

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA DA BIOMASSA

EDUARDO FABRÍCIO DE OLIVEIRA COSTA

**Perfil de cana-energia para incrementar o faturamento de empresa produtora  
de etanol e bioeletricidade**

Rio Largo, AL  
2017

EDUARDO FABRÍCIO DE OLIVEIRA COSTA

**Perfil de cana-energia para incrementar o faturamento de empresa produtora  
de etanol e bioeletricidade**

Dissertação de Mestrado  
apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Energia da Biomassa  
da Universidade Federal de Alagoas,  
como requisito para obtenção do grau  
de Mestre em Energia da Biomassa.

Orientador: Prof. Dr. João Messias  
dos Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Geraldo V. de  
Souza Barbosa.

Rio Largo, AL

2017

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias**  
Bibliotecária Responsável: Myrtes Vieira do Nascimento

C837i Costa, Eduardo Fabrício de Oliveira  
Perfil de cana-energia para incrementar o faturamento de empresa produtora de etanol e bioeletricidade / Eduardo Fabrício de Oliveira Costa – 2017.  
69 f.; il; 33 cm

Orientador: João Messias Santos  
Coorientador: Geraldo V. De Souza Barbosa  
Dissertação (Mestrado em Energia de Biomassa) - Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2017.

Inclui bibliografia

1. Biomassa 2. Cogeração 3. *Saccharum spp* I. Título.

CDU: 633.61

## TERMO DE APROVAÇÃO

EDUARDO FABRÍCIO DE OLIVEIRA COSTA

### PERFIL DE CANA-ENERGIA PARA INCREMENTAR O FATURAMENTO DE EMPRESA PRODUTORA DE ETANOL E BIOELETRICIDADE

Esta dissertação foi submetida a julgamento como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre Profissional em Energia da Biomassa, outorgado pela Universidade Federal de Alagoas.

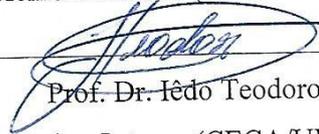
A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Aprovado em 25/05/2017

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Messias dos Santos  
Orientador (CECA/UFAL)

  
\_\_\_\_\_  
Profª. Drª. Edjane Gonçalves de Freitas  
Membro Externo (FAT)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Geraldo Veríssimo de Souza Barbosa  
Membro Interno (CECA/UFAL)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Iêdo Teodoro  
Membro Interno (CECA/UFAL)

Rio Largo – AL

2017

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por todo direcionamento e providência;

A minha esposa e companheira, Maria de Fátima Barbosa de Andrade Costa, pela ajuda e compreensão em todos os momentos;

Aos meus pais e irmãos, pelas orações e incentivo;

Ao Prof. Dr. Reynaldo Palacios Bereche da Universidade Federal do ABC (UFABC), pelo desenvolvimento do fluxograma de simulação de cogeração no software EMSO;

Aos colegas de mestrado, em especial David Antônio e Norma Acioli, por todo apoio e companheirismo durante o curso e pelos ensinamentos sobre a área industrial tratados durante a pesquisa;

Ao Prof. Dr. João Messias dos Santos, por suas orientações;

Ao Prof. Dr. Geraldo Veríssimo, por suas ideias desafiadoras;

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que este trabalho se realizasse. Muito obrigado.

*“Sabemos que todas as coisas  
cooperam para o bem daqueles que  
amam a Deus, daqueles que são  
chamados segundo o seu propósito”.*

Epístola de Paulo aos Romanos, 8.28

## RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura que apresenta um elevado potencial energético. Por ser utilizada como matéria-prima para a produção de etanol e cogeração de bioeletricidade instituições de pesquisas trabalham no desenvolvimento da cana-energia, uma variedade com elevada produtividade, que pode ser cultivada de forma complementar as variedades de cana comerciais e com potencial para incrementar o faturamento do produtor ou empresa com a venda dos seus produtos. Com base nessa premissa, este trabalho teve como objetivo encontrar perfis de cana-energia ideais para serem produzidos no estado de Alagoas. Para determinar o faturamento considerou-se a quantidade de etanol e bioeletricidade produzida por tonelada de cana e seus valores de mercado praticados no mês de março de 2017. A produção de etanol foi estimada com base no rendimento teórico de etanol por kg de ATR por tonelada de cana e a cogeração de bioeletricidade foi estimada a partir do software EMSO, que simulou uma planta de cogeração dotada de uma caldeira com 65 bar, 473°C e turbinas de extração e condensação. Os resultados de faturamento com a venda do etanol e bioeletricidade demonstraram que perfis de cana-energia com produtividade entre 55,5 e 82 toneladas por hectare já se apresentam como alternativa viável para produção em Alagoas. Esses resultados são compatíveis com estudos experimentais descritos pela literatura, que citam que a produtividade da cana-energia chega a ser 1,5 vez maior que a produtividade de cultivares comerciais de cana-de-açúcar. Assim, um cenário bastante otimista se apresenta sugerindo que em curto/médio prazo a cana-energia comece a ocupar os canaviais, tornando-se um novo paradigma no setor sucroenergético alagoano e brasileiro.

**Palavras-chave:** Biomassa. Cogeração. *Saccharum spp.*

## ABSTRACT

Sugarcane is a crop that has a high energy potential. As a raw feedstock to produce ethanol and bioelectricity cogeneration research institutions work on the development of energy cane, a variety with high productivity, which can be cultivated in a complementary way to the commercial sugarcane varieties and with the potential to increase the billing of the producer or company with the sale of its products. Based on this premise, this work had as its objective finding profiles of energy cane ideal to be produced in the state of Alagoas. The amount of ethanol and bioelectricity produced per ton of sugarcane and its market values practiced in the month of March 2017 were used to determine the sales. Ethanol production was estimated based on the theoretical ethanol yield per kg of ATR per ton of sugarcane and bioelectricity cogeneration was estimated from the EMSO software, which simulated a cogeneration plant with a boiler with 65 bar, 473 ° C and extraction and condensation turbines. The results of sales with the sale of ethanol and bioelectricity have shown that sugarcane profiles with productivity between 55.5 and 82 Tons per hectare are already presented as a viable alternative for production in Alagoas. These results are compatible with experimental studies described in the literature, which mention that energy cane productivity is 1.5 times greater than the yield of commercial sugarcane cultivars. Thus, a very optimistic scenario is presented suggesting that in the short / medium term energy cane will begin to occupy sugarcane plantations, becoming a new paradigm in the Alagoan and Brazilian sugar-energy sector.

**Keywords:** Biomass. Cogeneration. *Saccharum spp.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Oferta interna de energia 2015.	18
Figura 2	Participação da biomassa da cana-de-açúcar na oferta interna de energia de fontes renováveis.	18
Figura 3	Fluxograma simplificado de moagem em planta de processamento de cana-de-açúcar.	23
Figura 4	Fluxograma simplificado de unidade de fermentação e destilação em planta de produção de etanol de primeira geração.	24
Figura 5	Fluxograma simplificado de unidade produtora de etanol de segunda geração.	25
Figura 6	Fluxograma simplificado de unidade de cogeração em planta de processamento de cana-de-açúcar.	26
Figura 7	Fluxograma simplificado de formação de preço da energia elétrica.	31
Figura 8	Área de trabalho do simulador EMSO.	43
Figura 9	Análise de regressão linear: acréscimo de conteúdo mássico de bagaço por percentual de fibra.	49
Figura 10	Bagaço total, vazão de bagaço e energia elétrica excedente produzida com uso do bagaço de cana com variados percentuais de fibra.	50
Figura 11	Histórico de preço médio do PLD (R\$/MWh) – Submercado Nordeste (janeiro/2007 a janeiro/2017).	55
Figura 12	Histórico de preço médio do etanol hidratado (R\$/litro) – Alagoas (janeiro/2007 a janeiro/2017).	56
Figura 13	Estimativa de faturamento (R\$/ha) de etanol/ha e etanol+eletricidade/ha.	58
Figura 14	Estimativa de faturamento (R\$/ha) de etanol+eletricidade, considerando a produtividade de estado de Alagoas e Região Centro-Sul.	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição bioquímica da cana-de-açúcar.	21
Tabela 2	Desempenho do setor sucroenergético brasileiro entre 2011 e 2016.	28
Tabela 3	Cogeração no setor sucroenergético brasileiro.	29
Tabela 4	Variação da composição entre diferentes tipos de cana.	35
Tabela 5	Valores usados para cálculo do percentual de bagaço por tonelada de cana.	39
Tabela 6	Variáveis de operação do sistema de cogeração.	42
Tabela 7	Composição do bagaço da cana-de-açúcar em base seca.	42
Tabela 8	Perfil de fibra e ATR da cana-de-açúcar no estado de Alagoas	46
Tabela 9	Produtividade média de cana-de-açúcar nas safras 2011/12 a 2015/16 no estado de Alagoas. (t/ha).	47
Tabela 10	Bagaço total, vazão de bagaço e energia elétrica excedente produzida com uso do bagaço de cana para os diferentes perfis.	49
Tabela 11	Rendimento teórico de etanol hidratado por kg de ATR em uma tonelada de cana.	51

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Tipos de leilão de energia elétrica realizados no Brasil.	30
Quadro 2	Metodologia para a formação do indicador CEPEA para etanol.	33
Quadro 3	Equipamentos usados nas simulações realizadas pelo software EMSO.	41
Quadro 4	Produção de energia elétrica excedente e etanol hidratado a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar com diferentes perfis de fibra e ATR.	52
Quadro 5	Faturamento (R\$/tc) com a venda de energia elétrica excedente e etanol hidratado por tonelada de cana-de-açúcar com diferentes perfis de fibra e ATR.	53
Quadro 6	Produção de energia elétrica excedente e etanol hidratado a partir de uma tonelada de cana-energia com diferentes perfis de fibra e ATR.	53
Quadro 7	Faturamento (R\$/tc) com a venda de energia elétrica excedente e etanol hidratado por tonelada de cana-energia com diferentes perfis de fibra e ATR.	54
Quadro 8	Produção de energia elétrica excedente e etanol hidratado com base na produtividade média da cana-de-açúcar (55 t/ha) com diferentes perfis de fibra e ATR.	57
Quadro 9	Faturamento (R\$/ha) com a venda de energia elétrica excedente e etanol hidratado com base na produtividade média da cana-de-açúcar com diferentes perfis de fibra e ATR.	57
Quadro 10	Produtividade mínima estimada para diferentes perfis de cana-energia para cultivo em complemento a cana-de-açúcar no estado de Alagoas. (t/ha)	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRACEEL	Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ALSOC	Ambiente Livre para Simulação, Otimização e Controle de Processos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ATR	Açúcares Totais Recuperáveis
ATR/tc	Açúcar Total Recuperável por Tonelada de Cana
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
BTC	Bagaço por Tonelada de Cana
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia elétrica
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CGEE	Centro de Gestão e Estudo Estratégicos
CMO	Custos Marginais de Operação
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
Cofins	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPC	Capacidade de Processamento de Cana
EMSO	Environment for Modeling, Simulation and Optmization
FC	Fator de Conversão
g/ml	Gramas por Mililitro
GWh	Gigawatt-hora
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IRE	Índice de Rendimento de Etanol

kg	Quilograma
Kg/s	Quilograma por Segundo
Kg/tc	Quilograma por Tonelada de Cana
kW	Quilowatt
kWh/tc	Quilowatt-hora por Tonelada de Cana
l/tc	Litros por Tonelada de Cana
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MJ/kg	Megajoule por Quilograma
MME	Ministério de Minas e Energia
MTep	Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIS	Programa Integração Social
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
PMGCA	Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar
Pol%	Pol no Bagaço
Proálcool	Programa Nacional do Álcool
PZA	Pureza do Caldo Residual
R\$/litro	Reais por litro
R\$/MWh	Reais por Megawatt-hora
RB	República Brasil
REHD	Rendimento Teórico para Etanol Hidratado Direto
RIDESA	Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético
SIN	Sistema Interligado nacional

Sindaçúcar-AL	Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
t/h	Tonelada por Hora
t/ha	Tonelada por hectare
tc/ha	Tonelada de cana por hectare
UB	Umidade do Bagaço
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
VBC	Vazão de Bagaço para Cogeração
%bag	Percentual Teórico de Bagaço
%BR	Percentual de Bagaço Reserva
%FIB	Percentual de Fibra
°Bx	Brix
°C	Graus Celsius

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Biomassa e Bioenergia</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>A Cana-de-açúcar (<i>Saccharum spp.</i>)</b>	<b>19</b>
2.2.1	A cana-de-açúcar como fonte de biomassa	20
2.2.2	Componentes da cana-de-açúcar	20
<b>2.3</b>	<b>Matérias-primas da Cana para Bioenergia</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Processos Industriais no Setor Sucroenergético</b>	<b>23</b>
<b>2.5</b>	<b>O setor Sucroenergético Brasileiro</b>	<b>27</b>
<b>2.6</b>	<b>Setor e Mercado de Energia Elétrica no Brasil</b>	<b>29</b>
2.6.1	Formação de preço da energia elétrica	31
<b>2.7</b>	<b>Setor e Mercado do Etanol no Brasil</b>	<b>32</b>
2.7.1	Formação de preço do etanol	32
<b>2.8</b>	<b>A cana-energia</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Bagaço para Cogeração</b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Simulador do Sistema de Cogeração</b>	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>Fluxograma de Simulação</b>	<b>40</b>
<b>3.4</b>	<b>Simulação de Cogeração</b>	<b>44</b>
<b>3.5</b>	<b>Rendimento Teórico de Etanol</b>	<b>44</b>
<b>3.6</b>	<b>Simulação de Cenários com Uso de Perfis de Cana</b>	<b>45</b>
3.6.1	Produção e faturamento por tonelada de cana	47
3.6.2	Produção e faturamento por produtividade	47
3.6.3	Determinação do perfil de cana-energia complementar a cana-de-açúcar	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Produção de Bagaço e Energia Elétrica Excedente</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Produção de Etanol Hidratado</b>	<b>50</b>
<b>4.3</b>	<b>Cenários com Diferentes Perfis de Cana</b>	<b>52</b>
4.3.1	Produção e faturamento por produtividade	56
4.3.2	Perfil estimado para cana-energia	59
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com vocação natural para o agronegócio. Seu desenvolvimento e sua história econômica estão intimamente associados aos vários ciclos agrícolas praticados desde a colonização, iniciando com o cultivo da cana-de-açúcar trazida pelos portugueses.

O setor canavieiro brasileiro sempre foi destaque no mercado nacional e internacional. Atualmente, o país é o líder mundial em produção de cana, e esta marca é reflexo de muitos séculos de investimentos e inovações empregados na modernização do seu parque industrial e no desenvolvimento de variedades de cana modernas e de alto rendimento.

Os estudos com a cana sempre foram pautados na busca por incrementar seu potencial de produção de sacarose, matéria-prima para a produção de açúcar e etanol. Mas, atualmente, empresas ligadas ao setor sucroenergético, instituições de pesquisas e universidades têm trabalhado no desenvolvimento de variedades de cana mais voltada para a produção de biomassa para bioenergia, sem perdas significativas do seu teor de sacarose. É nesse contexto que se apresenta o conceito de cana-energia. Uma planta com potencial energético superior às variedades de cana-de-açúcar atuais. Que apresenta maior produtividade, maior longevidade, que, pelas suas características de rusticidade pode ser cultivada em áreas marginais, necessitando assim de menos insumos, e que pode ser explorada de forma integral para a obtenção de açúcar, etanol, eletricidade e biopolímeros.

