



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO
APROVEITAMENTO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR GERADO NO
SETOR SUCROALCOOLEIRO DE MINAS GERAIS

BRUNA DE FÁTIMA PEDROSA GUEDES FLAUSINIO

BELO HORIZONTE
DEZEMBRO, 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO
APROVEITAMENTO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR GERADO NO
SETOR SUCROALCOOLEIRO DE MINAS GERAIS

BRUNA DE FÁTIMA PEDROSA GUEDES FLAUSINIO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de Concentração: Engenharia Nuclear e da Energia
Orientadora: Dra. Antonella Lombardi Costa
Coorientador: Dr. Ricardo Brant Pinheiro

BELO HORIZONTE
DEZEMBRO, 2015

F587p

Flausinio, Bruna de Fátima Pedrosa Guedes.

Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais [manuscrito] / Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausinio. – 2015.

xv, 115 f., enc.: il.

Orientadora: Antonella Lombardi Costa.

Coorientador: Ricardo Brant Pinheiro.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Incluem anexos e apêndices.

Bibliografia: f. 106-115.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Cana-de-açúcar - Teses. 3. Bagaço de cana - Teses. 4. Energia elétrica e calor - Cogeração - Teses. I. Costa, Antonella Lombardi. II. Pinheiro, Ricardo Brant. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO


Produção de Energia Elétrica a Partir do Aproveitamento do Bagaço de Cana-de-Açúcar Gerado no Setor Sucroalcooleiro de Minas Gerais

BRUNA DE FÁTIMA PEDROSA GUEDES FLAUSINIO

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.


Aprovada em 16 de dezembro de 2015, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Antonella Lombardi Costa - Orientadora
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. Ricardo Brant Pinheiro - Co-orientador
Prof. Aposentado - Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. Angela Pomini Macedo Ferreira
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. Auxiliadora Maria Moura Santi
UFOP/MG


Prof. Alessandra Lopes Carvalho
PUC/MG


Dr. Fabricio Vieira Andrade
IFMG

Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Senhor Jesus Cristo por tudo o que tem feito por mim e por tudo o que ainda vai fazer. A Deus seja toda a glória!

A minha família pelo suporte emocional em minha vida pessoal e profissional.

Ao meu amado esposo pela paciência e compreensão.

A minha orientadora, Prof^a Antonella, pela confiança e apoio constante no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Ricardo, pelos valiosos ensinamentos sobre energia.

A Auxiliadora pela sua fé incansável em meu potencial e pelo imenso carinho.

Ao Jonas pelo apoio nas horas difíceis e por não medir esforços em abrir oportunidades para minha vida.

A todos os professores e servidores do Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG.

A Universidade Federal de Ouro Preto por me apoiar na realização do doutorado.

A todos que torceram e torcem por mim.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Aspectos gerais do setor sucroalcooleiro brasileiro.....	1
1.2 Breve histórico da cana-de-açúcar no Brasil	4
1.3 A consolidação da indústria da cana-de-açúcar como fonte de energia	7
1.3.1 O Programa Nacional do Álcool.....	9
1.4 Os derivados da cana-de-açúcar	12
1.5 Objetivos, métodos e estrutura do trabalho	13
1.5.1 Objetivos.....	13
1.5.2 Metodologia.....	14
1.5.3 Estrutura do trabalho.....	15
2 – CENÁRIOS ATUAIS ENVOLVENDO A PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL....	16
2.1 Etapas da atividade produtiva de um empreendimento do setor sucroalcooleiro – a obtenção de seus produtos e subprodutos.....	16
2.2 Tecnologias de produção de etanol.....	23
2.3 Produção nacional de etanol, marcos legais e as projeções para o setor	26
2.3.1 Configuração da produção nacional e das exportações e importações de etanol	28
2.3.2 Cenário político para o futuro do etanol	36
2.3.3 Projeções para o setor sucroalcooleiro	39
2.3.4 Projeções para a energia proveniente da queima do bagaço.....	46
3 – A ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: IMPORTÂNCIA PARA A MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL	48
3.1 Valor energético teórico do bagaço de cana-de-açúcar	49
3.2 Tecnologias de conversão do bagaço de cana em energia elétrica.....	51
3.3 O aproveitamento do bagaço de cana para produção de energia elétrica	55
3.3.1 A reestruturação do setor elétrico brasileiro e a sua ligação com a energia elétrica proveniente da biomassa de cana-de-açúcar.....	56
3.3.2 A participação na matriz elétrica nacional da energia proveniente do bagaço de cana.....	61
3.3.3 O consumo de energia nas usinas sucroalcooleiras	64
3.3.4 Eficiência da cogeração no setor sucroalcooleiro.....	65
4 – ESTUDO DE CASO: A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA QUEIMA DO BAGAÇO DE CANA EM MINAS GERAIS	70
4.1 A representatividade do setor sucroalcooleiro na matriz energética de Minas Gerais ..	71

4.2 Configuração energética do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais a partir do uso do bagaço	74
4.2.1 Perfil tecnológico dos empreendimentos sucroalcooleiros de Minas Gerais	78
4.2.2 Análise dos rendimentos energético e exergético do sistema de cogeração do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais	80
4.2.3 O bagaço excedente dos processos industriais do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais	86
4.3 Reflexões a respeito da disponibilização dos excedentes de energia elétrica do setor sucroalcooleiro à rede de distribuição	89
4.4 Perfil socioambiental relacionado às emissões atmosféricas do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais	92
4.4.1 A questão do trabalho nos canaviais	92
4.4.2 Potencial de emissões atmosféricas a partir da queima do bagaço de cana no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais	94
4.4.3 Emissões de gases de efeito estufa provenientes do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais	98
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
REFERÊNCIAS	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma básico de um empreendimento sucroalcooleiro.....	21
Figura 2.2 – Rotas tecnológicas para produção de etanol.....	24
Figura 2.3 – Usinas de etanol no Brasil.....	45
Figura 3.1 – Esquema típico de um sistema de cogeração com turbina a vapor com presença de condensador.....	52
Figura 4.1 – Distribuição dos empreendimentos sucroalcooleiros em Minas Gerais.....	75
Figura 4.2 – Esquema simplificado de uma usina de cogeração.....	81
Figura 4.3 – Participação das fontes energéticas nas emissões de GEE em Minas Gerais.....	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 – Evolução da Oferta Interna de Energia (OIE) em relação à participação dos produtos derivados da cana-de-açúcar e da hidráulica, na matriz energética nacional, no período de 2004 a 2013.....	12
Gráfico 2.1 – Produção de etanol no período de 2004 a 2013.....	27
Gráfico 2.2 – Participação dos derivados de cana-de-açúcar na Oferta Interna de Energia.....	31
Gráfico 2.3 – Produção, exportação e importação do etanol brasileiro no período de 2004 a 2013.....	36
Gráfico 2.4 – Expectativa de evolução da produção brasileira de etanol no longo prazo.....	41
Gráfico 2.5 – Comparação entre as projeções do PNE 2030 e PDE 2023 para produção de cana-de-açúcar, açúcar, bagaço e palhas para o ano de 2020.....	44
Gráfico 4.1 – Oferta interna de energia por fonte em Minas Gerais, em 2013.....	72
Gráfico 4.2 – Evolução do consumo de bagaço de cana em Minas Gerais e no Brasil (2004 a 2013).....	73
Gráfico 4.3 – Configuração da cogeração de energia do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais entre 2009 a 2015.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Marcos legais para o setor sucroalcooleiro.....	38
Quadro 3.1 – Breve histórico da reestruturação do setor elétrico nacional a partir dos anos 1990.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Destinação do bagaço e da palha da cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração (em 10 ⁶ toneladas).....	25
Tabela 2.2 – Evolução da oferta interna de etanol (em 10 ³ m ³) no período de 2004 a 2013.....	30
Tabela 2.3 – Projeção da expansão da produção brasileira de cana e derivados no período de 2005 a 2030.....	40
Tabela 2.4 – Evolução da produção de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2050.....	42
Tabela 3.1 – Empreendimentos sucroalcooleiros aptos a participar do 1º Leilão de Energia de Reserva em 2008.....	43
Tabela 3.2 – Resultado do 1º Leilão de Energia de Reserva realizado em 2008.....	60
Tabela 3.3 – Resultados da participação do bagaço de cana no 3º Leilão de Fontes Alternativas em 2015.....	60
Tabela 3.4 – Dez maiores setores autoprodutores de energia elétrica no Brasil em 2014.....	61
Tabela 3.5 – Demanda energética no processamento industrial da cana-de-açúcar.....	63
Tabela 3.6 – Custo energético para produzir um 1L de etanol nas operações de produção e processamento da cana-de-açúcar na região paulista do Médio Paranapanema.....	64
Tabela 3.7 – Aspectos tecnológicos dos empreendimentos em atividade em 2008 do setor sucroalcooleiro no Estado de Minas Gerais.....	65
Tabela 3.8 – Características técnicas dos ciclos tradicionais de cogeração <i>topping</i> a vapor em contrapressão.....	66
Tabela 3.9 – Características técnicas dos ciclos de condensação e extração de baixa tecnologia.....	67
Tabela 4.1 – Capacidade instalada de cogeração no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais (safra 2008/2009).....	68
Tabela 4.2 – Potencial de energia teórico e técnico calculado para o setor sucroalcooleiro de Minas Gerais, em 2013.....	76
Tabela 4.3 – Distribuição dos empreendimentos do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais em 2015.....	77
Tabela 4.4 – Capacidade instalada de moagem e de cogeração do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais.....	78

Tabela 4.5 – Rendimentos energético e exergético calculados para os empreendimentos sucroalcooleiros em operação no Estado de Minas Gerais.....	79
Tabela 4.6 – Geração de bagaço excedente pelos empreendimentos sucroalcooleiros em operação no Estado de Minas Gerais.....	85
Tabela 4.7 – Investimentos financeiros em linhas de transmissão de energia elétrica excedente do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais.....	91
Tabela 4.8 – Seleção de empreendimentos sucroalcooleiros do Estado de Minas Gerais para avaliação das emissões atmosféricas.....	95
Tabela 4.9 – Amostragem das emissões atmosféricas em caldeiras a bagaço de cana.....	96
Tabela 4.10 – Padrões de emissão para MP e NOx segundo Deliberação Normativa COPAM N° 011/86 e Resolução CONAMA N° 382/06.....	97
Tabela 4.11 – Monitoramento da concentração de NOx nas caldeiras a bagaço de cana.....	98
Tabela 4.12 – Fator de emissão de poluentes nos gases provenientes da queima do bagaço de cana em caldeiras.....	98
Tabela 4.13 – Valores de GWP para o potencial global de aquecimento dos gases de efeito estufa.....	99
Tabela 4.14 – Emissão potencial de gases de efeito estufa, óxidos de nitrogênio e material particulado em Minas Gerais relativos à queima de bagaço.....	99
Tabela 4.15 – Emissões da queima de resíduos agrícolas no Estado de Minas Gerais.....	101
Tabela 4.16 – Emissão de gases de efeito estufa (GEE) evitada com a eliminação da queima da cana em Minas Gerais.....	102
Tabela 4.17 – Resultados da análise das emissões de gases de efeito estufa para o setor sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais.....	102

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CGEE – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

USEPA – United States America Environmental Protection Agency

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MME – Ministério de Minas e Energia

PEMC – Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

PNE – Plano Nacional de Energia

PNMC – Plano Nacional sobre Mudança do Clima

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais

SIAMIG – Associação das Indústrias Sucreenergéticas de Minas Gerais

CO₂e – carbono equivalente

GEE – gases de efeito estufa

NO_x – óxidos de nitrogênio

tep – tonelada equivalente de petróleo

RESUMO

Em plena era das mudanças climáticas, o Brasil destaca-se como o detentor da matriz energética mais renovável em todo mundo (41%), segundo a Empresa de Pesquisa Energética no Balanço Energético Nacional de 2014, ano base 2013. Entre as fontes responsáveis pela renovabilidade da matriz energética brasileira está a biomassa de cana-de-açúcar, cujos produtos assumiram, a partir de 2007, a liderança na oferta interna de energia, ultrapassando a energia hidráulica, que é a principal responsável pela geração de energia elétrica no país. Contudo, também já é realidade a geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana nas plantas de cogeração do setor sucroalcooleiro. Dentre os maiores produtores nacionais de cana-de-açúcar está o Estado de Minas Gerais, onde os derivados da cana-de-açúcar representam quase 16% da demanda por fonte de energia. Possuindo um representativo número de empreendimentos, com 39 usinas em operação em 2015, o setor sucroalcooleiro de Minas Gerais apresenta um potencial de produção de energia elétrica excedente e, portanto, passível de ser comercializada para a rede de distribuição, capaz de ofertar cerca de 15% da energia elétrica proveniente de centrais térmicas que atendem ao Estado. Além disso, a geração de energia elétrica a partir de uma fonte renovável contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, além de representar uma alternativa energética à hidroeletricidade, uma vez que a geração do bagaço ocorre durante a safra da cana-de-açúcar nos períodos de estiagem, quando os reservatórios diminuem o volume de água. Este trabalho quantifica e demonstra a capacidade de produção de eletricidade a partir da massa de bagaço de cana residual, tomando como referência as tecnologias de geração termelétrica utilizadas pela indústria do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais. Avaliando informações de processos ambientais disponíveis dos empreendimentos em operação em Minas Gerais, estimou-se a geração de bagaço excedente em torno de 167,72 t/h. Aplicando-se a esse total de bagaço excedente os melhores rendimentos encontrados nas usinas de cogeração em operação, estima-se que o setor sucroalcooleiro mineiro tem potencial de comercialização de energia elétrica em torno de 847 MWh, considerando-se a energia disponível.

Palavras-chave: Cana-de-Açúcar. Setor Sucroalcooleiro. Bagaço de Cana. Cogeração. Energia Elétrica.

ABSTRACT

In the age of climate change, Brazil stands out as the holder of more renewable energy mix worldwide (41%), according to the Energy Research Company (*Empresa de Pesquisa Energética*) in the National Energy Balance (*Balanço Energético Nacional – BEN*) 2014, the base year 2013. Among the sources responsible for renewability of the Brazilian energy matrix is the biomass sugarcane, whose products have taken, from 2007, the lead in domestic energy supply, exceeding the hydraulic energy, which is primarily responsible for electricity generation in the country. However, also already is reality the electricity generation from the burning of sugarcane bagasse in cogeneration plants of this sector. Among the largest national sugarcane producers is the state of Minas Gerais, where the derivatives of sugarcane represent almost 16% of the demand for energy source. Having a representative number of installations, with 39 plants in operation in 2015, the sugar and alcohol sector of Minas Gerais has a potential surplus of electricity production to be sold to the distribution network, able to offer about 15% of electricity from thermal power plants serving the state. Moreover, the generation of electricity from a renewable source contributes to the reduction of greenhouse gas emissions, and represents an energy alternative to hydroelectricity, since the bagasse generation occurs during the harvest of sugar cane during the dry season, when reservoirs decrease the volume of water. This paper quantifies and demonstrates the electricity production capacity from the residual bagasse mass, with reference to the thermoelectric generation technologies used by the industry in the sugar and alcohol sector of Minas Gerais. Evaluating information available in the environmental processes of the plants in operation in Minas Gerais, it was estimated the generation of surplus bagasse around 167.72 t/h. Applying to this total of surplus bagasse the best yields found in cogeneration plants in operation, it is estimated that the sugar and alcohol sector has the potential for sale of electricity around 847 MWh, considering the available energy.

Key words: Sugar Cane. Sugar and Alcohol Sector. Sugar Cane Bagasse. Cogeneration. Electricity.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais do setor sucroalcooleiro brasileiro

A energia é um dos maiores impulsionadores do desenvolvimento e da qualidade de vida de qualquer nação do mundo e, atualmente, uma das maiores discussões a cerca do tema energético diz respeito não apenas à sua disponibilidade, mas às formas mais sustentáveis de sua obtenção. Isso porque, num cenário de crescente discussão a respeito das consequências das mudanças climáticas, as principais fontes energéticas que ditaram e ainda ditam os rumos do desenvolvimento no mundo todo estão enfrentando o surgimento de uma nova preocupação em ampliar o espaço destinado às chamadas fontes renováveis de energia.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, o Brasil se destaca pela grande participação de energia renovável na produção total de energia. Enquanto no resto do mundo a participação da energia renovável na Oferta Interna de Energia era de 13% e nos países do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) era de 15%, no Brasil essa fonte de energia chegou a 46%, em 2011 (MDIC, 2013). Atualmente, com cerca de 40% de participação de renováveis em sua matriz energética, o Brasil mantém-se entre as mais elevadas do mundo, com pequena redução devido à menor oferta de energia hidráulica (EPE, 2015).

Entre as fontes renováveis de energia presentes na matriz brasileira está a biomassa, que se beneficia das grandes áreas tropicais e chuvosas do país, oferecendo grande potencial no setor energético nacional. Ela é classificada como recurso nas categorias de biomassa energética florestal, seus produtos e subprodutos ou resíduos; de biomassa energética agrícola, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e de rejeitos urbanos (EPE, 2007). Resumidamente, a biomassa é toda matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, usada para produzir energia, como é o caso dos produtos derivados da cana-de-açúcar, que assumiram, a partir de 2007, a liderança da oferta interna de energia no Brasil, ultrapassando a da hidroeletricidade, embora essa última seja a principal responsável pela geração de energia elétrica no país.

Outro aspecto relevante é que a evolução no uso dos produtos da cana-de-açúcar tem ultrapassado as fronteiras da produção de açúcar e álcool (etanol¹), pois há geração de energia

¹ Neste trabalho, optou-se por utilizar o termo etanol no lugar de álcool, respeitando a Resolução ANP Nº 9, de 01/4/2009, que estabelece essa nomenclatura padrão internacional para os postos e como forma de promover o biocombustível brasileiro.

elétrica a partir dos resíduos do setor sucroalcooleiro, em que a principal biomassa residual é constituída pelo bagaço de cana-de-açúcar – objeto de estudo desse trabalho.

Entende-se como bagaço de cana-de-açúcar um material constituído por fibras celulósicas resultante da moagem da cana. O bagaço é a principal fonte de energia do setor sucroalcooleiro, por meio da queima em plantas de cogeração. Rico em matéria orgânica, o bagaço pode ser uma fonte de energia através da produção de etanol de segunda geração. Outros usos menores do bagaço são voltados para a fertilização do solo, produção de ração animal, polímeros, papel e de placas de aglomerados (BANERJEE, PANDEY, 2002). As cinzas do bagaço de cana, provenientes da queima, também têm sido consideradas como um possível material na indústria de cimento, pois seu alto teor de sílica (SiO_2), permite seu uso como substituição de parte do cimento Portland, em argamassas e concretos (OLIVEIRA et al., 2009).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana e açúcar e o segundo maior em etanol. O país também é o maior exportador de açúcar e de etanol. Em 2013, o etanol respondeu por 15,4 % do combustível utilizado no setor de transporte rodoviário em território nacional, o que representa 31,3% do combustível utilizado pelos veículos leves. A produção nacional de açúcar, no mesmo ano foi de 37,3 milhões de toneladas (EPE, 2014a).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, a produção de cana-de-açúcar, em 2009, alcançou 622,6 milhões de toneladas. Desde então, devido a problemas de safra, a produção de cana-de-açúcar sofreu quedas. Contudo, a produção de cana-de-açúcar conseguiu recuperar-se a partir de 2012, quando alcançou 593,6 milhões de toneladas. O Balanço Energético Nacional de 2014 divulgou que, na safra² de 2013/2014, a produção de cana-de-açúcar superou o recorde de 2009, alcançando 648,1 milhões de toneladas (EPE, 2014a).

A partir desses valores, pode-se concluir que a contribuição da biomassa proveniente do bagaço de cana pode ser muito interessante para a matriz energética brasileira, quanto à diversificação das fontes de geração de energia elétrica, uma vez que a cogeração de energia a partir do bagaço de cana, além de suprir as necessidades energéticas de processos industriais, gera excedentes de energia elétrica.

A biomassa participante da matriz energética brasileira é constituída pela lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações, sendo que a contribuição dessas fontes para a

² Para calcular a safra de cana-de-açúcar, o Balanço Energético Nacional considera o intervalo de abril do ano anterior a abril do ano seguinte, a fim de abranger os diferentes meses de colheita nas regiões produtoras.

oferta interna de energia elétrica atingiu 7,6%, em 2013. De todo o bagaço de cana gerado na safra 2013/2014, foram destinadas 57,5 milhões de toneladas para o setor energético (EPE, 2014a).

Do ponto de vista institucional, é importante destacar que, em 2008, o Ministério de Minas e Energia – MME promoveu o primeiro leilão de energia de reserva para a geração de energia elétrica a partir dessa fonte, com a entrega da produção em 2009 e 2010, estando o maior potencial de aproveitamento de biomassa concentrado nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás, que são os maiores produtores de cana-de-açúcar do país, como destacado.

Com uma área de produção de cana-de-açúcar de 805,5 mil ha, o setor sucroalcooleiro do estado de Minas Gerais e seu potencial de geração de eletricidade sempre estiveram atrás apenas do maior produtor nacional – o estado de São Paulo, que possui 4.685,7 mil ha. Mas, esse cenário vem apresentando alterações ao longo dos anos, colocando Minas Gerais em terceira posição no ranking nacional de produção de cana-de-açúcar. A partir da safra de 2011/2012, o estado de Goiás assumiu o posto de segundo lugar, fato que pode ser justificado pelo aumento de 47,5 mil hectares de sua área de plantio em função das lavouras para atender às novas usinas sucroalcooleiras inauguradas recentemente, e da expansão da área de unidades mais antigas, correspondendo a um total de 864,2 mil ha (CONAB, 2015).

Apesar de atualmente ocupar a terceira posição nacional na produção de cana-de-açúcar, Minas Gerais conta com 46 empreendimentos sucroalcooleiros, estando prevista, para os próximos anos, a entrada em operação de mais 21 empreendimentos, que hoje se encontram em fase de licenciamento ambiental prévio e de instalação. De acordo com os processos registrados no órgão ambiental do estado de Minas Gerais – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, a capacidade instalada do setor sucroalcooleiro é de 418.801,3 toneladas de cana por dia.

Para se formar uma ideia da importância do setor sucroalcooleiro em Minas Gerais, segundo o Balanço Energético Nacional de 2014, o consumo final energético de bagaço de cana no Brasil, em 2013, foi de 138.420 milhões de toneladas e, em Minas Gerais, de 16.869 milhões de toneladas, correspondentes a 12,2% do total nacional. Em termos de projeções futuras, a Empresa de Pesquisas Energéticas – EPE, por meio do Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030, projetou um crescimento expressivo da produção de cana-de-açúcar no Brasil para o período de 2010 a 2030, devendo passar de $518,4 \times 10^6$ t/ano para $1.141,2 \times 10^6$ t/ano, enquanto que, em Minas Gerais, considerando o mesmo período, a produção deverá

passar de $39,8 \times 10^6$ t/ano para $110,0 \times 10^6$ t/ano (EPE, 2007). Contudo, novos estudos estão sendo elaborados pela EPE, tendo como foco a preparação de cinco estudos que irão compor o Plano Nacional de Energia 2050 – PNE 2050. No segundo e último estudo disponibilizado pela EPE, até o presente momento, que trata da Demanda de Energia para o período de 2013 a 2050, a produtividade da cana-de-açúcar, no país, passará de 82,9 t/ha para 96,7 t/ha. Esse cenário indica que a expansão da produção de cana-de-açúcar necessitará de uma menor expansão de área plantada (EPE, 2014b).

1.2 Breve histórico da cana-de-açúcar no Brasil

Cultivada no Brasil há quase cinco séculos, a história da cana-de-açúcar mistura-se com a própria História do Brasil, uma vez que foi um dos pilares do processo de colonização do país e até se tornou um ciclo de grande destaque na economia brasileira.

A planta, originária de Papua-Nova Guiné, chegou ao Brasil durante a colonização de Portugal no país. Têm-se notícias de que no ano de 1532 foi instalado o primeiro engenho de cana-de-açúcar pelo colonizador português Martin Afonso de Souza, durante uma expedição de colonização criada pelo imperador D. João III. Ele construiu o primeiro engenho de açúcar no litoral de São Paulo, na Capitania de São Vicente. Os historiadores consideram esse fato o marco zero da colonização do país. Inicialmente a Coroa Portuguesa precisava ocupar as terras no Brasil, para não perder o direito de uso e como o açúcar era um produto que estava em crescente consumo na Europa e com um bom preço no mercado europeu, este foi o produto escolhido para produção nas terras brasileiras. Embora tenha sido introduzida no estado de São Paulo, foi a produção de cana no nordeste brasileiro, sobretudo onde hoje estão os estados de Pernambuco e da Paraíba, que abasteceu o mercado europeu nos primeiros séculos após sua introdução no Brasil. Tinha início, então, o chamado ciclo de cana-de-açúcar, que liderou a economia nacional durante dois séculos, com a produção do açúcar e da cachaça (CORTEZ, 2010; ÚNICA, 2011).

Por volta de 1550, o Brasil estava na liderança da produção mundial de açúcar. Diante de sua importância adquirida ao longo dos anos, não é difícil entender o porquê da escolha do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. O solo de massapê, de grande fertilidade e encontrado em abundância nas terras brasileiras, o curto prazo requerido pela cultura, o clima favorável para o crescimento e a maturação da planta e a grande disponibilidade de terras contribuíram definitivamente para o estabelecimento da cana-de-açúcar no país.

De início, durante o século XV e XVI, Portugal precisava investir na instalação da indústria açucareira no Brasil. Além disso, era preciso dispor de embarcações para o transporte do produto. Para tanto, associaram-se aos holandeses que, em troca, ficaram com a distribuição e comercialização do açúcar na Europa. Essa associação foi possível porque, anteriormente à união das coroas ibéricas, Portugal e os Países Baixos, em que se inclui a Holanda, mantinham um ativo comércio.

Dessa forma, a produção açucareira, que desenvolveu-se sobretudo no litoral nordestino, organizou-se de modo a proporcionar altos rendimentos a fim de compensar os investimentos. Essa produção, baseada na grande propriedade, monocultura, escravista e destinada aos mercados externos, passou por uma conjuntura de expansão entre 1570 e 1620, devido ao crescimento da demanda na Europa e por não haver praticamente concorrência (FAUSTO, 1995).

Entretanto, em 1580, quando a coroa espanhola assumiu o trono português, na medida em que havia, à época, um conflito aberto entre a Espanha e os Países Baixos, o relacionamento entre Portugal e Holanda sofreu mudanças, sobretudo na comercialização do açúcar por parte dos holandeses. A partir daí, tem início as mais importantes invasões do período colonial – as invasões holandesas –, que envolveram longos períodos de duração, conflitos e consequências.

No primeiro momento, os embargos espanhóis aos navios holandeses em portos lusitanos geraram revolta entre os comerciantes portugueses que, finalmente, em 1609, conseguiram suspendê-los por meio da assinatura da Trégua dos Doze Anos entre Espanha e Holanda. Segundo Fausto (1995), essa trégua deixou Portugal em situação relativamente calma. Contudo, com o fim da trégua, em 1621, os espanhóis trataram logo de reassumir seus embargos. No mesmo ano, os holandeses criaram a Companhia Holandesa das Índias Ocidentais, formada com capitais do Estado e de financistas particulares, tendo como seus alvos principais a ocupação das zonas de produção açucareira na América portuguesa e o controle do suprimento de escravos.

Em 1624, a Companhia das Índias Ocidentais invadiu o nordeste brasileiro, ocupando a cidade de Salvador. Durante a ocupação, boa parte da população refugiou-se no interior, em fazendas próximas à capital e organizaram a resistência, chefiada por Matias de Albuquerque e pelo bispo Dom Marcos Teixeira. Assim, utilizando-se da tática de guerrilhas para conter o avanço do inimigo e, contando com a ajuda de reforços da Espanha e de Portugal, eles impediram a expansão dos invasores. Uma frota luso-espanhola composta de 52 navios e mais

de 12 mil homens juntou-se, a seguir, às tropas combatentes, o que levou os holandeses a se renderem em maio de 1625 (FAUSTO, 1995).

Os holandeses, por sua vez, não se deram por vencidos e organizaram uma nova invasão ao Brasil, tendo como alvo, desta vez, a capitania de Pernambuco. Anos depois de serem expulsos da Bahia, em 1630, os holandeses invadiram novamente o Brasil e conseguiram ocupar Olinda e Recife, onde permaneceram até 1654. Essa segunda invasão holandesa, que durou vinte e quatro anos, pode ser dividida em três fases distintas:

- Fase inicial (1630 – 1636): período de conquista holandesa da zona produtora.
- Fase média (1637 – 1644): caracterizada pela fixação dos holandeses sob o domínio do conde Maurício de Nassau, que chegou ao Brasil em 1637. Com o objetivo de consolidar as conquistas holandesas e obter a confiança da população, Maurício de Nassau foi o responsável por uma série de importantes iniciativas políticas e realizações administrativas, como a abertura de casas bancárias, melhoramentos públicos, incentivos culturais, tolerância religiosa etc. No entanto, parcelas consideráveis da população recusaram-se a se submeter ao domínio holandês, além disso, havia divergências religiosas e a Companhia das Índias Ocidentais pressionou o aumento de vários gêneros consumidos pela população, gerando revoltas. Por desavenças com a Companhia, Maurício de Nassau regressou à Europa em 1644.
- Fase final (1645 – 1654): período em que ocorreu o declínio e a expulsão dos holandeses. Livre do domínio espanhol, Portugal começou a apoiar a resistência ao domínio holandês no Brasil. Houve uma série de conflitos. O impasse foi quebrado nas duas Batalhas dos Guararapes (1648 e 1649). Em 1653, uma esquadra portuguesa cercou o Recife, levando à expulsão dos holandeses no ano seguinte.

É importante destacar que as invasões holandesas trouxeram consequências importantes para o Brasil. A quebra do monopólio da produção açucareira, promovida pelos conhecimentos adquiridos pelos holandeses durante sua permanência no Brasil, foi determinante para o aumento da concorrência. Isso levou à queda nos preços do açúcar brasileiro no mercado internacional e, com os custos de produção inalterados, o país foi obrigado a reduzir drasticamente suas exportações.

Como visto, durante os séculos XVI e XVII, essa foi a principal atividade econômica desenvolvida no país, sendo que, no fim do século XVII, a descoberta de ouro em Minas Gerais levou a retração na produção de açúcar até o fim do século XIX. Porém, a renda gerada com a cana-de-açúcar no período de 1500 a 1822 foi quase duas vezes superior à renda gerada

pelo ouro (SILVA; FISCHETTI, 2008). Além disso, no século XVIII, houve o surgimento do açúcar de beterraba.

Os anos que se seguiram foram marcados por diversas mudanças no cenário internacional; fatos como a Primeira Guerra Mundial influenciaram na produção do açúcar a partir da cana. Como na Europa o açúcar produzido a partir da beterraba estava condenado pela guerra, o Brasil passou por um breve momento de investimentos para modernização da produção, mas o mercado muito instável acabou levando os agricultores a produzirem a cachaça que, por algum tempo, sustentou o cultivo da cana.

A posição atual do Estado de São Paulo como maior produtor de cana-de-açúcar iniciou-se com a crise do café, em 1929, onde a expansão da produção baseou-se em grandes propriedades e grandes usinas. Dessa forma, São Paulo tornou-se mais competitivo, ultrapassando ao longo dos anos a produção de Pernambuco.

1.3 A consolidação da indústria da cana-de-açúcar como fonte de energia

Nas últimas décadas, o país tem acompanhado uma verdadeira revolução na indústria canavieira, que se reinventou, por meio do emprego de novas tecnologias, como por exemplo, a introdução de difusores na extração do caldo e o emprego caldeiras de maior pressão e turbinas de multi-estágios nas usinas de cogeração, atingindo novos mercados e marcando presença indispensável na matriz energética brasileira.

A produção de cana-de-açúcar origina duas grandes fontes energéticas: o etanol e o bagaço de cana-de-açúcar, sendo o primeiro empregado no setor de transporte e o segundo como energético em instalações específicas para geração de energia mecânica, térmica e elétrica.

O emprego do etanol como combustível iniciou-se antes da Segunda Guerra Mundial. Mas, seu emprego era bem restrito, embora já existissem algumas iniciativas do governo brasileiro em promover o desenvolvimento do setor sucroalcooleiro, a exemplo, da criação do Instituto do Açúcar e do Alcool – IAA, em 1933, pelo presidente Getúlio Vargas, o qual tinha como principais objetivos o incentivo e o controle da produção de açúcar e álcool, bem como de suas matérias-primas em todo território nacional (LEITE, 2007). O IAA foi extinto na década de 1990.

De acordo com Leite (2007), o álcool representou, em 1941, menos de 1% do consumo nacional de energia. Apesar de insignificante, ao longo dos anos o etanol foi

ganhando espaço com inovações tecnológicas que culminaram com a transformação do etanol hidratado em etanol anidro³, sendo esse último mais adequado à mistura com a gasolina automotiva comum.

Adentrando o século XX, o mundo passa a ter uma nova potência energética: o petróleo, que substituiu fontes energéticas utilizadas na época como o carvão mineral, usado para iluminação e como fonte de calor, além introduzir derivados de seu processo de refino como a gasolina, alavancando a indústria automobilística. Assim, foi criada a base energética do mundo.

Com as crises do petróleo⁴ ocorridas na década de 1970, a cana-de-açúcar ressurge no Brasil como uma importante alternativa energética e o governo federal interveio na questão de forma direta, por meio da criação do Programa Nacional do Álcool – Proálcool, que será discutido em seguida.

Ainda em termos de energéticos, conforme citado anteriormente, o setor sucroalcooleiro também conta com o bagaço de cana-de-açúcar, que de acordo com a CONAB (2011), não é nenhuma novidade, pois a geração de energia com a queima do bagaço é uma prática rotineira nas usinas sucroalcooleiras há décadas. A novidade fica a cargo da geração de excedentes de energia elétrica que são passíveis de exportação para o sistema elétrico nacional abrindo, assim, uma nova oportunidade de negócios para o setor. Tudo isso sem falar no ganho ambiental, em matéria de emissões de gases de efeito estufa, por meio do emprego de uma fonte renovável de energia. Contudo, esse tema será tratado nos próximos capítulos desse trabalho.

³O etanol hidratado possui teor alcoólico mínimo de 96°GL e pode ser usado em motores fabricados ou adaptados especificamente para esse fim, em particular com a adoção de taxas de compressão mais elevadas, visando utilizar adequadamente a octanagem mais alta do etanol (BNDES e CGEE, 2008). Já o etanol anidro apresenta teor alcoólico de 99,7°GL e seu uso é em mistura com a gasolina A para a obtenção da gasolina C, a qual é a única gasolina que pode ser comercializada no território nacional para abastecimento de veículos automotores.

O °GL é a sigla usada para grau Gay Lussac, que é a fração em volume da mistura álcool e água.

⁴A primeira crise do petróleo ocorreu em 1973, quando os maiores produtores diminuíram a produção, elevando o preço do barril de petróleo, quadruplicando seu valor em poucos meses (de US\$ 2,90 para US\$ 11,65). Entre os fatores que levaram ao aumento do preço do petróleo está a criação da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), que passaram a controlar a oferta desse produto no mercado e os embargos feitos aos EUA e à Europa Ocidental que apoiaram a ocupação de territórios palestinos durante a Guerra do Yom Kippur. A segunda crise do petróleo ocorreu em 1979 como consequência da desorganização do setor petrolífero do Irã, em função da queda do ditador Xá Reza Pahlevi pela revolução islâmica liderada pelo aiatolá Khomeini. Os preços do barril de petróleo também triplicaram nessa época, chegaram ao equivalente a US\$ 36. Em meados dos anos 1980 os preços voltam a cair.

1.3.1 O Programa Nacional do Álcool

Já no início do século XX, houve a primeira intervenção governamental na produção nacional de etanol, que previa a adição de 2% desse combustível à gasolina. Contudo, durante as primeiras décadas essa postura não tinha nenhuma relação com a diminuição das importações nacionais de combustíveis, muito menos com as questões de cunho ambiental. A ideia era criar um mercado que pudesse absorver o excedente da produção de açúcar, ao convertê-lo em etanol (LEITE, 2010, p. 17). Isso levou a um longo processo de aumento na adição de etanol à gasolina. Entretanto, somente no final do século XX, a adição do etanol à gasolina ganhou significativa importância, por meio da criação do Programa Nacional do Álcool e do Programa Nacional de Controle da Poluição Veicular – PROCONVE, estabelecido pelo CONAMA.

O Programa Nacional do Álcool – Proálcool contribuiu efetivamente para a diversificação da matriz energética brasileira e teve início em 14 de novembro de 1975, através do Decreto n° 76.593 promulgado pelo presidente Ernesto Geisel, surgindo como medida imediata para o primeiro choque do petróleo em 1973.

Basicamente, o Proálcool, de início, estimulou a adição de etanol anidro à gasolina reduzindo assim sua importação. Posteriormente, o etanol hidratado pode ser utilizado como combustível, graças às adaptações nos motores dos automóveis, substituindo completamente a gasolina. É importante ressaltar que a expansão da produção de etanol e o surgimento dos carros movidos a este combustível não foi imediata. O primeiro automóvel movido exclusivamente a álcool foi o Fiat 147, lançado pela indústria automobilística em 1978. Entretanto, a partir de 1986 teve início a queda no consumo de etanol, em função dos preços do açúcar no mercado internacional. Já na década de 1990 o governo brasileiro inicia a importação do etanol dos EUA. Além disso, os motores dos carros apresentam problemas técnicos com queda de desempenho nos períodos frios.

Além da hegemonia, ainda que breve (cerca de uma década) dos automóveis a álcool, o Brasil foi um dos pioneiros na eliminação total do chumbo tetraetila⁵, o que acarretou ainda mais vantagens com relação à diminuição das emissões veiculares.

Em termos legais, as proporções na mistura gasolina e etanol foram variando até atingir 22%, valor esse consagrado pelo Conselho Nacional do Petróleo – CNP, por meio da Portaria CNP N° 144/1984 e do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos

⁵ O chumbo tetraetila ($Pb(C_2H_5)_4$) era usado como aditivo adicionado a gasolina para elevar sua octanagem.

Automotores – PROCONVE, estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 18, de 6 de maio de 1986.

Durante a vigência do Proálcool houve boa evolução da produção e da participação das destilarias anexas às usinas e das usinas autônomas, ou seja, o país vivenciou o sucesso do programa com a ampliação da capacidade produtiva do setor sucroalcooleiro. Houve ainda o surgimento de empresas como a Dedini e a Zanini, no Estado de São Paulo, que se tornaram grandes fornecedoras de equipamentos e inovação tecnológica, pois souberam como acompanhar a evolução tecnológica e como se capacitar para entregar novas usinas e destilarias nas diferentes fases do Proálcool (CORTEZ, 2010).

Outros destaques relacionados ao Proálcool são:

- (a) primeiro programa, no mundo, de produção de veículos movidos a combustível não derivado de petróleo;
- (b) redução do IPI para veículos com motores a álcool;
- (c) fixação do preço do etanol hidratado em 35,3% a menos que o valor da gasolina;
- (d) redução significativa da importação de derivados de petróleo no período de vigência do programa;
- (e) expansão da frota de veículos a álcool, com uma produção de 95% em 1986.

No entanto, no início dos anos 1990, o Proálcool começa a sofrer fortes golpes em função do encadeamento de uma série de diversos fatores dentro e fora do Brasil, como por exemplo, a redução significativa do preço do barril de petróleo, de US\$ 40 para valores entre US\$ 12 e US\$ 20 dólares e a conseqüente queda no preço da gasolina, e do momento de estagnação econômica no Brasil.

Embora, no país, o estímulo para o consumo do etanol hidratado tenha sido mantido pelo fato de haver uma política de associar o preço do etanol ao da gasolina, ocorreu um forte desestímulo na produção do setor, pois os produtores passaram a receber mais pela produção de açúcar, levando à queda na produção desse combustível que passou a faltar no abastecimento ao consumidor final (SILVA; FISCHETTI, 2008). Dessa forma, o preço atrativo do etanol para o consumidor e a redução de impostos para automóveis com essa tecnologia, levaram à uma grande demanda por esse combustível, gerando uma forte crise de abastecimento na entressafra.

Tais fatores afetaram a credibilidade do Proálcool e a redução de estímulos do seu uso pelos proprietários de veículos provocou a diminuição em sua demanda e, conseqüentemente, na produção de automóveis a álcool.

Cabe aqui ressaltar que o que manteve a produção do etanol foi a decisão do CONAMA de adicionar o etanol à gasolina para reduzir os níveis de emissões atmosféricas.

Acredita-se que a última fase do Proálcool, compreendida entre 1995 e 2000, serviu para colocar ainda mais em evidência um ponto de grande discussão a respeito do comportamento das indústrias sucroalcooleiras, que é o crescimento da produção de açúcar em detrimento da produção do etanol, quando este primeiro apresenta um mercado mais atrativo. Durante esses anos, para se ter uma ideia, as exportações brasileiras de açúcar passaram de cerca de 1 milhão de toneladas para quase 10 milhões de toneladas ao ano.

A partir de 2003, tem início a produção dos carros *flex*, que surgiram com o propósito de usar etanol ou gasolina, em qualquer proporção.

A fim de garantir o abastecimento do mercado *flex*, bem como dar continuidade à mistura do etanol à gasolina, o governo publicou medidas provisórias que alteraram o valor da mistura, aumentando ou diminuindo a porcentagem de etanol na gasolina, a fim de traçar estratégias com relação ao petróleo ou à produção de etanol. Isso porque, quando se eleva o percentual de etanol anidro a ser misturado à gasolina, obtêm-se algumas modificações no cenário energético com relação ao consumo final da gasolina e da produção de etanol. Ou seja, o controle exercido sobre o mercado do etanol deve-se justamente às variações nesse percentual de mistura, que teve início em 1931, quando atingia até 5%. No decorrer dos anos, já ocorreram mais de 50 variações na mistura do etanol anidro na gasolina, sendo o valor máximo já adotado até hoje de 25% de etanol anidro.

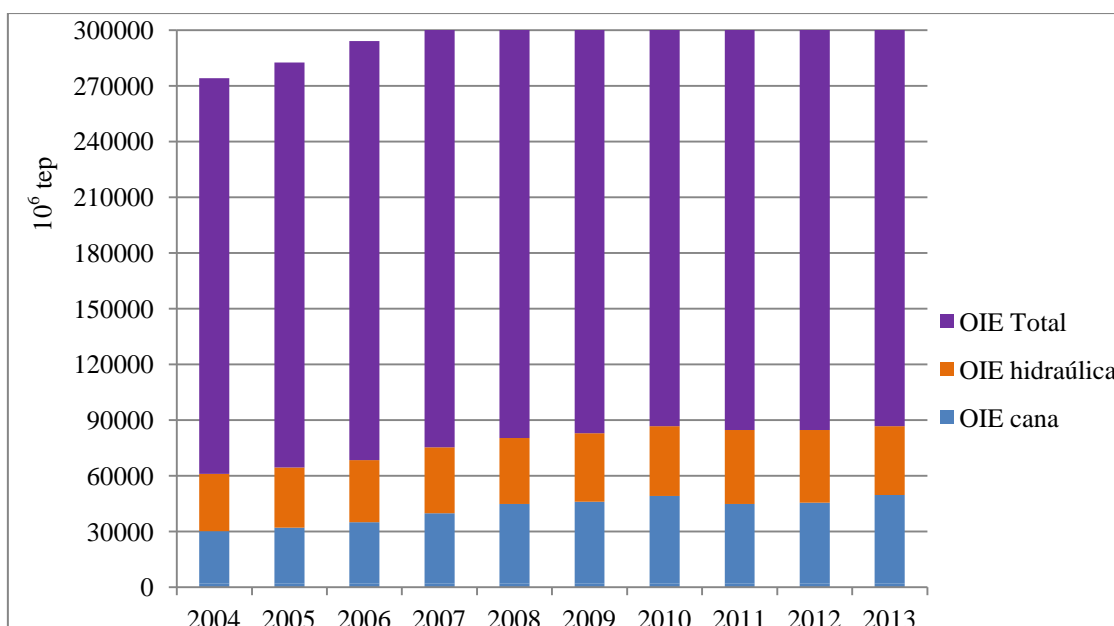
Atualmente, o Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool – CIMA estabeleceu, por meio da Resolução Nº 1, de 04 de março de 2015, o percentual obrigatório de adição de etanol anidro de 27% à gasolina comum e de 25% à gasolina Premium, a partir do dia 16 de março de 2015. Os percalços dessa nova medida ainda serão avaliados ao longo da próxima safra da cana (2015/2016) e da produção e exportação de gasolina automotiva. Além disso, há uma sinalização do governo brasileiro em aumentar os níveis de adição de etanol à gasolina, com intenção de atingir o índice de 30% até o início do ano de 2016, o que impactará diretamente na geração de mais matéria-prima para cogeração nas usinas sucroalcooleiras (PORTAL BRASIL, 2015).

1.4 Os derivados da cana-de-açúcar

A oferta de energia da biomassa do setor sucroalcooleiro está associada à evolução da capacidade de produção de cana-de-açúcar, que não está relacionada apenas à expansão de novas áreas de produção agrícola, mas sobretudo com a conjuntura do cenário nacional dos seus derivados⁶.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional, os produtos derivados da cana-de-açúcar foram o grande destaque na matriz energética brasileira em 2007, quando ultrapassaram a energia hidráulica e eletricidade na oferta interna de energia do país, permanecendo atrás apenas do petróleo e seus derivados (EPE, 2008). Desde o ano de 2007, os produtos derivados da cana-de-açúcar vêm mantendo essa posição. De acordo com o BEN 2014, na safra 2013/2014 esses produtos garantiram o fornecimento de 47.603×10^3 tep (16,1% da Oferta Interna de Energia) contra 37.054×10^3 tep da energia hidráulica (12,5% da Oferta Interna de Energia). O Gráfico 1.1 ilustra a importância de tal fonte para a matriz energética nacional.

Gráfico 1.1 – Evolução da Oferta Interna de Energia (OIE) em relação à participação dos produtos derivados da cana-de-açúcar e da hidráulica, na matriz energética nacional, no período de 2004 a 2013



Fonte: Elaborado a partir de EPE (2014)

⁶ O Balanço Energético Nacional classifica como produtos derivados da cana-de-açúcar aqueles que são obtidos a partir da cana esmagada para produção de açúcar e álcool. São considerados como produtos primários o caldo da cana, melaço, bagaço, pontas, folhas e olhaduras e, como produtos secundários, o álcool anidro e hidratado.

A produção de energia primária dos derivados da cana-de-açúcar apresentou os seguintes resultados para a safra de 2013/2014: a) caldo de cana: 185.331 x 10³t, ultrapassando o auge da produção que foi em 2010, quando esse valor foi de 185.080 x 10³t; b) melaço: 20.150 x 10³t e c) bagaço de cana: 163.142 x 10³t (EPE, 2014a).

Trata-se, então, de um setor importante para a economia brasileira e, em particular, para a economia de Minas Gerais, e que se encontra em grande expansão, promove a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico, a formação de recursos humanos qualificados e a geração de postos de trabalho.

O setor sucroalcooleiro também é relevante para o Brasil dispor de maior autonomia energética proveniente de fontes renováveis e, conseqüentemente, de segurança de abastecimento, manter liderança tecnológica e promover a redução do impacto ambiental, que decorre do descarte do bagaço. Por outro lado, a falta de estudo sistemático sobre o potencial do uso do bagaço de cana-de-açúcar para a geração de excedente de energia elétrica em Minas Gerais confere ao trabalho o caráter de ineditismo, que se exige de uma tese de doutorado.

1.5 Objetivos, métodos e estrutura do trabalho

1.5.1 Objetivos

Objetivo geral

Avaliar o potencial de produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais e de venda do excedente às empresas concessionárias de energia elétrica, baseando-se em ampla busca de dados disponíveis.

Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são listados a seguir:

(a) estimar a massa total de bagaço de cana gerada nas indústrias do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais, identificando a fração destinada à produção de energia elétrica (quando for o caso) e a fração residual de bagaço;

- (b) desenvolver um estudo sobre o estado da arte das tecnologias de produção de eletricidade a partir do bagaço de cana no Brasil;
- (c) fazer uma ampla busca de dados disponíveis sobre todos os empreendimentos sucroalcooleiros de Minas Gerais;
- (d) quantificar a capacidade de produção de eletricidade a partir da massa de bagaço de cana residual, tomando como referência as tecnologias de geração termelétrica utilizadas pela indústria do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais;
- (e) analisar as emissões de gases de efeito estufa relacionada à cadeia energética do setor sucroalcooleiro;
- (f) identificar os impactos econômicos, sociais e ambientais associados à produção de eletricidade a partir do bagaço de cana.
- (g) fazer o estudo de caso do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais, considerando os rendimentos das usinas de cogeração e a geração de excedentes de bagaço de cana, a partir dos dados obtidos em (c).

1.5.2 Metodologia

O presente trabalho de doutorado é baseado em investigação documental. Nesse sentido, foi realizada extensa pesquisa e investigação de dados e informações setoriais sobre o estado da arte das tecnologias de produção de eletricidade a partir do aproveitamento do bagaço de cana, no Brasil, sobretudo no Estado de Minas Gerais, em livros textos, teses e dissertações, artigos técnicos e relatórios setoriais, cujas informações e dados foram complementados com informações obtidas em base de dados disponibilizadas por instituições governamentais, como o Ministério de Minas e Energia – MME, a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o Ministério do Planejamento, e o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA.

De forma análoga, foi realizada uma pesquisa para obter informações e dados sobre as características tecnológicas das usinas termelétricas do setor sucroalcooleiro instalado em Minas Gerais, dados de eficiência de conversão energética, massa de bagaço de cana gerada no processo de produção de açúcar e álcool e massa de bagaço que é empregada na produção de eletricidade. O universo da pesquisa foi constituído por todas as indústrias instaladas no território mineiro. A obtenção de informações sobre os empreendimentos que constituem o

setor sucroalcooleiro mineiro, a análise e uniformização dos dados e a preparação e organização de tabelas constituiu um rigoroso trabalho de pesquisa e foi imprescindível para a análise do setor neste trabalho.

As principais fontes de informação foram os processos de licenciamento ambiental desses empreendimentos, que constam do acervo da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais – SEMAD e o trabalho de Matheus (2010).

Por fim, foi realizada uma análise dos rendimentos energético exergético das usinas de cogeração presentes no setor sucroalcooleiro, a fim de identificar a geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana excedente, bem como impactos socioambientais relacionados às emissões atmosféricas da produção de energia a partir do uso do bagaço de cana, tomando como base os estudos ambientais disponibilizados pela SEMAD, relatórios da Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais e de estudos que constituem o Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais.

1.5.3 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo este primeiro constituído pelas questões introdutórias ao tema, fazendo uma abordagem geral e dinâmica da configuração do setor sucroalcooleiro no Brasil, apresentando também os objetivos e métodos.

O segundo capítulo trata do cenário atual sobre a produção de etanol no Brasil, descrevendo os processos produtivos da indústria sucroalcooleira, os aspectos legais, econômicos e políticos ligados ao setor sucroalcooleiro nacional e as projeções futuras conforme planejamento energético adotado no país.

O terceiro capítulo aborda a importância do setor sucroalcooleiro na matriz elétrica nacional, além de tratar da parte tecnológica da produção sucroalcooleira desenvolvida no país e a cogeração de energia a partir da queima do bagaço. São considerados os aspectos mais relevantes da configuração industrial dos empreendimentos do setor e a demanda energética em seus processos industriais.

O quarto capítulo constitui-se da apresentação do estudo de caso, que analisa o setor sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais, no tocante à produção de energia elétrica pelos empreendimentos em suas usinas de cogeração. Além do rendimento na geração de energia elétrica, também são avaliados os aspectos socioambientais do setor.

Por fim, o capítulo cinco apresenta as conclusões do trabalho.

2 – CENÁRIOS ATUAIS ENVOLVENDO A PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL

O Brasil domina o ciclo completo da produção de açúcar e de etanol, desde a lavoura de alta produtividade até a instalação dos equipamentos necessários. De acordo com Cortez (2010) esse é o “modelo brasileiro”, que se desenvolveu nos últimos 40 anos, com exceção do período de 1979 a 1985, quando, na vigência do Proálcool, foram instaladas várias destilarias autônomas. Segundo o autor, a produção de etanol estava, em quase todas as unidades de produção, associada ao uso da sacarose que, anteriormente, encontrava-se no mel final. Diferentemente de outros produtores de açúcar, o Brasil não exaure tanto esse mel final, pois, normalmente, o mistura ao caldo de cana para produzir etanol. “No nosso jeito de fazer açúcar, produzimos um produto de melhor qualidade e menor custo que os competidores” (CORTEZ, 2010). Assim, o modelo brasileiro possui a particularidade de ter criado um processo produtivo integrado, em usinas de produção de etanol e açúcar.

2.1 Etapas da atividade produtiva de um empreendimento do setor sucroalcooleiro – a obtenção de seus produtos e subprodutos

A cadeia produtiva de uma usina de açúcar ou de álcool é composta por uma fase agrícola e uma fase industrial. Basicamente, inicia-se no cultivo da matéria-prima, passando pela colheita, processamento industrial e finalmente a comercialização dos produtos finais.

A seguir, cada etapa que compõe essa cadeia produtiva é descrita de forma a levar à compreensão do modelo brasileiro de produção sucroalcooleira, destacando suas particularidades que, posteriormente, servirão para dar embasamento ao foco principal desse presente trabalho, que é a geração de excedentes de energia elétrica pelo setor.

A descrição do processo está baseada nas publicações do Centro de Gestão de Estudos Estratégicos – CGEE, sobre o bioetanol⁷ de cana-de-açúcar (BNDES, CGEE, 2008; CGEE, 2009).

Tudo começa com o cultivo da cana-de-açúcar. Nessa etapa, o primeiro passo é a escolha da variedade de cana-de-açúcar a ser cultivada, considerando os aspectos morfoclimáticos da região escolhida, como sabido, há uma melhor produtividade da cana-de-açúcar em locais que apresentam duas estações distintas – uma quente e úmida, que favorece

⁷ Termo usado por alguns autores. Refere-se ao etanol produzido a partir de biomassa, seja ela cana-de-açúcar, milho, mandioca ou beterraba.

o processo de germinação e formação de brotos, e outra fria e seca, que favorece a maturação e o acúmulo de sacarose. Este último fator é importante para medições de ATR – Açúcar Total Recuperável, que corresponde à quantidade de açúcar disponível na matéria-prima, subtraído das perdas no processo industrial (EPE, 2014a) e nos preços do açúcar e do etanol comercializados pelas usinas nos mercados interno e externo. Interessante ressaltar que o ATR é analisado, assim que a matéria-prima chega à usina e, dentre as mais de 600 espécies de cana-de-açúcar existentes no Brasil, esses dados precisam ser levados em conta para garantir qual delas será mais rentável e mais adaptável às condições de solo e de clima onde a cana será cultivada.

Outro fator relacionado à etapa de cultivo da cana-de-açúcar refere-se ao seu ciclo. No Brasil, o ciclo da cana dura, em média, seis anos, sendo necessário refazer o plantio após esse período. Durante o ciclo são realizados cinco cortes, sendo que o primeiro ocorre de 12 a 18 meses após o plantio e, posteriormente, a cada um ano. Depois do primeiro corte, a cana cresce por rebrotamento e a cada rebrota há uma queda na produtividade. A produtividade média está na faixa de 50 t/ha a 100 t/ha, sendo que na região Centro-Sul, onde há maior concentração das usinas, a faixa de produtividade é de 78 t/ha a 80 t/ha e mais especificamente no Estado de São Paulo os níveis produtividade atingem 80 t/ha a 85 t/ha.

Há o costume de se utilizar o termo “cana soca” para cada ciclo e, usualmente, devido à queda na produtividade, os produtores preferem adotar quatro cortes. Ou seja, as canas mais velhas têm maior probabilidade de não serem colhidas, pois possuem menor produtividade, o que resultará em uma menor rentabilidade aos produtores. Há ainda a chamada “cana bisada”, que é aquela que deixou de ser colhida em uma safra por motivos climáticos ou econômicos. Logo, a falta de investimentos e incentivos fiscais é um agravante para o setor sucroalcooleiro, haja vista que há um número crescente de canaviais que precisam ser renovados.

O próximo passo é a colheita, que caracteriza o chamado ano civil da cana e apresenta variações conforme a região do país. No Centro-Sul, a colheita é realizada no período de abril a dezembro e na região Nordeste, de agosto a abril. Em ambas as regiões, esses são períodos de maior seca, o que favorece a maturação da cana. Assim, alterações climáticas, como longos períodos de estiagem, podem influenciar diretamente na safra da cana.

A colheita da cana-de-açúcar propriamente dita é realizada, no Brasil, predominantemente por meio da colheita manual, embora a utilização de máquinas e equipamentos especializados venha sendo muito divulgada. Desde os primórdios, a colheita

era feita de forma exclusivamente manual, sendo necessária a queima da palha para viabilizá-la. O trabalho na colheita manual é bastante exaustivo e as condições inadequadas deste fizeram com que diversas vezes ele fosse considerado de caráter exploratório, levando muitos trabalhadores a terem sua saúde prejudicada de forma irreversível, algumas vezes chegando até a morte. Hoje, com a crescente preocupação ambiental, essa questão ganha ainda mais um forte agravante que é o fato de tal prática contribuir para as emissões de dióxido de carbono, além de elevar os custos financeiros e ambientais com a lavagem da matéria-prima para posterior processamento industrial.

Pelos motivos citados acima, muitos estados produtores tem assumido o compromisso legal de determinar a obrigatoriedade de mecanização da colheita, que visa, inclusive, aproveitar também a palha como insumo energético para o próprio setor sucroalcooleiro. À frente dessa questão está o Estado de São Paulo, que por meio da publicação da Lei Estadual N° 11.241, de 19 de setembro de 2002, regulamentada pelo Decreto Estadual N° 47.700, de 11 de março de 2003, disciplina a eliminação progressiva da queima da palha como método de limpeza do canavial. Além disso, em 2006, graças ao Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético, uma vertente do Programa Etanol Verde, em São Paulo, os métodos de colheita da cana-de-açúcar vem passando por uma profunda reformulação. De acordo com as Secretarias do Meio Ambiente e da Agricultura do Estado de São Paulo, a safra 2013/2014 apresentou um índice de mecanização de 83,7% das áreas destinadas à cultura da cana em todo o estado (UNICA, 2014).

A fase agrícola termina com o transporte, que deve ser feito da forma mais rápida possível, visto que a cana-de-açúcar é perecível e não pode ser armazenada por muito tempo, pois isso levaria a uma queda na qualidade do produto. Normalmente, a cana leva menos de 24 horas para ser entregue na usina após a colheita, tendo-se, para isso, um prazo limite de 72 horas. Ao chegarem à usina os caminhões são pesados e posteriormente são retiradas amostras para que se faça análise laboratorial dos teores de sacarose. Os resultados desses testes norteiam todo o processamento na usina. Além disso, o teor de sacarose também irá determinar o valor monetário pago pela tonelada de cana-de-açúcar. Segundo o CONSECANA-SP⁸ (2006) esse valor é baseado no parâmetro Açúcar Total Recuperável –

⁸ O Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo - CONSECANA-SP, criado em 1999, é uma associação formada por representantes das indústrias do setor sucroalcooleiro e pelos plantadores de cana-de-açúcar, que tem como principal responsabilidade zelar pelo relacionamento entre ambas as partes. Esse conselho criou o sistema de pagamento da cana-de-açúcar pelo teor de sacarose – o ATR, que é de adoção voluntária.

ATR⁹, o qual corresponde a uma base comum de comparação para o açúcar contido na cana que chega à usina para ser processada, bem como o açúcar e o etanol produzidos, todos convertidos nesta mesma base. Ou seja, o ATR representa todos os açúcares presentes na matéria-prima.

Logo que a cana-de-açúcar chega à usina, inicia-se a fase industrial. A tecnologia de produção de etanol e açúcar é muito semelhante, do ponto de vista de processos, em todas as usinas brasileiras. As diferenças podem estar nos tipos e qualidades dos equipamentos, controles operacionais e gerenciais, o que irá garantir a otimização de toda a cadeia produtiva. Ocorre ainda o fato de as destilarias serem autônomas ou anexas ao processo de fabricação do açúcar. Contudo, a maioria das usinas brasileiras é capaz de produzir tanto etanol quanto açúcar, variando a proporção de acordo com os interesses de mercado da usina.

A primeira etapa do processo industrial é a moagem da cana. Contudo, em se tratando de colheita manual, antes de ser moída, a cana passa por uma etapa de lavagem para retirar as impurezas provenientes da queima da cana, terra e torrões. Após a lavagem, a cana inteira é picada para ser moída. Vale ressaltar que a cana colhida com colheitadeira mecânica não passa por essas duas etapas, pois elas não são queimadas e a própria máquina já faz o corte da cana.

A moagem é uma etapa que serve para a retirada do caldo, que será devidamente tratado para a produção de açúcar ou de etanol. A extração do caldo pode ser feita em moendas, que é o método mais empregado atualmente, ou em difusores. Nas moendas, a cana-de-açúcar é encaminhada por esteiras até um conjunto de rolos montados em conjuntos com quatro a sete ternos de moenda sucessivos. Como após a passagem pelo primeiro terno de moenda, a proporção de caldo em relação à fibra cai de, aproximadamente, 7 para algo entre 2 a 2,5, torna-se difícil extrair o caldo residual. A solução adotada nesse caso é a embebição, que consiste na injeção de água na camada de cana entre os dois últimos ternos. O resíduo gerado – o bagaço, apresenta uma umidade final em torno de 50%.