Atualmente, a cana-de-açúcar produzida no estado de Alagoas apresenta um perfil médio de 15% de fibra, 130 kg de Açúcares Totais Recuperáveis por tonelada de cana (ATR/tc) e uma produtividade de 55 toneladas por hectare (t/ha) (CONAB, 2016; SINDAÇÚCAR-AL, 2017). Como a perspectiva para a cana-energia é de um acréscimo na produção de fibras mantendo uma quantidade significativa de ATR, aumento da produtividade em 50% e longevidade do canavial de aproximadamente oito anos (VIOLANTE, 2012; SILVEIRA, 2014), a cana-energia se apresenta como uma alternativa promissora de biomassa para o setor sucroenergético no Brasil.

Os resultados desta pesquisa serão úteis para corroborar com outros estudos sobre a produção de cana-energia, servindo também como elemento norteador para produtores e empresários do setor, ampliando as possibilidades de mudança e de escolha de um novo perfil de cana que apresente maior produtividade e maior capacidade de incrementar o faturamento com a venda de etanol e bioeletricidade.

O objetivo deste trabalho foi determinar perfis de cana-energia como alternativa complementar a produção de cana-de-açúcar utilizada atualmente no estado de Alagoas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Biomassa e Bioenergia

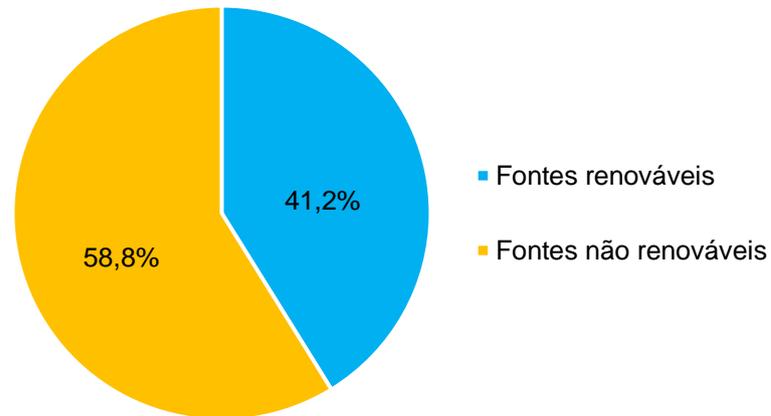
Nas últimas décadas a humanidade tem passado por uma crescente evolução da ciência e grandes avanços tecnológicos. Isso tem gerado uma série de mudanças nos seus hábitos e necessidades e em decorrência disso nunca houve uma dependência por fontes de energia tão grande como a que há nos dias atuais.

A dependência de fontes energéticas não-renováveis e a preocupação em aprimorar as fontes alternativas de energia já existentes, têm impulsionado o desenvolvimento de muitas pesquisas que visam associar a busca pela produtividade energética com a prática de ações sustentáveis. Neste cenário, a biomassa tem assumido papel de destaque.

No contexto energético atual, denomina-se biomassa todo material ou produto oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Ela tem sido considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética tanto no mercado internacional como no Brasil (ANEEL, 2005; VIANA, 2011).

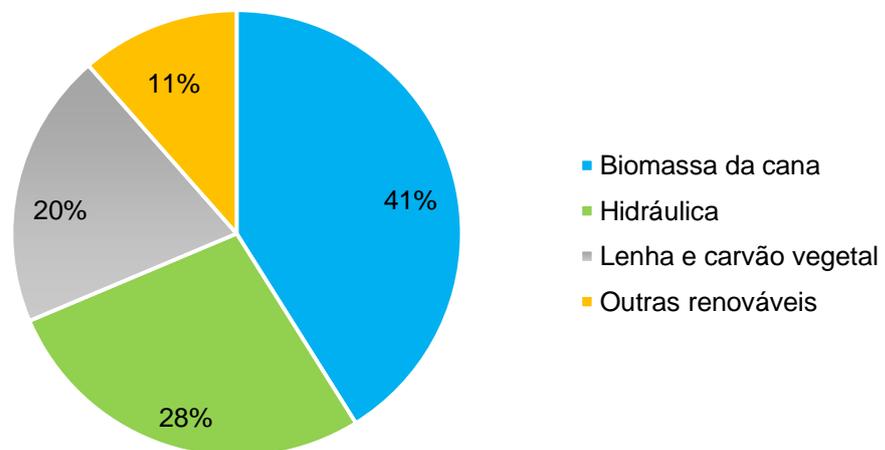
Conforme consta na última divulgação do Balanço Energético Nacional (BEN - 2016), a oferta interna de energia em 2015 atingiu 299,2 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (MTEp). Desse total, 58,8% são provenientes de fontes não-renováveis (petróleo, gás natural, carvão mineral etc.) e os 41,2% restantes, de fontes renováveis como a hidráulica, biomassa e eólica, dentre outras (Figura 1). Do percentual energético proveniente de fontes renováveis destacam-se os 41% de participação da biomassa da cana-de-açúcar (Figura 2), produzindo açúcar, etanol e bioeletricidade (BEN, 2016).

Figura 1: Oferta interna de energia 2015.



Fonte: BEN, 2016.

Figura 2: Participação da biomassa da cana-de-açúcar na oferta interna de energia de fontes renováveis.



Fonte: BEN, 2016.

## 2.2 A Cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)

É uma gramínea perene, de grande estatura, cultivada em regiões tropicais, semitropicais e subtropicais do mundo. Segundo os estudos taxonômicos de Cronquist, a cana-de-açúcar está classificada na família *Poaceae*, tribo *Andropogoneae*, subtribo *Saccharineae* e gênero *Saccharum*. Ela partilha características comuns com outros quatro gêneros (*Miscanthus*, *Erianthus*, *Narenga* e *Sclerostachya*), que em conjunto compõem um grupo taxonômico não-formal chamado “Complexo *Saccharum*” (BANDEIRA, 2010).

Conhecidas há centenas de anos pela sua versatilidade, as plantas do gênero *Saccharum* são espécies vegetais de grande importância para o homem. As espécies pertencentes a este gênero são: *Saccharum spontaneum*, *S. robustum*, *S. officinarum*, *S. barberi*, *S. sinensis* e *S. edule* (ROACH; DANIELS, 1987; OGTR, 2008).

As espécies de maior importância são a *S. officinarum* e a *S. spontaneum*. A primeira apresenta um cariótipo  $2n = 80$ , e a segunda dois principais citotipos:  $2n = 64$  e  $2n = 112$ . Conseqüentemente, as variedades de cana-de-açúcar oriundas do cruzamento interespecífico entre essas duas espécies podem ser altamente poliploides e aneuploides, variando de 80 a 130 cromossomos, sendo que a maior parte do conjunto genômico dos híbridos modernos (cerca de 80%) é proveniente de *S. officinarum*, de 10% a 15% de *S. spontaneum* e de 5% a 10% de recombinantes de outras espécies do gênero *Saccharum* (BORÉM *et al.*, 2011; MATSUOKA *et al.*, 2011; VIOLANTE, 2012).

Assim como outras espécies agrícolas, a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) passou por processos de aperfeiçoamento. Durante séculos o foco do melhoramento genético da cana-de-açúcar foi aumentar seu potencial de produção de açúcar, e no seu histórico de melhoramento são mencionadas cinco fases principais: 1ª) o cruzamento e a seleção de clones nobres para a obtenção de cultivares nobres; 2ª) cruzamentos interespecíficos entre *S. officinarum* e *S. spontaneum* seguidos de retrocruzamentos com *S. officinarum* ou outros híbridos para manter o conteúdo suficientemente elevado de açúcar (processo chamado de nobilização); 3ª) cruzamentos entre canas nobilizadas; 4ª) cruzamentos entre os híbridos resultantes da nobilização, formando as cultivares atuais e 5ª) melhoramento utilizando

germoplasma selvagem (BORÉM *et al.*, 2011; VIOLANTE, 2012; MATSUOKA *et al.*, 2014).

### 2.2.1 A cana-de-açúcar como fonte de biomassa

A cana-de-açúcar, tem se destacado no cenário mundial como fonte de biomassa vegetal moderna pela sua capacidade de absorver uma grande quantidade de energia radiante (solar) e transformá-la em energia química. Parte dessa energia fica armazenada sob a forma de açúcares fermentescíveis que são utilizados no tradicional processo de produção de etanol, outra parte dessa energia acumula-se na biomassa da cana sob a forma de uma intrincada associação entre lignina, celulose e hemicelulose. Esse composto lignocelulósico tem potencial para ser processado em sistemas de cogeração de eletricidade e em processos de hidrólise, que resultam na produção de etanol lignocelulósico. Assim, a cana-de-açúcar pode ser aproveitada de forma integral como uma cultura energética de ciclo rápido, curto, de alto desempenho e rendimento (CORTEZ *et al.*, 2008; DEMIRBAS *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2012).

### 2.2.2 Componentes da cana-de-açúcar

De forma simplificada, pode-se dizer que a cana-de-açúcar apresenta sua composição bioquímica dividida em duas fases (Tabela 1). A “fase sólida” (biomassa) é composta pelos feixes e fibras que formam os tecidos de sustentação, armazenamento e transporte de substâncias formados principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Já a “fase líquida”, chamada caldo, é composta principalmente por uma solução aquosa contendo uma grande quantidade de açúcares como glicose, frutose e sacarose (HAMERSKI, 2009; OGEDA; PETRI, 2010).

Tabela 1: Composição bioquímica da cana-de-açúcar.

<b>Componentes da cana-de-açúcar</b>	<b>(%) em massa na cana-de-açúcar</b>
Água	73 – 76
Sólidos	24 – 27
Sólidos solúveis	10 – 16
Fibra (seca)	11 – 16
Constituintes do caldo	(%) em sólidos solúveis
Açúcares	75 – 92
Sacarose	70 – 88
Glicose	2 – 4
Frutose	2 – 4
Constituintes da biomassa	(%) em biomassa
Celulose	40 – 50
Hemicelulose	20 – 32
Lignina	22 – 32

Fonte: SANTOS *et al.* (2001), GOMIDE *et al.* (2005), SANTOS *et al.* (2012), MORAIS *et al.* (2013), adaptada pelo autor.

Como o foco do setor sucroenergético durante muitos anos foi a produção de açúcar, o caldo da cana era basicamente o único componente utilizado, enquanto o bagaço e a palha sempre foram considerados resíduos. Mas com a modernização dos processos nas usinas ambos se tornaram matérias-primas para a produção de vapor de processo, geração elétrica e mais recentemente produção de etanol celulósico.

### **2.3 Matérias-primas da Cana para Bioenergia**

O caldo da cana é uma mistura aquosa complexa com composição química que pode variar largamente segundo uma série de fatores intrínsecos à própria planta (como variedade e grau de maturação, por exemplo), e também por fatores externos, tais como: condições ambientais, tipo de solo, manejo e processamento. Ele é obtido a partir da moagem do colmo previamente lavado e desfibrado e nele são encontradas diversas substâncias como sacarose, glicose, frutose, amido, componentes minerais,

ácidos orgânicos, proteínas, pectinas, lipídios e carotenoides (MACEDO; CORTEZ, 2005; ALBUQUERQUE, 2011).

O bagaço é a biomassa resultante do processo de extração do caldo da cana-de-açúcar. É constituído basicamente por 46% de fibra, 50% de água e 4% de sólidos dissolvidos, sendo bastante heterogêneo tanto na estrutura morfológica como na composição química. Isto se deve as diferentes variedades de cana utilizadas e dos tipos de manejo empregados no campo e no beneficiamento da cana na indústria. Com poder calorífico superior (PCS) que varia entre 17 e 20 MJ/kg, o bagaço é tradicionalmente usado como uma fonte energética essencial para o funcionamento das usinas na geração de vapor de processo e cogeração de eletricidade através da sua combustão em caldeiras, e mais atualmente, essa biomassa tem sido usada para a produção de etanol celulósico chamado também de etanol de segunda geração ou 2G (CGEE, 2009; UNICA, 2010; CORTEZ *et al.*, 2013).

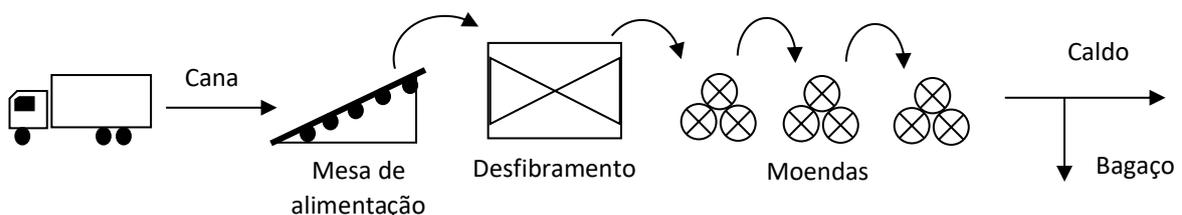
A palha da cana é constituída basicamente de folhas verdes, folhas secas, bainhas e ponteiros. Sua composição química é muito semelhante à do bagaço no que diz respeito a quantidade de celulose e hemicelulose, porém, difere no conteúdo de lignina, que é menor que o do bagaço. O crescente desenvolvimento alcançado pela agroindústria canavieira tem inserido novas tecnologias agrícolas e industriais, e tem aprimorado os procedimentos de recuperação integral ou parcial da palha no campo. Essa mudança no manejo tem sido impulsionada principalmente pela intervenção de órgãos públicos que estabelecem o fim progressivo da prática da queima até o ano de 2031, especialmente em áreas passíveis de mecanização, conforme o Decreto 2.661/98. Isso tem provocado um aumento na disponibilidade de palha para ser recuperada e posteriormente usada como fonte de biomassa pela indústria, fornecendo um aporte energético nos processos de produção de etanol e eletricidade (VIANA, 2011; SANTOS *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2013).

Assim, diferente do que era praticado na época dos engenhos de açúcar, a cana hoje é aproveitada integralmente como matéria-prima, graças aos avanços tecnológicos empregados no campo e na indústria. O caldo, o bagaço e a palha são utilizados como integrantes coparticipantes no funcionamento das usinas do setor sucroenergético, pois a tendência deste setor é aumentar a variedade dos seus produtos a partir de novas rotas tecnológicas otimizando o uso da cana-de-açúcar.

## 2.4 Processos Industriais no Setor Sucroenergético

Os processos industriais no setor sucroenergético são bastante conhecidos e solidificados. A cana-de-açúcar ao chegar na usina é descarregada em uma mesa de alimentação e conduzida ao processo de moagem (Figura 3). Um sistema de esteiras conduz a cana para um conjunto de facas e martelos que têm por objetivo desfibrar os colmos. Esse processo prepara a biomassa da cana para ser comprimida pelas moendas, onde, por esmagamento o caldo será extraído, restando o bagaço. O caldo será destinado aos processos de produção de açúcar e/ou etanol e o bagaço será conduzido para servir como combustível para a cogeração de eletricidade, e nos processos mais modernos, será destinado para a produção de etanol de segunda geração, podendo ser acrescido a ele percentuais da palha recolhida no campo.

Figura 3: Fluxograma simplificado de moagem em planta de processamento de cana-de-açúcar.