O caldo da cana também pode ser extraído por meio dos chamados difusores, que constituem uma evolução tecnológica dos últimos anos, sendo empregados em algumas novas usinas. Após a cana ser cortada e desfibrada, é realizada uma sequência de lavagens com água quente, fazendo que, por meio de lixiviação, os açúcares presentes cedam. Por último, a cana passa por um rolo de secagem.

⁹ O ATR tem a função de medir a qualidade da cana-de-açúcar em função da concentração total de açúcares (sacarose, glicose e frutose) recuperáveis no processo industrial. Essa medida é expressa em kg por tonelada de cana.

O caldo extraído segue para a produção de açúcar ou de etanol. Em uma usina sucroalcooleira, preferencialmente, os primeiros caldos retirados são destinados para a produção de açúcar, em função de seus maiores índices de sacarose. Na produção do açúcar, o caldo passa primeiramente por um tratamento químico para coagular, flocular e precipitar as impurezas que serão retiradas por meio de decantação, seguida, de uma filtração. Após a filtração, obtêm-se o caldo tratado e outro resíduo – a torta de filtro.

A etapa de filtração é a última etapa comum entre a produção de açúcar e etanol. A partir desse ponto, se a opção for a obtenção de açúcar, o caldo tratado é encaminhado para a etapa de evaporação e cozimento, que são responsáveis pela concentração e cristalização da sacarose, uma vez que nem sempre se consegue uma cristalização completa em apenas um ciclo. Isto é, a solução produzida, chamada de mel, é novamente re-injetada no processo com o intuito de se tentar recuperar mais açúcar. Em seguida, com a sacarose já cristalizada, em uma centrífuga, os cristais de açúcar são separados do melaço, que é uma solução remanescente, mas rica em sacarose e, portanto, passível de ser fermentada para a produção de etanol. Os cristais de açúcar seguem para secadores e, em seguida, são peneirados e armazenados. O tempo total de processamento para a produção de açúcar é de cerca de 15 horas e para cada tonelada de cana processada são obtidos 0,120 toneladas de açúcar.

A produção de etanol pode seguir a partir do caldo tratado ou do melaço ou da mistura desses (mosto). A produção de etanol, feita a partir tanto do caldo tratado como da mistura caldo e melaço, utiliza o processo de fermentação, que é realizado em dornas de fermentação alcoólica. O material é colocado nas dornas e posteriormente adicionam-se leveduras¹⁰, responsáveis pela fermentação. O processo leva cerca de 8 horas a 12 horas. Após a fermentação, o líquido resultante é o vinho fermentado, que possui uma concentração de álcool variando de 7% a 10%. Para que o produto seja de maior concentração, o álcool desse vinho é recuperado em colunas de destilação e nelas se obtém o etanol na forma hidratada com cerca de 96% de álcool e 4% de água, em volume. Nessa etapa, há a geração de outro resíduo – a vinhaça¹¹. Na destilação, para cada litro de etanol hidratado produzido há a geração de 0,010 m³ a 0,013 m³ de vinhaça. O etanol hidratado segue, então, para venda como produto final ou é direcionado para a produção de etanol anidro.

Para se obter o etanol anidro, que possui 99,7% em volume de álcool, é necessária a etapa de desidratação. Um método muito conhecido, no Brasil, para obtenção do etanol anidro

¹⁰ Microrganismos da espécie *Saccharomyces cerevisiae*.

¹¹ A vinhaça também conhecida por vinhoto, restilo ou garapão é o resíduo líquido proveniente da destilação do vinho, produto da fermentação alcoólica do caldo de cana, do melaço ou da mistura de caldo e melaço para a obtenção do etanol (CORTEZ, 2010).

é a destilação azeotrópica, que emprega um hidrocarboneto – o ciclohexano – como agente desidratante. Nesse processo, o ciclohexano forma com o etanol hidratado uma mistura azeotrópica ternária¹² (ciclohexano + etanol + água), que possui ebulição inferior ao do etanol anidro. O ciclohexano é adicionado no topo da coluna de destilação e o etanol anidro é retirado pelo fundo da coluna, graças à diferença do ponto de ebulição.

A Figura 2.1 apresenta um fluxograma do processo produtivo, contemplando as etapas descritas anteriormente.

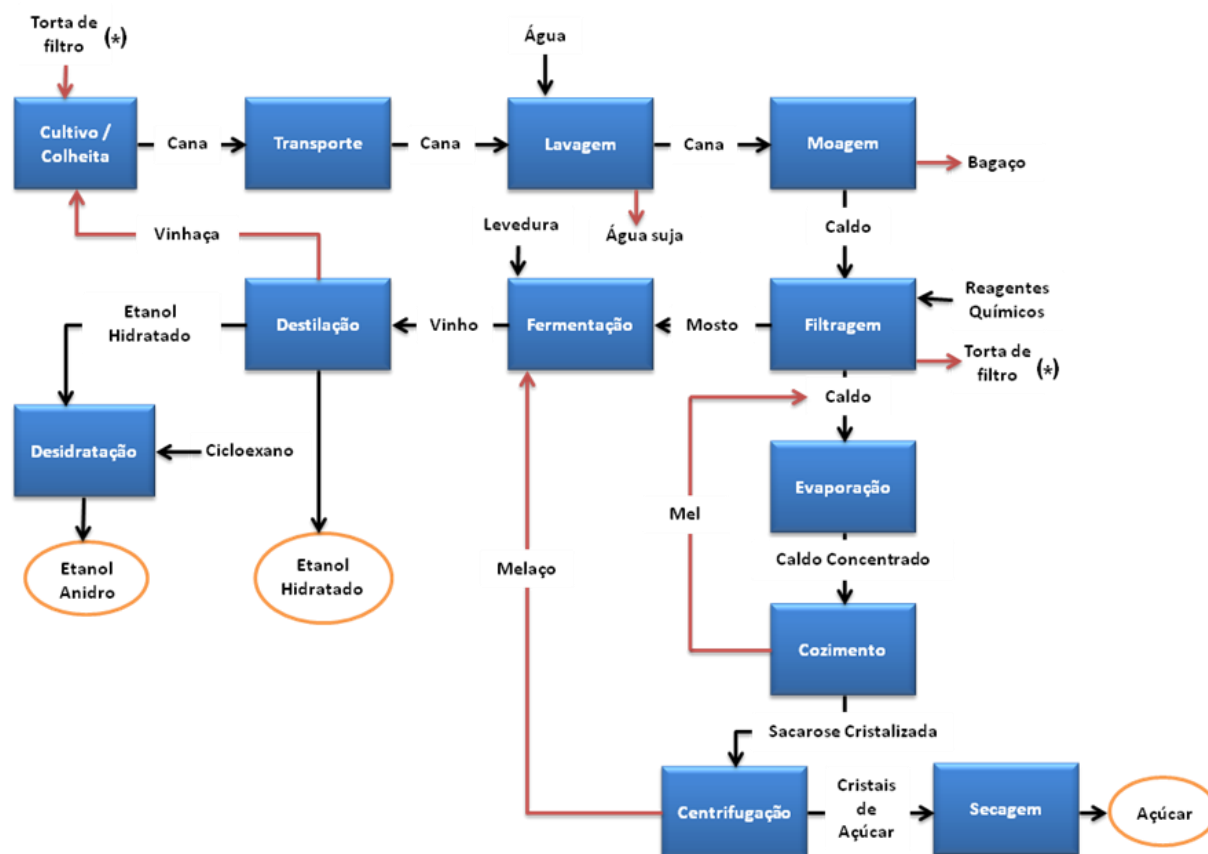


Figura 2.1 – Fluxograma básico de um empreendimento sucroalcooleiro

Fonte: SILVA (2010)

A respeito do processamento da cana-de-açúcar, um aspecto muito relevante reside no fato de o setor gerar grandes quantidades de resíduos e efluentes líquidos na obtenção do etanol e do açúcar. Para minimizar a poluição e atender às normas legais vigentes, o setor

¹² Uma mistura azeotrópica caracteriza-se como uma mistura homogênea de líquidos, em que a separação desses não se dá por métodos convencionais de destilação, devido à diferença de seus pontos de ebulição. A mistura azeotrópica ternária contendo o hidrocarboneto, o etanol e a água, ao ser condensada, dá origem a duas fases líquidas imiscíveis e por isso ela é denominada mistura azeotrópica heterogênea (CORTEZ et al, 2008).

sucroalcooleiro vem dando alguns destinos a esses resíduos, como é o caso da aplicação da vinhaça na fertirrigação, que consiste na aspersão direta desse efluente líquido nas lavouras de cana-de-açúcar. Assim como a torta de filtro, a vinhaça tem seus valores nutricionais conhecidos desde a década de 1950, mas sua utilização teve início apenas na década de 1970 e intensificou-se em 1999, em função da mudança cambial e da elevação dos preços dos fertilizantes químicos (ROSSETTO; SANTIAGO, 2015). Dessa forma, apresentando em sua composição vários elementos químicos que foram absorvidos pela cana, provenientes do solo, durante sua fase de desenvolvimento, na vinhaça encontram-se o potássio, o fósforo, o nitrogênio e outros micronutrientes, que acabam entrando como um reforço na fertilização da lavoura de cana-de-açúcar, reduzindo o uso de fertilizantes a base de petróleo.

Cita-se, também, outros destinos para a vinhaça. Em Minas Gerais, por exemplo, a vinhaça está sendo destinada às áreas de reflorestamento e plantações de eucalipto, atividade que está regulamentada pela Deliberação Normativa do Conselho de Política Ambiental – COPAM N° 184, de 13 de junho de 2013.

Porém, o potencial poluidor da vinhaça é algo preocupante, pois contém alta demanda bioquímica de oxigênio¹³ (DBO), que levou à proibição de seu descarte em rios, lagos e cursos de água. Além disso, como citado anteriormente, o volume gerado de vinhaça é muito grande. Se aplicada em excesso na fertirrigação, pode causar sérias alterações na qualidade da matéria-prima para indústria, como a diminuição da qualidade tecnológica do caldo (CORTEZ, 2010). Uma das alternativas estudadas para a minimização desse problema é a utilização da vinhaça na produção de biogás em biodigestores anaeróbicos. Dessa forma, há possibilidade de geração de mais uma fonte de energia para contribuir para a matriz energética do país, além de reduzir os impactos ambientais desse efluente, que é considerado um dos problemas mais preocupantes do setor sucroalcooleiro.

Segundo VALLE (2004), a biodigestão anaeróbia é uma das alternativas mais interessantes para o tratamento da vinhaça. A tecnologia da biodigestão anaeróbia possui uma elevada eficiência na remoção da DBO, o que leva à produção de um biofertilizante neutro, que é mais vantajoso que o vinhoto “in natura” no processo de fertirrigação, produzindo um biogás com teor de metano da ordem de 60%. Além disso, a inclusão do tratamento anaeróbio do vinhoto na indústria do etanol aumenta a eficiência exergética do sistema em torno de 13%.

¹³ A DBO é um parâmetro utilizado para medir a quantidade de oxigênio consumido na degradação da matéria orgânica no meio aquático pela ação de microorganismos.

Outro resíduo resultante do processo industrial é a torta de filtro, gerada na etapa de tratamento do caldo. Devido ao seu potencial orgânico, ela é utilizada como adubo no cultivo da cana, pois possui elevada concentração de fósforo. Para tanto, uma análise da composição da torta deve ser feita na usina para se conhecer a sua composição antes de levá-la para ser utilizada nas áreas de plantio, pois também pode acarretar sérios problemas ambientais.

O bagaço de cana seria um problema complicado, pois sua composição orgânica precisaria ser avaliada, assim como seu potencial poluidor, antes do seu descarte final. Contudo, suas boas características para uso energético tornaram-no uma importante fonte energética do setor sucroalcooleiro. Ao longo dos anos, o setor vem aprimorando a técnica de aproveitamento do potencial calorífico do bagaço em instalações próprias, que passaram a ser o motor energético do setor – as usinas de cogeração. Além disso, o bagaço pode competir diretamente com o caldo da cana-de-açúcar na produção de etanol de segunda geração (etanol lignocelulósico).

2.2 Tecnologias de produção de etanol

Em função das várias fontes primárias¹⁴ que podem ser empregadas para a sua produção, o etanol pode ser produzido a partir de diferentes rotas tecnológicas, como mostra a Figura 2.2. Entretanto, no Brasil, a cana-de-açúcar é a principal fonte de energia primária para a sua obtenção.

¹⁴ As fontes primárias para obtenção de etanol devem conter quantidades significativas de amido ou açúcares, como por exemplo, o milho, a beterraba, a mandioca e outros.

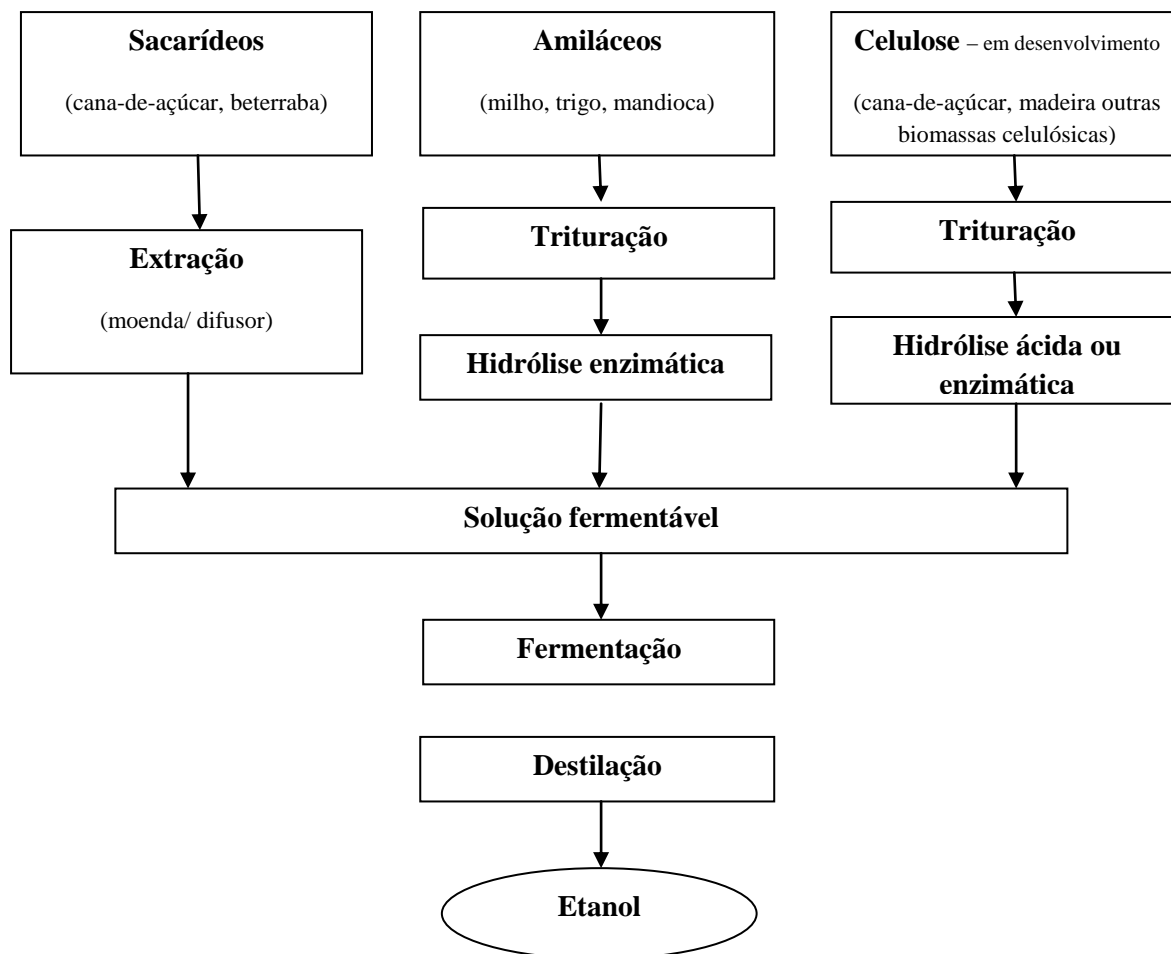


Figura 2.2 – Rotas tecnológicas para produção de etanol

Fonte: Adaptado de BNDES, CGEE (2008)

As rotas para produção de etanol celulósico são duas: a hidrólise ácida ou química e a hidrólise enzimática (Figura 2.2). A hidrólise química consiste na obtenção de etanol a partir do ataque à parede celular por meio de solventes ácidos ou básicos. O objetivo é “afrouxar” e quebrar os polímeros da parede celular vegetal, liberando monossacarídeos e oligossacarídeos fermentáveis. No entanto, essa técnica gera resíduos químicos e apresenta elevados custos. A hidrólise enzimática, por sua vez, depende da “maquinaria bioquímica de micro-organismos” (fungos e bactérias) para desmontar a parede celular e obter o etanol celulósico. É um processo de natureza microbiológica, em que ocorre um ataque enzimático à parede celular (CORTEZ, 2010).

A produção de etanol utilizando celulose está em fase de desenvolvimento, mas isso diz respeito à melhorias na tecnologia aplicada, pois já existem alguns empreendimentos que

comercializam o etanol proveniente da celulose, por meio da hidrólise, denominado de etanol de segunda geração.

Recentemente, a Raízen inaugurou, no interior paulista, uma unidade produtora de etanol celulósico a partir do processamento do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, com capacidade de produção de 40.000 m³ por safra. Em Minas Gerais há a S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool, no município de Iturama, que também produz etanol de segunda geração.

Os ganhos com a introdução dessa rota tecnológica estão previstos em importantes estudos de planejamento energético desenvolvidos no país, bem como no próprio Plano Nacional de Energia – PNE 2030, lançado em 2007, conforme pode-se observar na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Destinação do bagaço e da palha da cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração (em 10⁶ toneladas)

	2005	2010	2020	2030
Produção de cana	431	518	849	1.140
Biomassa produzida	117,8	141,9	233,5	313,5
Bagaço	57,8	69,7	114,6	153,9
Palha	60,0	72,2	118,9	159,6
Biomassa ofertada	57,8	73,3	132,3	185,8
Uso do bagaço	100%	100%	100%	100%
Recuperação da palha	0%	5,0%	14,9%	20,0%
Destinação da biomassa				
Produção de etanol	0,0	0,3	17,7	18,7
Produção de eletricidade	57,8	73,0	114,6	167,1

Fonte: EPE (2007)

Assim, na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, o bagaço de cana pode ser considerado como um subproduto a ser aproveitado em caldeiras para geração de calor e eletricidade. A partir da disponibilidade da tecnologia de hidrólise, etanol e eletricidade concorrem pelos mesmos insumos.

Outra questão a ser considerada no cenário futuro projetado no PNE 2030 é a recuperação da palha deixada no campo. Com a disseminação da prática de mecanização da colheita da cana-de-açúcar, além da introdução de máquinas de corte e colheita da cana, estão sendo feitas algumas adaptações no maquinário para retirada da palha que, inclusive, pode ser enfardada na própria área de colheita da cana.

2.3 Produção nacional de etanol, marcos legais e as projeções para o setor

Seguindo o desenvolvimento do tema do presente trabalho, seria tão mais simples trabalhar apenas com os dados da produção de cana-de-açúcar para evidenciar o potencial de geração de bagaço de cana a ser transformado em bioeletricidade. No entanto, isso prejudicaria o entendimento de fatores relacionados a cada um dos produtos do setor sucroalcooleiro que, sem sombra de dúvida, impactam direta e indiretamente na disponibilidade desse insumo que poderia ser usado para a geração de excedente de energia elétrica. Assim exposto, são apresentados pontos relevantes da produção de etanol como um todo, partindo de sua obtenção, bem como de seu maior concorrente – o açúcar, indo-se de encontro às questões relacionadas com sua oferta no mercado interno e externo.

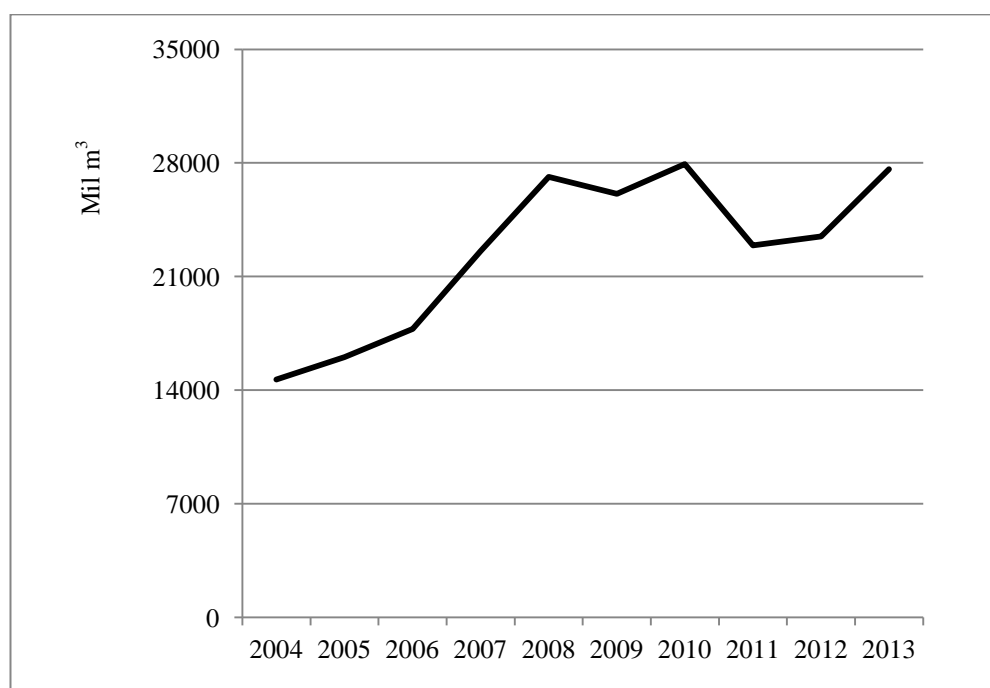
O etanol pode ser utilizado como combustível em motores de combustão interna com ignição por centelha (Ciclo Otto) de duas maneiras: em mistura do etanol anidro com a gasolina A (gasolina pura), formando a gasolina C; ou como etanol hidratado. No Brasil, as especificações, que devem ser atendidas pelos produtores e respeitadas por toda a cadeia de comercialização, são estabelecidas pela Portaria ANP N° 309, de 27 de dezembro de 2001, para a gasolina misturada com etanol anidro, e pela Resolução ANP N° 36, de 6 de dezembro de 2005 para o etanol hidratado e anidro.

De acordo com o BEN 2014 – ano base 2013, a produção de etanol no Brasil totalizou 27,61 mil m³, como pode ser observado no Gráfico 2.1. Quanto ao seu emprego, destaca-se que apenas 5,35% desse total foram usados para fins não energéticos e os outros 94,65% no setor de transporte rodoviário (EPE, 2014a).

Tomando-se os últimos dez anos, verifica-se que a produção de etanol sofreu significativa queda a partir de 2011. De acordo com a CONAB (2011), a safra 2010/2011 enfrentou queda de produtividade devido à estiagem prolongada na região Centro-Sul e má distribuição das chuvas nas regiões Norte e Nordeste. Além disso, houve uma migração maior de cana para a fabricação de açúcar, em função da forte demanda mundial pelo produto.

Para a safra 2011/2012, a redução foi ainda maior, 11,8% (CONAB, 2011). Esta última também apresentou 8,4% de queda no total de cana moída que foi de 623,905 milhões de toneladas, o que significou um *déficit* de 52 milhões de toneladas em relação à safra de 2010/2011.

Gráfico 2.1 – Produção de etanol no período de 2004 a 2013



Fonte: EPE (2014)

A safra 2012/2013 apresentou um crescimento de produtividade de 4,2% em relação a 2011/2012, totalizando 69,85 t/ha. O total de cana moída também teve aumento de 6,2%, significando 34,76 milhões de toneladas a mais do que na safra anterior, totalizando a produção de 595,13 milhões de toneladas (CONAB, 2012).

O incremento da produção na safra 2012/2013 é justificado pela recuperação das condições climáticas, a partir do segundo semestre de 2012, nas principais regiões produtoras da Região Centro-Sul, e pela entrada em produção de áreas renovadas e áreas novas que apresentam maior produtividade (CONAB, 2012).

Conforme pode ser observado no Gráfico 2.1, a partir de 2010, a produção de etanol sofreu reveses consideráveis, em função de problemas na safra de cana-de-açúcar, do solo pela falta de renovação dos canaviais, resultando em preços mais elevados para esse biocombustível. Houve também queda na produção devido ao desgaste do solo. Isso levou à migração do consumo de combustíveis veiculares para a gasolina, evidenciando a soberania do consumidor com os veículos *flex fuel*, que permitem a troca do combustível. Soma-se a esse comportamento, os programas de governo do presidente do país na época, Luís Inácio Lula da Silva, que incentivou o consumo de bens da linha branca e de automóveis com isenção do IPI, como forma de atitude perante a crise econômica mundial de 2008. Essa

política acabou aumentando, enormemente, a fabricação de automóveis no Brasil para atender à demanda do mercado consumidor.

Por conta disso, a produção nacional de gasolina voltou a crescer, porém não foi suficiente para atender à crescente demanda levando a um déficit desse produto, o que fez com que o país necessitasse importar o combustível (RIBAS, 2014).

O BEN 2014 divulgou para o setor de transportes, em 2013, a taxa de participação de 15,4 % para o etanol e, da gasolina automotiva de 31,7%. Ou seja, a diferença entre o etanol e a gasolina é praticamente a metade, o que evidencia a possibilidade de desequilíbrios na demanda de etanol.

Vale ressaltar que, com a descoberta do petróleo do pré-sal da Bacia de Campos, as refinarias brasileiras fizeram adaptações no seu parque tecnológico para processar o petróleo nacional. Apesar de não apresentar o mesmo grau de API¹⁵ do petróleo importado do Oriente Médio, por exemplo, o petróleo do pré-sal é considerado leve (grau de API \approx 27) e, para processá-lo, foram projetadas novas refinarias, sendo uma delas a Abreu e Lima (RNEST), localizada em Ipojuca, Pernambuco, com produção focada em diesel (70%) e outros produtos como nafta e GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), que são deficitários no mercado interno.

Na disputa entre etanol e gasolina, como combustível em veículos automotivos, há que se considerar que a adição do etanol anidro à gasolina é justificada por questões ambientais muito específicas. Mas, no contexto das mudanças climáticas, a preferência pelo etanol hidratado nos motores *flex* ganha importância fundamental.

2.3.1 Configuração da produção nacional e das exportações e importações de etanol

Conforme destacado anteriormente, a produção brasileira de etanol sofreu significativa queda a partir da safra de 2010/2011, voltando a apresentar crescimento na safra de 2013/2014 (EPE, 2014a). Apesar dessa recuperação, o cenário que se desenha para o etanol não é tão positivo quanto há alguns anos atrás, quando vinha apresentado extraordinário crescimento, apontando o país como futura potência mundial exportadora. A perspectiva, em 2007, era atender, com o etanol brasileiro, 5 % do consumo mundial de gasolina, podendo chegar a 10%, em 2015, a partir de técnicas mais avançadas, como o etanol celulósico ou etanol de segunda geração (INFOPETRO, 2011).

¹⁵ Escala criada pelo *American Petroleum Institute* para classificar o petróleo conforme a densidade relativa de óleos e derivados. O API é medido em graus e classifica o petróleo em leve, médio e pesado.

Além de sofrer com as adversidades climáticas, o cenário do etanol é influenciado por outras variáveis como aumento de preços e necessidade de importação do produto.

A descoberta de petróleo nos campos do pré-sal foi favorável para o país, mas os elevados preços do barril de petróleo, que pressionavam a inflação, levaram a um congelamento artificial do preço da gasolina. Frente a esse cenário, os produtores de etanol não puderam repassar aumentos nos custos de produção para os consumidores e passaram a acumular prejuízos. A produção caiu e o setor perdeu força. Além disso, a crise econômica mundial, que eclodiu no ano de 2008 descapitalizou os produtores e a elevação dos preços de financiamento fizeram com que a dívida das usinas alcançasse valores exorbitantes. Endividadas, a maioria delas reduziu ou paralisou os investimentos tanto no maquinário quanto na renovação do canavial (DIEGUEZ, 2013). Estima-se que, entre 2011 e 2012, cerca de 27 usinas fecharam as portas ou entraram em recuperação judicial, conforme noticiou uma das mais influentes instituições nacionais voltadas para o setor – a União da Indústria de Cana-de-Açúcar – ÚNICA (VANINI, 2013).

Por outro lado, é preciso estudar a questão fora da óptica dos produtores, pois justamente em um período de maior crescimento da frota nacional de carros *flex*, o preço do etanol sofreu aumentos. Esse fato colaborou para impedir uma crise de abastecimento de etanol. Soma-se, ainda, a questão do açúcar, que em 2013 manteve-se praticamente inalterada em função dos baixos preços desse produto praticados no mercado internacional, como será visto mais adiante.

Embora os dados divulgados por instituições ligadas ao setor sucroalcooleiro possam ser, por vezes, tendenciosos, o governo assumiu a *mea culpa* com relação ao cenário nacional do etanol. De certo, a atual e maior crise já enfrentada pela Petrobras, que é considerada a maior empresa energética do país, impulsionou uma nova postura do governo em relação aos combustíveis disponíveis na matriz energética brasileira. No dia 08 de abril de 2015, o Ministro de Minas e Energia, Eduardo Braga, apresentou projeções que evidenciaram que o Brasil não terá condições de atender a demanda por etanol ou gasolina com combustível nacional e, até 2023, o problema crescerá de forma expressiva e preocupante. O governo reconheceu, então, publicamente a existência de um buraco na oferta que, neste momento, só poderá ser resolvido com a importação de gasolina. Nesse caso, a situação do etanol pode sair da esfera de discussões dos usineiros e assumir de vez um lugar entre as decisões futuras do Ministério de Minas e Energia (NOVACANA, 2015).

Conforme a evolução em relação à oferta de etanol (Tabela 2.2) esta ficou praticamente estagnada no período de 2008 a 2010. Enquanto em 2008 foram produzidos 27,2 mil m³, em 2010 a produção fechou em 28,0 mil m³, o que representa um crescimento de apenas 1,5% a.a. Logo em seguida, na safra de 2011, a produção de etanol sofreu forte queda de 17,8%, passando de 28,0 mil m³ para 23,0 mil m³ produzidos, como consequência da retração de 8,4% na produção de cana-de-açúcar em relação à safra anterior e da porcentagem de cana destinada à produção de etanol hidratado, a qual fechou a safra com uma redução de 30%, totalizando 13,9 mil m³ (CONAB, 2012).

Tabela 2.2 – Evolução da oferta interna de etanol (em 10³ m³) no período de 2004 a 2013

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Etanol anidro	7.9	8.2	7.9	8.3	9.6	7.0	8.4	9.1	9.6	12.0
Etanol hidratado	6.8	7.8	9.6	14.3	17.6	19.1	19.6	13.9	13.9	15.6
Etanol total	14.7	16.0	17.8	22.6	27.1	26.1	28.0	23.0	23.5	27.6

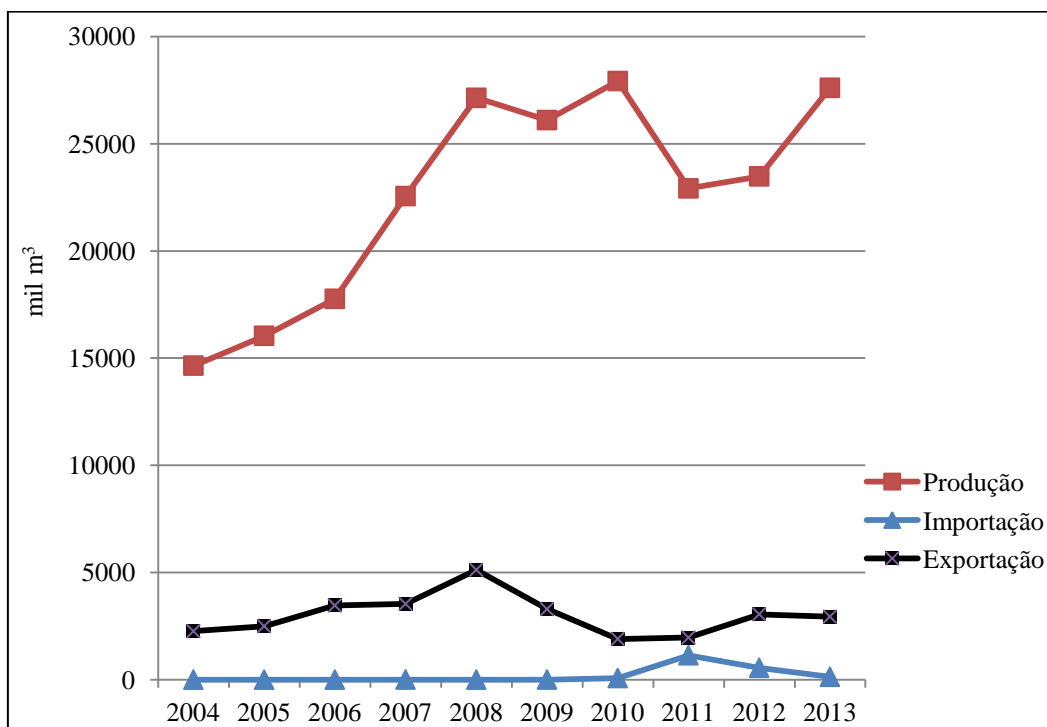
Fonte: EPE (2014a)

Em 2012, foram produzidos 23,5 mil m³ de etanol, volume 2,2% superior a 2011. Este modesto crescimento foi resultado de um acréscimo na produção de etanol anidro motivado pela expansão da demanda de gasolina C (EPE, 2014a).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), em 2013, a produção nacional de açúcar foi de 37,3 milhões de toneladas, apresentando uma queda de 3,1% em relação ao ano anterior, enquanto a fabricação de etanol cresceu atingindo um montante de 27,6 mil m³. A produção de etanol anidro, que é misturado à gasolina A para formar a gasolina C, registrou acréscimo de 25,5%, o que pode ser justificado pelo aumento na demanda de gasolina. A partir de maio de 2013, o teor de etanol na gasolina passou do percentual de 20% para 25% (EPE, 2014a).

Soma-se, ainda, o fato de que, segundo o BEN 2014, o Brasil passou a importar etanol anidro a partir de 2007 e etanol hidratado a partir de 2010, conforme pode ser observado no Gráfico 2.2. Embora, ambos os combustíveis tenham apresentado diminuições em suas importações na safra de 2013/14, é esperado que o país recorra a importações ocasionais de etanol anidro para atender a demanda esperada, dependendo de haver ou não crescimento econômico.

Gráfico 2.2 – Produção, exportação e importação do etanol brasileiro no período de 2004 a 2013



Fonte: EPE (2014a)

Com relação às exportações de etanol brasileiro, considerando o etanol anidro e o etanol hidratado, pode-se dizer que elas iniciaram-se nos anos 1980. Quanto à sua configuração, há uma evolução histórica. Isso devido às mudanças na política comercial, principalmente na década de 1990, quando o setor passou pelo processo de desregulamentação com o fim das cotas de produção e liberação da comercialização do álcool combustível. Outras mudanças contribuíram para o aumento das exportações, como o Plano Real, em 1994, e a posterior valorização do câmbio brasileiro. Como consequência, os exportadores obtiveram maior acesso à importação de máquinas, tecnologias e insumos produtivos, o que levou ao aumento da produção nacional. Assim como outros produtos, o etanol passou a tornar-se mais competitivo no comércio internacional (BITTENCOURT et al., 2012).

Segundo Nastari (2005), até o início dos anos 2000, as exportações de etanol eram realizadas, sobretudo, com o objetivo de escoar os excedentes de produção. Uma das razões mais defendidas deste fenômeno foi o fato de os preços do etanol no mercado externo, via de regra, terem sido inferiores aos preços de oportunidade do produto no mercado interno. Além disso, o autor chama a atenção para a preocupação, na época, de que havia, sim, esforços para

desenvolvimento de novos mercados de etanol no exterior, mas também havia a preocupação de que o Brasil não permanecesse como único grande produtor e consumidor de etanol combustível no mundo, com a justificativa de que isso poderia comprometer o seu uso no próprio país, ou ainda a possibilidade de reversão da adesão da indústria automobilística. Nesse cenário, um grande esforço foi realizado para apoiar o desenvolvimento da indústria do etanol nos EUA, que incluía pesquisas realizadas no Brasil sobre a questão da adição de etanol na gasolina.

A exportação de etanol pode ter tido como origem a oferta. Mas, a partir da liberalização do câmbio, em 1999, e a maior competitividade do açúcar e etanol brasileiros, as demandas do mercado interno externo começaram a crescer, o que levou a indústria sucroalcooleira a se expandir conforme a demanda (NASTARI, 2005).

Para se ter uma ideia do potencial de exportação brasileiro, em 2004, as exportações de etanol foram de 2,32 milhões m³ contra 0,66 milhões m³ em 2003 (NASTARI, 2005). Anos mais tarde, o etanol brasileiro chegou a um montante de exportações de 4,7 mil m³ gerando um lucro de US\$ 2,2 bilhões, em 2008 (UNICA, 2013).

Outro fato que contribuiu para as exportações de etanol foi que o Brasil mostrou ao mundo que era possível uma energia proveniente da biomassa fazer o papel de concorrente direto da gasolina. Hoje, a tecnologia automotiva aqui desenvolvida na época do Proálcool, bem como a produção de combustíveis a partir da biomassa como substitutos de derivados do petróleo está difundida no mundo todo. Surgiu, então, o interesse de outros países, como EUA, Japão, China e Tailândia, no etanol produzido pelo Brasil. A própria Agência de Proteção Ambiental – *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), dos EUA, criou em, 2007, uma lei que estipula um volume anual de mistura obrigatória de combustíveis alternativos aos fósseis, utilizados em solo americano.

Desde então, grandes volumes de etanol brasileiro passaram a ser exportados para os EUA e, ao longo dos anos, esse combustível foi reconhecido pela USEPA como sendo “avançado¹⁶”, devido às reduções de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Tal fato, inclusive, vai de encontro à *Clean Air Protection*, de 1990, segundo a qual o Congresso dos EUA banuiu o uso do chumbo tetraetila e determinou à USEPA reduzir o teor de aromáticos da gasolina até o “máximo nível possível”. A USEPA tem, até hoje, o dever legal de promover políticas e regulamentos para “reduzir a toxicidade das emissões atmosféricas de fontes

¹⁶ Combustível com capacidade de reduzir em 50% ou mais a emissão de dióxido de carbono (CO₂) em comparação às emissões geradas pela gasolina. De acordo com os critérios adotados pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA), o etanol brasileiro reduz a emissão de CO₂ em 61% (MILANEZ et al, 2012).

móveis (...) ao maior nível possível (...) de ser atingido” (Clean Air Act, § 202(l)) (NASTARI, 2014).

Como forma de proteção aos produtores locais de etanol, o governo dos EUA instituiu subsídios através de uma tarifa de US\$ 0,54 sobre cada galão (0,0038 m³) importado de etanol, o que acabava inviabilizando o produto brasileiro de ser competitivo naquele país. Porém, a partir de 2011, o governo dos EUA havia decidido não renovar essa tarifa, o que aumentaria o potencial de exportação brasileiro para aquele mercado (RIBAS, 2014).

Atualmente, as exportações de etanol para os EUA estão passando por um momento delicado e de incertezas. Em função da nova configuração, naquele país, no tocante à substituição de combustíveis de origem fóssil pelo etanol e, também, pelo biodiesel, a indústria do petróleo dos EUA passou a pressionar a USEPA no sentido de reduzir as metas definidas para o Padrão de Combustíveis Renováveis (RFS), na lei aprovada no Congresso norte-americano, em 2007, que define os volumes de produção e uso dos biocombustíveis nos EUA. Para se ter uma ideia da configuração do setor de combustíveis norte-americano, observa-se que entre 2000 e 2007, o consumo de anual de gasolina cresceu de 494,87 milhões m³ para 540,93 milhões m³, mas desde então esse consumo retrocedeu para 508,36 milhões m³, em 2013. No mesmo período de 2000 a 2013, o consumo de etanol nos EUA cresceu 45,6 milhões m³, passando de 6,50 milhões m³ para 52,17 milhões m³ (NASTARI, 2014).

Logo, pressionada pela indústria do petróleo, a USEPA propôs, em novembro de 2013, uma redução de 16% no consumo anual de combustíveis avançados naquele país. Com a medida, que certamente contraria a trajetória vitoriosa da expansão da sustentabilidade ambiental na política energética dos EUA, o volume total deverá ser reduzido de 11,3 milhões m³ para 8,3 milhões m³. A USEPA, ao explicar a decisão, citou a fraca demanda por misturas de combustível com mais de 10% de etanol e pelo fraco consumo de gasolina em geral, provocado, principalmente, pelo uso de carros menores e mais eficientes (CANAL RURAL, 2014).

Outras justificativas dadas para tal decisão da USEPA são o fracasso na própria expansão do etanol celulósico e as limitações na oferta de etanol brasileiro pelo setor sucroalcooleiro. Na contramão, os combustíveis fósseis provenientes do petróleo de xisto, que é explorado nos EUA, vem ganhando destaque no cenário energético norte-americano, inclusive com redução dos custos da energia proveniente dessa fonte.

De acordo com a União dos Produtores de Bioenergia – UDOP, a União da Indústria de Cana-de-Açúcar – UNICA, a redução proposta pela USEPA terá dois efeitos: redução nos

investimentos em biocombustíveis avançados por parte dos produtores e danos ambientais causados pela diminuição do uso de combustíveis derivados da biomassa. A organização também caracteriza a redução das importações de etanol pelos EUA como sendo “desnecessária e injustificada”, principalmente por se tratar de um retrocesso significativo, que inverte o progresso que vem sendo feito com o aumento da utilização de combustíveis renováveis eficientes, com baixas emissões de gases de efeito estufa. A UNICA também entende que a proposta favorece o uso de combustíveis fósseis, contrariando os objetivos da *Clean Air Act* e do Plano de Ação Climática, lançado em junho de 2013, pelo presidente norte-americano Barack Obama (UDOP, 2014).

De fato, essa mudança trará complicações futuras para o mercado brasileiro externo, além de colocar em risco a expansão e competitividade dos biocombustíveis.

Se a exportação do etanol teve como origem a oferta, a partir de 1999, a realidade passou a ser outra devido à maior liberalização do câmbio e ao afloramento da competitividade do açúcar e álcool brasileiros, o etanol brasileiro passou a ser competitivo com a gasolina a preços de mercado. Sendo assim, as demandas do mercado interno e externo passaram a crescer, e a expansão da indústria sucroalcooleira passou a ser influenciada pela demanda (NASTARI, 2005).

No tocante às importações brasileiras de etanol, essas tiveram início em 1990 e prosseguiram até 2003. Após esse ano, como mencionado anteriormente, as mesmas reiniciaram em 2007, de acordo com os dados divulgados pelo BEN, sendo estas profundamente agravadas pela crise mundial de 2008, a falta de competitividade nos preços do etanol com a gasolina e a necessidade de maiores e melhores investimentos no setor sucroalcooleiro, entre outros fatores.

O maior agravante dessa situação de influência pela demanda foi que, desde 2008, o mercado brasileiro de etanol vem apresentando um descompasso entre a oferta interna e demanda potencial desse combustível. A consolidação do mercado interno doméstico de etanol pode ser vista pela composição da frota nacional de veículos automotores. Pelo lado da demanda, o licenciamento de automóveis *flex fuel* registrou o total de 2.940.494 em 2014, segundo dados da Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores – Anfavea. Esse dado revela que cerca de 84% da frota de automóveis novos licenciados no último ano possuem tecnologia *flex fuel* (ANFAVEA, 2015).

Além da estagnação na produção, a oferta de etanol também foi prejudicada pelo aumento internacional dos preços de seu concorrente direto no setor sucroalcooleiro – o

açúcar. Devido à configuração do setor sucroalcooleiro nacional, que apresenta um grande número de usinas mistas, com produção simultânea de açúcar e álcool, torna-se relevante avaliar o cenário da produção de açúcar.

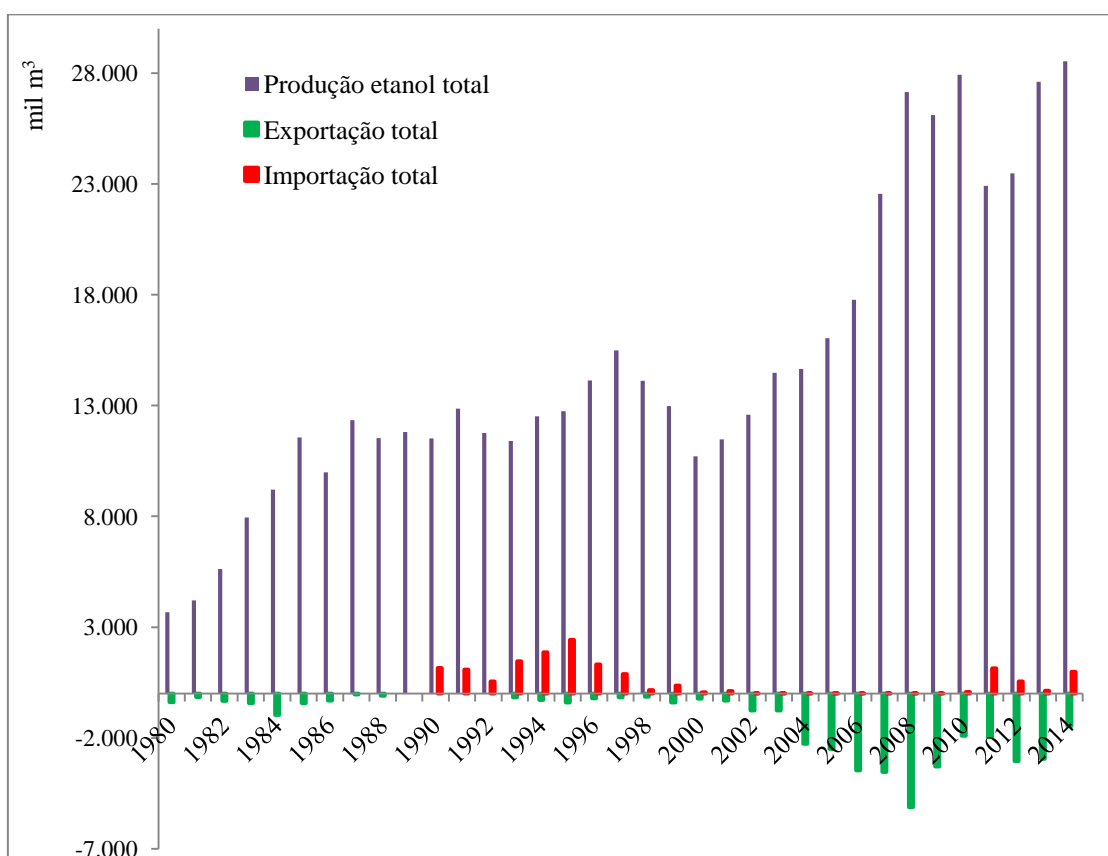
Os preços do açúcar se mantiveram em patamares elevados desde 2009, quando houve quebra na safra de cana na Índia, segundo maior produtor mundial de açúcar (CEPEA, ESALQ, 2010).

Os menores patamares de preços do açúcar em 2013 estiveram atrelados, principalmente, às baixas nos valores externos do produto e à tendência geral da economia brasileira, que esteve desacelerada, já que a produção interna de açúcar permaneceu praticamente estável. Com isso, as importações de etanol, em 2013, foram de 68.000 tep, contra 601.000 tep atingidas em 2011 (EPE, 2014a).

Solucionar os problemas associados à oferta de etanol não é tarefa fácil. Será necessário investir pesado no setor sucroalcooleiro, principalmente no que diz respeito à expansão da capacidade produtiva, passando pela renovação dos canaviais e mecanização das lavouras. Além disso, é preciso garantir que políticas públicas possam ser desenvolvidas para abraçar, de uma vez por todas, esse importante setor energético nacional.

O Gráfico 2.3, a seguir, apresenta a série histórica da produção de etanol versus exportação e importação, a partir dos anos 1980.

Gráfico 2.3 – Série histórica das exportações e importações de etanol brasileiro (1980 – 2014)



Fonte: EPE (2015)

2.3.2 Cenário político para o futuro do etanol

O Brasil, apesar de todo o seu histórico com o cultivo da cana-de-açúcar, e possuir quase 400 empreendimentos sucroalcooleiros, carece de instrumentos legais específicos para regulamentar o aproveitamento da energia da biomassa.

A tendência de crescimento do uso do etanol é de grande relevância para a discussão a cerca da geração de energia a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar, pois está diretamente relacionada com a evolução do próprio cultivo de cana-de-açúcar no país. Logo, é importante discutir a respeito de prováveis cenários para o futuro do etanol brasileiro.

O etanol tornou-se uma espécie de mercado autorregulado, sendo que a única forma de controle exercida pelo governo é a variação da porcentagem de etanol anidro adicionado na gasolina, o que acaba gerando mudanças no comportamento dos usineiros. Isso, porque a configuração da maioria dos empreendimentos sucroalcooleiros é mista, ou seja, destina-se à produção de etanol e de açúcar. Como o açúcar é uma *commodity*, o comportamento dos usineiros é afetado pelo preço do açúcar no mercado internacional.

Os preços do etanol e do açúcar no mercado doméstico não têm nenhuma regulamentação governamental sendo determinados apenas por regras de livre comércio e de concorrência plena (RIBAS, 2014). Isso quer dizer que, ressalvadas as exigências na mistura de etanol na gasolina, os usineiros possuem controle na decisão de sua produção. Esse agravante, no entanto, não interfere na produção de energia elétrica, pois a fabricação do etanol e do açúcar possui uma particularidade em comum no fluxograma de processo, como será visto mais adiante, a qual garante que a geração de energia elétrica e de possíveis excedentes a partir do bagaço de cana não seja afetada nesse sentido.

Um aspecto político interessante refere-se ao posicionamento dos usineiros com relação à postura do governo em termos de auxílio financeiro para a ampliação de sua capacidade de produção e de renovação dos canaviais, que são limitados a, no máximo, seis safras por ano. Segundo a UNICA (2007), desde a vigência do Proálcool, a intervenção governamental nas atividades do setor sucroalcooleiro vem sofrendo redução, com a eliminação gradual de práticas de regulamentação do mercado de etanol. Além disso, naquela época houve grande desvalorização da moeda nacional frente ao dólar, valorizando os produtos que eram exportados, como é o caso do açúcar.

Contudo, se por um lado o setor sucroalcooleiro defende sua autonomia, tanto em relação à escolha do produto (açúcar ou etanol), quanto aos volumes de produção e, até mesmo, quanto à expansão da capacidade instalada, de outro lado, os mesmos almejam o “favorecimento” por parte do governo brasileiro através da criação de mais linhas de crédito específicas, sem que para isso proponham uma contrapartida do setor.

Contradizendo o setor sucroalcooleiro, algumas medidas vêm sendo tomadas pelo governo brasileiro com relação ao problema de financiamento para viabilizar a renovação dos canaviais e, conseqüentemente, alavancar a produção de etanol, conforme apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Marcos legais para o setor sucroalcooleiro

Leis, Resoluções, Medidas e Programas	O que contempla
Lei Federal Nº 12.351, de 22 de dezembro de 2010	Dispõe sobre a exploração e a produção de petróleo, de gás natural e de outros hidrocarbonetos fluidos em áreas do pré-sal e em áreas estratégicas, cria o Fundo Social – FS, sua estrutura e fontes de recursos. Essa lei altera a Lei Federal Nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, conhecida como Lei do Petróleo, que instituiu e consolidou o uso do álcool hidratado como combustível.
Lei Federal Nº 12.490, de 16 de setembro de 2011	Expande a esfera de atribuição da ANP para toda a indústria dos biocombustíveis. Assim, tem início um novo marco regulatório do etanol combustível no Brasil, já que as atribuições da ANP passam a contemplar toda a cadeia desse biocombustível.
Resolução ANP Nº 26, de 30 de agosto de 2012	Estabelece os requisitos para a atividade de produção de etanol, abrangendo a construção, ampliação de capacidade, modificação e operação de Planta Produtora de Etanol.
Medida Provisória Nº 554, de 23 de dezembro de 2011	Autoriza a concessão de subvenção econômica sob a modalidade de equalização de taxa de juros nas operações de financiamento para estocagem de álcool combustível. Cria o Programa de Financiamento à Estocagem de Álcool, que é um programa de apoio decidido em favor do setor sucroalcooleiro nacional, a fim de oferecer juros menores para o financiamento à estocagem de etanol, suprir a demanda interna e garantir um preço razoável do produto no período de entressafra.
Lei Federal Nº 12.666, de 14 de junho de 2012	Converte em lei a Medida Provisória Nº 544 e concede subvenção econômica às instituições financeiras oficiais federais não apenas nas operações de financiamento para a estocagem de álcool combustível, mas também para a renovação e a implantação de canaviais.
BNDES Prorenova	Programa do BNDES de Apoio à Renovação e Implantação de Novos Canaviais, lançado em 2012, que visa incentivar a produção de cana-de-açúcar por meio do financiamento à renovação dos canaviais antigos e à ampliação da lavoura.
BNDES PASS	Programa do BNDES de Apoio ao Setor Sucroalcooleiro com o objetivo de financiar a estocagem do etanol combustível.

Fonte: Elaboração própria

Em 2013, o governo federal aprovou um conjunto de medidas contemplando a redução dos juros em linhas de financiamento para a renovação dos canaviais e para a estocagem do etanol. Entre elas está o crédito presumido de PIS/Cofins ao produtor de etanol, o que na prática vai zerar a alíquota de R\$ 0,12 por litro desses tributos. Outra medida é a redução dos juros do Prorenova, linha de financiamento do BNDES para a renovação e implantação de novos canaviais (PORTAL BRASIL, 2013).

Evidencia-se, então, claramente, a existência de um sério entrave ao estabelecimento de uma forma de regulamentação específica para o setor, deixando margem a seguinte

questão: “*O etanol também não seria uma commodity? Qual é a melhor solução para o etanol? Estatizar?*”

Há que se considerar ainda que, em anos recentes, as empresas do setor petrolífero estão adquirindo empreendimentos do setor sucroalcooleiro para terem, elas próprias, o controle e a garantia do produto, de forma a atender os percentuais de adição exigidos pela legislação ambiental ou por medidas governamentais. A Bambuí Bioenergia S/A, localizada no município de Bambuí, em Minas Gerais é um exemplo disso. Esse empreendimento pertence à Petrobras Biocombustível, em parceria com a Turdos Participações, desde 2009. Além de produzir etanol e energia elétrica excedente para exportação, a Bambuí Bioenergia S/A tem condições de mecanizar 100% da colheita de cana-de-açúcar até o final de 2015 (PETROBRAS, 2015). Outro exemplo é a fusão entre a Shell e a Cosan, criando a Raízen, em 2011, que hoje está entre as cinco maiores empresas de energia em faturamento no país e uma das mais competitivas na área de energia sustentável do mundo. A Raízen possui 24 unidades de produção, contemplando uma produção de 2,1 milhões m³ de etanol, 4,1 milhões de toneladas de açúcar, 940 MW de capacidade instalada e mais de 5.400 postos de abastecimento.

2.3.3 Projeções para o setor sucroalcooleiro

Com relação às projeções para o setor sucroalcooleiro, existem projeções a longo prazo, como o Plano Nacional de Energia 2030 - PNE 2030 e o Plano Nacional de Energia 2050 – PNE 2050, sendo que este último não apresenta dados muito detalhados para o setor sucroalcooleiro pois o mesmo encontra-se, ainda, em fase de elaboração de três dos cinco estudos que o constituirão. Por esse motivo, o presente trabalho aborda, sobretudo, o PNE 2030. Dentro de uma perspectiva de longo prazo, a biomassa para fins energéticos, em geral, e como fonte para geração de energia elétrica, em particular, está entre as fontes renováveis com maiores possibilidades, seja em termos de natureza e origem, seja em termos de tecnologia de conversão em produtos energéticos (EPE, 2007). Para o horizonte de tempo do PNE 2030, levando em consideração que a evolução da produção de cana-de-açúcar está relacionada com a expansão da área plantada e o aumento da produtividade da cultura da mesma, foram gerados patamares de produção evidenciado o crescimento dessa fonte energética, conforme apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Projeção da expansão da produção brasileira de cana e derivados no período de 2005 a 2030

Cana-de-açúcar	2005	2010	2020	2030
Produção (10 ⁶ t)	431	518	849	1.140
Área ocupada (10 ⁶ ha)	5,6	6,7	10,6	13,9
Açúcar (10⁶ t)				
Produção	28,2	32,0	52,0	78,0
Exportação	17,8	21-23	28-30	31-37
Etanol (10⁶ m³)				
Produção	16,0	24,0	48,0	66,6
Exportação	2,5	4,4	14,2	11,5
Biomassa (10⁶ t)				
Bagaço	58	70	119	154
Palha	60	73	119	160
Notas:				
- Os níveis de produção de cana-de-açúcar foram baseados na continuidade da evolução de produtividade agrícola e industrial verificada nas últimas duas décadas antes da elaboração do PNE 2030, isto é, antes do ano de 2006.				
- Não foram considerados nos cálculos os possíveis avanços com o etanol de segunda geração, por meio da hidrólise de material celulósico.				

Fonte: EPE (2007)

Ressalta-se que o etanol tem sua projeção baseada no cálculo da produção total de cana-de-açúcar a partir da área colhida (ha) e da produtividade (kg/ha), ambas estimadas por estágio de corte da mesma que, atualmente, gira em torno de quatro a cinco cortes, no máximo.

Com relação à produção de cana-de-açúcar, até o presente momento, pode-se constatar que a última safra (2013/14), registrada no BEN 2014, atingiu 648,1 milhões de toneladas. Segundo a CONAB (2015a), em seu quarto Levantamento de Safra¹⁷ 2014/15, este valor irá se manter, com pequena queda de 3,7%. Já com relação à área plantada, o país deve manter mais de 9 milhões de hectares. Tal configuração revela que o setor está dentro das metas planejadas no PNE 2030.

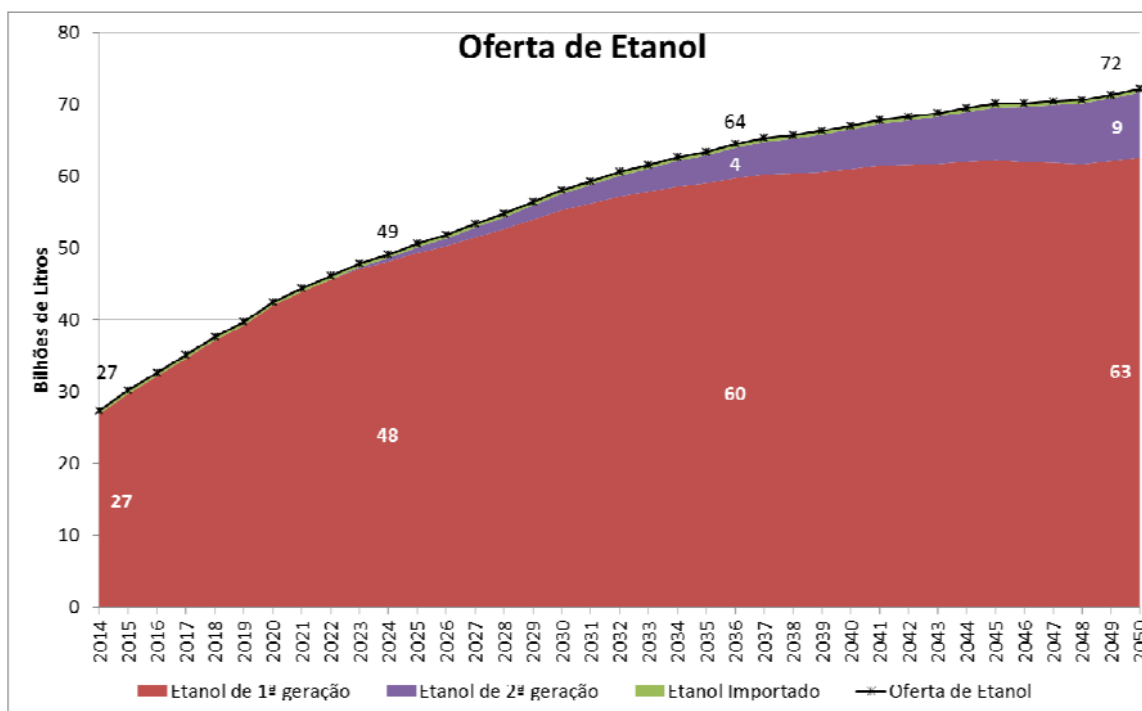
Para o açúcar e o etanol total (anidro e hidratado), a CONAB (2015a) registrou para a safra de 2014/15 uma produção total de açúcar de 35,56 milhões de toneladas e etanol de 28,66 mil m³. Apesar de estes valores estarem em dentro das previsões do PNE 2030, de acordo com o BEN 2014, houve uma queda tanto na produção de açúcar, que em 2013 foi de 37,3 milhões de toneladas, quanto na produção de etanol que foi de 27,61 mil m³ para o mesmo ano. Isto pode ser explicado pela queda de produtividade observada para a safra

¹⁷ A CONAB emite periodicamente levantamentos de safra de algumas culturas, como é o caso da cana-de-açúcar, contemplando toda a lavoura da Região Centro-Sul, Norte e Nordeste do país, de acordo com o calendário de plantio/colheita ser em cada uma dessas regiões.