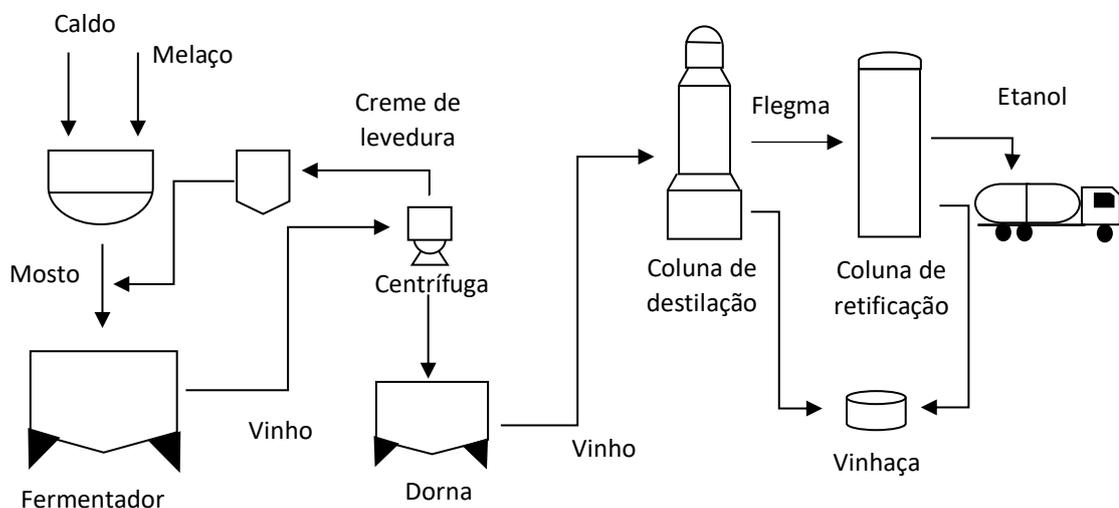


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para a produção de açúcar, o caldo da cana obtido pelo processo de extração passa por tratamentos que visam retirar as impurezas através de peneiras e posteriormente por processos de tratamento físico-químicos através da sulfitação (uso de  $\text{SO}_2$ ) e tratamento com cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Todos esses processos buscam obter máxima eliminação de não-açúcares, coloides, turbidez e cor para a obtenção de um caldo com pH entre 6,8 e 7,2 e redução de componentes que acentuem a sua cor. Após o tratamento, o caldo é conduzido as etapas de evaporação, cristalização e centrifugação para a obtenção do açúcar, originando também um subproduto chamado melaço, um líquido denso, viscoso, de cor parda escura, rico em açúcares, contendo pequeno percentual de água e com densidade que varia de 1,4 a 1,5 g/ml (MACEDO; CORTEZ, 2005; CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2011).

Para a produção do etanol de primeira geração, o mosto oriundo do caldo da cana-de-açúcar, do melaço diluído com água ou da mistura do caldo com o melaço é colocado em tanques de fermentação onde é misturado às leveduras (Figura 4). O mosto é o líquido açucarado com uma concentração de sólidos de 17° a 22°Bx pronto para ser fermentado. O açúcar contido nele é consumido pelas leveduras e como resultado do processo há produção de álcool e uma intensa liberação de CO<sub>2</sub>. O tempo de fermentação varia de 4 a 12 horas, e ao final, praticamente todo o açúcar terá sido consumido restando nos tanques de fermentação uma mistura denominada “vinho fermentado”, com teor médio de álcool que varia de 7% a 10%. Este vinho é enviado às centrífugas para a recuperação das leveduras que serão reaproveitadas, e o vinho sem leveduras é conduzido às colunas de destilação para que o álcool seja recuperado por meio dos diferentes pontos de ebulição das substâncias voláteis contidas nele (MACEDO; CORTEZ, 2005; BARRETO; COELHO, 2011; VASCONCELOS, 2011).

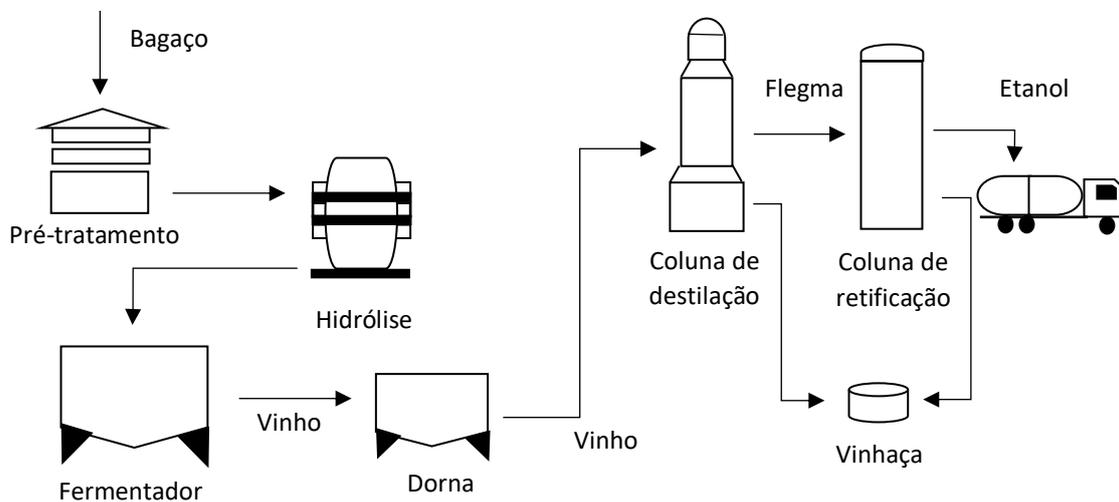
Figura 4: Fluxograma simplificado de unidade de fermentação e destilação em planta de produção de etanol de primeira geração.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

No Brasil, diversos grupos e centros de pesquisa estão desenvolvendo o uso de novas tecnologias na produção de biocombustíveis a partir do bagaço e da palha da cana. A Figura 5 demonstra de forma simplificada o fluxograma de produção de etanol de segunda geração a partir de material lignocelulósico, que se inicia com o pré-tratamento da biomassa. Este processo visa quebrar a sua estrutura celular separando o composto lignocelulósico com a ruptura do complexo celulose-hemicelulose-lignina e a remoção de cada uma das suas frações. Após o pré-tratamento, a biomassa é submetida ao processo de hidrólise que possibilitará a quebra dos polissacarídeos celulose e hemicelulose pela ação de catalisadores químicos ou biológicos específicos, resultando em moléculas de açúcares fermentescíveis. Em seguida vem a fermentação, onde os açúcares liberados são metabolizados pelos microrganismos para a produção do etanol e após isso, o vinho fermentado é enviado para a destilação, em um processo idêntico ao utilizado na produção do etanol de primeira geração (ROSA; GARCIA, 2009; RABELO *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2013;).

Figura 5: Fluxograma simplificado de unidade produtora de etanol de segunda geração.

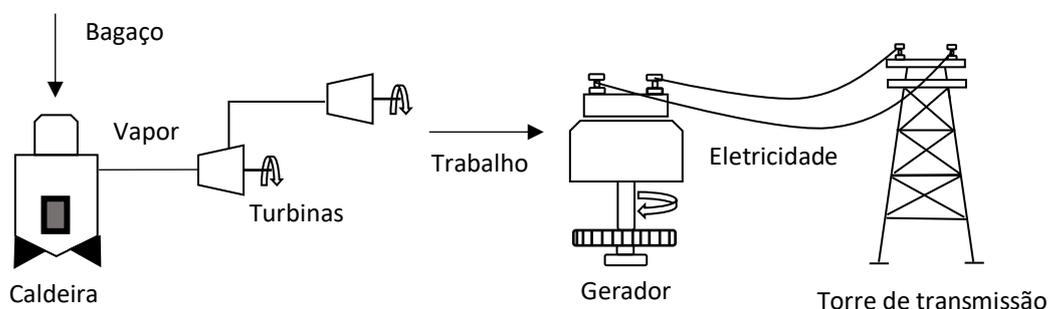


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

As necessidades energéticas das usinas de cana-de-açúcar são atendidas pela sua planta de cogeração. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em sua Resolução Normativa nº 235/2006, cogeração é o processo operado numa instalação específica para fins de produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária (ANEEL, 2006).

Em geral, as usinas de cana-de-açúcar utilizam um ciclo de vapor (ciclo Rankine) do tipo *topping*, onde o combustível é alimentado diretamente em caldeiras. O ciclo Rankine é um ciclo termodinâmico reversível que converte calor em trabalho usando água como fluido operante. A água é bombeada para um equipamento chamado caldeira ou gerador de vapor, e nela, um combustível é queimado gerando vapor superaquecido. Nas usinas de cana-de-açúcar utiliza-se o calor proveniente da combustão do bagaço para geração de vapor. O vapor passa por um processo de expansão nas turbinas onde ocorre a conversão da energia térmica em trabalho, acionando um gerador que irá converter esse trabalho em energia elétrica (Figura 6). Nos sistemas de cogeração mais modernos, a quantidade de energia elétrica produzida é suficiente para atender as necessidades da usina gerando também excedentes de eletricidade, que são comercializados entre as usinas e os consumidores em ambientes de contratação de energia (CGEE, 2009; CHIERICATO, 2010; ALVES, 2011; CARVALHO e PONTES, 2014;)

Figura 6: Fluxograma simplificado de unidade de cogeração em planta de processamento de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

## 2.5 O Setor Sucroenergético Brasileiro

O setor sucroenergético sempre foi de grande importância para a economia brasileira, inicialmente com a produção de açúcar e, depois, a partir da década de 1970, com a produção de etanol (SOARES; BOMTEMPO, 2014).

Atualmente, o setor passou a ter oportunidades de diversificação com a produção de químicos renováveis, combustíveis mais elaborados e energia elétrica. Essa diversificação tem sido impulsionada especialmente pela presença crescente de empresas com perfis diferentes da usina tradicional. São empresas petroquímicas, *traders* agrícolas e empresas de investimentos que têm injetado grandes somas procurando assegurar sua presença na área de combustíveis alternativos (WILKINSON, 2015).

As usinas estão concentradas principalmente na Zona da Mata da região Nordeste e no interior do estado de São Paulo, mas verifica-se um deslocamento dessa indústria para o norte do estado do Paraná e, mais recentemente, uma forte expansão para o cerrado brasileiro, com destaque para os estados da região Centro-Oeste (GARCIA *et al.*, 2015).

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2017), na safra 2016/2017 estiveram em atividade no Brasil 353 usinas distribuídas nas cinco regiões do país. Algumas delas produziram apenas etanol, outras apenas açúcar, enquanto outras produziram etanol e açúcar.

A estrutura industrial brasileira do setor sucroenergético abriga usinas com capacidade de moagem de cana menores que um milhão de toneladas ao ano a aquelas com capacidade superior a cinco milhões de toneladas. Do total de usinas em operação na safra 2012/2013, apenas nove unidades tinham capacidade superior a cinco milhões de toneladas e todas elas situadas na região Centro-Sul. As regiões Norte e Nordeste abrigavam predominantemente unidades com capacidade para processar até um milhão de toneladas, sendo que apenas duas tinham capacidade máxima para processar até três milhões de toneladas/ano (CONAB, 2017).

Embora tenha passado por um período de bastante crescimento entre os anos de 2003 a 2009 consecutivas crises por problemas políticos, econômicos e climáticos provocaram uma estagnação do setor nos últimos anos, contudo, os investimentos

continuaram, e mesmo passando por um período de pouco crescimento bons resultados foram obtidos entre as safras 2011/2012 a 2015/2016 (Tabela 2) especialmente quanto a produtividade, elevando a quantidade de cana produzida e a fabricação dos seus derivados (WILKINSON, 2015; CONAB, 2016).

Tabela 2: Desempenho do setor sucroenergético brasileiro entre 2011 e 2016.

<b>Dados</b>	<b>Safras</b>				
	<b>2011/12</b>	<b>2012/13</b>	<b>2013/14</b>	<b>2014/15</b>	<b>2015/16</b>
Área plantada (em mil hectares)	8.362,6	8.485,0	8.811,4	9.004,5	8.654,8
Produção (em mil toneladas)	560.955,2	588.915,7	658.822,3	634.767,0	665.586,2
Produtividade (toneladas/hectare)	67,08	69,41	74,77	70,50	76,90

Fonte: CONAB (2016), adaptada pelo autor.

Neste mesmo período a produção de etanol também aumentou, chegando a bater o recorde ao atingir 30 bilhões de litros na safra 2015/2016, crescimento de 6% em relação a 2014 decorrente principalmente da elevação do percentual de etanol anidro na gasolina C (BRASIL, 2016).

Outro segmento bastante explorado pelo setor nas últimas safras foi a cogeração. Sua importância no incremento da Matriz Energética Nacional vem se evidenciando nos últimos anos, a ponto de tornar-se objeto de atenção nas usinas, que têm investido de forma crescente na melhoria e ampliação de sua capacidade instalada.

Nos últimos anos as usinas têm feito uma transição nas suas plantas de cogeração, evoluindo-se de sistemas a vapor de média pressão (22 bar) para sistemas de alta pressão (65 bar e 85 bar). Isso possibilita às indústrias, além da autossuficiência em energia elétrica, a geração de excedentes para fornecimento ao Sistema Interligado Nacional (CGEE, 2009).

Esse resultado tem se evidenciado de tal forma que em 2011 foram ofertados ao sistema 9.925 GWh, e passados apenas quatro anos, em 2015, esse número mais que dobrou, chegando a 20.502 GWh, conforme consta na Tabela 3 (MME, 2016).

Tabela 3: Cogeração no setor sucroenergético brasileiro.

Ano	Produção total (GWh)	Uso próprio (GWh)	Vendas (GWh)	Quantidade de usinas com cogeração	Potência total instalada (MW)	Potência média por usina (MW)
2011	22324	12399	9925	344	7148	21
2012	25066	12923	12142	365	8180	22
2013	29869	13812	16056	365	9344	26
2014	32271	13148	19122	387	9881	26
2015	34229	13727	20502	394	10532	27

Fonte: MME (2016), adaptada pelo autor.

## 2.6 Setor e Mercado de Energia Elétrica no Brasil

O setor elétrico brasileiro possui um modelo de operação diferenciado em relação ao restante do mundo, pois, no país há um enorme potencial energético a ser explorado, principalmente no que diz respeito às fontes renováveis, o que implica constantes inovações tecnológicas e regulatórias. Dessa forma, a busca por um modelo sustentável está na pauta do mercado de energia, estruturado para garantir a segurança no suprimento, incentivar a expansão da geração, diversificar a matriz energética e atender a demanda dos consumidores ao menor custo (CCEE, 2017).

As empresas responsáveis pela produção e transmissão de energia compõem o Sistema Inteligado Nacional (SIN). Nele, ocorrem as negociações de compra e venda de energia. Isso significa que, uma vez que um agente de mercado (distribuidor, gerador, comercializador ou consumidor) se torne membro do SIN, pode negociar com qualquer outro agente (ONS, 2017).

As relações comerciais no atual modelo se estabelecem em duas esferas: no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e no Ambiente de Contratação Livre (ACL).

O ambiente de contratação regulada é o segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica entre agentes vendedores e agentes de distribuição, precedidas de licitação. A licitação ocorre por meio dos leilões de energia, um processo de concorrência promovido pelo poder público com vistas a se obter energia elétrica em um prazo futuro, pré-determinado

nos termos de um edital, podendo ser caracterizado em várias modalidades, conforme apresenta o Quadro 1 (ANEEL, 2015).