2014/15, que teve redução de 5,7% na média geral. Essa redução ocorreu na Região Centro-Sul, sobretudo em São Paulo. Embora tenha sido observado um pequeno acréscimo de áreas plantadas na Região Centro-Sul, as condições climáticas desfavoráveis à lavoura de cana-de-açúcar e a falta de investimento em manutenção dos canaviais contribuíram para o decréscimo na produtividade. Na Região Nordeste, por sua vez, a queda das áreas de produção foi compensada pelas chuvas.

Segundo o PNE 2050, em seu estudo sobre a “Demanda de Energia”, quanto às destilarias, espera-se que este segmento cresça a taxas inferiores à média do setor energético, devido em grande parte à penetração de veículos híbridos e elétricos, fato que contribui para conter a demanda por etanol, conforme Gráfico 2.4. A oferta de etanol para o mesmo horizonte de tempo entre o PNE 2030 e o PNE 2050, ou seja, o ano de 2030, mesmo desconsiderando as exportações do produto, apresenta valores distantes, pois segundo o PNE 2050, o país só atingirá 66,6 milhões m³ de etanol no final da década de 2030.

Gráfico 2.4 - Expectativa de evolução da produção brasileira de etanol no longo prazo



Fonte: MME, EPE (2014b)

No tocante à produção de cana-de-açúcar, de acordo com o estudo “Cenários Econômicos PNE 2050”, haverá tendência de maior participação dos combustíveis produzidos

a partir da biomassa na matriz energética brasileira e mundial. Nesse sentido, pelo lado da oferta, o Brasil apresenta fatores positivos como clima, disponibilidade de terra e tecnologia de ponta para atender a demanda futura. A limitação pode ser o custo da terra, na medida em que as terras mais próximas à infraestrutura logística instalada forem utilizadas. A Tabela 2.4 apresenta a evolução da produção de cana-de-açúcar, até 2050, levando-se em conta um aumento de produtividade de cerca de 70% (EPE, 2014c). Observa-se que as projeções do PNE 2030 para a cana-de-açúcar são mais otimistas do que as do PNE 2050. No entanto, ao longo das últimas safras, o setor sucroalcooleiro vem apresentando alguns problemas, conforme discutido anteriormente, o que modificou o cenário a partir da safra de 2012/2013, haja vista que o ano base do PNE 2050 é 2013.

Tabela 2.4 – Evolução da produção de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2050

Cana-de-açúcar	2013	2020	2030	2040	2050
Produção (10 ⁶ t)	737,7	815	939,9	1.084	1.250
Área ocupada (10 ⁶ ha)	8,9	10,3	11,3	12,1	12,9

Fonte: EPE (2014c)

Em uma linha de horizonte mais curta, as projeções para o setor sucroalcooleiro seguem os Planos Decenais de Expansão da Energia Elétrica, que constituem importantes instrumentos de planejamento da expansão eletroenergética do país. A partir de 2007, tais planos passaram a ser elaborados com uma visão ampliada de forma a incorporar uma visão integrada da expansão da demanda e da oferta de diversos energéticos, além da energia elétrica (MME, PDE, 2014).

O Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2023 apresentou uma projeção¹⁸ para o etanol, partindo de 23,9 milhões m³ em 2014, e atinge 42,8 milhões m³ em 2023. Além disso, a biomassa de cana-de-açúcar para a oferta de energia elétrica também está contemplada nas projeções realizadas pelo PDE 2023, sendo que a contribuição desta fonte para o cenário energético nacional pode vir a ser mais relevante, caso seu potencial técnico venha a ser plenamente aproveitado (MME, EPE, 2014).

Segundo o PDE 2023, perante as dificuldades econômicas enfrentadas no setor sucroalcooleiro, foram realizadas ações conjuntas do governo com o setor privado no sentido

¹⁸ As projeções para a biomassa de cana, contempladas no PDE 2023, consideram uma média de cinco corte para o ciclo da cana-de-açúcar. Assim, a partir de um ano base e de conhecimento do ciclo da cana-de-açúcar, é possível projetar para os anos subsequentes as áreas plantadas por estágio de corte, sendo também necessário estimar as áreas em reforma e reincorporadas.

de proporcionar a retomada dos investimentos na renovação e expansão dos canaviais. Estas ações propiciaram uma recuperação dos indicadores de produtividade no país, que saíram de 67,1 toneladas de cana/ha na safra 2011/12 para 74,8 toneladas de cana/ha na safra 2013/14, embora ainda longe do máximo histórico de 81,6 toneladas de cana/ha alcançado na safra 2009/10. Para a safra 2013/14, o uso do açúcar total recuperável (ATR) para produção de açúcar foi de 45%, inferior ao da safra 2012/13, em que o percentual foi de 50%. Um dos fatores responsáveis por isso foi a manutenção dos preços desta *commodity* em um patamar baixo, devido à sobreoferta no mercado internacional. Como consequência, como visto anteriormente, a produção de etanol para a safra 2013/14 foi de quase 28 milhões m³, correspondendo a um incremento de mais de 4 milhões m³ em relação à safra anterior.

Contudo, apesar da recuperação da produtividade agrícola na safra 2013/14, a safra 2014/15 sofreu um recuo para cerca de 70 toneladas de cana/ha, devido ao clima atipicamente seco, combinado com temperaturas acima da média, entre dezembro e fevereiro de 2014, em grande parte da maior região produtora, ou seja, a Centro-Sul. Entretanto, para a próxima safra (2015/16) há previsão de um retorno do valor da produtividade agrícola aos patamares observados na safra de 2013/14. Esse diagnóstico pode ser confirmado pela CONAB (2015b), em seu terceiro Levantamento de Safra 2015/16.

A Tabela 2.5, a seguir, apresenta um resumo das projeções do PDE 2023 para a expansão da oferta interna de biomassa de cana-de-açúcar.

Tabela 2.5 – Projeção da oferta de biomassa de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2023

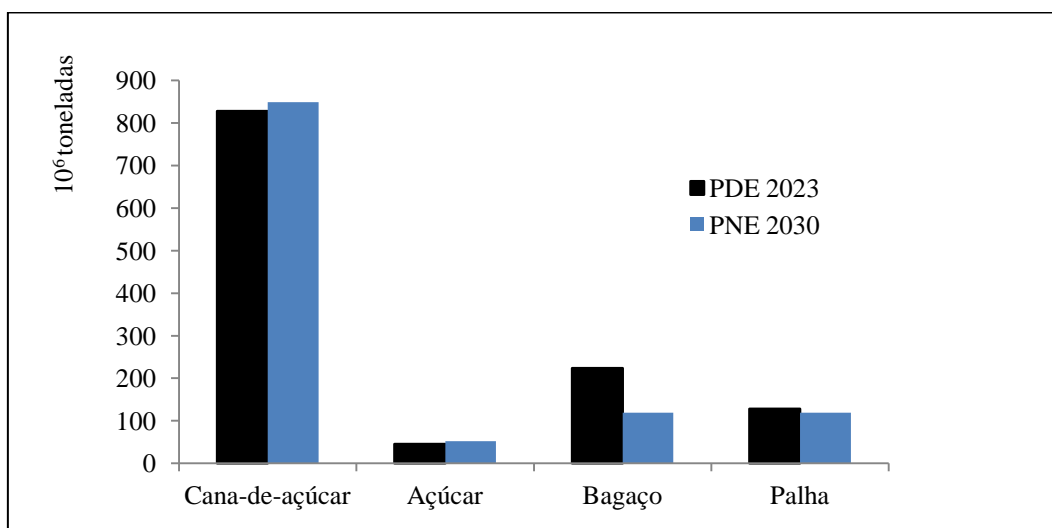
Ano	Cana-de-açúcar (10 ⁶ t)	Açúcar (10 ⁶ t)	Etanol (10 ⁶ m ³)	Bagaço (10 ⁶ t)	Palha e pontas* (10 ⁶ t)
2013	652,1	ni	ni	176,1	101,1
2014	609,5	36,0	27,0	164,5	94,5
2015	685,8	38,5	30,0	185,2	106,3
2016	722,1	40,7	33,0	195,0	111,9
2017	747,3	41,6	35,0	201,8	115,8
2018	775,7	42,5	38,0	209,4	120,2
2019	800,3	43,5	40,0	216,1	124,0
2020	827,8	45,2	42,0	223,5	128,3
2021	856,9	46,8	44,0	231,4	132,8
2022	878,0	47,7	46,0	237,1	136,1
2023	897,3	48,4	48,0	242,3	139,1

*Admitiu-se que uma tonelada de cana-de-açúcar origina 270 kg de bagaço e disponibiliza 155 kg de palha e ponta para uso.
ni – não informado

Fonte: MME, EPE (2014)

A análise das projeções apresentadas nas Tabelas 2.3 e 2.5, mostra que os planos PNE 2030 e PDE 2023 apresentam algumas diferenças nas projeções para um horizonte de tempo em comum, que é o ano de 2020, conforme pode ser verificado no Gráfico 2.5.

Gráfico 2.5 – Comparação entre as projeções do PNE 2030 e PDE 2023 para produção de cana-de-açúcar, açúcar, bagaço e palha para o ano de 2020



Fonte: EPE (2007); MME, EPE (2014)

Pelo Gráfico 2.5, percebe-se que a maior diferença entre os dois planejamentos está na quantidade de bagaço gerado, que pode estar associado a uma melhora na questão do teor de umidade e percentual gerado por tonelada de cana.

Para o etanol, a produção em 2020 alcançará 42 milhões m³ segundo PDE 2023, que é um valor 12,5% menor que o projetado pelo PNE 2030 (48 milhões m³).

As justificativas para essa discrepância entre as projeções para a cana-de-açúcar e para o etanol recaem, principalmente, sobre a necessidade da retomada dos investimentos na renovação e expansão dos canaviais, além das adversidades climáticas evidenciadas ao longo das safras. Para o açúcar, a produção segundo o PDE 2023 considerou o consumo interno e a parcela de açúcar a ser exportada, sendo estimada uma taxa de crescimento da produção nacional de açúcar em torno de 2,6%.

Outro detalhe importante é a projeção para a expansão da capacidade industrial do setor sucroalcooleiro, pois impactam diretamente na capacidade de produção do etanol. De acordo com a CONAB, ao final do ano de 2013 havia um total de 389 usinas em operação no

Brasil. Porém, 21 usinas estavam em recuperação judicial ao fim de 2013, representando um montante de 29 milhões de toneladas de cana, que deixaram de ser processadas. Dentre essas últimas, 10 usinas não constavam do cadastro da Agência Nacional do Petróleo de abril de 2014.

Eis o cenário para as projeções da capacidade de produção de etanol para os dois períodos considerados no PDE 2023. Enquanto para o período de 2014 a 2016 está prevista a implantação de cinco novas usinas com capacidade nominal de moagem de aproximadamente 13 milhões de toneladas de cana, para o período de 2017 a 2023 estão previstas mais treze novas usinas, que juntas totalizam uma capacidade nominal de moagem de aproximadamente 52 milhões de toneladas (MME, EPE, 2014). A Figura 2.3 ilustra a localização dessas novas usinas no território nacional, considerando as que devem entrar em operação nos próximos anos, e dos projetos considerados para o período de 2017 a 2023.

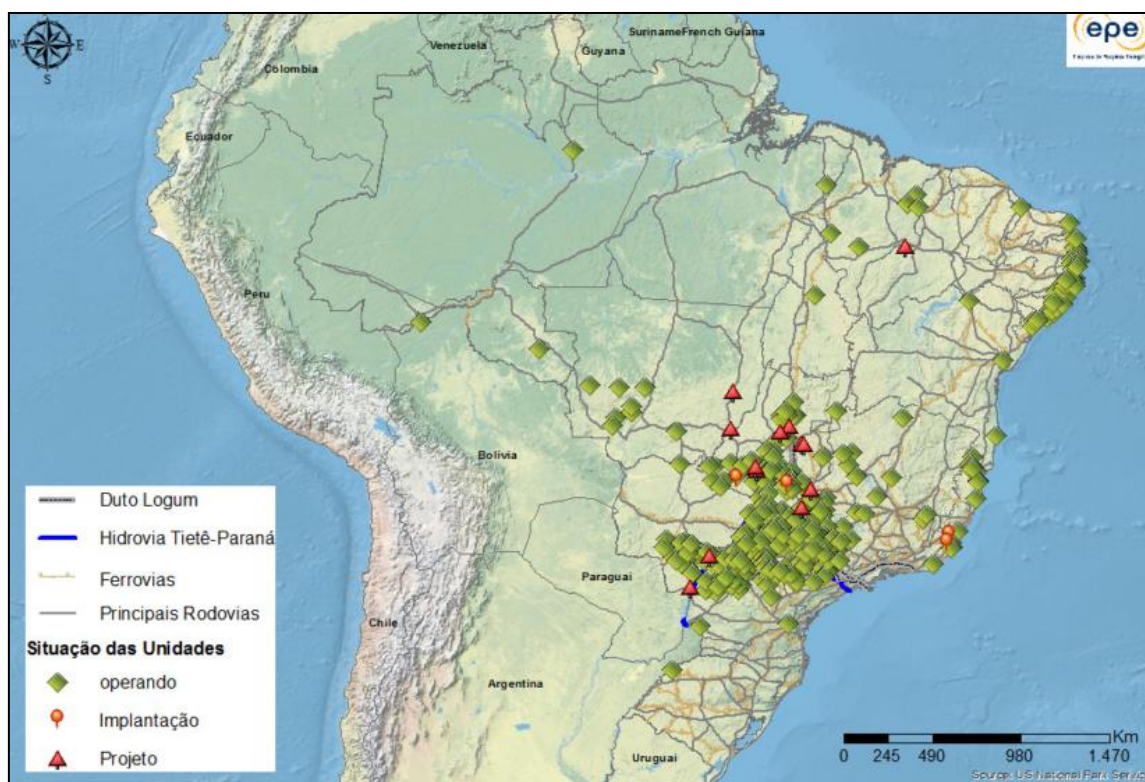


Figura 2.3 – Usinas de etanol no Brasil

Fonte: MME, EPE (2014)

2.3.4 Projeções para a energia proveniente da queima do bagaço

Há que se destacar que além da contribuição para a diversificação da matriz elétrica brasileira, a energia elétrica proveniente da queima do bagaço de cana apresenta ainda a vantagem de aumentar a adaptação econômica do setor sucroalcooleiro em função da alta volatilidade dos preços do etanol e do açúcar. Contudo, apesar de suas vantagens econômicas e ambientais, o aproveitamento da geração de energia elétrica no setor ainda está muito aquém do seu potencial.

Nyko et al. (2011) fala da existência de um hiato entre o potencial energético da cana-de-açúcar e a energia elétrica gerada pelas usinas sucroalcooleiras. A respeito da cogeração de energia elétrica, tal hiato é reforçado pela opção histórica, feita por muitas usinas, por tecnologias de cogeração que visavam apenas a autoprodução de energia e ao consumo do bagaço gerado como insumo, devido à sua difícil estocagem e baixa relevância comercial.

Ao mencionar essa lacuna entre potencial gerador e potencial real aproveitado, o autor propõe uma avaliação do problema ligado à eficiência na queima do bagaço pelo setor sucroalcooleiro. De certo, historicamente, os primeiros projetos de cogeração do setor tinham como objetivo a produção do vapor necessário ao processo produtivo ao menor custo. Assim, investiu-se em geradores a vapor de baixa pressão, produzindo vapor saturado ou levemente superaquecido. Como os sistemas elétricos eram pouco desenvolvidos, ou simplesmente inexistentes nas regiões em que as usinas estavam localizadas, o acionamento dos equipamentos industriais era predominantemente mecânico, e a geração elétrica voltada quase que exclusivamente ao atendimento das necessidades de iluminação da própria usina e dos núcleos residenciais ao entorno (SUZOR; BOUVET, 1991).

Como justificativa de seu apontamento, Nyko et al. (2011) realizaram um estudo, em 2009, contemplando 65% das usinas e destilarias em operação no país com o objetivo de identificar quais os fatores que, segundo a ótica das usinas, mais contribuem para inibir o investimento na cogeração de energia elétrica. Os resultados apontaram como principal obstáculo aos investimentos em cogeração o custo dos investimentos em modernização da usina e as condições de financiamento ao investimento.

Conforme consta no PDE 2023, as iniciativas governamentais visam fomentar a renovação e modernização das instalações de cogeração, além de facilitar as conexões ao Sistema Interligado Nacional – SIN¹⁹. O PDE 2023 ainda apresenta uma análise do potencial

¹⁹ Sistema hidrotérmico de produção e transmissão de energia elétrica no Brasil, formado por empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia requerida pelo

técnico de exportação de energia elétrica da biomassa de cana-de-açúcar, que considerou a produção já estimada de cana-de-açúcar e as características técnicas das usinas sucroalcooleiras. Para o cálculo do potencial técnico de exportação de energia elétrica ao SIN considerou-se que todo o bagaço gerado pelo setor seria utilizado para geração de energia elétrica, quer seja para autoconsumo, quer seja para exportação. Assim, o fator médio de exportação de eletricidade previamente calculado (75,2 kWh/t de cana) foi aplicado ao total de cana processada nas usinas do parque sucroalcooleiro, a cada ano, resultando na obtenção do potencial técnico de energia elétrica advinda do bagaço da cana-de-açúcar que poderia ser adicionado ao SIN (MME, EPE, 2014).

De acordo com os dados divulgados pelo PDE 2023, há a previsão de contratação de cerca de 1,6 GW médios pelas usinas sucroalcooleiras até o final de 2018, podendo esse valor ser maior com a realização de futuros leilões de energia. Além disso, o potencial técnico de produção para o SIN de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar, considerando o aproveitamento ótimo do bagaço, permitiria ofertar 7,7 GW médios até 2023, dos quais 1,4 GW médio já foi contratado nos leilões e com início de suprimento até 2018. O potencial desta fonte está localizado principalmente nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná, portanto próximo dos maiores centros consumidores de energia elétrica (MME, EPE, 2014).

Vale ressaltar que esses valores não estão englobando o aproveitamento das palhas e pontas. Os resultados indicam que o potencial energético dessas fontes seria de 7,0 GW médios e 11,8 GW médios, respectivamente, até 2023 (MME, EPE, 2014).

país encontram-se fora do SIN, nos chamados Sistemas Isolados, onde comunidades isoladas (quase todas localizadas na Amazônia) são abastecidas por geração térmica a óleo.

3 – A ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: IMPORTÂNCIA PARA A MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL

Hoje em dia, inúmeras pesquisas envolvendo fontes alternativas de energia vêm sendo realizadas com o objetivo de se reduzir as emissões de gases de efeito estufa e garantir o abastecimento da demanda futura. Nesse sentido, alguns subprodutos de processos dos setores industrial, agrícola e terciário têm sido aproveitados de forma bastante significativa em sistemas de cogeração, como por exemplo, as siderúrgicas, usinas sucroalcooleiras e de papel e celulose (SILVA, 2010).

Como visto anteriormente, a biomassa é uma fonte orgânica que pode ser utilizada para produzir energia e tem sido defendida como uma importante alternativa energética aos combustíveis fósseis. Historicamente, a lenha foi uma das principais fontes energéticas básicas na estrutura mundial até o surgimento da Revolução Industrial, quando passou a ser substituída em larga escala pelo carvão mineral, no século XVIII. Mesmo assim, resistiu ao longo dos anos, e hoje essa fonte de energia é empregada junto com outras fontes de biomassa na matriz energética de muitos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

A biomassa pode ser usada como insumo para geração de energia elétrica, pois está entre as fontes de energia renováveis com maiores possibilidades em termos de natureza, origem, tecnologia de conversão e produtos energéticos, exigindo para a quantificação da oferta de energia elétrica, a quantificação dos resíduos das principais culturas e das atividades agroindustriais do país, bem como as formas de sua disponibilização.

Considerando o contexto em que se insere a avaliação do potencial da biomassa como recurso energético, as políticas de governo voltaram sua atenção para as fontes de biomassa de escala compatível com a integração ao sistema elétrico e para as culturas que apresentam condições atuais e perspectivas futuras de escala no país, considerando tanto as culturas alimentares e seus resíduos, as culturas energéticas e a produção silvicultural, bem como os resíduos agroindustriais produzidos, entre os quais está o bagaço da cana-de-açúcar. Como o setor sucroalcooleiro gera grande quantidade de resíduos, estes podem ser aproveitados na geração de eletricidade, em sistemas chamados de cogeração.

A cogeração é definida pela Resolução Normativa Nº 235, de 14 de novembro de 2006, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, como sendo o *“processo operado numa instalação específica para fins da 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, observando que a instalação específica denomina-se central termoelétrica cogeneradora, cujo ambiente não se confunde com o processo ao qual está conectada”.

Daí a queima do bagaço de cana apresentar um papel de extrema importância ao setor sucroalcooleiro e, ao mesmo tempo, conferir uma destinação a esse resíduo, além de se aproveitar de seu potencial energético. Ressalta-se, contudo, que o processo de obtenção de energia a partir da queima do bagaço não se constitui em solução definitiva a esse resíduo, pois há que se considerar a geração de emissões atmosféricas e das cinzas.

É justamente o alto teor de fibras que confere ao bagaço de cana o potencial de ser empregado na produção de vapor e de energia elétrica, utilizadas como insumo para a fabricação de açúcar e etanol. Dessa forma, o bagaço pode garantir a autossuficiência energética das usinas sucroalcooleiras durante o período da safra da cana-de-açúcar.

Além de atender as necessidades de energia das usinas, desde a década de 1980, o bagaço tem permitido a geração de excedentes de energia elétrica que são fornecidos para o sistema elétrico brasileiro (SOUZA, 2012). A participação dessa fonte de biomassa na matriz elétrica é importante, porque a safra da cana-de-açúcar coincide com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, onde está concentrada a maior potência instalada em hidrelétricas do país. A eletricidade fornecida neste período auxilia, portanto, a preservação dos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas (ANEEL, 2008).

Sobre essa questão, Cortez (2010) afirma que “a cana-de-açúcar é olhada cada vez mais como uma fonte de energia, e não só como fonte de alimento. Porém, ela é hoje mal aproveitada sob esse aspecto, uma vez que menos de 30% de sua energia primária original são convertidos em energia secundária útil (álcool e energia elétrica)”. Tal fato traz à tona uma questão primordial quanto ao aproveitamento energético do bagaço de cana – a eficiência no aproveitamento de seu potencial energético.

3.1 Valor energético teórico do bagaço de cana-de-açúcar

O colmo da cana-de-açúcar contém a sacarose, que é a matéria-prima básica necessária para a produção de açúcar e de etanol, que é obtida na moagem da cana, para extração do caldo. Extraído o caldo, resta a parcela fibrosa do colmo, que se refere ao bagaço de cana, apresentando um teor de umidade em torno de 50%.

A quantidade de bagaço produzida após a moagem depende fundamentalmente do colmo de cana-de-açúcar, cujas características físico-químicas variam segundo fatores como a variedade da espécie plantada, a idade da cultura e seu estágio de corte, o clima, o solo, o uso ou não de vinhoto na fertirrigação do campo, entre outros. Contudo, de acordo com estudos da CONAB, o material genético em uso no país apresenta um teor aproximado de 0,270t a 0,290t de bagaço (com 50% de umidade) em cada tonelada de cana processada. Do total produzido nas unidades de produção, uma parcela diminuta (próxima a 10%) é destinada a usos diversos, como a alimentação animal, em especial através de um processo de hidrólise. Toda a parte restante (90%) é queimada em caldeiras no próprio ambiente onde é produzida para a geração de vapor (CONAB, 2011).

Em termos de potencial energético, o conteúdo calórico da cana-de-açúcar, considerando os todos os seus componentes (sacarose, fibras, água e outros), é de aproximadamente 1.060 kcal/kg (4,44 MJ/kg). Retirando dessa quantidade a energia contida apenas no bagaço, o poder calorífico para o caldo de cana alcança é de cerca de 620 kcal/kg (2,60 MJ/kg). Quanto ao melaço, com cerca de 55% de açúcares redutores em peso e capaz de produzir em torno de 0,35 m³ de álcool/t de cana, chega-se a um valor próximo de 1.930 kcal/kg (8,10 MJ/kg). Para o bagaço de cana é utilizado o poder calorífico calculado experimentalmente pelo antigo Instituto do Açúcar e Álcool – IAA²⁰, apresentando poder calorífico superior de 2.257 kcal/kg (9,45 MJ/kg) e poder calorífico inferior de 2.130 kcal/kg (8,92 MJ/kg) (EPE, 2007).

Outro ponto fundamental para prever a quantidade de energia que pode ser extraída a partir do bagaço de cana é a tecnologia utilizada no processo de geração de energia elétrica, como será tratado no item a seguir. As pesquisas demonstraram que apenas o uso de caldeiras de alta eficiência de geração de vapor a altas pressões e temperaturas (6 MPa a 8 MPa e 763K a 793K, respectivamente, e superior) permite produção de energia elétrica adicional em uma usina. No entanto, o custo de caldeiras e sua instalação é relativamente elevado. Por outro lado, estudos demonstram que os custos de investimento de capital podem ser cobertos por receitas de exportações do excedente de eletricidade para a rede interligada (SIN) em três a cinco anos (ISO, 2009).

²⁰ O Instituto do Açúcar e Álcool – IAA foi uma autarquia criada em 1933, durante o governo do presidente Getúlio Vargas, que se caracterizou como uma espécie de monopólio do setor sucroalcooleiro nacional. Ele foi extinto em 1990, pelo presidente Fernando Collor de Melo, dando início ao período de desregulamentação do setor, com a liberação das exportações e dos preços do açúcar e do álcool.

3.2 Tecnologias de conversão do bagaço de cana em energia elétrica

Hoje, grande parte do bagaço produzido no setor sucroalcooleiro brasileiro é utilizado na produção de energia elétrica e calor de processo. Grande parte dessa geração é voltada para o atendimento das necessidades da própria usina (autoprodução). Há ainda a questão da palha, que semelhante ao bagaço, serve como combustível para produção energia. Entretanto, devido ao fato de ainda haver grande parte de colheita manual nas lavouras de cana-de-açúcar, a palha é deixada no solo, funcionando como adubo orgânico para a cultura.

Embora tenha sido muito empregada até meados do século XX, a cogeração foi perdendo a competitividade para a eletricidade produzida pelas concessionárias nas grandes centrais geradoras (termoelétricas, hidrelétricas, termonucleares), o que implicou na redução dos custos da eletricidade, restringindo o emprego da cogeração em sistemas isolados (plataformas submarinas) e indústrias com resíduos combustíveis (canavieira e de papel e celulose, por exemplo) (INEE, 2015).

No entanto, importantes mudanças no cenário energético mundial, como as decorrentes das crises do petróleo, em 1973 e 1979, incentivaram a busca por fontes alternativas.

Houve a necessidade de reformas em face da elevação do custo da geração de energia institucionais em vários países em face da elevação do custo da geração de energia elétrica segundo as tecnologias convencionais (termoeletricidade a carvão mineral), tanto por razões tecnológicas quanto ambientais e devido ao processo recessivo dos países industrializados (CORTEZ *et al.*, 2008). Essas reformas, de caráter eminentemente descentralizador, resultaram na revalorização da cogeração, na produção de energia elétrica em pequena escala, no uso mais intensivo de fontes energéticas renováveis e na produção independente (MATEUS, 2010).

Uma típica central termoelétrica a bagaço de cana-de-açúcar é composta de vários sistemas: caldeira, turbina, gerador elétrico, subestação elevatória e o sistema de transmissão de energia, além de um conjunto de sistemas periféricos como alimentação da caldeira, sistemas de refrigeração de mancais do turbogerador etc. (MATEUS, 2010).

De acordo com Corrêa Neto e Ramon (2002), a transformação da energia térmica em energia mecânica, que ocorre em uma central termoelétrica, é realizada por diferentes equipamentos cuja construção é baseada em algum dos diversos ciclos termodinâmicos conhecidos. No caso do setor sucroalcooleiro, o atendimento energético é tradicionalmente realizado pelo ciclo Rankine, onde o combustível (bagaço de cana) é queimado externamente

(na caldeira) à máquina motriz (turbina), para produzir vapor. Esse vapor superaquecido está a uma temperatura que varia entre 723K a 803K, em usinas mais modernas. Em seguida, o vapor se expande na turbina e produz trabalho mecânico, acionado um gerador (CORRÊA NETO, RAMON, 2002).

Após a expansão, o vapor em baixas pressões e menor temperatura é condensado e retorna para a caldeira. Segundo Cremonez (2013) este é o principal ponto onde a cogeração é agregada, pois antes do fluido (vapor) ser retornado ao estado líquido, ele pode ser usado no processo industrial para diversos fins como evaporação, cozimento, secagem e outros. Assim, há dois arranjos básicos de cogeração: o primeiro com a turbina em contrapressão, onde o condensador é substituído pelo próprio processo industrial e o segundo, com a turbina de condensação, onde o vapor retorna à caldeira na forma de condensado.

Assim, empregam-se duas tecnologias comerciais na cogeração do setor sucroalcooleiro, sendo que uma utiliza turbinas de contrapressão e é a mais difundida no setor sucroalcooleiro nacional, e outra que utiliza turbinas de condensação/extração. A Figura 3.1 apresenta um desenho típico de um sistema de cogeração com turbina a vapor, com presença de condensador.

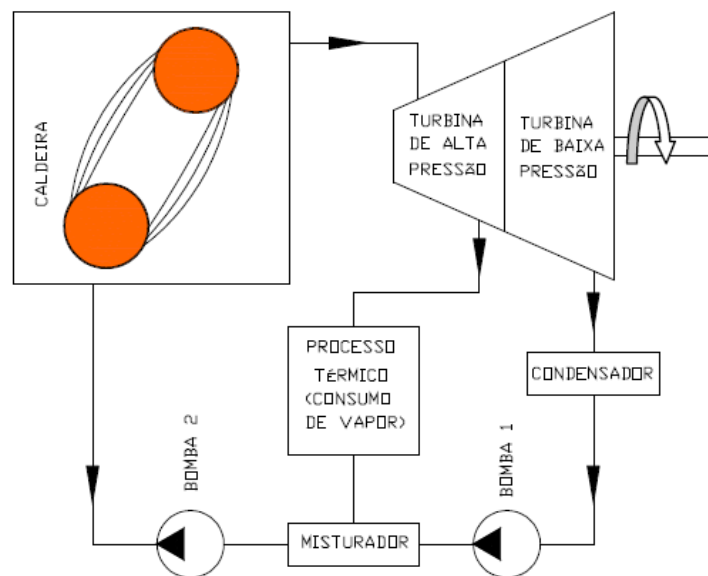


Figura 3.1 – Esquema típico de um sistema de cogeração com turbina a vapor com presença de condensador

Fonte: Adaptado de SONNTAG; BORGNAKKE; WYLEN (1998)

Essas duas rotas tecnológicas foram analisadas juntamente com outras no estudo sobre biomassa contemplado no Plano Nacional de Energia 2030 e resumidas pela ANEEL no Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2008), podendo assim ser diferenciadas:

- Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão: *“É empregado de forma integrada a processos produtivos por meio de cogeração. Nele, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor. Este vapor pode acionar as turbinas usadas no trabalho mecânico requerido nas unidades de produção e as turbinas para a geração de energia elétrica. Além disso, o vapor que seria liberado na atmosfera após a realização desses processos pode ser encaminhado para o atendimento das necessidades térmicas do processo de produção”*. De acordo com o estudo, este processo é o mais difundido atualmente além de apresentar maturidade do ponto de vista comercial e industrial. De acordo com Lora²¹ apud Mateus (2010, p.49), a desvantagem desse sistema é a pouca flexibilidade em relação à variação de carga, de modo que a potência elétrica fica condicionada ao consumo de vapor no processo.
- Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração: *“Consiste na condensação total ou parcial do vapor ao final da realização do trabalho na turbina para atendimento às atividades mecânicas ou térmicas do processo produtivo. Esta energia a ser condensada, quando inserida em um processo de cogeração, é retirada em um ponto intermediário da expansão do vapor que irá movimentar as turbinas. A diferença fundamental desta rota em relação à contrapressão é a existência de um condensador na exaustão da turbina e de níveis determinados para aquecimento da água que alimentará a caldeira. A primeira característica proporciona maior flexibilidade da geração termelétrica (que deixa de ser condicionada ao consumo de vapor no processo). A segunda proporciona aumento na eficiência global da geração de energia. Este sistema, portanto, permite a obtenção de maior volume de energia elétrica”*. Um inconveniente deste sistema é o alto custo necessário à sua instalação, muito superior aos investimentos necessários à implantação do sistema simples de condensação.

Os sistemas de cogeração supracitados também podem ser classificados de acordo com a ordem de produção de cada tipo de energia. Assim, tem-se os sistemas *“toppingcycle²²”* e *“bottomingcycle”*, respectivamente. No primeiro deles, a produção de

²¹ LORA, Electo Eduardo Silva. Controle da poluição do ar na indústria açucareira. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. 2000.

²² Na configuração *topping*, o combustível é queimado primeiramente em uma máquina térmica para produção de energia mecânica ou elétrica e o calor rejeitado é utilizado sob a forma de calor útil em um processo.

energia elétrica é privilegiada e o resíduo de sua produção (vapor) é utilizado nos processos que necessitam de energia térmica na forma de vapor a baixas temperaturas e/ou pressão. No *bottoming cycle*, a geração de energia elétrica é secundária (RIBAS, 2014).

Entre esses dois sistemas de cogeração, o mais utilizado no Brasil é o *topping*, pois o vapor residual do processo geralmente está a uma temperatura muito baixa para poder ser reaproveitado na geração de eletricidade. Assim, os sistemas *bottoming* são utilizados apenas em indústrias cujos processos forneçam grande quantidade de calor residual, limitando assim o uso desse ciclo (SANTOS e NOVO, 2008).

Balestieri (2002) aponta três estratégias de operação possíveis para centrais de cogeração em regime *topping*, conforme descrito a seguir.

1) Paridade térmica: nesse caso, o sistema é dimensionado de forma a ser atendida, primordialmente, a demanda térmica do processo. Pode, ou não, haver suplemento de calor por caldeiras auxiliares, em caso de alta demanda. Nesse caso, a energia elétrica é tratada como um subproduto, devendo ser adquirida da rede, caso a produção interna não seja suficiente. Caso haja excedente, a energia elétrica pode ser vendida à rede da concessionária de distribuição. A demanda para a qual o sistema está sendo projetado é a térmica.

2) Paridade elétrica: O sistema é projetado para atender prioritariamente a demanda elétrica. Para esses sistemas, o déficit de energia térmica deve ser adquirido de fornecedores externos, ou então, produzido a partir de um sistema de geração de vapor independente. Em sistemas operando em paridade elétrica, o excedente de energia térmica – vapor, caso exista, só poderá ser comercializado caso o mesmo se encontre próximo suficiente de outros consumidores. Por se tratar de um sistema que é projetado para suprir a demanda elétrica não existe excedente elétrico.

3) Despacho econômico: corresponde à colocação da central de cogeração em funcionamento apenas nos períodos em que a tarifa paga pela concessionária apresenta um retorno que interesse ao investidor. A central de cogeração poderá ficar desligada da concessionária nos casos em que não houver uma atratividade econômica em sua operação, ainda que isto implique custos devido à ociosidade dos equipamentos. Nessa estratégia, procura-se atender à comercialização de excedentes em períodos de tempo limitados, ou seja, na escala temporal diária ou na mensal, na medida em que os excedentes, térmicos ou elétricos, existam e que apresentem atratividade econômica e financeira.

Em relação ao processo de armazenamento de bagaço, este deve ser cuidadosamente planejado. A temperatura do bagaço armazenado sofre elevação, devido à ação de

decomposição do resíduo por microorganismos, podendo comprometer a saúde dos trabalhadores pela bagaçose. Esta tem sido descrita como uma pneumonia de hipersensibilidade caracterizada por inflamações dos brônquios e alvéolos, originada pela ação bacteriana das endotoxinas desenvolvidas no bagaço armazenado (ABMT, 2003). Deste modo, várias pesquisas têm sido realizadas para estudar os meios ideais para armazenamento de bagaço.

3.3 O aproveitamento do bagaço de cana para produção de energia elétrica

Para entender a importância da participação do bagaço de cana dentro da matriz elétrica nacional, primeiramente, faz-se necessário uma breve caracterização desse setor, que é principalmente composto por hidrelétricas (70,6%).

De acordo com dados atuais do Banco de Informações de Geração – BIG da ANEEL, há um total de 4.147 empreendimentos do setor de geração de energia elétrica em operação no país, totalizando 137.703.074 kW de potência instalada. Está prevista para os próximos anos uma adição de 40.574.539 kW na capacidade de geração do País, proveniente dos 186 empreendimentos atualmente em construção e mais 674 em empreendimentos com construção não iniciada (ANEEL, 2015).

Entre os empreendimentos do setor de geração de energia elétrica nacional, que se encontram em operação, estão os seguintes tipos: i) Central Geradora Hidrelétrica; ii) Central Geradora Eólica; iii) Pequena Central Hidrelétrica; iv) Central Geradora Solar Fotovoltaica; v) Usina Hidrelétrica; vi) Usina Termelétrica; vii) Usina Termonuclear.

O Brasil possui um grande potencial de geração de eletricidade a partir da energia hidráulica, com mais de mil empreendimentos produtores de hidroeletricidade que, juntos, somaram, em 2015, cerca de 90.220.869 kW (ANEEL, 2015). Pelas condições naturais do Brasil essa prática é favorável e os empreendimentos desse tipo continuam sendo construídos nas diversas bacias hidrográficas do país.

As usinas do tipo termelétricas ocupam a segunda posição em capacidade de geração e a primeira em número de empreendimentos, totalizando 41.112.575 kW e 2.679, respectivamente (ANEEL, 2015). Elas são fundamentais para a garantia de energia elétrica no país, principalmente quando ocorre abaixamento nos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas, o que reduz o potencial de geração de energia elétrica consideravelmente, a exemplo do que no país tem ocorrido atualmente. Nesse tipo de empreendimento, além disso,

vem se tornando uma prática comum a autoprodução²³ de energia, que significa dizer que os empreendimentos recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo, nos diversos ramos da indústria brasileira, o que aumenta ainda mais o potencial de utilização da queima de combustíveis renováveis para a geração de eletricidade, dando viabilidade econômica para essa atividade.

As termelétricas que usam o bagaço de cana servem como um sistema complementar à produção de energia elétrica a partir de recursos hídricos. Isto porque a produção de excedente de energia elétrica transformou o setor sucroalcooleiro em um produtor independente de energia.

3.3.1 A reestruturação do setor elétrico brasileiro e a sua ligação com a energia elétrica proveniente da biomassa de cana-de-açúcar

Não é nenhuma novidade afirmar que o sistema elétrico brasileiro é algo único do gênero no cenário mundial. Apoiado principalmente sobre a energia hidráulica, que é uma fonte renovável de energia, ele apresenta uma flexibilidade que permite até que a demanda por energia cresça antes da oferta, graças ao fato de o sistema ter uma única e grande reserva hídrica compartilhada, funcionando como uma imensa bateria (SANTOS et al., 2008).

Entretanto, o modelo do setor elétrico criado pela Eletrobrás²⁴, passou por grandes turbulências no final dos anos 1980, com as taxas de consumo de energia se tornando cada vez maiores e o país com seus investimentos no setor estacionados, gerou uma grave crise no fornecimento na metade da década de 1990 aliada conjuntamente às condições climáticas da época. Com isso, aceleraram as discussões a respeito da desverticalização do setor, que fez com que o país optasse por novas reformas baseadas nas políticas neoliberais que configurava o novo cenário econômico mundial do final do século XX e início do século XXI. Esse novo modelo de desenvolvimento consistia na transferência de setores econômicos do país que tinham potencial de lucro e que estavam sendo controlados pelo Estado para o setor privado.

²³ A ANEEL define como autoprodutor de energia elétrica a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo.

²⁴ A Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás) foi instalada oficialmente em 1962, durante o governo do presidente João Goulart, com a atribuição de promover estudos, projetos de construção e operação de usinas geradoras, linhas de transmissão e subestações destinadas ao suprimento de energia elétrica do país. Ou seja, a Eletrobrás tinha a missão de contribuir decisivamente para a expansão da oferta de energia elétrica e o desenvolvimento do país. Após reformas institucionais e privatizações na década de 1990 e posteriormente a nova regulamentação do setor elétrico em 2004 a companhia perdeu algumas funções e houve mudanças em seu perfil de atuação. Hoje, a Eletrobrás controla doze subsidiárias, um centro de pesquisas e detém metade do capital de Itaipu Binacional.

Assim, foram publicadas a Lei Federal N° 8.031, de 12 de abril de 1990 (que instituiu o Plano Nacional de Desestatização – PND), a Lei Federal N° 8.987, de 13 de fevereiro de 1995 (sendo conhecida como Lei das Concessões, que exigia que as concessões acontecessem por meio de licitações) e a Lei Federal N° 9.074, de 7 de julho de 1995 (que legalizava a competição de geradores e distribuidores de energia e introduziu o conceito do produtor independente de energia elétrica – PIE). Essas leis são consideradas o marco do novo modelo proposto para o Setor Elétrico Nacional e estabelecem as diretrizes baseadas em um mercado competitivo de energia elétrica. Nesse cenário de mudanças, ainda ocorreu a promulgação da Lei Federal N° 8.631, de 4 de março de 1993, que acabou com o nivelamento das tarifas de energia elétrica pagas pelas diferentes regiões do país e com a porcentagem mínima de 10% de retorno para as concessionárias. O Quadro 3.1 apresenta um breve histórico da nova configuração do setor elétrico brasileiro a partir da desestatização do mesmo, ocorrida no governo do presidente Fernando Henrique Cardoso.

Quadro 3.1 – Breve histórico da reestruturação do setor elétrico nacional a partir dos anos 1990

Ano	Lei	Principais aspectos
1993	Lei N° 8.631	Extinção da equalização tarifária e manutenção do regime de serviço pelo custo, com a previsão de reajustes dos níveis tarifários. Imposição aos concessionários geradores e distribuidores de celebração de contrato de suprimento de energia elétrica.
1995	Lei N° 8.987	Concessões e permissões de serviços públicos.
1995	Lei N° 9.074	Novos parâmetros para a exploração de potenciais hidráulicos mediante concessão, precedida de licitação, ou autorização.
1996	Lei N° 9.427 (alterada pela Lei N° 12.351/2010)	Criação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL como autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME. Atribuições da ANEEL: regulação e a fiscalização da produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal.
1998	Lei N° 9.648	Inauguração da livre negociação da compra e venda de energia elétrica, inclusive com a participação dos concessionários de distribuição de energia. Criação do Mercado Atacadista de Energia Elétrica – MAE e do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, para viabilizar a livre concorrência.
2004	Lei N° 10.848	Alterações no setor elétrico, sobretudo quanto à comercialização de energia, que se daria no Ambiente de Contratação Regulada – ACR e no Ambiente de Contratação livre – ACL. Aquisição de energia por meio de leilões promovidos pelo Poder Concedente.
2004	Lei N° 10.847, editada em conjunto com a Lei N° 10.848	Criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME. Atribuições da EPE: realizar pesquisas para subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo, gás natural, carvão mineral, fontes renováveis, entre outras.

Fonte: Elaboração própria

Como visto, através da Lei Federal N° 9.074/1995 foram estabelecidos novos parâmetros para a exploração de potenciais hidráulicos mediante concessão, precedida de

licitação, ou autorização, trazendo o reconhecimento da figura do produtor independente de energia, definido como sendo “a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização do poder concedente, para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco”. Cria-se, então, a oportunidade de comercialização da energia elétrica gerada por novos geradores independentes, configurando entre eles os operadores de instalações de cogeração, como é o caso do setor sucroalcooleiro, objeto deste presente trabalho.

Contudo, com relação à classificação das usinas sucroalcooleiras como autoprodutores ou produtores independentes de energia é importante considerar que elas podem ser enquadradas nas duas situações. Isto porque o Decreto Federal N° 2.665, de 2 de julho de 1998, concedeu aos autoprodutores a permissão para a comercialização da energia co-gerada que exceder ao consumo de sua planta industrial, de acordo com prévia autorização da ANEEL. Assim, as usinas que se dedicam a produção de energia para seu próprio consumo tem a possibilidade de, eventualmente, comercializar o excedente elétrico de sua produção.

Por outro lado, de acordo com a Lei Federal N° 9.074/95, as usinas sucroalcooleiras também podem ser classificadas como produtoras independentes de energia (SOUZA, 2002). De acordo com o Decreto Federal N° 2.003, de 10 de setembro de 1996, o setor sucroalcooleiro classificado como produtor independente de energia pode comercializar seus excedentes junto aos seguintes agentes do setor elétrico: i) distribuidoras de serviço público de eletricidade; ii) consumidores livres de eletricidade (adquire energia elétrica de qualquer fornecedor, conforme legislação e regulamentos específicos); iii) comercializadores de eletricidade; iv) consumidores de eletricidade integrantes de complexo industrial ou comercial, aos quais forneça vapor ou outro insumo oriundo de processo de cogeração; v) conjunto de consumidores de eletricidade, independentemente de tensão e carga nas condições previamente ajustadas com a concessionária local de distribuição e vi) qualquer consumidor que demonstre a ANEEL não ter a distribuição local lhe assegurando o fornecimento de eletricidade no prazo de até 180 dias, contanto da respectiva solicitação.

Segundo Souza (2002), mesmo com a definição apresentada pelo Decreto Federal N° 2.003/96, só vigorava a opção de vender o excedente de energia elétrica para a distribuidora local. Ou seja, as demais opções, como a de negociar o excedente com o consumidor livre, dependiam da regulamentação do acesso dos produtores independentes de energia as redes de distribuição e transmissão das distribuidoras, bem como de sua conexão. O problema somente foi solucionado com a promulgação da Resolução da ANEEL N° 281, de 01 de outubro de

1999, que estabeleceu as condições gerais de contratação do acesso, compreendendo o uso e a conexão, aos sistemas de transmissão e distribuição de eletricidade, permitindo, desse modo, a efetivação do disposto no Decreto Federal N° 2.003/96. Dessa forma, foi possível a comercialização direta entre produtores e consumidores livres, independente de sua localização no sistema elétrico.

A própria configuração do setor sucroalcooleiro, que caracteriza a energia elétrica proveniente da cogeração no setor sucroalcooleiro como sendo de geração distribuída²⁵, constitui-se em uma condição vantajosa, pois é gerada próxima aos principais centros de consumo, em razão da concentração da produção de cana no Sudeste e da expansão dessa cultura em áreas de fronteira agrícola no Centro-Oeste. De fato, o subsistema Sudeste/Centro-Oeste responde por cerca de 60% da carga do Sistema Interligado Nacional – SIN (NYKO et al., 2011).

Para o Setor Elétrico Nacional, a partir de 2004, a comercialização da energia elétrica no país passou a contar com dois diferentes ambientes de contratação, sendo um chamado Ambiente de Contratação Regulada – ACR, com agentes de geração e de distribuição de energia e o outro Ambiente de Contratação Livre – ACL, com geradores, distribuidores, comercializadores, importadores e exportadores, consumidores livres e especiais. Além disso, para alcançar a modalidade tarifária, foram instituídos os leilões como instrumento de compra de energia elétrica pelas distribuidoras no ambiente regulado. Esses leilões são realizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, por delegação da ANEEL, e avaliam a energia elétrica sob o critério de menor tarifa (CCEE, 2015b).

Quanto à disponibilização de energia elétrica proveniente da queima do bagaço de cana no Ambiente de Contratação Regulado – ACR, em 2008, o Ministério de Minas e Energia – MME promoveu o primeiro leilão de energia de reserva, com entrega da produção em 2009 e 2010, estando o maior potencial de aproveitamento da biomassa energética concentrado nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás, que, aliás, são os maiores produtores de cana-de-açúcar (MATEUS, 2010).

Segundo GARDOS et al. (2008), estavam aptos a participar desse leilão, na época, 154 empreendimentos, distribuídos entre os estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, conforme Tabela 3.1.

²⁵ O Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE) define como Geração Distribuída (GD) uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia.

Tabela 3.1 – Empreendimentos sucroalcooleiros aptos a participar do 1º Leilão de Energia de Reserva em 2008

Estados	Energia a ser fornecida no 1º Leilão de Energia de Reserva de 2008		
	Quantidade de empreendimentos aptos a participar do leilão	Entrega da produção em 2009 (MW)	Entrega da produção em 2010 (MW)
São Paulo	105	609	2.547
Minas Gerais	26	555	1.078
Goiás	23	480	700

Fonte: GARDOS et al. (2008)

O 1º Leilão de Energia de Reserva realizado, em 14 de agosto de 2008, constituiu-se em um marco para o Setor Elétrico nacional pelo fato de ser uma reserva estrutural para o sistema elétrico composta exclusivamente por uma fonte energética renovável, com potencial relevante para o país e com possibilidade de entrega da energia em 2009, que por si só foi uma vantagem em comparação aos cronogramas típicos de usinas térmicas, que normalmente levam três anos para começarem a operar e, ainda de hidrelétricas de grande porte, em que esse tempo sobe para até cinco anos.

O resultado do 11º Leilão de Energia de Reserva resultou na contratação de 2.349,40 MW para o sistema elétrico brasileiro em 2009 e 2010. Um total de 31 usinas termelétricas movidas à biomassa (bagaço de cana e capim elefante) participou do leilão, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resultado do 1º Leilão de Energia de Reserva realizado em 2008

Entrega da energia	Distribuição dos empreendimentos	Potência (MW)	Preço de venda (R\$/MWh)
2009	3	229,50	60,86
2010	28	2.149,90	58,71
<i>Total</i>	<i>31</i>	<i>2.379,40</i>	<i>58,84</i>

Fonte: EPE (2008)

O prazo de vigência dos contratos estabelecidos no 1º Leilão de Energia de Reserva foi de quinze anos, para os empreendimentos movidos à biomassa que ainda não tenham entrado em operação comercial.

Em seguida a este leilão específico, outros leilões realizados até o presente momento contemplaram a biomassa bagaço de cana como fonte energética, contudo, nenhum deles foi voltado exclusivamente para essa fonte.

A comercialização da energia elétrica do setor sucroalcooleiro nos dois ambientes de mercado (ACR e ACL) totalizou 215 MW médios até dezembro de 2013, em um total de 23 leilões realizados, que contou com a participação do bagaço de cana em 14 deles (MME; EPE, 2014).

Mais recentemente, um destaque para a biomassa de bagaço de cana aconteceu no 3º Leilão de Fontes Alternativas, realizado em abril de 2015, quando tal fonte representou 76% do total da energia contratada, conforme Tabela 3.3, a seguir. Novamente, os estados participantes foram São Paulo, Minas Gerais e Goiás. A entrega de energia do 3º Leilão de Fontes Alternativas ocorrerá a partir do dia 01 de julho de 2017.

Tabela 3.3 – Resultados da participação do bagaço de cana no 3º Leilão de Fontes Alternativas em 2015

Estados	Distribuição dos empreendimentos	Potência (MW)	Preço médio de venda (R\$/MWh)
São Paulo	5	389,00	209,91
Minas Gerais	1	53,20	
Goiás	2	90,73	

Fonte: EPE (2015); INSTITUTO ACENDE BRASIL (2015)

Por outro lado, os usineiros encontram dificuldades com relação ao preço da energia e interesse das concessionárias, pois há a necessidade de investimentos na instalação de linhas de transmissão de energia nos canaviais.

3.3.2 A participação na matriz elétrica nacional da energia proveniente do bagaço de cana

As qualificações do uso da eletricidade proveniente da queima do bagaço de cana-de-açúcar são: i) competitividade em termos de custo; ii) complementaridade sazonal com relação ao regime de chuvas; iii) maturidade da indústria sucroenergética; iv) contribuição na redução de emissões de gases de efeito estufa; v) proximidade ao centro de carga. Para se ter ideia da sazonalidade das aflúências médias, os números, em 2008, foram os seguintes: no mês de fevereiro a Energia Natural Afluyente – ENA²⁶ chega a mais de 89 GW médios e em setembro, período mais seco, esse valor alcança níveis de 30 GW médios, quase um terço do

²⁶ Energia hídrica que corre pelos rios com fins energéticos.

potencial na época de cheia dos rios. Contudo, esse problema é amenizado com a estocagem de água nos reservatórios (barragens) durante a época chuvosa. A viabilidade econômica e a complementaridade do sistema de geração de energia a partir do bagaço são os pilares para a expansão dessa atividade, dado que o segundo, completa de forma perfeita, a geração hidrelétrica, pois o período de seca, das regiões Sudeste e Centro-Oeste, que em 2008 concentrava cerca de 70% da capacidade dos reservatórios nacionais, coincide com a época de safra da cana-de-açúcar, que se estende dos meses de abril a novembro (MACEDO; SOUZA, 2010).

Pode-se afirmar, então, que o bagaço de cana tem papel fundamental na finalidade de complementar a produção de energia elétrica a partir de recursos hídricos, diversificando as fontes de geração de energia elétrica no Brasil. Não obstante, as termelétricas foram determinadas, após o apagão de 2001, como fundamentais para a garantia de energia elétrica, principalmente quando ocorre baixa nos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas, o que reduz o potencial de geração de energia elétrica. Porém, a ação governamental apoiou-se sobremaneira em combustíveis fósseis como o gás natural. Neste contexto, o bagaço de cana é um diferencial estratégico, principalmente por ser uma fonte renovável de energia.

Para estimular a geração de energia através da exploração de usinas termelétricas e outras fontes alternativas, em 2009, a ANEEL regulamentou a Resolução Normativa N° 390, de 15 de dezembro de 2009. Essa norma permitiu que centrais geradoras com capacidade instalada reduzida, distribuíssem e comercializassem a energia produzida. A regulamentação da ANEEL beneficiou produtores rurais e instituições de todo país. Dessa maneira, cada região passou a explorar os recursos produzidos, gerando, por exemplo, o biogás, antes descartado em sua maioria.

De acordo com dados da ANEEL (2015), atualmente 391 empreendimentos possuem capacidade instalada de 10.799 MW de energia a partir do bagaço de cana, ficando atrás apenas da geração a partir de hidroelétricas e das termelétricas a gás natural. Desse total de empreendimentos, 66 são autoprodutores de energia elétrica e 204 são produtores independentes. O restante dos empreendimentos está classificado como registro²⁷.

A verificação da participação do bagaço no setor elétrico se faz, sobretudo, através dos números da produção de cana-de-açúcar e, os índices registrados ao longo dos anos, apontam

²⁷ Refere-se aos micro e mini geradores conforme Resolução Normativa da ANEEL N° 482, de 17 de abril de 2012.

positivamente para o aumento do potencial (teórico) de geração de bioeletricidade a partir da cogeração do bagaço.

De acordo com o MME (2014), a capacidade instalada de geração elétrica no Brasil, ao final de 2014, atingiu o montante de 133,9 GW, com participação de 9,9 GW de biomassa de cana. Com 9,9 GW, a capacidade instalada a bagaço de cana representa 81% das plantas de biomassa e 7,4% da estrutura nacional de usinas geradoras de energia em operação. Em termos de autoprodução de energia elétrica, o setor sucroalcooleiro responde por mais de 47% da capacidade (vide Tabela 3.4) e, em 2014, gerou 19.500 GWh de excedentes de energia elétrica, superando a geração em 2013 (16.000 GWh) e em 2012 (12.140 GWh).

Tabela 3.4 – Dez maiores setores autoprodutores de energia elétrica no Brasil em 2014

Nº	Setor	Capacidade (MW)	%
1	Açúcar e Alcool	9.881	47,3
2	Não Ferrosos	2.367	11,3
3	Siderurgia	2.146	10,3
4	Papel e Celulose	2.282	10,9
5	Mineração e Pelotização	1.161	5,6
6	Serviços	586	2,8
7	Agropecuária	496	2,4
8	Química	480	2,3
9	Petróleo e Gás*	467	2,2
10	Cimento	426	2,0
	Outros	607	2,9
	Brasil	20.898	100

* Passa a 2.600 MW, incluindo a potência de plataformas não registradas na ANEEL.

Fonte: MME (2015)

Há, ainda, expectativas com relação ao aumento da participação do setor sucroenergético nos leilões de energia com a introdução da Resolução Normativa nº 479 da ANEEL, em vigor no país desde abril de 2012.

Assim, apesar da crise que afligiu o setor nas últimas safras, a geração de renda a partir da biomassa é um investimento ainda não totalmente explorado, mas lucrativo e continua sendo alvo de novos projetos.

3.3.3 O consumo de energia nas usinas sucroalcooleiras

Para se ter uma ideia do gasto energético em uma planta industrial do setor sucroalcooleiro, é apresentado, na Tabela 3.5. o consumo de energia no processamento industrial da cana-de-açúcar.

Tabela 3.5 – Demanda energética no processamento industrial da cana-de-açúcar

Tipo de Energia	Unidade	Açúcar	Etanol hidratado	Etanol anidro
Térmica Aquecedores, evaporadores e destilaria	kg _{vapor} /t de cana	470-500	370-410	500-580
Mecânica Acionamento dos sistemas de preparo e moagem da cana	kWh/t de cana	16	16	16
Elétrica Motores elétricos diversos, iluminação e outras cargas	kWh/t de cana	12	12	12

Nota: considerou-se a demanda de vapor de 3,0 kg a 3,5 kg de vapor por litro de etanol hidratado e 1,5 kg a 2,0 kg de vapor por litro para o etanol anidro.

Fonte: Adaptado de CGEE e BNDES (2008)

Como a produção de etanol envolve grande descarte de água, a demanda por energia é alta, especialmente de energia térmica.

De acordo com a Tabela 3.5, em condições típicas, as usinas brasileiras consomem no preparo e na moagem da cana 16 kWh por tonelada de cana, e mais 12 kWh por tonelada de cana em outros processos industriais específicos. Desse modo, usinas com capacidade de geração acima de 28 kWh por tonelada de cana processada podem disponibilizar o excedente de energia produzida para comercialização (CGEE e BNDES, 2008).

Os custos de geração já são competitivos com os do sistema convencional de suprimento, o que possibilita a autossuficiência do setor em termos de energia elétrica, por meio da cogeração (CCEE, 2015a).

Outra fonte que apresenta o gasto energético relacionado à produção de etanol é dada por Salla et al. (2009), conforme Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Custo energético para produzir um 1L de etanol nas operações de produção e processamento da cana-de-açúcar na região paulista do Médio Paranapanema

Operações de produção da cana-de-açúcar	MJ L ⁻¹	%
Preparo de área	0,1	5,0
Plantio	0,1	2,5
Insumos	0,9	50,3
Condução da lavoura	0,3	13,5
Colheita	0,3	13,1
Transporte a Indústria	0,2	12,1
Depreciação energética	0,1	3,5
Total	2,0	100,0
Operações de processamento da cana-de-açúcar	MJ L ⁻¹	%
Desintegração /moagem	0,7	1,9
Hidrólise/sacarificação /Tratamento do caldo	13,8	56,1
Fermentação	0,1	0,5
Destilação	4,7	41,2
Manutenção	0,1	0,3
Total	19,4	100,0

Fonte: SALLA et al. (2009)

3.3.4 Eficiência da cogeração no setor sucroalcooleiro

Para o setor sucroalcooleiro, o estudo da eficiência dos equipamentos envolve o processo de obtenção do açúcar e do etanol, bem como daqueles que fazem parte do processo de cogeração de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana. Entretanto, um processo depende do outro, pois o colmo da cana-de-açúcar contém a sacarose, que é a matéria-prima básica necessária para a produção de açúcar e de etanol, que é obtida na moagem da cana, para extração do caldo, com extração de açúcares com eficiência que varia de 94% a 97,5%.

A tecnologia utilizada para a produção de açúcar, destilação de álcool e cogeração de energia elétrica, em Minas Gerais, considerando a safra de 2008/2009, é apresentada na Tabela 3.7. Os valores são similares aos utilizados em outros Estados da Federação como, por exemplo, São Paulo.

Tabela 3.7 – Aspectos tecnológicos dos empreendimentos em atividade em 2008 do setor sucroalcooleiro no Estado de Minas Gerais

	<i>Aspectos Tecnológicos</i>	<i>Empreendimentos em atividade</i>	<i>Total</i>
Moagem de cana-de-açúcar	Capacidade instalada (t/d)	768 – 22.500	356.176
	Tipo de equipamento de moagem	moenda	-
	Consumo médio de cana (t/d)	782,0 – 19.481,6	144.937
	Consumo específico de água (m ³ /t)	1,4	2 a 10 ⁽³⁾
Fabricação de álcool	Número de empreendimentos ⁽¹⁾	41	-
	Capacidade instalada (m ³ /d)	60 – 1.364	19.516
	Consumo específico de água (m ³ _{água} /m ³ _{etanol})	0,7 – 95,1	17,9 (média do setor)
Fabricação de açúcar	Número de empreendimentos ⁽¹⁾	25	-
	Capacidade instalada (sacas/d)	7.500 – 50.000	494.400
	Consumo específico de água (m ³ /m ³)	1,5 – 55,5	12,4 (média do setor)
Co-geração ⁽²⁾	Capacidade instalada dos geradores (MW)	0,5 – 80	787
	Capacidade instalada de geração vapor (t/h)	25 – 440	7.109
	Consumo médio de bagaço (t/h)	4 – 206,2	1.909
	Consumo específico de água (m ³ /kW)	0,3 (L) – 6,84	0,85 (média do setor)
	Índice de Geração de Vapor (kg vapor/kg bagaço)	0,75 – 5,4	2,8 (média do setor)
	Índice específico de geração bruta de eletricidade (kWh/t de cana moída)	0,7 – 48,3	>10,0 ⁽⁴⁾
1- Dentre os 43 empreendimentos em operação no Estado de Minas Gerais, 18 unidades se destinam exclusivamente à produção de álcool, enquanto dois se destinam apenas à produção de açúcar, os demais produzem açúcar e álcool; 2- Todos os 43 empreendimentos em atividade geram energia elétrica por meio da cogeração com uso do bagaço de cana-de-açúcar; 3- Valor de referência por FREIRE e CORTEZ (2000); 4- Valor de referência mínimo por LEME (2008).			