Quadro 1: Tipos de leilão de energia elétrica realizados no Brasil.

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>
Energia nova	Atender ao aumento de carga das distribuidoras no futuro a partir de empreendimentos que não entraram em operação comercial.
Energia existente	Criado para que as distribuidoras possam ajustar suas demandas e contratar energia gerada por usinas já construídas e que estejam em operação.
Energia reserva	Criado para elevar a segurança no fornecimento de energia elétrica com energia proveniente de usinas contratadas para esta finalidade.
Fontes alternativas	Visam aumentar a participação no mercado regulado e na matriz energética brasileira de fontes renováveis.
Estruturantes	Destinam-se à compra de energia proveniente de projetos de geração de empreendimentos de grande porte tendo em vista seu caráter estratégico e o interesse público.

Fonte: ANEEL (2015), ANEEL (2016).

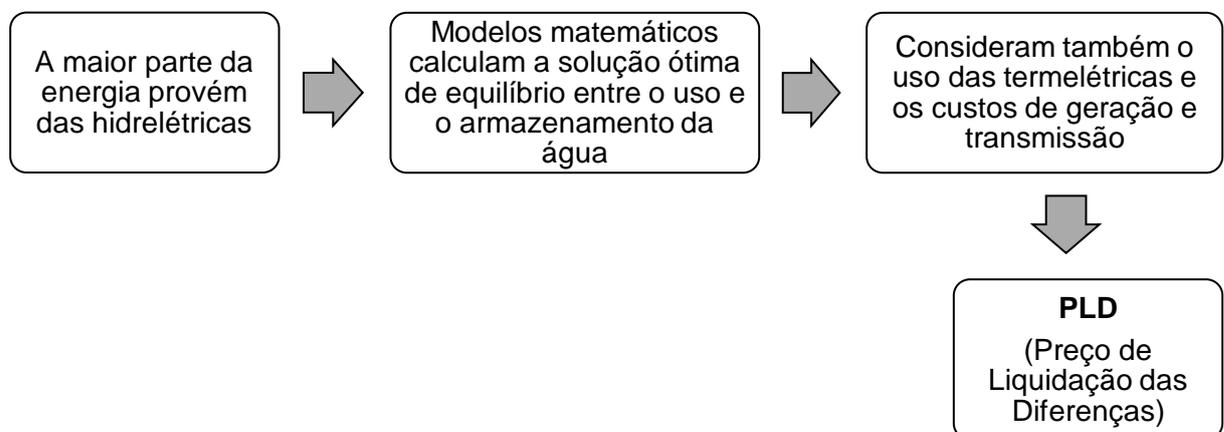
Também chamado de mercado livre de energia elétrica, o ambiente de contratação livre é o local em que os consumidores podem escolher livremente seus fornecedores de energia e negociam as condições de contratação. Para tanto, o consumidor deve estar enquadrado como “consumidor livre”, quando possui no mínimo 3.000 kW de demanda contratada, ou como “consumidor especial”, quando possui uma demanda contratada igual ou maior que 500 kW e menor que 3.000 kW, independente do nível de tensão (ABRACEEL, 2017).

### 2.6.1 Formação de preço da energia elétrica

No Brasil, a maior parte da energia elétrica é gerada nas usinas hidrelétricas. Como esse tipo de geração está sujeito a variações climáticas que alteram os períodos de precipitação influenciando diretamente os níveis dos reservatórios, para a formação de preço da energia elétrica são utilizados modelos matemáticos para se calcular o Preço de Liquidação das Diferenças (Figura 7). Esses cálculos têm por objetivo encontrar a solução ótima de equilíbrio entre o uso e o armazenamento da água nas usinas hidrelétricas, considerando também o uso das usinas termelétricas para manter a estabilidade do sistema de acordo com o consumo de eletricidade. Assim, com base nas condições hidrológicas, na demanda de energia, no preço do combustível, no custo de déficit, na entrada de novos projetos e na disponibilidade de equipamentos de geração e transmissão, o modelo de formação de preço obtém um valor ótimo para atender o mercado com base nos preços dos Custos Marginais de Operação (CMO) para o período estudado, para cada patamar de carga (pesada, média e leve) e para cada submercado (regiões Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Norte e Nordeste) (CCEE, 2017).

A partir dos Custos Marginais de Operação o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) é obtido. Um valor determinado semanalmente e limitado pela Aneel por um preço máximo e mínimo vigentes para cada período de apuração e para cada submercado, sendo aplicado para o ano de 2017 o valor mínimo de R\$ 33,68/MWh e máximo de R\$ 533,82/MWh (CCEE, 2017).

Figura 7: Fluxograma simplificado de formação de preço da energia elétrica.



Fonte: CCEE (2017).

## 2.7 Setor e Mercado do Etanol no Brasil

A produção de etanol combustível não é algo efetivamente novo. Pesquisas de sua utilização remontam ao final do século XIX, mas sua utilização corrente no mundo somente ocorreu na década de 1930 nos Estados Unidos (CGEE, 2009).

No Brasil, no início da década de 1970, houve um grande incentivo governamental no setor sucroalcooleiro e em 1975 a acentuada queda dos preços no mercado internacional de açúcar, a alta dos preços do petróleo e uma superprodução interna de cana fez com que o governo desenvolvesse o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), direcionando o álcool para uso como combustível, resolvendo o problema do excedente de cana e diminuindo a dependência da importação do petróleo. Contudo, o Proálcool não conseguiu perdurar por muito tempo, tendo três períodos claros: primeiro uma expansão moderada entre os anos de 1975 e 1979; em seguida uma expansão acelerada entre 1980 e 1985, e por último a desaceleração e crise, entre 1986 e 1990 (CARVALHO, 2012).

Na década de 1990 importantes mudanças políticas e econômicas ocasionadas pela transição presidencial provocaram a eliminação das cotas de comercialização no mercado interno, e a partir do ano 2000 houve uma retomada do setor impulsionado especialmente pela criação dos automóveis *flex-fuel*, promovendo um crescimento médio do setor de 10% ao ano (TÁVORA, 2011).

Durante os anos seguintes, houve uma evolução crescente do mercado do etanol no Brasil seguindo a tendência do mercado internacional de combustíveis. Um mercado com preços livres, determinados pelos agentes econômicos ou emulando os mercados mais competitivos, segundo os denominados preços de paridade (BNDES/CGEE, 2008).

### 2.7.1 Formação de preço do etanol

O preço do etanol para o consumidor é formado a partir de uma série de cálculos complexos que analisam o comportamento econômico e mercadológico dos preços pagos ao produtor e ao distribuidor, bem como seu respectivo custo de produção. Esses cálculos são definidos segundo as cadeias produtivas e logísticas

adotadas, incorporando os tributos devidos e as margens de comercialização (LIMA, 2011).

BNDES/CGEE (2008) dizem que o preço mínimo do etanol para os produtores deve atender a dois pressupostos:

- a) cobrir os custos de produção, que, naturalmente incluem os custos de matéria-prima, operação da planta de produção e os custos de investimentos realizados;
- b) ser igual ou superior aos resultados que seriam obtidos caso a matéria-prima se destinasse à fabricação de açúcar ou melado.

É importante enfatizar que na cadeia produtiva do etanol há participação de órgãos ligados ao governo como: o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), responsável pelo acompanhamento das fases agrícola e industrial da produção do etanol, e a Agência Nacional do Petróleo (ANP), responsável pelas fases de distribuição e consumo do combustível, que promove a regulação, a contratação e a fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria do petróleo, do gás natural e dos biocombustíveis (LIMA *et al.*, 2014).

Quanto ao preço do etanol, o CEPEA divulga através de um Indicador semanal ou mensal os valores de mercado aplicados ao etanol hidratado e anidro produzidos pelo setor sucroenergético brasileiro. Este indicador trata do preço do etanol comercializado da usina à distribuidora e para sua composição é adotada a seguinte metodologia constante no Quadro 2.

Quadro 2: Metodologia para a formação do indicador CEPEA para etanol.

Especificação dos produtos	Em acordo com as especificações da Agência Nacional de Petróleo (ANP)
Moeda/Unidade de medida	Preço à vista; R\$/litro
Entrega	A retirar na unidade de produção (usina/destilaria)
Agentes consultados	Unidades produtoras (usinas/destilarias), distribuidoras e intermediários de vendas
Periodicidade	Levantamento diário, mas divulgação semanal ou mensal

Fonte: CEPEA (2017).

## 2.8 A Cana-energia

O termo “cana-energia” é recente, embora existam registros dessa cultura proposta desde o final da década de 1970 em Porto Rico por um grupo de programas chamados “gestão da cana-energia”, desenvolvidos em um contexto onde se iniciou uma busca por alternativas de fontes energéticas renováveis, direcionadas para a produção exclusiva de biomassa. Neste cenário, o termo “cana-energia” foi uma definição para um sistema de gestão e não uma denominação de um tipo específico de planta (MATSUOKA *et al.*, 2014; OKUNO, 2016).

Mesmo com o sucesso dos programas de gestão da cana-energia após alguns anos eles foram descontinuados. Porém, com o atual crescimento do interesse por biocombustíveis e por mais alternativas de biomassa, países como o Brasil retomaram os estudos a partir de variedades com baixos teores de açúcar e com maior produção de biomassa oriundos dos programas de Porto Rico. Esses acessos foram denominados “cana-energia”, agora em um sentido de distinção botânica, designando assim um novo tipo de planta que pode ser processada pela indústria para a produção de açúcar e/ou etanol, mas com um componente adicional, a maior quantidade de biomassa para a produção de etanol de segunda geração, energia elétrica e outros subprodutos (OKUNO, 2016).

Matsuoka *et al.* (2011, 2014) citam algumas características significantes da cana-energia:

- a) apresenta uma alta taxa de perfilhamento, o que significa que cada touceira é capaz de produzir uma quantidade maior de colmos, podendo-se prever de 10 a 12 socas. Essa capacidade de perfilhamento está ligada diretamente a capacidade de produzir rizomas;
- b) o sistema radicular rizomatoso proporciona à planta uma melhor tolerância ao estresse hídrico e à falta de disponibilidade de nutrientes, conferindo-lhe um rendimento maior na maioria dos ambientes, especialmente em condições marginais de solo e estresse climático;
- c) sua rebrota após a colheita também é melhor pois ocorre uma maior dispersão de perfilhos atuando também contra a erosão, o que a torna importante não só por razões econômicas, mas também ambientais.

Com essas características, a cana-energia apresenta uma produtividade mais elevada que a cana convencional. Violante (2012) identificou entre híbridos de cana-energia, materiais com produção de biomassa na proporção média de 1,5 vez mais massa seca na fase de soqueira quando comparada a cana tradicional, sendo que o híbrido de cana-energia mais produtivo expressou média de 64,6 toneladas de matéria seca por hectare, frente as 37,9 toneladas de matéria seca por hectare produzidas pela variedade comercial RB867515.

Assim, a cana-energia apresenta-se então como uma excelente alternativa na diversificação da matriz energética nacional. Isto é comprovado através da sua maior capacidade de produzir biomassa, tornando-se uma cultura com alta densidade energética, sendo assim uma excelente fonte de energia renovável (SILVEIRA, 2014).

Como o principal produto de interesse na produção de cana-energia é a biomassa, uma vez produzida através da fotossíntese ela fica armazenada na composição estrutural da planta sem haver perdas com o passar do tempo, o que faz dessa biomassa uma matéria-prima que pode ser armazenada para uso contínuo ao longo do ano, diferente da sazonalidade da cana-de-açúcar (OKUNO, 2016).

Por ser mais rústica e resistente a condições de estresse hídrico e nutricional ela também pode ser cultivada em áreas agrícolas marginais, fator importante, pois reduz a competição com culturas voltadas para a produção de alimentos (VIOLANTE, 2012).

Considerando os trabalhos de melhoramento genético, duas categorias de cana-energia são descritas (Tabela 4). A tipo 1, é descrita como uma cana que apresenta características mais próximas as da cana-de-açúcar convencional. Já a cana-energia tipo 2 apresenta um teor pequeno de açúcar, mas elevado teor de fibra, pensada para a produção exclusiva de biomassa (MATSUOKA *et al.*, 2014).

Tabela 4: Variação da composição entre diferentes tipos de cana.

<b>Componentes</b>	<b>Cana-de-açúcar</b>	<b>Cana energia Tipo 1</b>	<b>Cana energia Tipo 2</b>
Água	75%	70%	65%
Fibra	12%	17%	30%
Açúcar	13%	13%	5%

Fonte: TEW; COBILL (2008), adaptada pelo autor.

No Brasil, a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA) vem executando programas de melhoramento e seleção de famílias envolvendo cruzamento de acessos de *S. spontaneum*, *S. robustum*, cultivares RB (República Brasil) e de outros programas de melhoramento, visando obter com sucesso a cana-energia Tipo 1, com 17% de fibra e mantendo os 13% de sacarose (SILVEIRA, 2014).

O uso de germoplasma selvagem nos programas de melhoramento está relacionado com a tentativa de ampliar a base genética, que se estreitou devido aos cruzamentos que objetivaram maximizar a produção de sacarose durante as últimas décadas (MATSUOKA *et al.*, 2011).

O investimento no melhoramento genético tem apresentado resultados muito importantes e significativos na obtenção de uma variedade comercial capaz de produzir mais biomassa. Tradicionalmente, a cana-de-açúcar cultivada há séculos no Brasil passou por inúmeras pesquisas com o objetivo de aumentar o seu teor de açúcar, contudo, um novo paradigma está surgindo dentro do setor sucroenergético, fundamentado na produção de biomassa, com o objetivo de otimizar a produção de bioeletricidade nas usinas e ser a planta energética do futuro.

### 3 METODOLOGIA

A determinação do perfil ideal de cana-energia para ser cultivado no estado de Alagoas foi feita a partir de comparativos entre perfis de cana-de-açúcar e cana-energia. De acordo com o percentual de fibra e a quantidade de ATR por tonelada de cana, foram determinados perfis de cana-de-açúcar e cana-energia e estimadas a produção de etanol e bioeletricidade produzidos por cada perfil. A partir do percentual de fibra foi calculada a quantidade de bagaço destinada para um sistema de cogeração de bioeletricidade. Um simulador realizou os cálculos e determinou a quantidade de bioeletricidade excedente, enquanto que a partir da quantidade de ATR foi calculado o rendimento teórico de etanol por tonelada de cana.

Entende-se por energia elétrica excedente aquela que está disponível para a comercialização, resultante da quantidade de eletricidade total produzida menos o consumo de eletricidade da usina e do sistema de cogeração.

A planta de cogeração simulada foi composta por uma caldeira que fornece vapor a 65 bar de pressão e temperatura de 473°C para turbinas de extração e condensação. Esta configuração foi escolhida por ser mais eficiente do que a configuração tradicionalmente utilizada por boa parte das usinas no Brasil, especialmente na região nordeste. Nessas usinas, o sistema de cogeração apresenta caldeiras de baixa pressão (22 bar), com temperatura de 300°C e turbinas de contrapressão. É um sistema que apresenta baixa eficiência energética e em geral produz eletricidade suficiente apenas para o consumo da própria usina, sem gerar excedentes (ALVES, 2011).