Fonte: Adaptado de MATEUS (2010)

Ao longo dos anos, o setor sucroalcooleiro brasileiro evoluiu em relação à sua autossuficiência em energia elétrica. Antes da década de 1980, a cogeração era utilizada apenas para o auto suprimento de energia elétrica e vapor (energia mecânica) com a utilização de caldeiras de baixa pressão (entre 1,2 MPa e 2,2 MPa). Posteriormente, o setor começou a se interessar pela exportação de seus excedentes de energia para a rede de distribuição. Embora algumas usinas tenham aumentado a sua eficiência na cogeração de energia elétrica, a grande maioria permaneceu operando com equipamentos de baixa pressão de vapor saturado. Esse aspecto, em particular, demonstra que o setor sucroalcooleiro pode apresentar um potencial muito aquém do estimado (TUDESCHINI, 2012).

Como visto anteriormente, a geração termelétrica e o atendimento energético nas usinas de açúcar e álcool tradicionalmente realizados por sistemas baseados em ciclos de cogeração *topping*. Segundo Corrêa Neto e Ramon (2002), esses ciclos se dividem em

topping a vapor em contrapressão e *topping* a vapor em condensação e extração. A diferença entre eles está no desempenho energético. Os ciclos tradicionais de cogeração *topping* a vapor em contrapressão operam com pressões de vapor saturado da ordem de 2,0 MPa, muito abaixo dos 8,0 MPa utilizados em usinas produtoras de açúcar de outras regiões do mundo e que proporcionam uma geração elétrica significativamente superior. As características técnicas desse ciclo estão descritas na Tabela 3.8 e seguem os resultados obtidos pelo Instituto Tecnológico de Pesquisas do Estado de São Paulo – IPT.

Tabela 3.8 – Características técnicas dos ciclos tradicionais de cogeração *topping* a vapor em contrapressão

Parâmetro	Unidade	Faixa de Ocorrência
Temperatura de Operação	(K)	553 a 623
Pressão de Operação	(MPa)	1,76 a 2,45
Produção e Consumo de Vapor	(kg _{vapor} /t de cana)	540 a 680
Eficiência das Caldeiras	Base PCSu (%)	55
Consumo de Energia Elétrica	(kWh/t de cana)	10 a 12,5
Geração de Energia Elétrica	(kWh/t de cana)	5 a 12
Eficiência das Turbinas	(%)	34
Eficiência da Geração Termoelétrica	(%)	1,5 a 4,5
Excedente de bagaço	(%)	12
Escala até	(MW)	25

Fonte: Adaptado de CAMARGO et al. (1990)

Para Pereira e Cerqueira (1995), o rendimento na geração de vapor será maior, quanto menores forem as perdas térmicas e, que o rendimento bruto varia entre 88% a 94% nas caldeiras de alta capacidade, e de 60% a 70% nas pequenas, observando-se que a maioria das usinas sucroalcooleiras ainda operam com caldeiras menores e mais antigas.

Para se ter uma ideia da baixa eficiência da tecnologia de geração de energia utilizada no setor sucroalcooleiro, o PNE 2030 apresentou para a safra de 2004/2005, quando a produção de cana-de-açúcar foi de 400 milhões de toneladas, uma geração de 8,1 TWh/ano. Caso todo potencial disponível fosse melhor aproveitado, através de ciclos de contrapressão eficientizado, com caldeiras de pressão mais elevada, seria possível produzir três vezes mais energia, ou seja, cerca de 24,3 TWh/ano. Adicionalmente, a recuperação da palha para fins energéticos permitiria elevar a produção de eletricidade em cerca de 40% (EPE, 2007).

Para os ciclos de cogeração *topping* a vapor com condensação e extração, o vapor que sai da turbina pode ser total ou parcialmente condensado e retornar à caldeira, sendo que o

vapor necessário ao atendimento dos processos industriais é fornecido por extração de vapor na turbina em um ponto intermediário da mesma e pelo vapor de contrapressão das turbinas de acionamento mecânico (CORRÊA NETO; RAMON, 2002). As características técnicas desse ciclo consideram modificações no ciclo tradicional e estão descritas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Características técnicas dos ciclos de condensação e extração de baixa tecnologia

Parâmetro	Unidade	Valores adotados
Temperatura de Operação	(K)	798
Pressão de Operação	(MPa)	8,5
Produção e Consumo de Vapor	(kg _{vapor} /t de cana)	575
Eficiência das Caldeiras ⁽¹⁾	Base PCSu (%)	67
Consumo de Energia Elétrica	(kWh/t de cana)	18
Consumo de Vapor de Processo	(kg _{vapor} /t de cana)	320
Eficiência das Turbinas ⁽²⁾	(%)	50
Eficiência da Geração Termoelétrica ⁽³⁾	(%)	7,5
Excedente de bagaço	(%)	0
Escala até	(MW)	50

1- Caldeiras de geração de vapor a 8,5 MPa e 798K; 2- turbinas de múltiplos estágios com vapor a 2,1 MPa e 553K; 3- turbogeradores de condensação e extração a 2,1 MPa e a 0,25 MPa.

Fonte: Adaptado de CAMARGO et al. (1990)

Se por um lado os sistemas a vapor utilizados no setor sucroalcooleiro constituem uma tecnologia amplamente conhecida, onde os equipamentos (caldeiras, turbinas e geradores elétricos) são de fabricação nacional, há uma limitação econômica para o emprego de temperaturas mais elevadas, pois o aço produzido no Brasil e, que é empregado na confecção das caldeiras, por exemplo, pode suportar temperaturas até no máximo 793 K. Outros tipos de aços, com capacidade de suportar maior quantidade de calor, precisariam ser importados, tornando o volume de investimentos, com fins de aumento de eficiência energética, proibitivos. Dessa forma, ainda encontram-se, em operação, as caldeiras de baixa pressão em muitos empreendimentos do setor sucroalcooleiro. Em relação às turbinas, a potência máxima desses equipamentos está limitada a 50 MW por motivos econômicos, pois o mercado nacional de geradores elétricos só atende até esse nível de potência (ENSINAS et al. 2010).

Segundo Ensinas et al. (2010), a própria evolução na configuração no projeto de construção das caldeiras e o progressivo aumento dos parâmetros de pressão e temperatura do vapor, da ordem de 6 MPa e 753 K a 793 K, respectivamente, levaram a um melhoramento da eficiência das mesmas, com a introdução de dispositivos capazes de aproveitar a energia térmica dos gases de escape para promover o aquecimento do ar de alimentação, como é o

caso dos pré-aquecedores de ar. Outro dispositivo, mais recentemente empregado, é o secador de bagaço, que tem a função de reduzir a umidade do bagaço de cana. Outro aspecto que merece destaque é o tipo de queima do bagaço. O bagaço deixou de ser queimado em pilhas, onde havia uma queima instável e deficiente, e passou a ser queimado em suspensão, devido à alterações nos projetos das caldeiras, com alimentação do bagaço ocorrendo a uma altura de 1m a 4m.

Percebe-se, então, que a avaliação da eficiência das usinas de cogeração depende de fatores de projeto e parâmetros adotados para o funcionamento dos equipamentos utilizados.

Ressalta-se, ainda, que a forma de produção do etanol e de açúcar tem impacto direto na sustentabilidade da geração de energia elétrica a partir da cogeração do bagaço de cana, uma vez que, no Brasil, a maior parte do setor sucroalcooleiro ainda realiza a colheita manual da cana-de-açúcar, que envolve o processo de queima, gerando assim os chamados gases de efeito estufa (GEE).

4 – ESTUDO DE CASO: A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA QUEIMA DO BAGAÇO DE CANA EM MINAS GERAIS

No Brasil, existem 392 usinas no setor sucroalcooleiro (ANEEL, 2015) sendo que, a grande maioria delas, é do tipo “mista”, isto é, que conseguem produzir tanto etanol, quanto açúcar. Dessa forma, o país sustenta as posições de segundo maior produtor de etanol e de maior produtor de açúcar mundial.

Atualmente, a produção de cana-de-açúcar da Região Centro-Sul responde por 90,7% de toda produção brasileira, com destaque para os Estados de São Paulo, Goiás e Minas Gerais.

Minas Gerais está entre os maiores produtores de cana-de-açúcar, ocupando a terceira posição no ranking nacional, com um total produzido de 59,7 milhões de toneladas na safra de 2014/15, conforme CONAB (2015a). Esse montante representa 9,4% do total nacional de cana-de-açúcar, cultivados em uma área de 805,5 mil hectares do estado mineiro.

Com relação ao potencial estadual de geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana, é necessária uma avaliação do setor sucroalcooleiro atual. Assim, a análise da capacidade instalada de cogeração do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais passa, inicialmente, pelo número de empreendimentos existentes nesse setor e também das perspectivas da introdução de novas instalações e de ampliações daqueles já existentes. O desempenho das usinas deve ser avaliado sob o ponto de vista das análises dos potenciais teóricos de geração de eletricidade em função dos equipamentos existentes nas usinas de cogeração, levando em conta as várias características técnicas dos sistemas que formam as usinas.

Portanto, o estudo de caso, aqui tratado, aborda a configuração do cenário energético, o perfil tecnológico, ambiental e socioeconômico do setor sucroalcooleiro e a estimativa de geração de bagaço excedente que poderá ser destinado à produção de energia elétrica no Estado de Minas Gerais.

A caracterização do setor sucroalcooleiro mineiro contou com análises de dados e informações disponibilizados em publicações de órgãos governamentais, bem como de órgãos competentes e de grande relevância no cenário energético estadual e de estudos específicos do setor como é o caso de Mateus (2010).

As informações dos empreendimentos sucroalcooleiros basearam-se em um levantamento realizado junto ao órgão ambiental estadual, através do Sistema Integrado de Informações Ambientais – SIAM, pertencente à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais – SEMAD.

Em Minas Gerais, o licenciamento ambiental é determinado pelas diretrizes da Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 09 de setembro de 2004, que estabelece os critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ambiental de funcionamento ou de licenciamento ambiental no nível estadual entre outros. A consulta aos processos de licenciamento ambiental do setor permitiu investigar quais empreendimentos estão aptos para operar e aqueles que se encontram em fase de projeto ou instalação. Anexadas a esses processos, encontram-se importantes documentos a respeito do processo produtivo de cada empreendimento. Trata-se dos estudos ambientais exigidos para obtenção do licenciamento, como o Estudo de Impacto Ambiental – EIA e seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental – RIMA, o Relatório de Controle Ambiental – RCA, o Plano de Controle Ambiental – PCA e o Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – RADA.

É importante salientar que o conteúdo dos processos de licenciamento ambiental é de acesso público²⁸, conforme preconiza a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei Federal Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981), que garantiu à população o acesso às informações ambientais, bem como a criação de audiências públicas para tomada de decisão em relação aos planos e programas de atividades potencialmente poluidoras do meio ambiente.

A relação dos empreendimentos sucroalcooleiros de Minas Gerais e os processos consultados estão no Anexo 1.

4.1 A representatividade do setor sucroalcooleiro na matriz energética de Minas Gerais

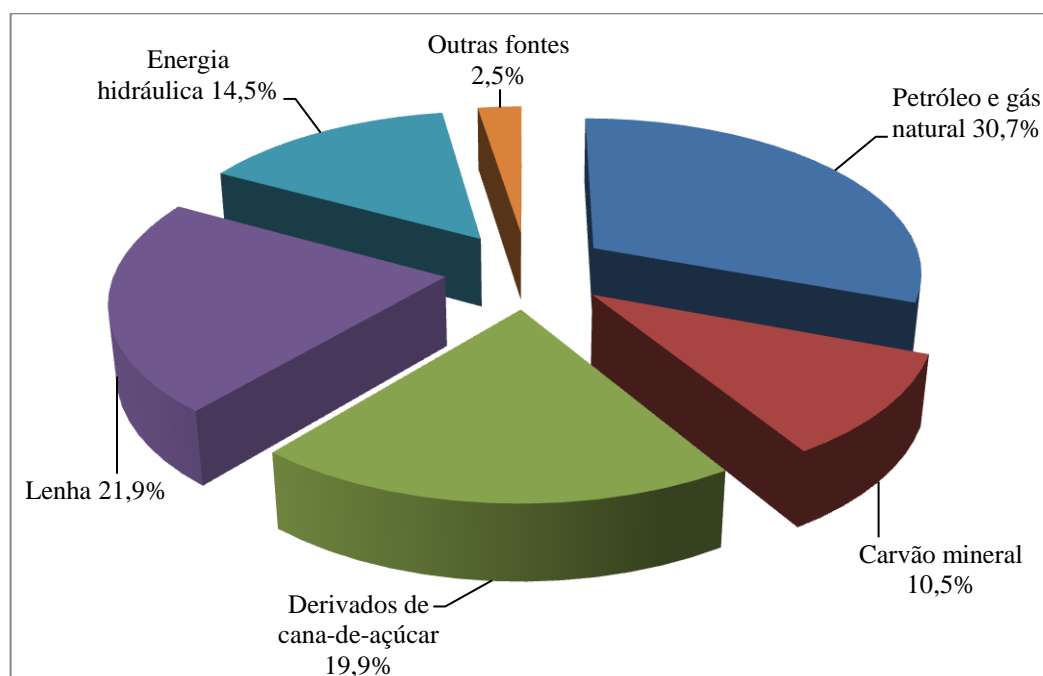
A matriz energética do Estado de Minas Gerais apresenta uma grande demanda por energia de fontes renováveis. Segundo o 29º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG, em 2013, do total da demanda estadual de energia, 50,9% referiram-se às fontes renováveis de energia e o restante às fontes não renováveis (CEMIG, 2015).

²⁸ A Lei Federal Nº 10.650, de 16 de abril de 2003, dispõe sobre o acesso público aos dados e informações existentes nos órgãos e entidades integrantes do Sistema Nacional do Meio Ambiente, instituído pela Lei Nº 6.938/81. Em Minas Gerais, a Lei Estadual Nº 15.971, de 12 de janeiro de 2006, assegura o acesso a informações básicas sobre o meio ambiente, em atendimento ao disposto no inciso II do § 1º do art. 214 da Constituição do Estado.

Particularmente, a lenha e derivados possuem uma significativa participação na matriz energética estadual, sobretudo nos setores industrial e residencial apresentando, em 2013, a participação de 36,6% do total das fontes renováveis de energia (CEMIG, 2015). Mas, a sustentabilidade dessa fonte depende diretamente de políticas que incentivem o corte apenas de florestas plantadas, o combate ao desmatamento e a restrição às importações de lenha nativa.

O Gráfico 4.1 apresenta a oferta interna bruta de energia, em Minas Gerais, para o ano de 2013, conforme 29º BEEMG.

Gráfico 4.1 – Oferta interna de energia por fonte em Minas Gerais, em 2013



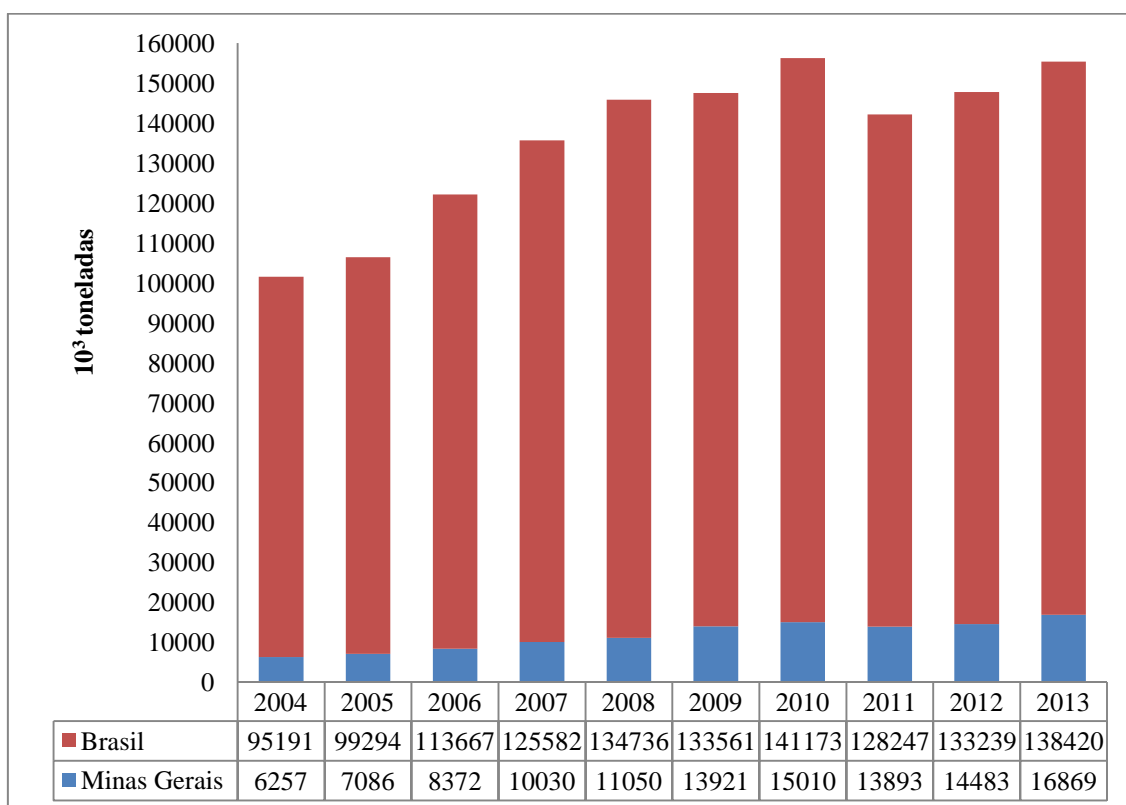
Fonte: Adaptado de CEMIG, 2015.

Com relação aos derivados da cana-de-açúcar, a demanda por essa fonte representou, no estado de Minas Gerais, cerca de 15,7% em 2013.

De acordo com o 29º BEEMG (CEMIG, 2015), foram produzidas 16,9 milhões de toneladas de bagaço de cana em 2013, sendo que 11,6 milhões de toneladas foram consumidas, principalmente, na geração de vapor de processo e para geração de eletricidade no setor sucroalcooleiro.

Destaca-se, ainda, que a evolução do consumo estadual de bagaço de cana foi positiva nos últimos dez anos, com exceção de 2011, com a queda na produção na safra da cana-de-açúcar de 2010/2013, conforme já discutido anteriormente. A série temporal do consumo de bagaço de cana em Minas Gerais e no Brasil é apresentada no Gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 – Evolução do consumo de bagaço de cana em Minas Gerais e no Brasil (2004 – 2013)



Fonte: Adaptado de EPE (2014) e CEMIG (2015)

Nota-se que, no período de 2004 a 2013, o consumo de bagaço cresceu 62,9% em Minas Gerais, enquanto que o consumo nacional cresceu 31,2%. Em Minas Gerais, o crescimento do consumo do bagaço de cana foi duas vezes maior em comparação à produção nacional entre 2004 a 2013.

O crescimento do consumo do bagaço em Minas Gerais poderá ser, num futuro próximo, determinante para contribuir com a geração de energia elétrica a ser disponibilizada na rede de distribuição de energia. Além disso, essa fonte pode, ainda, contribuir para diminuir as importações de energia porque, desde meados dos anos 1980, Minas Gerais vem apresentando aumento de sua dependência externa de energia, deixando assim de ser um

Estado tradicionalmente exportador de energia. Alguns fatores têm contribuído para essa dependência, como o racionamento de energia elétrica em 2001, quando a importação de energéticos pelo Estado representou 56% de sua demanda total de energia. Em 2005, o Estado voltou a produzir mais energia primária do que importa, sendo que a dependência externa foi reduzida para 48,6%. Contudo, em 2013, a dependência externa foi superior representando cerca de 53,5% da demanda em função, principalmente, da diminuição de produção de energia hidráulica ocasionada pelo prolongamento do período de estiagem no ano (CEMIG, 2015).

Outra contribuição importante do setor sucroalcooleiro para a renovabilidade da matriz energética estadual é a produção de etanol, que cresceu significativamente nos últimos dez anos, conforme consta no 29º Balanço Energético de Minas Gerais. A produção de etanol que, em 2004, era de $803 \times 10^6 \text{ m}^3$ passou para $2679 \times 10^6 \text{ m}^3$, em 2013. Isso resultou na interrupção da importação de etanol pelo Estado.

4.2 Configuração energética do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais a partir do uso do bagaço

Minas Gerais possui um número representativo de empreendimentos no setor sucroalcooleiro contemplando destilarias, usinas de açúcar e usinas mistas. Os empreendimentos estão distribuídos em praticamente todas as regiões do estado, envolvendo 37 municípios mineiros, conforme ilustrado na Figura 4.1.

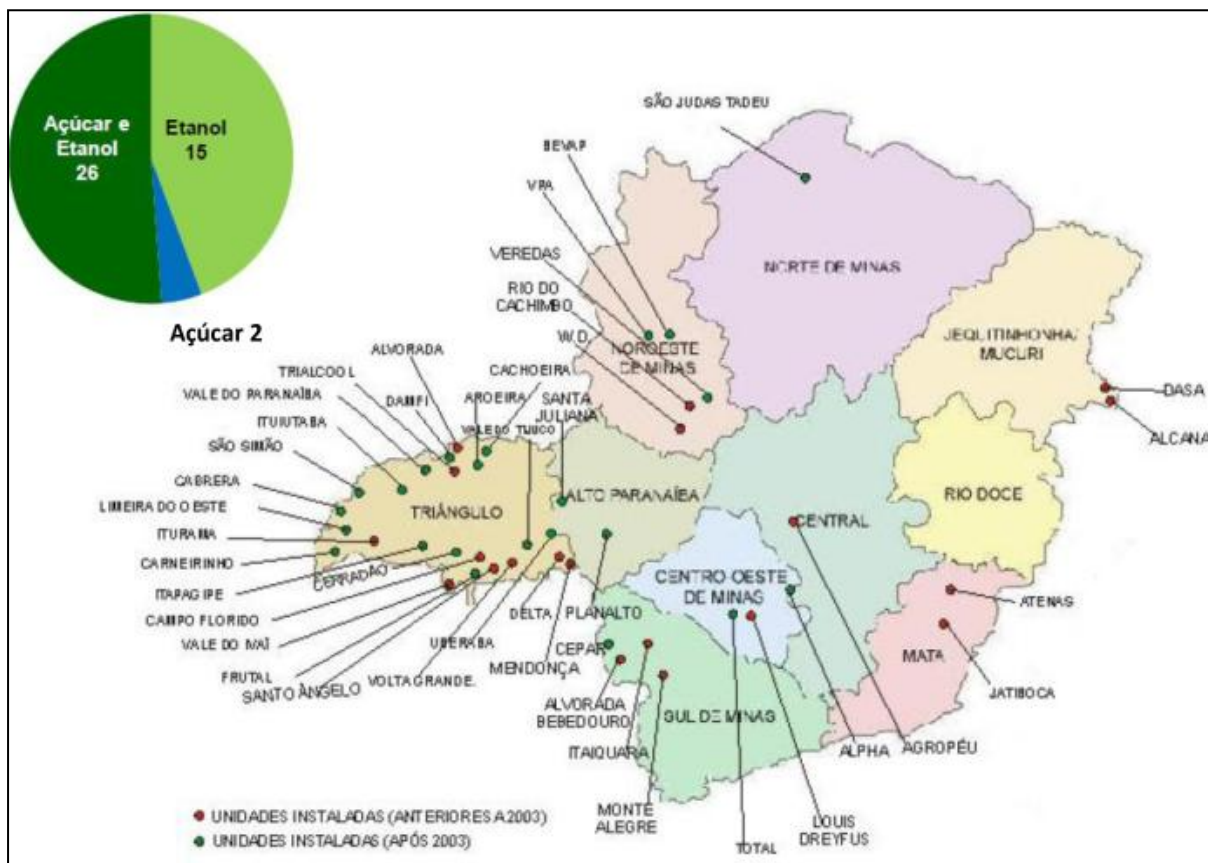


Figura 4.1 – Distribuição dos empreendimentos sucroalcooleiros em Minas Gerais

Fonte: FEAM (2014)

De acordo com a Figura 4.1, o Estado de Minas Gerais apresenta 43 empreendimentos sucroalcooleiros em operação ou licenciados para operar embora, recentemente, este número tenha subido para 46 devido a alterações ocorridas nos processos de licenciamento ambiental, como será abordado no item seguinte, a respeito do perfil tecnológico traçado para o setor.

Com relação ao potencial de geração de energia elétrica do setor sucroalcooleiro, foram considerados dois estudos, conforme descrito a seguir.

O trabalho de Mateus (2010) avaliou para a safra de 2008/2009 uma capacidade instalada de cogeração de 1.506,7 MW, considerando todos os empreendimentos, ou seja, 66 usinas, pesquisados na época. Dentre os que estavam em operação, doze empreendimentos não apresentaram qualquer informação sobre a produção de energia elétrica no ano de 2008 para uso próprio e para comercialização, e seis outros não estavam operando no período. Dessa forma, a produção de energia elétrica, para os 37 empreendimentos em operação, correspondeu a uma capacidade instalada de 787,0 MW. Para os empreendimentos em fase de

implantação e projeto, foi estimado que a geração de energia elétrica chegasse a uma capacidade instalada de 719,7 MW, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Capacidade instalada de cogeração no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais (safra 2008/2009)

Empreendimentos	Cogeração (MW)
<i>em operação</i>	787,0
<i>em fase de implantação</i>	251,8
<i>em fase de projeto</i>	467,9
Total	1.506,7

Fonte: MATEUS (2010)

Esses empreendimentos foram responsáveis por uma produção de energia elétrica de 788,7 mil MW, dos quais apenas oito empreendimentos informaram a comercialização de 215,18 mil MW (MATEUS, 2010).

Assim, os oito empreendimentos foram responsáveis pela comercialização de cerca de 27% do total gerado de energia elétrica (valores referentes à safra de 2008/2009 do setor sucroalcooleiro em Minas Gerais). Os vinte e três novos empreendimentos, em fase de implantação e de projeto, podem aumentar a capacidade instalada em quase 50%, o que significa um aumento na capacidade de geração elétrica atual.

Outro estudo, realizado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente, em 2014, avaliou para 38 usinas sucroalcooleiras do Estado de Minas Gerais, que utilizam o bagaço de cana como combustível em caldeiras, o potencial de cogeração de energia elétrica para o setor. O referido estudo utilizou dois conceitos para designar os valores encontrados para a energia elétrica produzida: o potencial teórico, que considera a geração total de energia elétrica, com máxima eficiência e, o potencial técnico, que considera as perdas e rendimentos envolvidos na produção de energia elétrica. Assim, baseando-se nos dados divulgados pelo BEN 2014 e pela CONAB, considerando a safra de 2013/2014, foram obtidos esses potenciais, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Potencial de energia teórico e técnico calculado para o setor sucroalcooleiro de Minas Gerais, em 2013

Potencial teórico			
Produção de cana (t)	Produção de Bagaço (t)		Potencial de energia teórico (MWh/ano)
59.712.900	16.719.612		41.417.656
Potencial técnico			
Produção de cana (t)	Produção de Bagaço (t)	Potencial técnico médio por tonelada (MWh/t)	Potencial de energia teórico (MWh/ano)
59.712.900	16.719.612	0,096	1.605.083
Dados: Teor de bagaço por tonelada de cana: 270 kg/t Poder calorífico inferior do bagaço (PCI): 2.130 kcal/kg (2,48 MWh/t) Cálculo do potencial teórico: massa do bagaço (t) x PCI (MWh) Cálculo do potencial técnico: massa do bagaço (t) x 0,096			

Fonte: Adaptado de FEAM (2014d), EPE (2014), CONAB (2011)

O potencial de energia técnico estimado para o setor sucroalcooleiro considera a melhor tecnologia de extra-condensação utilizada em projetos de cogeração, que permite gerar maiores excedentes de energia, em torno de 96 kWh por tonelada de bagaço-de-cana.

Entretanto, por meio dos aspectos tecnológicos identificados para os empreendimentos em operação no Estado de Minas Gerais, conforme Tabela 3.7, apresentada anteriormente, verifica-se que o valor médio de cana para o índice médio de geração bruta de eletricidade varia de 0,7 kWh/t de cana a 48,3 kWh/t de cana moída, sendo o valor médio de 23,5 kWh por tonelada de cana (MATEUS, 2010). Ou seja, essa realidade comprova que, embora existam empreendimentos que empregam uma tecnologia mais avançada em suas usinas de cogeração, ainda existem empreendimentos com baixa geração de energia elétrica, indicando que há uma maior demanda de vapor para o processo industrial. A boa notícia é que a média do setor é superior, inclusive, aos valores considerados na literatura como sendo usuais. Para Leme (2005), os valores usuais desse índice, em geral, ultrapassam 10 kWh por tonelada de cana moída, sendo que ainda pode ser considerado o uso de palha de cana como combustível complementar.

Frente à esses estudos, entende-se como fator de extrema importância o conhecimento da estruturação do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais para uma abordagem mais realista do potencial de geração de energia existente no aproveitamento do bagaço de cana. Dessa

forma, para tratar da eletricidade excedente, o desenvolvimento deste trabalho seguiu dois perfis distintos – um tecnológico e um socioambiental.

4.2.1 Perfil tecnológico dos empreendimentos sucroalcooleiros de Minas Gerais

A construção do perfil tecnológico dos empreendimentos sucroalcooleiros do estado considerou um universo de 66 usinas, distribuídas conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Distribuição dos empreendimentos do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais em 2015

	Produtores exclusivos de açúcar	Produtores exclusivos de etanol	Produtores de açúcar e etanol	Produtores exclusivos de energia
Empreendimentos existentes	2	21	22	1
Empreendimentos em fase de implantação⁽¹⁾	0	12	1	1
Empreendimentos em fase de projeto	0	2	4	0
Total	2	35	27	2

1- Os empreendimentos em fase de implantação são aqueles que possuem as Licença Prévia e Licença de Instalação.

Fonte: Adaptado de Mateus (2010), ANEEL (2015), MAPA (2015) e SEMAD (vários anos)

Para facilitar a apresentação dos dados, os empreendimentos foram referenciados numericamente de 1 a 66, em ordem alfabética da razão social, como relacionado no Anexo 1.

Devido à crise enfrentada pelo setor nas últimas safras, alguns empreendimentos não se encontram em operação atualmente, conforme pesquisa realizada junto aos processos de licenciamento ambiental. Contudo, considerando o fato de que muitas usinas estão em processo de revalidação de suas licenças de operação, enquanto outras ainda não se manifestaram a respeito, sendo inclusive passíveis de sofrerem autuação por infrações nesse sentido, foi necessário recorrer à base de dados da ANEEL e ao MAPA para fazer a composição das usinas em operação até novembro de 2015.