Os cálculos de simulação de cogeração de bioeletricidade consideraram os valores adotados nos trabalhos de simulação realizados por CGEE (2009) e Alves (2011), que adotaram para a usina as seguintes características:

- a) produção apenas de etanol;
- b) consumo de energia elétrica da usina de 28 kWh/tc;
- c) consumo de energia elétrica do sistema de cogeração de 14 kWh/tc;
- d) capacidade de processamento de 500 toneladas de cana por hora;
- e) processamento de 2 milhões de toneladas de cana por safra.

Este modelo de usina foi utilizado partindo-se da hipótese de que usinas com essa capacidade apresentam maiores condições de gerar excedentes de eletricidade, e, embora não seja o perfil da maioria das usinas na região nordeste, de acordo com CONAB (2017), o estado de Alagoas apresenta ao menos duas indústrias com esta capacidade de processamento.

Com base nos resultados de produção de bioeletricidade e etanol e no valor de mercado desses produtos, foi estimado o faturamento obtido para cada perfil de cana, sendo possível determinar quais perfis de cana-energia são mais vantajosos para incrementar o faturamento do produtor.

### 3.1 Bagaço para Cogeração

O percentual teórico de bagaço para cogeração foi obtido a partir do percentual de fibra da cana. Para este cálculo foi aplicada a equação 1 disponibilizada pelos laboratórios de análises agroindustriais de duas usinas localizadas no estado de Alagoas.

$$bag = \left( \frac{FIB}{100 - \left( UB + \left( \left( \frac{Pol}{PZA} \right) \times 100 \right) \right) \right)} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

bag – Percentual teórico de bagaço por tonelada de cana (%)

FIB – Percentual de fibra da cana (%)

UB – Umidade do bagaço (%)

Pol – Pol do bagaço (%)

PZA – Pureza do caldo residual

A variável umidade do bagaço (UB), foi considerada 50% como descrita nas simulações de cogeração realizadas por CGEE (2009) e Alves (2011).

Para as variáveis Pol do bagaço (Pol) e Pureza do caldo residual (PZA), os valores considerados foram obtidos a partir da média das safras 2011/12 a 2015/16 fornecidas pelo laboratório de análises agroindustriais de uma usina de cana-de-açúcar, localizada no estado de Alagoas. (Tabela 5)

Tabela 5: Valores usados para cálculo do percentual de bagaço por tonelada de cana.

Safras	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	Média
PZA	67,98	77,17	76,14	78,93	73,85	<b>74,81</b>
Pol (%)	2,27	2,79	2,49	2,81	2,64	<b>2,60</b>

Elaboração: Autor, 2017.

O percentual teórico de bagaço (bag) foi convertido em quantidade mássica de bagaço, ou quantidade de Bagaço por Tonelada de Cana (BTC) pela equação 2.

$$BTC = bag \times 10 \quad (2)$$

A equação 3 foi usada para calcular a vazão de bagaço (em kg/s) que será destinada à cogeração. Este cálculo utiliza a quantidade de bagaço produzida (kg/tc) e a capacidade de processamento de cana da usina de 500 t/h, conforme considera CGEE (2009) e Alves (2011).

$$VBC = \left( \frac{BTC \times CPC}{FC} \right) - BR \quad (3)$$

Onde:

VBC – Vazão de Bagaço para Cogeração (kg/s)

BTC – Bagaço por Tonelada de Cana (kg/tc)

CPC – Capacidade de Processamento de Cana (500 t/h)

FC – Fator de Conversão (horas-segundos)

BR – Percentual de Bagaço destinado a Reserva (%)

O percentual de bagaço destinado a reserva equivale a 10% do total de bagaço produzido. Este quantitativo é reservado para reinício da cogeração, em caso de eventuais paradas do sistema (CGEE, 2009; ALVES, 2011).

### **3.2 Simulador do Sistema de Cogeração**

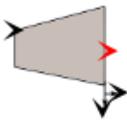
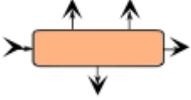
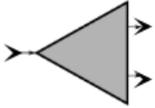
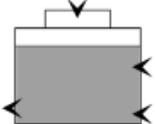
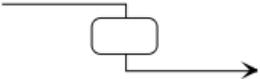
Para obter a quantidade de energia elétrica excedente a partir da cogeração com uso do bagaço foi utilizado o simulador EMSO (*Environment for Modeling, Simulation and Optimization* - Ambiente para Modelagem, Simulação e Otimização). Este simulador apresenta um ambiente gráfico completo onde o usuário pode modelar processos complexos dinâmicos ou estáveis selecionando e conectando blocos de modelo. Além disso, o usuário pode desenvolver novos modelos usando a linguagem de modelagem EMSO ou utilizando as já feitas a partir de uma coleção de modelos pré-configurados do EMSO.

Embora não seja um software livre, o EMSO é distribuído sob a licença da ALSOC para fins de pesquisas não lucrativas. Ele surgiu como resultado de uma parceria entre universidades e empresas petroquímicas nacionais, tendo sido desenvolvido em 2001, e pode ser baixado no site do projeto ALSOC ([www.enq.ufrgs.br/alsoc](http://www.enq.ufrgs.br/alsoc)).

### **3.3 Fluxograma de Simulação**

Para construir o sistema de cogeração foi selecionado o módulo de simulação de processos EMSO e o banco de dados que apresenta os equipamentos usados em uma planta de cogeração (Quadro 3).

Quadro 3: Equipamentos usados nas simulações realizadas pelo software EMSO.

	<p>Caldeira ou Gerador de vapor: equipamento responsável pela queima do bagaço. Apresenta duas correntes de entrada (combustível e água) e uma corrente de saída (vapor vivo).</p>
	<p>Fonte de combustível: utiliza os valores de referência do bagaço.</p>
	<p>Turbina de extração e condensação: utiliza o vapor para geração de trabalho. Apresenta uma entrada de vapor (vapor vivo) e duas saídas (exaustão e extração)</p>
	<p>Distribuidor de bagaço: simula a saída do bagaço das moendas e o distribui para reserva, excedente e alimentação da caldeira.</p>
	<p>Divisor de fluxo de vapor: destina parte do vapor para o desaerador e parte para o condensador.</p>
	<p>Desaerador: controla o nível de oxigênio na água de alimentação da caldeira. Apresenta três correntes de entrada de vapor e uma saída.</p>
	<p>Condensador: responsável pela redução de temperatura do vapor saturado para atingir a condição de líquido. Apresenta uma entrada e uma saída de vapor.</p>
	<p>Gerador elétrico: utiliza o trabalho gerado pela turbina e o converte em energia elétrica.</p>
	<p>Bomba: responsável pela condução do vapor condensado para a caldeira.</p>
	<p>Distribuidor elétrico: responsável pelo balaço entre energia elétrica gerada, consumida e excedente.</p>
	<p>Conector: responsável pela conexão entre dois equipamentos. Ocorre através da corrente de saída de um equipamento à corrente de entrada do outro.</p>

Fonte: Software EMSO, adaptado pelo autor, 2017.

Na área de trabalho do simulador (Figura 8), foram inseridos e conectados todos os equipamentos selecionados para uma planta de cogeração do setor sucroenergético, e em cada equipamento foram inseridas as variáveis de operação do sistema e o perfil de operação da usina simulada (Tabela 6), os dados da composição do bagaço (Tabela 7).

Tabela 6: Variáveis de operação do sistema de cogeração.

<b>Caldeira</b>	
Pressão do vapor gerado	65 bar
Temperatura do vapor gerado	473 °C
Eficiência da caldeira (base PCI)	85 %
<b>Turbinas</b>	
Eficiência da turbina	83,3 %
Pressão de vapor de extração para processo	2,5 bar
Pressão do vapor de exaustão (condensação)	0,135 bar
<b>Perfil da usina</b>	
Consumo de eletricidade da usina	28 (kWh/tc)
Consumo de eletricidade do sistema de cogeração	14 (kWh/tc)
Bagaço destinado para partida do sistema (reinício)	10 (%)

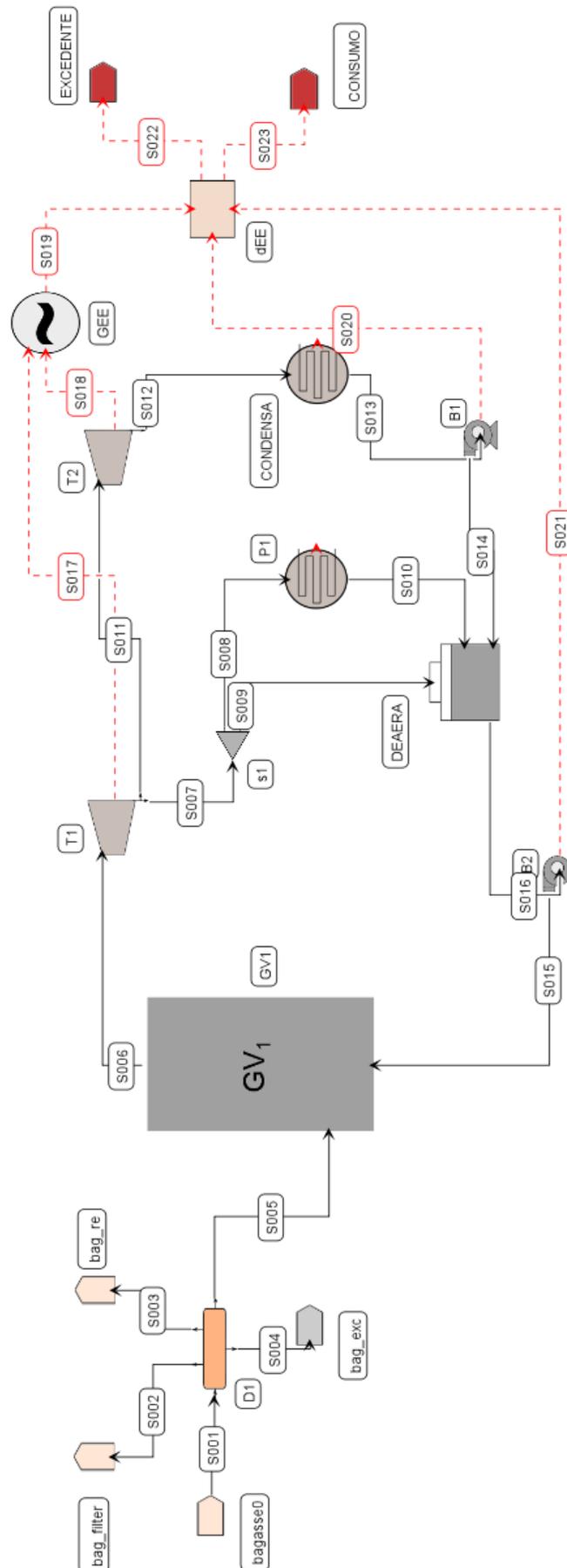
Fonte: ALVES (2011).

Tabela 7: Composição do bagaço da cana-de-açúcar em base seca.

<b>Análise imediata</b>	<b>[% , em massa]</b>
Teor de umidade	0,0
Cinzas	2,2
Carbono fixo	18,0
Material volátil	79,9
<b>Análise elementar</b>	<b>[% , em massa]</b>
Carbono	44,6
Hidrogênio	5,8
Nitrogênio	0,6
Oxigênio	44,5

Fonte: CORTEZ *et al.* (2013).

Figura 8: Área de trabalho do simulador EMSO.



Fonte: Software EMSO, adaptada pelo autor, 2017.

### 3.4 Simulação de Cogeração

Para realizar a simulação, o software foi inicializado e o ícone “*fonte de combustível*” foi selecionado. Nele, foram inseridos os valores da análise imediata e elementar do bagaço, seu poder calorífico em B.U. (7,524 MJ/kg), e a quantidade de bagaço destinada à cogeração (vazão de bagaço).

Concluindo a inserção dessas informações o simulador foi acionado através do ícone “*run*”, e o sistema fez a verificação automática dos dados inseridos e calculou a quantidade de energia produzida, consumida e excedente a partir da vazão de bagaço informada.

Este processo foi realizado com cada um dos perfis de cana abordados neste trabalho de acordo com o seu percentual de fibra (de 12 a 21%), e assim, foi possível obter a quantidade de energia excedente produzida pelo bagaço da cana com base em seu percentual de fibra.

### 3.5 Rendimento Teórico de Etanol

Para estimar a produção de etanol produzido por tonelada ou hectare de cana foi utilizado o cálculo de rendimento teórico de álcool apresentado por Fernandes (2003). Este, considera que para destilaria autônoma, isto é, fabricação somente de álcool direto, o rendimento teórico para etanol hidratado direto (REHD) é obtido mediante o cálculo da equação 4.

$$REHD = ATR \times IRE \quad (4)$$

Onde:

REHD – Rendimento Teórico para etanol Hidratado Direto

ATR – Açúcares Totais Recuperáveis (kg/tc)

IRE – Índice de rendimento de Etanol por unidade de ATR

O Açúcar Total Recuperável (ATR), representa a quantidade de ART (Açúcares Redutores Totais, também chamados de “açúcares totais”) de todos os açúcares da cana recuperados desde a entrada da cana na usina até o xarope, ou seja, é o resultado da diferença entre o ART da cana e as perdas na lavagem da cana, bagaço final, torta dos filtros ou prensas e “indeterminadas”, considerando eficiência média padrão (FERNANDES, 2003).

Conforme o Sindaçúcar-AL (2017), atualmente em Alagoas, considerando o padrão tecnológico em uso para tratamento e purificação do caldo, as perdas que ocorrem no processo industrial e as relações convencionais entre quantidade de ATR e a quantidade do produto final (etanol hidratado), para a obtenção de um litro de etanol hidratado são necessários 1,7409 kg de ATR. Dessa forma, o índice de rendimento para o etanol hidratado (IRE) é de 0,5744.

Assim, para se obter os resultados do rendimento teórico do etanol hidratado, calculou-se a quantidade de ATR presente numa tonelada de cana pelo índice de rendimento teórico para o etanol hidratado (0,5744).

Este cálculo foi realizado com cada um dos perfis de cana abordados neste trabalho com valores entre 80 a 140 kg de ATR/tc.

### **3.6 Simulação de Cenários com Uso de Perfis de Cana**

Após obter os resultados da produção do excedente de eletricidade e do rendimento teórico de etanol hidratado, estes valores foram agrupados e em seguida realizaram-se os cálculos do faturamento estimado por tonelada de cana e por produtividade, com base no preço da energia elétrica e do etanol praticados pelo mercado.

Para a realização dos cálculos de produção foram considerados dois tipos de cana com diferentes níveis de ATR e fibra, conforme segue:

- a) para a cana-de-açúcar, variação de 100 a 140 kg de ATR/tc e percentual de fibra de 12 a 16%;
- b) para a cana energia, variação de 80 a 120 kg de ATR/tc e percentual de fibra de 17 a 21%.

A variação de fibra adotada para a cana-de-açúcar e para a cana energia são apresentadas por Tew; Cobill (2008), que determinam para a cana tradicionalmente cultivada para a produção de açúcar um percentual de fibra a partir de 12%, e para a cana energia, cultivada para biomassa vegetal, um percentual de fibra a partir de 17%.

A variação de ATR adotada para a cana-de-açúcar tem como base os valores médios registrados pelas usinas no estado de Alagoas no decorrer das safras 2011/2012 a 2015/2016. Esses valores foram divulgados através dos boletins de safras pelo Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas (Sindaçúcar-AL) e são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Perfil de fibra e ATR da cana-de-açúcar no estado de Alagoas.

Unidade	Safras					Média
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	
<b>Kg de ATR/tc</b>	131,62	138,63	127,57	130,03	128,62	<b>131,29</b>
<b>Fibra (%)</b>	14,64	15,06	15,01	15,04	15,26	<b>15,00</b>

Fonte: Sindaçúcar – AL (2017), adaptada pelo autor.

Considerando a escassa literatura sobre trabalhos que relacionam o incremento de fibra com a redução de açúcares totais, para esta pesquisa determinou-se para a cana-energia o intervalo de 80 a 120 kg de ATR/tc.

Para a realização dos cálculos de faturamento foram considerados os seguintes valores de referência:

- a) para a eletricidade, o valor médio do PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) cotado em R\$/MWh 284,01. Valor praticado no mercado livre de energia elétrica para o submercado nordeste no mês de março/2017, divulgado pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica);
- b) para o etanol hidratado, o valor médio do preço do litro vendido às distribuidoras cotado em R\$/litro 1,7106. Valor praticado no mês março/2017, divulgado pelo indicador mensal CEPEA para o estado de Alagoas.

### 3.6.1 Produção e faturamento por tonelada de cana

Para os resultados de produção por tonelada de cana, os valores obtidos pelos cálculos do simulador EMSO para energia elétrica excedente (kWh/tc) e pelo rendimento teórico de etanol hidratado (l/tc) para cada perfil de cana-de-açúcar e cana-energia, foram distribuídos diretamente nas tabelas.

Para o faturamento, os valores de produção de eletricidade e rendimento de etanol foram multiplicados pelos preços em Reais do megawatt-hora (R\$/MWh) e do litro do etanol (R\$/litro), respectivamente, praticados pelo mercado no mês de março de 2017.

### 3.6.2 Produção e faturamento por produtividade

Para os cálculos de produção e faturamento por produtividade os valores de energia elétrica excedente e rendimento teórico de etanol obtidos por tonelada de cana foram multiplicados pela produtividade média da cana-de-açúcar obtida nas últimas cinco safras no estado de Alagoas (Tabela 9).

Tabela 9: Produtividade média de cana-de-açúcar nas safras 2011/12 a 2015/16 no estado de Alagoas. (t/ha).

UF	Safras (t/ha)					Média
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	
Alagoas	59,75	52,80	53,79	58,20	50,04	<b>54,92</b>

Fonte: CONAB (2016), adaptada pelo autor.

### 3.6.3 Determinação do perfil de cana-energia complementar a cana-de-açúcar

Com base nos dados apresentados nas seções anteriores, atualmente, a cana-de-açúcar no estado de Alagoas apresenta um perfil tecnológico médio de 15% de fibra, 130 kg de ATR/tc e produtividade de 55 toneladas/ha.

Cultivada há séculos no Brasil a cana-de-açúcar tem se modernizado como resultado de inúmeras pesquisas, e no cenário atual, as pesquisas têm apontado para uma cana com um perfil mais voltado para a produção de biomassa, que tenha maior produtividade e que seja competitiva com as variedades de cana atuais.

Assim, para encontrar o perfil da cana-energia que seja complementar a cana-de-açúcar no estado de Alagoas, o procedimento utilizado foi calcular a produtividade mínima necessária para cada perfil de cana-energia, a fim de que, o faturamento com a comercialização dos produtos (etanol e eletricidade) de cada perfil estimado atinja o faturamento esperado com a comercialização do etanol e eletricidade produzidos pelo perfil de cana-de-açúcar atualmente encontrado no estado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Produção de Bagaço e Energia Elétrica Excedente

O bagaço total produzido, vazão de bagaço e energia elétrica excedente para cada perfil de cana estão apresentados na Tabela 11.

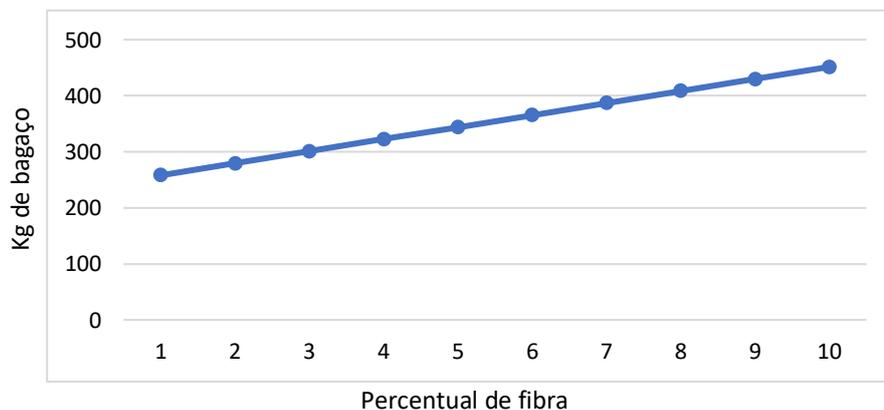
Tabela 10: Bagaço total, vazão de bagaço e energia elétrica excedente produzida com uso do bagaço de cana para os diferentes perfis.

Perfil de cana %FIB	Bagaço total produzido [kg/tc] (50% de umidade)	Vazão de bagaço [kg/s]	Energia elétrica excedente kWh/tc
12	257,93	32,24	28,05
13	279,42	34,93	33,60
14	300,92	37,62	39,15
15	322,41	40,30	44,69
16	343,90	42,99	50,24
17	365,40	45,68	55,80
18	386,89	48,36	61,33
19	408,39	51,05	66,89
20	429,88	53,74	72,45
21	451,37	56,42	77,98

Fonte: Autor, 2017.

Através de análise de regressão linear os resultados mostraram que para cada 1% de fibra adicionada ao perfil da cana há um acréscimo de 21,49 kg ao conteúdo mássico de bagaço (Figura 9).

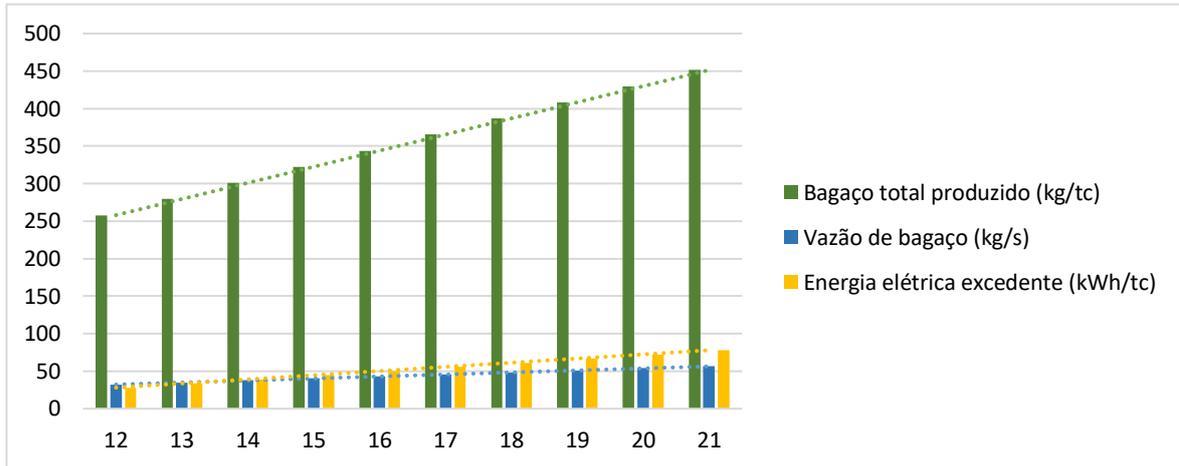
Figura 9: Análise de regressão linear: acréscimo de conteúdo mássico de bagaço por percentual de fibra.



Fonte: Autor, 2017.

A análise dos resultados mostrou também que a cada 1% de fibra acrescentada, 2,69 kg/s de bagaço são destinados para a caldeira e 5,5 kWh são acrescentados por tonelada de cana (Figura 10).

Figura 10: Bagaço total, vazão de bagaço e energia elétrica excedente produzida com uso do bagaço de cana com variados percentuais de fibra.



Fonte: Autor, 2017.

## 4.2 Produção de Etanol Hidratado

Os resultados para a produção de etanol hidratado (Tabela 12) foram obtidos a partir da quantidade de ATR presente em uma tonelada de cana.

Fernandes (2003) diz que para calcular a quantidade teórica de etanol produzida por uma tonelada de cana deve-se multiplicar a quantidade de ATR/tc pelo índice de rendimento do etanol. Este índice refere-se a quantidade necessária de ATR para se produzir 1 litro de etanol hidratado com base na eficiência industrial das usinas de cana-de-açúcar no Brasil.

Tabela 11: Rendimento teórico de etanol hidratado por kg de ATR em uma tonelada de cana.

<b>ATR (kg/tc)</b>	<b>Etanol hidratado (litros/tc)</b>
80	45,95
85	48,82
90	51,70
95	54,57
100	57,44
105	60,31
110	63,18
115	66,06
120	68,93
125	71,80
130	74,67
135	77,54
140	80,42

Fonte: Autor, 2017.

Os resultados de rendimento teórico de etanol estão bem próximos aos obtidos na prática no estado de Alagoas. De acordo com o Sindaçúcar-AL, para o perfil médio atual da cana-de-açúcar em Alagoas (130 kg de ATR/tc) a produção de etanol hidratado nas usinas do estado é de 75,2 litros/tc. Pelos cálculos de produção teórica de etanol este mesmo perfil de cana pode produzir 74,67 litros de etanol por tonelada de cana. Dessa forma, conclui-se que os resultados obtidos para o rendimento teórico de etanol neste trabalho condizem com os resultados descritos na literatura.

### 4.3 Cenários com Diferentes Perfis de Cana

Os resultados para a produção de energia elétrica excedente obtidos pela simulação no software EMSO, e etanol hidratado pelo rendimento teórico, de acordo com o perfil de fibra e ATR da cana foram agrupados nos Quadros 4 e 5.

No Quadro 4 são apresentados os resultados de produção de eletricidade e etanol para 1 tonelada de cana-de-açúcar, com uma variação de fibra de 12 a 16% e de 100 a 140 kg de ATR/tc.

Quadro 4: Produção de energia elétrica excedente e etanol hidratado a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar com diferentes perfis de fibra e ATR.

Fibra (%)	Produto	Kg de ATR/tc								
		140	135	130	125	120	115	110	105	100
12	EE	28,05	28,05	28,05	28,05	28,05	28,05	28,05	28,05	28,05
	EH	80,42	77,54	74,67	71,80	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44
13	EE	33,60	33,60	33,60	33,60	33,60	33,60	33,60	33,60	33,60
	EH	80,42	77,54	74,67	71,80	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44
14	EE	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15
	EH	80,42	77,54	74,67	71,80	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44
15	EE	44,69	44,69	44,69	44,69	44,69	44,69	44,69	44,69	44,69
	EH	80,42	77,54	74,67	71,80	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44
16	EE	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24
	EH	80,42	77,54	74,67	71,80	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44

EE – Energia elétrica excedente (kWh/tc)

EH – Etanol hidratado (litros/tc)

Fonte: Autor, 2017.

Segundo Sindaçúcar-AL (2017) a cana-de-açúcar produzida durante a safra 2015/2016 em Alagoas apresentou uma média de 15% de fibra e 130 kg de ATR/tc. Com base nesse perfil de cana e nos cálculos de cogeração e produção de etanol, este perfil de cana-de-açúcar tem potencial para produzir 44,69 kWh e 74,67 litros de etanol hidratado por tonelada processada.

O faturamento estimado com a comercialização desses produtos a partir deste e de outros possíveis perfis de cana-de-açúcar estão no Quadro 5.

Quadro 5: Faturamento (R\$/tc) com a venda de energia elétrica excedente e etanol hidratado por tonelada de cana-de-açúcar com diferentes perfis de fibra e ATR.

Fibra (%)	kg ATR/tc								
	140	135	130	125	120	115	110	105	100
12	145,53	140,61	135,70	130,79	125,87	120,96	116,05	111,14	106,22
13	147,10	142,19	137,28	132,36	127,45	122,54	117,63	112,71	107,80
14	148,68	143,77	138,85	133,94	129,03	124,11	119,20	114,29	109,38
15	150,25	145,34	140,43	135,51	130,60	125,69	120,77	115,86	110,95
16	151,83	146,92	142,00	137,09	132,18	127,26	122,35	117,44	112,53

Fonte: Autor, 2017.

Segundo Tew; Cobill (2008), a cana-energia Tipo 1 apresenta um percentual de fibra superior a 17%. Assim, para este trabalho foi adotada uma variação de fibra para a cana-energia de 17 a 21%. Essa variação baseia-se também na limitação técnica do parque industrial sucroenergético brasileiro, que não está preparado para processar canas com densidades muito elevadas de fibra.

No Quadro 6 são apresentados os resultados de produção de eletricidade e etanol para 1 tonelada de cana-energia, apresentando uma variação de fibra de 17 a 21% e de 80 a 120 kg de ATR/tc.

Quadro 6: Produção de energia elétrica excedente e etanol hidratado a partir de uma tonelada de cana-energia com diferentes perfis de fibra e ATR.

Fibra (%)	Produto	Kg de ATR/tc								
		120	115	110	105	100	95	90	85	80
17	EE	55,80	55,80	55,80	55,80	55,80	55,80	55,80	55,80	55,80
	EH	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44	54,57	51,70	48,82	45,95
18	EE	61,33	61,33	61,33	61,33	61,33	61,33	61,33	61,33	61,33
	EH	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44	54,57	51,70	48,82	45,95
19	EE	66,89	66,89	66,89	66,89	66,89	66,89	66,89	66,89	66,89
	EH	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44	54,57	51,70	48,82	45,95
20	EE	72,45	72,45	72,45	72,45	72,45	72,45	72,45	72,45	72,45
	EH	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44	54,57	51,70	48,82	45,95
21	EE	77,98	77,98	77,98	77,98	77,98	77,98	77,98	77,98	77,98
	EH	68,93	66,06	63,18	60,31	57,44	54,57	51,70	48,82	45,95

EE – Energia elétrica excedente (kWh/tc)

EH – Etanol hidratado (litros/tc)

Fonte: Autor, 2017.

Bressiani (2017) apresenta uma variedade de cana-energia Tipo 1 chamada Vertex 3, com um perfil médio de 21% de fibra e 115 kg de ATR/tc.

Com base nesse perfil de cana e nos cálculos de cogeração e produção de etanol aplicados neste trabalho, uma tonelada dessa cana tem potencial para produzir aproximadamente 77,98 kWh de eletricidade e cerca de 66,06 litros de etanol.

O Quadro 7 apresenta o faturamento estimado com a comercialização do etanol e eletricidade produzidos a partir de uma tonelada de cana-energia com diferentes perfis de fibra e ATR.

Quadro 7: Faturamento (R\$/tc) com a venda de energia elétrica excedente e etanol hidratado por tonelada de cana-energia com diferentes perfis de fibra e ATR.

Fibra (%)	kg ATR/tc								
	120	115	110	105	100	95	90	85	80
17	133,76	128,84	123,93	119,02	114,10	109,19	104,28	99,37	94,45
18	135,33	130,41	125,50	120,59	115,68	110,76	105,85	100,94	96,02
19	136,91	131,99	127,08	122,17	117,25	112,34	107,43	102,52	97,60
20	138,48	133,57	128,66	123,75	118,83	113,92	109,01	104,09	99,18
21	140,06	135,14	130,23	125,32	120,40	115,49	110,58	105,67	100,75

Fonte: Autor, 2017.

No comparativo do faturamento obtido com a venda do etanol e eletricidade excedente do perfil médio da cana-de-açúcar em Alagoas (15% de fibra e 130 kg de ATR/tc) e do perfil da cana-energia Tipo 1 (21% de fibra e 115 kg de ATR/tc) apresentada por Bressiani (2017), observa-se uma leve vantagem da cana-de-açúcar no faturamento por tonelada (R\$/t 140,43 cana-de-açúcar contra R\$/t 135,14 cana-energia, equivalente a R\$ 5,29 por tonelada). Entretanto, a grande diferença se dá na comparação do faturamento pela produtividade dos dois tipos de cana (cana-de-açúcar = 55 tc/ha, cana-energia Tipo1, Vertex 3 = 125,66 tc/ha).

O faturamento apresentado nos Quadros 5 e 7 teve como base o valor da energia elétrica para o submercado nordeste e o preço do etanol hidratado para Alagoas, ambos praticados no mês de março de 2017.

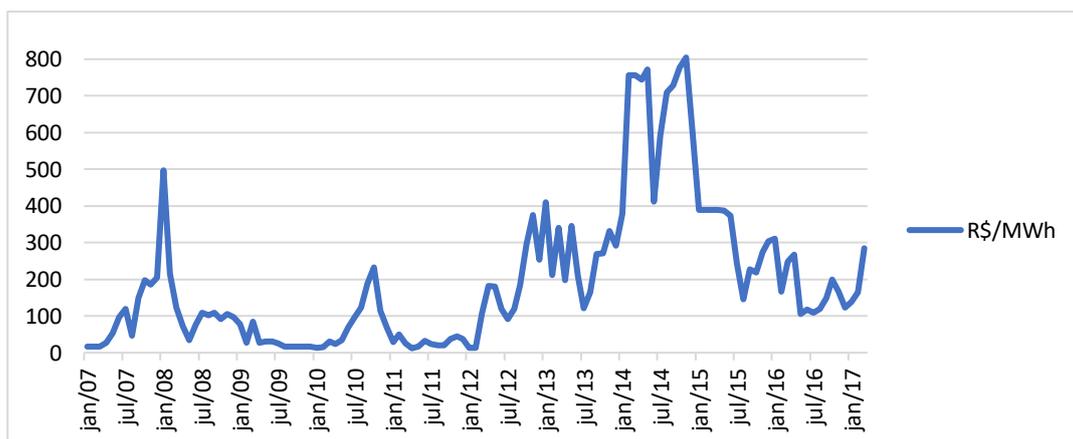
Os valores para energia elétrica são muito dinâmicos. A CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) divulga semanalmente o PLD (Preço de

Liquidação das Diferenças) que é o valor de mercado da eletricidade para aquela semana ou mês de referência. Como a energia elétrica é proveniente principalmente de hidrelétricas de grande porte, o valor da eletricidade varia muito em função de fatores como disponibilidade hídrica, pluviosidade média, custo de produção e distribuição e o valor dos combustíveis usados nas termelétricas que dão suporte a produção de eletricidade (CCEE, 2017).

Por conta dessas variáveis, o preço de mercado de energia elétrica é muito instável. Em um período de tempo muito curto pode ocorrer variações consideráveis nos valores do MWh. Um exemplo disso é o que ocorreu entre junho e outubro de 2014, quando o valor médio do PLD saltou de R\$/MWh 412,60 para a marca histórica de R\$/MWh 804,54. Dessa forma, para assegurar um limite de custos e faturamentos a Aneel aplica anualmente um valor mínimo e máximo para o PLD, sendo para o ano de 2017 o valor mínimo de R\$/MWh 33,68 e máximo de R\$/MWh 533,82 (CCEE, 2017).

A Figura 11 apresenta o histórico do preço médio do PLD para o submercado Nordeste no mercado livre de energia elétrica. Os valores são referentes ao período de janeiro de 2007 a janeiro de 2017.

Figura 11: Histórico de preço médio do PLD (R\$/MWh) – Submercado Nordeste (janeiro/2007 a janeiro/2017).

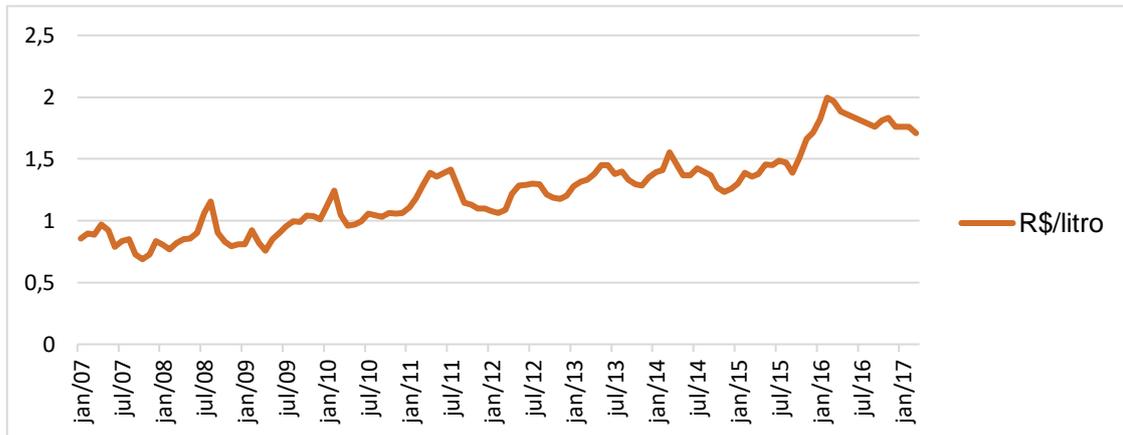


Fonte: CCEE (2017).

O preço do etanol também depende de muitas variáveis, como a produtividade nos canaviais, os custos de produção da matéria-prima e de sua transformação, o momento do mercado nacional e internacional dos combustíveis, entre outros (LIMA, 2011).

Mas diferente do mercado de eletricidade o preço de mercado do etanol é mais estável. A Figura 12 demonstram o histórico de preços do etanol praticados no período de janeiro de 2007 a janeiro de 2017.

Figura 12: Histórico de preço médio do etanol hidratado (R\$/litro) – Alagoas (janeiro/2007 a janeiro/2017).



Fonte: CEPEA (2017).

Em razão do comportamento desses mercados, a ideia de produção de uma cana com maior percentual de fibra para incrementar o faturamento com a venda de excedentes de eletricidade é muito boa, mas é relevante manter uma quantidade segura de ATR ao perfil desta cana para a produção de etanol, tendo em vista a maior estabilidade do mercado para este produto. Nesse caso, a cana-energia Tipo 1 apresenta-se como uma excelente alternativa para cultivo, pois seu percentual de fibra pode ser processado pelas usinas atuais e a redução de ATR não compromete significativamente a produção de etanol.

#### 4.3.1 Produção e faturamento por produtividade

A produtividade média adotada para a cana-de-açúcar foi de 55 toneladas/ha. Este valor foi obtido pela média das safras 2011/2012 a 2015/2016 no estado de Alagoas apresentadas pela CONAB (2017). Assim, os resultados de produção de etanol e excedentes de eletricidade com base na produtividade da cana-de-açúcar em Alagoas são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8: Produção de energia elétrica excedente e etanol hidratado com base na produtividade média da cana-de-açúcar (55 t/ha) com diferentes perfis de fibra e ATR.

Fibra (%)	Produto	Kg de ATR/tc								
		140	135	130	125	120	115	110	105	100
12	EE	1542,75	1542,75	1542,75	1542,75	1542,75	1542,75	1542,75	1542,75	1542,75
	EH	4422,88	4264,92	4106,96	3949,00	3791,04	3633,08	3475,12	3317,16	3159,20
13	EE	1848,00	1848,00	1848,00	1848,00	1848,00	1848,00	1848,00	1848,00	1848,00
	EH	4422,88	4264,92	4106,96	3949,00	3791,04	3633,08	3475,12	3317,16	3159,20
14	EE	2153,25	2153,25	2153,25	2153,25	2153,25	2153,25	2153,25	2153,25	2153,25
	EH	4422,88	4264,92	4106,96	3949,00	3791,04	3633,08	3475,12	3317,16	3159,20
15	EE	2457,95	2457,95	2457,95	2457,95	2457,95	2457,95	2457,95	2457,95	2457,95
	EH	4422,88	4264,92	4106,96	3949,00	3791,04	3633,08	3475,12	3317,16	3159,20
16	EE	2763,20	2763,20	2763,20	2763,20	2763,20	2763,20	2763,20	2763,20	2763,20
	EH	4422,88	4264,92	4106,96	3949,00	3791,04	3633,08	3475,12	3317,16	3159,20

EE – Energia elétrica excedente (kWh/ha)

EH – Etanol hidratado (litros/ha)

Fonte: Autor, 2017.

Para o faturamento com esses produtos, os cálculos basearam-se nos valores médios aplicados para o MWh e para o litro do etanol (R\$ 284,01 e R\$ 1,7106, respectivamente), praticados pelo mercado em março/2017. Os resultados são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9: Faturamento (R\$/ha) com a venda de energia elétrica excedente e etanol hidratado com base na produtividade média da cana-de-açúcar com diferentes perfis de fibra e ATR.

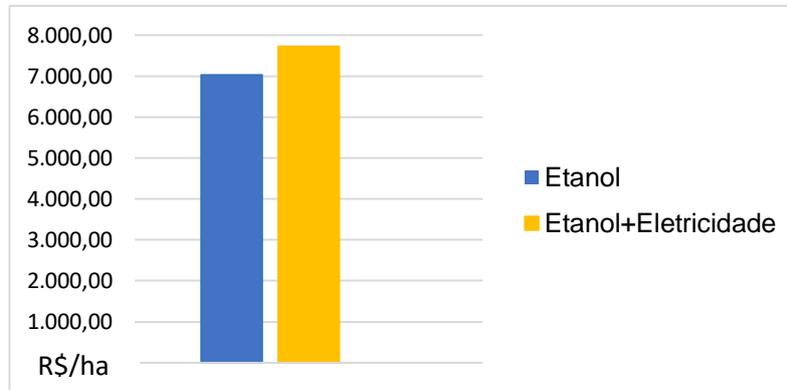
Fibra (%)	kg ATR/tc								
	140	135	130	125	120	115	110	105	100
12	8.003,93	7.733,73	7.463,52	7.193,32	6.923,11	6.652,90	6.382,70	6.112,49	5.842,28
13	8.090,63	7.820,42	7.550,22	7.280,01	7.009,80	6.739,60	6.469,39	6.199,18	5.928,98
14	8.177,32	7.907,13	7.636,91	7.366,70	7.096,50	6.826,29	6.556,08	6.285,88	6.015,67
15	8.263,86	7.993,65	7.723,45	7.453,24	7.183,04	6.912,83	6.642,62	6.372,42	6.102,21
16	8.350,55	8.080,35	7.810,14	7.539,94	7.269,73	6.999,52	6.729,32	6.459,11	6.188,90

Fonte: Autor, 2017.

Considerando que o perfil médio da cana-de-açúcar no estado de Alagoas é de 55 t/ha apresentando 15% de fibra e 130 kg de ATR/tc, estima-se que este a partir deste perfil de cana sejam produzidos 2457,95 kWh de bioeletricidade e 4106,96 litros de etanol hidratado por hectare de cana.

O faturamento total estimado com a venda desses produtos é de R\$ 7.723,45 por hectare, sendo R\$ 698,08 com a bioeletricidade e R\$ 7.025,37 com etanol (Figura 13).

Figura 13: Estimativa de faturamento (R\$/ha) de etanol/ha e etanol+eletricidade/ha.



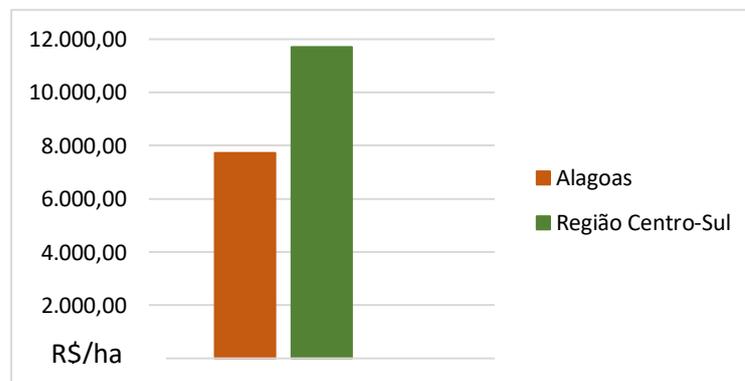
Fonte: Autor, 2017.

A Unica (2016) apresenta para a cana-de-açúcar produzida na Região Centro-Sul durante a safra 2015/2016 um perfil médio de 13% de fibra e 130 kg de ATR/tc e produtividade média de 83 toneladas de cana por hectare.

Na Figura 14 consta um comparativo do faturamento médio estimado por hectare de cana-de-açúcar, considerando o perfil médio para Alagoas e o perfil médio para a Região Centro-Sul.

Para o perfil de cana da Região Centro-Sul a estimativa de faturamento é de R\$ 11.704,05 por hectare de cana, considerando o valor de mercado dos produtos para a Região Nordeste e a metodologia aplicada neste trabalho.

Figura 14: Estimativa de faturamento (R\$/ha) de etanol+eletricidade, considerando a produtividade do estado de Alagoas e Região Centro-Sul.



Fonte: Autor, 2017.

#### 4.3.2 Perfil estimado para cana-energia

Considerando que a estimativa de faturamento médio com a comercialização de etanol e bioeletricidade da cana-de-açúcar em Alagoas é de R\$ 7.723,45 por hectare, para se equiparar a ela, a cana-energia precisa apresentar uma produtividade mínima necessária, para que, com a comercialização dos seus produtos (etanol e bioeletricidade) seu faturamento por hectare seja igual ou superior aos R\$ 7.723,45 obtidos com a cana-de-açúcar. Dessa forma, de acordo com os cálculos realizados, os valores de produtividade mínima esperados para cada perfil de cana-energia são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10: Produtividade mínima estimada para diferentes perfis de cana-energia para cultivo em complemento a cana-de-açúcar no estado de Alagoas. (t/ha)

Fibra (%)	kg ATR/tc								
	120	115	110	105	100	95	90	85	80
17	58,0	60,0	62,5	65,0	68,0	71,0	74,5	78,0	82,0
18	57,5	59,5	62,0	64,5	67,0	70,0	73,0	77,0	80,5
19	56,5	59,0	61,0	63,5	66,0	69,0	72,0	75,5	79,5
20	56,0	58,0	60,5	62,5	65,0	68,0	71,0	74,5	78,0
21	55,5	57,5	59,5	62,0	64,5	67,0	70,0	73,5	77,0

Fonte: Autor, 2017.

Para se equiparar a cana-de-açúcar produzida em Alagoas e ser uma opção de variedade que possa ser cultivada em complemento a ela, a cana-energia deve apresentar uma produtividade mínima entre 55,5 toneladas por hectare (perfil de 21% de fibra e 120 kg de ATR/tc) a 82 toneladas por hectare (perfil de 17% de fibra e 80 kg de ATR/tc).

Esses valores de produtividade mínima esperada condizem com alguns resultados obtidos por experimentos com cana-energia descritos pela literatura, como os trabalhos de Violante (2012) e Bressiani (2017).

Violante (2012) identificou entre híbridos de cana-energia, materiais com produção de 1,5 vez mais massa em comparação com variedades comerciais tradicionais. Neste caso, em comparação ao perfil de cana-de-açúcar de Alagoas que

tem produtividade média de 55 toneladas por hectare, a cana-energia apresentaria uma produtividade de 82,5 toneladas por hectare.

Bressiani (2017), apresenta resultados de produtividade média de 125,66 toneladas por hectare para a cultivar de cana-energia Tipo 1 com 21% de fibra e 115 de ATR. Um resultado mais de duas vezes maior do que o mínimo estimado para este mesmo perfil.

Além da alta produtividade, outros fatores corroboram com a proposta de cultivo da cana-energia em complemento a cana-de-açúcar. Matsuoka *et al.* (2011), Violante (2012), Matsuoka *et al.* (2014), citam:

- a) alta taxa de perfilhamento e maior dispersão dos perfilhos, o que leva a uma menor necessidade de mudas, reduzindo os custos com o plantio;
- b) maior longevidade do canavial, podendo-se prever de 10 a 12 socas;
- c) maior rusticidade e resistência, necessitando de menos nutrientes e sendo assim uma alternativa para uso em terras degradadas e áreas marginais.

Okuno (2016), em seu estudo de desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da cana-energia, conclui que o investimento nessa variedade de cana demonstrou atratividade financeira, tendo em vista que um dos indicadores de viabilidade econômica financeira mais importantes é a produtividade média da lavoura. Isto demonstra que todos os perfis de cana-energia propostos neste trabalho têm resultados de produtividade satisfatórios, e, portanto, apresentam-se como opção de cultivo em complemento a produção de cana-de-açúcar no estado de Alagoas.

## **5 CONCLUSÃO**

Considerando que a cana-energia adotada neste trabalho apresenta um percentual de fibra variando entre 17% a 21% e quantidade de ATR de 80 kg a 120 kg por tonelada de cana, todos os perfis de cana-energia estimados demonstraram resultados satisfatórios quanto a produtividade mínima esperada, apresentando-se como uma alternativa viável para ser cultivada no estado de Alagoas de forma complementar a produção de cana-de-açúcar.

## REFERÊNCIAS

- ABRACEEL: Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia. **Cartilha Mercado Livre de Energia**. Disponível em: <[http://www.abraceel.com.br/archives/files/Abraceel\\_Cartilha\\_MercadoLivre\\_V9.pdf](http://www.abraceel.com.br/archives/files/Abraceel_Cartilha_MercadoLivre_V9.pdf)> Acesso em: 31 mar. 2017.
- ALBUQUERQUE, F. M. **Processo de fabricação do açúcar**. 3. ed. Recife. Ed. Universitária da UFPE, 2011.
- ALVES, Moisés. **Estudo de sistemas de cogeração em usinas de açúcar e álcool, com utilização do bagaço e palha da cana**. 2011. 134p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Química.
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil 2005**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)> Acesso em 12/03/2015.
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 235, 14 nov. 2006**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>> Acesso em: 29/11/2016
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica. **Ambiente de contratação regulada**. 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ambiente-de-contratacao-regulada-acr->>> Acesso em: 31 mar. 2017.
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica. **Leilões de energia elétrica**. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/resultados-de-leiloes>> Acesso: 31 mar. 2017.
- BANDEIRA, W.L. **Análise de viabilidade de implantação de usina alcooleira no estado do Ceará**. 2010. 124p. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza.

BARRETO, T. V.; COELHO, A. C. D. Destilação. In: SANTOS, F., BORÉM, A. CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2. ed. Viçosa, MG, Os Editores, 2011. Capítulo 17, p.489-513.

BEN: Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final\\_2016\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final_2016_Web.pdf)> Acesso em: 22 nov. 2016.

BNDES/CGEE. **Bioetanol de cana-de-açúcar**: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro. 2008.

BORÉM, A.; SILVA, J. A.; DIOLA, V. Biologia molecular e biotecnologia. In: SANTOS, F., BORÉM, A. CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2. ed. Viçosa, MG, Os Editores, 2011. Capítulo 13, p.355-374.

BRASIL. **Portal Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/05/etanol-atingiu-producao-recorde-de-30-bilhoes-de-litros-em-2015>> Acesso em: 23 mar. 2017.

BRESSIANI, J. A. **BioVertis: Cana-energia**. CTBE, 2017. 21 slides: color. Slides produzidos a partir do software PowerPoint. Disponível em: <[http://pages.cnpem.br/wectbe/wp-content/uploads/sites/83/2017/04/Jose\\_Bressiani\\_2017\\_03\\_30\\_Cana\\_energia\\_Granbio\\_CTBE.pdf](http://pages.cnpem.br/wectbe/wp-content/uploads/sites/83/2017/04/Jose_Bressiani_2017_03_30_Cana_energia_Granbio_CTBE.pdf)> Acesso em: 15 mai. 2017.

CARVALHO, F. S. **O setor sucroenergético no Brasil: Estado, hegemonia e relações internacionais**. 2012. 192p. Dissertação (Mestrado). UNESP – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Filosofia e Ciências, Marília-SP.

CARVALHO, M. S.; PONTES, L. A. M. **Soluções de cogeração para uma planta industrial utilizando o ciclo brayton**. Revista Eletrônica de Energia. 2014. vol.4, n.1, p. 53-64. Disponível em: <<http://www.revistas.unifacs.br/index.php/ree/article/view/3348>> Acesso em: 14 mar. 2017.

CAVALCANTE, C. S.; ALBUQUERQUE, F. M. Processo de produção do açúcar. In: SANTOS, F., BORÉM, A. CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2. ed. Viçosa, MG, Os Editores, 2011. Capítulo 15, p.391-450.

CCEE: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Mercado de energia**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/como-participar/participe/entenda\\_mercado?\\_afLoop=707207813025518#%40%3F\\_afLoop%3D707207813025518%26\\_adf.ctrl-state%3Dubsxo8a83\\_4](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/participe/entenda_mercado?_afLoop=707207813025518#%40%3F_afLoop%3D707207813025518%26_adf.ctrl-state%3Dubsxo8a83_4)> Acesso em: 31 mar. 2017.

CCEE: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Preço da energia elétrica**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos\\_menu\\_lateral/precos?\\_adf.ctrl-state=7xn68jg3c\\_4&\\_afLoop=195751614950256#%40%3F\\_afLoop%3D195751614950256%26\\_adf.ctrl-state%3D6qujw947t\\_4](https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/precos?_adf.ctrl-state=7xn68jg3c_4&_afLoop=195751614950256#%40%3F_afLoop%3D195751614950256%26_adf.ctrl-state%3D6qujw947t_4)> Acesso em: 31 mar. 2017.

CEPEA: Centro de Estudos Avançados em Economia. **Indicador Etanol**. 2017. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol.aspx>> Acesso em 03 abr. 2017.

CGEE: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. Brasília-DF. 2009.

CHIERICATO, T. **Sistemas de Cogeração**. 2010. 61p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de São Carlos. Ribeirão Preto-SP.

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries Históricas. 2016**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina\\_objcmsconteudos=2#A\\_objcmsconteudos](http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos)> Acesso em: 24 jan. 2017.

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil**. v. 1 (2017) – Brasília: Conab, 2017. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_01\\_05\\_15\\_02\\_45\\_perfil\\_sucroalcool2012e13.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_01_05_15_02_45_perfil_sucroalcool2012e13.pdf)> Acesso em: 23 mar. 2017.

CORTEZ, L. A. B. (Org.); LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP, Editora da Unicamp, 2008.

CORTEZ, L. A. B.; JUNIOR, R. B.; ALMEIDA, E. Energia da cana-de-açúcar. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria** – Cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa, MG, Os Editores, 2013. Capítulo 1, p.17-54.

DEMIRBAS, M. F.; BALAT, M.; BALAT, H. **Potencial contribution of biomass to the sustainable energy development.** Energy Conversion and Management, University Mahallesi, Trabzon, Turkey, 50, p. 1746-1760, 2009.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na indústria de cana-de-açúcar.** 2. ed. Piracicaba, STAB – Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2003.

GARCIA, J. R.; LIMA, D. A. L. L.; VIERA, A. C. P. **A nova configuração da estrutura produtiva do setor sucroenergético brasileiro: panorama e perspectivas.** Revista Economia Contemporânea [online]. 2015, vol.19, n.1, p. 162-185. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rec/v19n1/1415-9848-rec-19-01-00162.pdf>> Acesso em: 24 jan. 2017.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. **Caracterização Tecnológica para Produção de Celulose da Nova Geração de Clones de *Eucalyptus* no Brasil.** R. Árvore, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005.

HAMERSKI, Fabiane. **Estudo de variáveis no processo de carbonatação do caldo de cana.** 2009. 149p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LIMA, N. C.; PENEDO, A. S. T.; QUEIROZ, J. V.; FUKURAMA, M.; SOUZA, G. H. S. **Diferenças nos preços do etano, hidratado no mercado brasileiro.** Custos e Agronegócios on line, v.10, n.4, out-dez, 2014.

MACEDO, I. C.; CORTEZ, L. A. B. O processamento industrial da cana-de-açúcar no Brasil. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira.** Campinas, SP, Editora da UNICAMP, 2005. Capítulo 6, p.247-268.

MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Re: Quantidade de unidades produtoras [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por efocosta@hotmail.com em 20 fev. 2017.

MATSUOKA, S.; BRESSIANI, J.; MACCHERONI, W.; FOUTO, I. Bioenergia de cana. In: SANTOS, F., BORÉM, A. CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2. ed. Viçosa, MG, Os Editores, 2011. Capítulo 20, p.547-572.

MATSUOKA, S.; KENNEDY, A. J.; SANTOS, E. G. D.; TOMAZELA, A. L.; RUBIO, L. C. S. **Energy Cane: Its Concept, Development, Characteristics, and Prospect**. Hindawi Publishing Corporation, Advances in Botany, v. 2014. 13 p. 2014.

MME: Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira 2016**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/apresentacoes>> Acesso em: 24 jan. 2017.

MORAIS, P. H. D.; RESENDE, T. M.; COSTA, M. M. Biopolímeros da cana-de-açúcar. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria – Cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, MG, Os Editores, 2013. Capítulo 7, p.204-224.

OGEDA, T. L.; PETRI, D. F.S. **Hidrólise Enzimática de Biomassa**. Quim. Nova, São Paulo, v.33, n.7, p. 1549-1558, 2010.

OGTR. Office of the Gene Technology Regulator. **The biology of the Saccharum spp**. Australia Government. Department of Health. February-2008, p.1-12. Disponível em: <[www.ogtr.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/Content/biologysugarcane-toc](http://www.ogtr.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/Content/biologysugarcane-toc)> Acesso em: 17 nov. 2016.

OKUNO, F. M. **Desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da cana energia**. 2016. 94p. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sistema interligado nacional**. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/o\\_que\\_e\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx)> Acesso em: 31 mar. 2017.

RABELO, S. C.; COSTA, A. C.; ROSSELL, C. E. V. Aproveitamento de resíduos industriais. In: SANTOS, F., BORÉM, A. CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2. ed. Viçosa, MG, Os Editores, 2011. Capítulo 18, p.516-535.

ROACH, B.T.; DANIELS, J. **A review of the origin and improvement of sugarcane**. In: Copersucar International Sugarcane Breeding Workshop. 1987, Piracicaba-SP, Brasil. São Paulo, 1987.

ROCHA, G. **Análise termodinâmica, termoeconômica e econômica de uma usina sucroalcooleira com processo de extração por difusão**. 2010. 148p. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

ROSA, S. E. S.; GARCIA, J. L. F. **O etanol de segunda geração: limites e oportunidades**. Revista do BNDES, 32, p.117-156. Dezembro, 2009. Disponível em: <[www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev3204.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev3204.pdf)> Acesso em: 18 nov. 2016.

SANTOS, E. A.; SILVA, D. S.; FILHO, J. L. Q. **Composição Química do Capim-Elefante cv. Roxo Cortado em Diferentes Alturas**. Rev. Bras. Zootec. v. 30 (1), p. 18-23, 2001.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol**. Quim. Nova, Viçosa, MG, v.35, n.12, p.1004-1010, 2012.

SANTOS, F.; QUEIROZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; SOUZA, C. J. A.; GOMES, F. J. B. Produção de etanol celulósico a partir da cana-de-açúcar. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria – Cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, MG, Os Editores, 2013. Capítulo 4, p.131-161.

SILVEIRA, L. C. I. **Seleção de Famílias de Irmãos Completos em Cana-de-açúcar para Produção de Biomassa**. 2014. 88p. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Fictotenia e Fitossanitarismo, Universidade Federal do Paraná.

SOARES, G. A.; BOMTEMPO, J. V. **Novos perfis de empresas no setor sucroenergético**. In: Congresso Brasileiro de Desenvolvimento Energético. 2014, Florianópolis-SC, Brasil.

TÁVORA, F. L. **História e economia dos biocombustíveis no Brasil**. Centro de Estudos da Consultoria do Senado, 2011. 78p. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td-89-historia-e-economia-dos-biocombustiveis-no-brasil/view>> Acesso em: 24 jan. 2017.

TEW, T.L.; COBILL, R.M. Genetic Improvement of Sugarcane (*Saccharum spp.*) as an Energy Crop. In: VERMERRIS, W. **Genetic Improvement of Bioenergy Crops**, New York, Springer, 2008, cap.9, p.262.

UNICA: União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo. Luc Projetos de Comunicação, 2010.

UNICA: União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Relatório final da safra 2015/2016** – Região centro-sul. 2016. Disponível em: < [www.unicadata.com.br/download\\_media.php?idM=24141552](http://www.unicadata.com.br/download_media.php?idM=24141552)> Acesso em: 17 mai. 2017.

VASCONCELOS, J. N. Fermentação etanólica. In: SANTOS, F., BORÉM, A. CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2. ed. Viçosa, MG, Os Editores, 2011. Capítulo 16, p.451-484.

VERRI, L. B.; Disponível em <<http://www.administradores.com.br/artigos/tecnologia/administrando-o-consumo-medio-de-energia-em-um-lar-padrao-mundial-classe-media-alta/72043/>> Acesso em: 17 mai. 2017.

VIANA, L. F. **Potencial energético do bagaço e palhiço de cana-de-açúcar**. 2011. 102p. Tese (doutorado). Universidade Federal de Lavras-MG.

VIOLANTE, M. H. S. R. **Potencial de cana-energia em áreas agrícolas marginais no Brasil**. 2012. 113p. Dissertação (MPAGRO). Fundação Getúlio Vargas – Escola de Economia de São Paulo.

WILKINSON, JOHN. **O setor sucroalcooleiro brasileiro na atual conjuntura nacional e internacional**. ActionAid. 2015. 20p. Disponível em:

<[http://www.actionaid.org.br/sites/files/actionaid/setor\\_sucroalcooleiro\\_port\\_rev.pdf](http://www.actionaid.org.br/sites/files/actionaid/setor_sucroalcooleiro_port_rev.pdf)>

Acesso em: 24 jan. 2017.