O cruzamento dos dados da SEMAD, a relação de Usinas do tipo Biomassa em Operação, da ANEEL (2015), e os empreendimentos cadastrados no Departamento de Cana-de-açúcar e Agroenergia do MAPA (2015) resultou na seleção de 39 empreendimentos sucroalcooleiros em operação no estado. A relação desses empreendimentos está contemplada no Anexo 2.

A capacidade instalada de moagem dos 39 empreendimentos em operação foi definida conforme informado nos processos de licenciamento dos mesmos. Neste caso, duas observações foram feitas, considerando:

- a capacidade instalada de moagem de cana-de-açúcar e de cogeração de energia licenciada e
- a capacidade instalada de moagem de cana-de-açúcar e de cogeração de energia em licenciamento.

Dessa forma, a capacidade instalada de moagem de cana-de-açúcar e de cogeração para o Estado de Minas Gerais levou em conta o fato de que alguns empreendimentos, em operação, se encontram em processo de licenciamento de suas atividades, devido a alteração de processos, ampliação da capacidade produtiva ou mesmo de revalidação da Licença de Operação²⁹. Os novos empreendimentos, ou seja, em fase de projeto e de implantação, também foram contemplados. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.4. A lista completa com todos os empreendimentos está no Anexo 3.

Tabela 4.4 – Capacidade instalada de moagem e de cogeração do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais

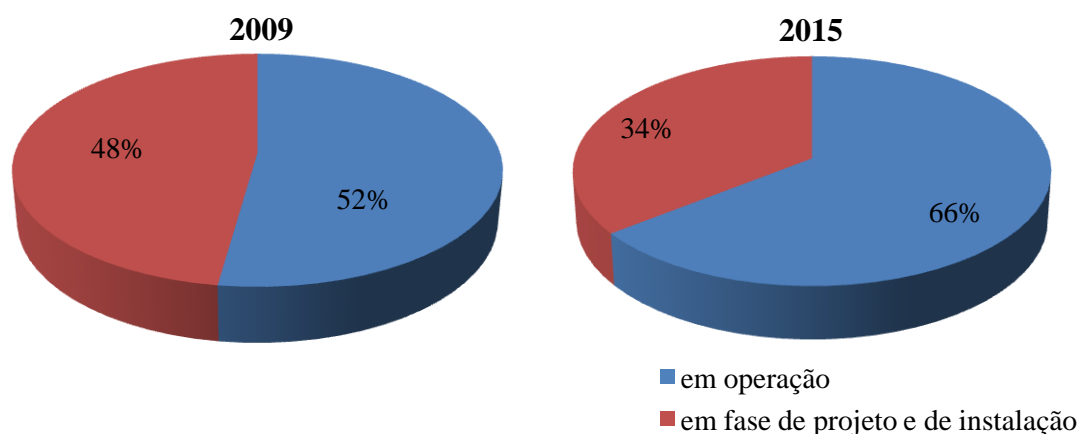
Número de empreendimentos	Situação	Capacidade instalada de moagem de cana-de-açúcar (t/d)	Capacidade instalada de cogeração (MW)
39	Em operação	397.300,77	1.096,16
20	Em fase de projeto e de implantação	141.695,91	554,90
<i>Total: 59</i>		<i>Total:538996,68</i>	<i>Total:1.651,06</i>

Estima-se um aumento de 35,7% na capacidade instalada total de moagem de cana-de-açúcar e de cogeração para o Estado de Minas Gerais, conforme Tabela 4.4, tão logo entrem em operação os novos empreendimentos. Essa capacidade de moagem também pode sofrer um aumento nas safras em que os empreendimentos desconsiderados daqueles em operação retomem suas atividades. A capacidade instalada das usinas de cogeração do setor sucroalcooleiro mineiro também pode sofrer um acréscimo de quase 51% com a entrada em operação dos novos empreendimentos. Contudo, é difícil prever com exatidão o momento em que esse aumento irá ocorrer, pois o licenciamento de cada empreendimento envolve um processo único e inerente a cada caso em particular.

²⁹ Empreendimentos que se encontram com a Revalidação da Licença de Operação (RevLO) ou com Licença de Operação Corretiva em processo de análise. Foram considerados aqueles com dados disponíveis.

Em comparação à safra de 2008/2009, devido a mudanças no quadro setorial como o fechamento de um empreendimento, a entrada em operação de quatro outros novos, a repotenciação da cogeração de energia de alguns empreendimentos e a implantação de dois novos empreendimentos, os 39 empreendimentos aqui considerados em operação, elevaram sua capacidade instalada de cogeração em 309,16 MW, detendo 64% de toda a capacidade instalada de cogeração do Estado, como apresentado no Gráfico 4.3.

Gráfico 4.3 – Configuração da cogeração de energia do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais entre 2009 a 2015



Fonte: Adaptado de MATEUS (2010) e SEMAD (vários anos)

4.2.2 Análise dos rendimentos energético e exerético do sistema de cogeração do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais

De um modo geral, na prática, a queima do bagaço e sua conversão em energia (mecânica ou elétrica) envolve perdas, em função da eficiência dos equipamentos envolvidos. Particularmente no setor sucroalcooleiro, até mesmo os estudos que mais se aproximam da eficiência das usinas de cogeração a bagaço de cana encontram dificuldades, porque as safras de cana-de-açúcar variam em função de aspectos climáticos, econômicos e políticos. Além disso, é preciso contar com a boa vontade dos usineiros para a obtenção de dados mais detalhados em uma pesquisa por empreendimento. Nesse sentido, optou-se por analisar a eficiência de toda a central termoeletrica a bagaço de cana, considerando os rendimentos energéticos e exeréticos.

De acordo com Santos (2006), há um grande interesse em se determinar a energia trocada em cada componente do ciclo térmico de uma central termelétrica a vapor sem ter que medir os fluxos do fluido de trabalho que atravessa cada componente, o que pode ser conseguido com o conhecimento do rendimento térmico do ciclo como um todo.

Para efeito de demonstração dos rendimentos calculados, tomou-se como exemplo uma usina de cogeração de um empreendimento do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais, conforme memória de cálculo, a seguir. As equações adotadas encontram-se no Apêndice 1, que apresenta as análises energética e exérgica de um sistema termodinâmico.

Ressalta-se que a inclusão da palha não é considerada nesse estudo, pois segundo levantamento realizado pela Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais, a palha é deixada no campo com o objetivo de fornecer matéria orgânica ao solo, embora haja perspectiva do setor em utilizar a palha para aumentar a geração de energia elétrica (SIAMIG, 2014).

- Cálculo dos rendimentos energético e exérgico de uma usina de cogeração

a) Dados do empreendimento nº 37:

Consumo de bagaço nas caldeiras: 197 t/h (vazão mássica do bagaço de cana: \dot{m}_B)

Capacidade instalada de cogeração na usina: 59 MW (potência elétrica gerada: \dot{W}_u)

$$1\text{W} = 1\text{J/s}$$

A Figura 4.2 apresenta um desenho esquemático do processo.

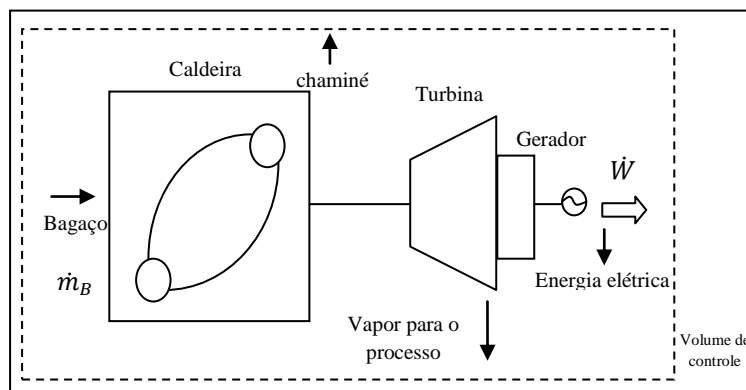


Figura 4.2 – Esquema simplificado de uma usina de cogeração

Fonte: Elaboração própria

b) Rendimento energético da usina

Sabe-se que uma central termoelétrica a bagaço de cana converte a energia química embarcada nesse combustível em energia elétrica. Dessa forma, seu rendimento energético (η) é definido pela equação A.47(Apêndice 1):

$$\eta = \frac{\dot{W}_u}{\dot{m}_B PCI_B},$$

onde PCI_B é o poder calorífico do bagaço, com 50% de umidade, que corresponde a 7.539 kJ/kg. O cálculo do PCI do bagaço é demonstrado na seção vi do Apêndice 1.

Logo, o rendimento energético da usina é:

$$\eta = \frac{59 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{197.000 \text{ kg} \times \frac{1}{3.600 \text{ s}} \times 7.359 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\eta = 0,1465$$

c) Rendimento exerético da usina

De modo análogo ao rendimento energético, o rendimento exerético de uma central termoelétrica é definido pela equação A.48 (Apêndice 1):

$$\chi = \frac{\dot{W}_u}{\dot{m}_B x_B^Q},$$

onde x_B^Q é a exerergia química específica do bagaço de cana (50% de umidade), que corresponde a 9.935 kJ/kg. O cálculo da exerergia específica do bagaço é demonstrado na seção vi do Apêndice 1.

Logo, o rendimento exerético da usina é:

$$\chi = \frac{59 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{197.000 \text{ kg} \times \frac{1}{3.600 \text{ s}} \times 9.935 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\chi = 0,1085$$

d) Comparação entre os rendimentos energético e exerético da usina

Das equações A.47 e A.48, tem-se que os rendimentos exerético e energético de uma central termoelétrica estão relacionados por:

$$\chi = \eta \frac{PCI_B}{x_B^Q}. \quad (\text{Equação A.49 – Apêndice 1})$$

Como, da equação A.50: $PCI_B < x_B^Q$, verifica-se que o rendimento exerético calculado para a usina foi inferior ao rendimento energético.

$$\eta = 14,65\%$$

$$\chi = 10,85\%$$

Embora os rendimentos obtidos para a usina em questão tenham apresentado valores baixos, eles estão de acordo com os valores encontrados na literatura, conforme apresentado no capítulo anterior.

Segundo Santos (2006), o rendimento térmico de uma turbina a vapor mais moderna, com capacidade de 300 MW, operando em ciclo Rankine, com extrações e reaquecimento, é da ordem de 35%. Entretanto, o rendimento do ciclo Rankine de 20 MW, sem reaquecimento, é de cerca de 25%. Valores de rendimento mais elevados, da ordem de 58%, são encontrados em ciclos combinados, com turbinas a vapor e a gás, que operam em ciclo Rankine e em ciclo Brayton, respectivamente. Além disso, as características do combustível utilizado – no caso, o bagaço de cana, também interferem no rendimento, apesar de o custo de se utilizar resíduos industriais ser vantajoso.

O empreendimento analisado apresenta equipamentos com especificações mais elevadas de pressão de vapor e temperatura, sendo que sua usina de cogeração opera com três caldeiras, sendo uma de 4,12 MPa e 773 K e as outras duas de 6,37 MPa e 783 K, e três turbinas de contrapressão, ou seja, não há formação de condensado para realimentar a caldeira. No entanto, segundo Mateus (2010), esse empreendimento foi responsável pela comercialização de 155.972,90 kWh de energia elétrica na safra de 2008/2009.

No que diz respeito às turbinas de contrapressão, pode-se identificar que há intenção em exportar e comercializar energia elétrica excedente, através da adoção de tecnologias que oferecem continuidade ao ciclo tradicional de contrapressão, elevando a geração de energia elétrica nesses ciclos. Uma vez que, no ciclo *topping* a vapor em contrapressão não há

condensadores, a eficiência na geração de energia elétrica fica condicionada à quantidade de vapor que demanda a produção de açúcar e etanol (CORRÊA NETO, RAMON, 2002).

A relação dos equipamentos presentes nesse e nos demais empreendimentos sucroalcooleiros em operação está contemplada no Anexo 4. Os dados dos equipamentos, obtidos dos processos de licenciamento, evidenciam que as informações sobre os mesmos são muito escassas, o que dificulta uma análise mais detalhada dos rendimentos. E, como descrito anteriormente sobre essa questão, esse é um ponto importante para se avaliar a eficiência da cogeração de energia.

Na Tabela 4.5 são apresentados os rendimentos energético e exergético dos empreendimentos sucroalcooleiros em operação no Estado de Minas Gerais, considerando aqueles que informaram o consumo de bagaço nas caldeiras nos processos da SEMAD.

Tabela 4.5 – Rendimentos energético e exerético calculados para os empreendimentos sucroalcooleiros em operação no Estado de Minas Gerais

Ref. Empreendimento	Bagaço consumido na(s) caldeira(s) (t/h)	Potência instalada (MW)	Rendimento energético (%)	Rendimento exerético (%)
1	217,00	80,00	18,03	13,36
2	57,38	30,00	25,58	18,95
3	54,78	5,50	4,91	3,64
7	138,40	80,00	28,28	20,95
8	173,00	75,00	21,21	15,71
9	73,73	56,00	37,16	27,52
12	51,70	4,30	4,07	3,01
13	125,60	50,00	19,47	14,42
14	175,33	85,00	23,72	17,57
17	77,00	8,00	5,08	3,76
19	12,35	1,00	3,96	2,93
20	34,00	4,20	6,04	4,48
22	8,14	2,50	15,02	11,13
23	52,00	30,00	28,22	20,91
24	30,00	4,50	7,34	5,44
25	57,79	15,00	12,70	9,41
26	110,00	15,00	6,67	4,94
27	175,00	30,00	8,39	6,21
29	60,87	20,00	16,07	11,91
32	214,40	40,00	9,13	6,76
33	85,87	11,26	6,41	4,75
35	102,00	30,00	14,39	10,66
36	51,00	2,40	2,30	1,71
37	197,00	59,00	14,65	10,85
38	242,38	30,00	6,05	4,48
39	96,00	15,00	7,64	5,66
40	56,00	6,00	5,24	3,88
41	57,79	16,00	13,54	10,03
42	187,50	40,00	10,44	7,73
46	114,26	28,50	12,20	9,04

Fonte: SEMAD (vários anos)

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.5, verifica-se que apenas um empreendimento (nº 9) apresenta rendimento energético acima de 35%. Esse empreendimento possui caldeira operando a 6,57 MPa e 788 K e três turbinas, sendo duas de contrapressão e uma de condensação. Isso mostra que, apesar de não possuir uma cogeração tão elevada

quanto a observada no empreendimento n° 14 que, inclusive, também possui maior capacidade instalada de moagem de cana, o empreendimento n° 9 apresenta tecnologias mais aprimoradas no aproveitamento da queima do bagaço de cana em sua usina de cogeração.

De acordo com Corrêa Neto e Ramon (2002), além de caldeiras operando a pressão de vapor e temperatura superiores, a simples introdução de um condensador na exaustão da turbina proporciona maior flexibilidade à usina de cogeração, pois a mesma pode operar na safra e na entressafra, além de proporcionar uma elevação em seu rendimento global.

Contudo, os investimentos nesses equipamentos são elevados, o que justifica a existência de usinas operando com baixos rendimentos no setor sucroalcooleiro. Além dos baixos rendimentos, essa postura pode influenciar no aproveitamento do bagaço de cana como fonte de energia para a diversificação da matriz elétrica, já que a geração de energia elétrica se beneficia com o uso de tecnologias mais modernas e caras.

4.2.3 O bagaço excedente dos processos industriais do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais

Como visto, bagaço de cana gerado pelo setor sucroalcooleiro destina-se à produção de energia térmica e elétrica, a fim de suprir as demandas do processo produtivo do açúcar e do álcool. No entanto, alguns empreendimentos não consomem todo o bagaço gerado em suas usinas de cogeração, gerando excedentes desse combustível. Essa quantidade de bagaço excedente pode ser destinada, por exemplo, à produção de ração ou de adubos para a lavoura de cana-de-açúcar, por meio da compostagem, porém um uso mais nobre seria a geração de energia elétrica para ser comercializada junto à rede de distribuição de energia. A produção de energia elétrica a partir do bagaço excedente do setor sucroalcooleiro pode, inclusive, contribuir para diversificar a matriz elétrica nacional, uma vez que sua geração ocorre no período de estiagem das chuvas – época da colheita da cana-de-açúcar.

Contudo, como as usinas sucroalcooleiras brasileiras apresentam muitas variações na produção de açúcar e etanol, em função de questões climáticas, econômicas e políticas, e, além disso, contam com grandes diferenças em cogeração e em seus níveis de conservação de energia nos processos produtivos, torna-se difícil estimar a quantidade de bagaço excedente para o setor. Segundo Macedo et al. (2004), a quantidade de bagaço excedente para uma usina de açúcar e etanol pode variar de 5% a 15% do bagaço total gerado e, esse excedente vem sendo utilizado para iniciar as atividades da usina de cogeração na safra seguinte, para ser comercializado com outras empresas ou para alimentação animal.

Para garantir o combustível necessário para acionar os equipamentos da usina de cogeração no início da safra, é sempre prudente admitir que pelo menos 5% do bagaço excedente de cana seja reservado (MAFRA, 2009).

Para o Estado de Minas Gerais, a quantidade de bagaço excedente gerada pelo setor sucroalcooleiro considerou apenas quinze empreendimentos em operação, que informaram seus excedentes em seus processos de licenciamento. Dentre eles, oito também informaram a quantidade de bagaço que é estocada para dar a partida nos equipamentos da usina de cogeração. A relação completa dos excedentes de bagaço informada pelos empreendimentos em operação é apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Geração de bagaço excedente pelos empreendimentos sucroalcooleiros em operação no Estado de Minas Gerais

Ref. Empreendimento	Quantidade de moagem de cana (t/d)	Quantidade de bagaço consumido (t/h)	Quantidade de bagaço excedente (t/h)	Quantidade de bagaço estocado (t/h)	Safra (d)
1	22.500,00	217,00	17,00	ni	180
2 ⁽¹⁾	7.200,00	71,00	4,00	2,50	155
12	5.280,00	51,70	3,30	1,30	150
13	10.800,00	125,60	3,48	1,80	173
14	21.600,00	175,33	35,50	5,80	187
20	4.080,00	34,00	13,00	ni	194
23	5.580,00	52,00	4,00	ni	270
24	3.800,00	30,00	6,40	ni	208
25 ⁽²⁾	8.304,00	76,80	13,44	0,96	217
30	6.000,00	63,00	6,00	ni	270
32	24.000,00	214,40	43,10	13,60	193
35	11.040,00	102,00	8,00	ni	215
36	5.520,00	51,00	7,00	ni	210
41	6.000,00	57,79	3,50	3,20	270
46	10.520,00	114,26	ni	4,00	210
Total:	152.224,00	1.435,88	167,72	33,16	
1- Foi considerada uma moagem de 300 tcana/h; 2- consumo de 1,9 t/h de bagaço para compostagem (adubo); ni- não informado.					

Fonte: SEMAD (vários anos)

Para calcular a quantidade de energia elétrica excedente, que o setor sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais pode gerar, tomou-se como base a melhor tecnologia disponível,

segundo dados apresentados na Tabela 4.5. A seguir, são demonstrados os cálculos para obtenção da energia elétrica a ser comercializada pelo setor sucroalcooleiro.

- Cálculo da energia elétrica excedente do setor sucroalcooleiro

a) Dados:

Bagaço excedente gerado: 167,72 t/h (m_B)

Poder calorífico inferior do bagaço: 7.539 kJ/kg (PCI_B) – calculado conforme seção vi do Apêndice 1

Exergia química específica do bagaço: 9.935 kJ/kg (χ_B^Q), calculado conforme seção vi do Apêndice 1

Rendimento energético: 0,3716 (η) (Tabela 4.5)

Rendimento exergético: 0,2752 (χ) (Tabela 4.5)

Horas de safra: 270 dias x 24 h = 6.480 h (h_{safra}), considerando a maior safra apresentada pelos empreendimentos da Tabela 4.6

1 W = 1 J/s

b) Energia elétrica excedente

- Energia elétrica excedente segundo o rendimento térmico da usina de cogeração (E_η):

$$E_\eta = m_B \times PCI_B \times h_{safra} \times \eta$$

$$E_\eta = 167.720 \text{ kg} \times \frac{1}{3600 \text{ s}} \times 7.539 \frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{\text{kg}} \times 6.480 \text{ h} \times 0,3716$$

$$E_\eta = 845,76 \text{ MWh}$$

- Energia elétrica excedente segundo o rendimento exergético da usina de cogeração (E_χ):

$$E_\chi = m_B \times \chi_B^Q \times h_{safra} \times \chi$$

$$E_\chi = 167.720 \text{ kg} \times \frac{1}{3600 \text{ s}} \times 9.935 \frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{\text{kg}} \times 6.480 \text{ h} \times 0,2752$$

$$E_\chi = 825,42 \text{ MWh}$$

Logo, estima-se que a energia elétrica excedente a ser comercializada para a rede é em torno de 847 MWh, considerando-se a energia disponível, e de 825 MWh, considerando-se a energia útil, de acordo com a melhor tecnologia disponível nas usinas de cogeração do setor sucroalcooleiro mineiro.

Segundo o 29º Balanço Energético de Minas Gerais – BEEMG, em 2013, foram ofertados 73.071,9 MWh de energia elétrica, proveniente de fonte hidráulica, para o Estado de Minas Gerais. Isso significa que o excedente elétrico produzido pelo setor sucroalcooleiro poderia suprir pouco mais de 1% da demanda estadual de energia elétrica. Se comparada à oferta de energia elétrica proveniente das centrais térmicas, esse excedente responderia por cerca de 15% da oferta, que foi de 5.582,4 MWh. No entanto, outras fontes, inclusive não renováveis, competem pela produção de energia nas centrais térmicas, como o gás natural, o óleo combustível, os gases siderúrgicos e o licor negro (CEMIG, 2015).

4.3 Reflexões a respeito da disponibilização dos excedentes de energia elétrica do setor sucroalcooleiro à rede de distribuição

Conforme discutido anteriormente, o surgimento da figura do produtor independente e do autoprodutor de energia³⁰ no setor elétrico nacional, a partir das mudanças políticas ocorridas nos anos 1990, vem transformando a forma como o segmento sucroalcooleiro considera a geração de excedentes de energia elétrica. Principalmente após a realização do 1º Leilão de Reserva, em 2008, voltado exclusivamente para a biomassa, que é considerado o primeiro certame regulado para estabelecer uma reserva estrutural para o sistema elétrico nacional. O bagaço de cana enquadra-se perfeitamente nesse quesito.

No entanto, ainda existem grandes barreiras para melhorar o aproveitamento do potencial de energia excedente do setor sucroalcooleiro.

O próprio valor final da energia negociada nos leilões é considerado baixo pelo setor sucroalcooleiro. Mesmo obtendo um preço médio de R\$ 209,91/MWh, em 2015 (valor muito acima do preço de R\$ 58,84/MWh contratado em 2008), os usineiros requerem mais retorno na disponibilização dessa energia, ao passo que, o horizonte de mais de 20 anos pode inferir imprevistos em seus lucros (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2015).

Existem outras barreiras citadas pelo setor como causas de inibição para o investimento em cogeração de energia elétrica. Entre elas destacam-se: (a) dificuldade de

³⁰ Lei Federal Nº 10.848, de 15 de março, de 2004.

conexão à rede de distribuição, (b) alto custo da modernização dos equipamentos, (c) inexperiência do setor quanto à operação no setor elétrico, (d) carga tributária³¹ e outros (FEAM, 2014).

No entanto, os problemas relacionados à conexão são os mais discutidos. Nessa questão há a necessidade de definições regulatórias, uma vez que a construção de linhas de transmissão fica a cargo do fornecedor da energia, o que prejudica os empreendimentos sucroalcooleiros de pequeno porte. Segundo Gentil (2013), esses custos podem representar até 30% do total de investimento em um projeto de geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana.

Entre um total de 66 empreendimentos, nove forneceram a extensão de suas linhas de transmissão de energia elétrica, que variam de 8,3 km a 40 km, com tensão entre 69 kV e 138 kV.

O custo por km de extensão de uma linha de transmissão de energia elétrica é um valor estimado, pois varia em função do preço de mercado dos diversos itens de materiais necessários, além da mão-de-obra em toda a etapa de planejamento e de construção.

Gentil (2013), através de uma pesquisa realizada com empreendimentos localizados em São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, apontou o custo de US\$ 100,000 para 1 km de extensão de uma linha de transmissão, com tensão de 138 kV. Já Kalucz (2013) e Eletrobras (2010) apresentam custos estimados, para cada 1 km de extensão de uma linha de transmissão, com 138 kV, considerando empreendimentos localizados nos estados do Paraná e de Rondônia, em US\$ 159,645.04 e US\$ 104,576.92, respectivamente.

Outro aspecto a ser considerado é a escala do empreendimento. Segundo estudo do BNDES (NYKO et al., 2011), o custo unitário do investimento para uma usina que processa um milhão de toneladas de cana-de-açúcar é 30% superior em relação a uma usina que processa 3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. A menor escala de investimentos também leva a custos unitários crescentes para a conexão com a rede, o que ajuda a explicar o entrave da conexão.

Considerando o valor médio de US\$ 121,407.15 para o custo para construção de 1 km de linha de transmissão, com 138 kV, foram estimados os investimentos em linhas de

³¹ O problema tributário é em função dos empreendimentos que optam por separar a atividade da usina de açúcar e etanol da geração de energia elétrica. Dessa forma, acabam criando outra empresa. Porém, beneficiam-se do licenciamento ambiental, que em Minas Gerais, devido ao porte e potencial poluidor dos empreendimentos, é mais simples que a obtenção de LP, LI e LO, sendo constituído pela concessão da AAF. É o caso dos empreendimentos 2, 6,7, 9, 10, 11, 30, 31, 38, 39 e 42.

transmissão para a energia elétrica excedente do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais, conforme Tabela 4.7. Para a tensão de 69 kV, foi considerado o valor apresentado pela Eletrobrás (2010) de UU\$ 84,812.92.

Tabela 4.7 – Investimentos financeiros em linhas de transmissão de energia elétrica excedente do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais

Ref. Empreendimento	Extensão da linha de transmissão (km)	Tensão (kV)	Investimento (UU\$)
1	36	138	4,370,657.40
9	29	138	3,520,807.35
13	11,8	69	1,000,792.46
28	28	138	3,399,400.20
32 e 46	21	138	2,549,550.15
35	26,5	138	3,217,289.48
38	8,3	69	703,947.24
63	40	138	7,648,650.45

Fonte: Elaborado a partir de Gentil (2013), Kalucz (2013) e Eletrobras (2010)

Nota-se, pela Tabela 4.15, que o investimento em linhas de transmissão é bastante elevado e varia em função da extensão e da tensão. Por outro lado, no caso dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, a localização geográfica dos empreendimentos sucroalcooleiros influencia diretamente nessa questão, pois estão mais próximas ao centro de carga, o que demanda menor extensão da linha até a rede básica, em comparação aos empreendimentos situados nos estados de Goiás e Mato Grosso, por exemplo. Além disso, os valores mais reduzidos para realizar a conexão à rede de distribuição envolvem gastos significativos em razão da necessidade de elevação da tensão.

De acordo com Nyko et. al. (2011), um estudo realizado com 29 empreendimentos sucroalcooleiros de Minas Gerais concluiu que a distância média encontrada na amostra entre as unidades e o sistema de transmissão é de cerca de 19 km. Para as que exportam seus excedentes de energia, essa distância está em torno de 15 km, e para as que ainda não exportam, em 24,4 km.

4.4 Perfil socioambiental relacionado às emissões atmosféricas do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais

Em se tratando de um trabalho que avalia o potencial energético do bagaço de cana, considerado como alternativa renovável às mudanças climáticas, é importante buscar retratar o perfil socioambiental do setor sucroalcooleiro em relação às emissões atmosféricas.

As emissões atmosféricas, por sua vez, estão ligadas ao tipo de colheita aplicada na lavoura de cana-de-açúcar que ainda segue, em considerável volume, a forma manual por meio da queima. A mecanização da colheita elimina essa queima por completo, mas também tem emissões ligadas ao uso de combustíveis fósseis no maquinário. Outro fator que contribui para essas emissões é a queima do bagaço de cana em caldeiras.

4.4.1 A questão do trabalho nos canaviais

Apesar da geração de emprego e renda, as atividades de plantio e colheita manual da cana-de-açúcar apresentam condições de trabalho que colocam em risco a saúde dos trabalhadores rurais. Tendo seus primórdios no trabalho de escravos negros, há muito se questiona sobre a melhoria das condições de trabalho nos canaviais de todo o país. Na década de 1970 os cortadores de cana-de-açúcar ou “boias-frias” enfrentavam condições piores de trabalho.

Desde então, ocorreram algumas mudanças, mas o fato é que trabalhadores que atuam na lavoura da cana-de-açúcar são contratados em regime temporário e estão condicionados ao tempo da safra, ou seja, tão logo essa termine, eles têm o contrato rescindido e são demitidos a qualquer momento. Mas, a questão vai além do tempo de trabalho, pois existem fatores importantes a serem considerados como a inadequada remuneração pelo trabalho braçal exaustivo, a falta de organizações sindicais mais atuantes ou mesmo a inexistência delas na maioria dos casos e a exposição desses trabalhadores a condições precárias de trabalho.

Um estudo realizado pela Secretaria de Estado da Saúde de São Paulo afirma que o trabalho de corte na maioria das lavouras de cana-de-açúcar submete o trabalhador, a cada um minuto trabalhado, a 17 flexões de tronco, além de ter que aplicar 54 golpes de facão. Além disso, o joelho do trabalhador fica o tempo todo semiflexionado e há extensão da coluna cervical. O estudo ainda destaca que, como o ambiente de trabalho é exposto, há risco de desidratação. No tocante à alimentação, as refeições acontecem quase que sempre no próprio local de trabalho (AGÊNCIA BRASIL, 2011).

Segundo levantamento do programa *Escravo, nem pensar!*, da ONG Repórter Brasil, a diminuição do número de cortadores manuais também foi acompanhada por uma melhora das condições de trabalho. No entanto, esse fato não extingue os casos de trabalho escravo nos canaviais. Infelizmente, ainda existem muitos trabalhadores submetidos a sérias violações trabalhistas. Como exemplo, há registro de más condições de trabalho de operadores de máquinas colhedoras, que trabalharam em turnos de até 27 horas seguidas. Não se pode esquecer ainda que o processo de mecanização indiretamente impõe um ritmo frenético aos trabalhadores, resultando numa cruel e desleal competição homem versus máquina, considerando que uma colheitadeira mecânica é capaz de realizar o trabalho de 80 a 100 pessoas (REPÓRTER BRASIL, 2014).

Considerando que a produtividade de um cortador de cana é fator decisivo na sua remuneração, o ritmo e as horas gastas no trabalho tornam-se fatores que elevam a perversidade das condições de trabalho no setor.

Na tentativa de escapar dos problemas trabalhistas e de promover a sustentabilidade em suas atividades, muitos empreendimentos têm investido na mecanização da lavoura. Aliás, o processo de mecanização da produção brasileira de cana-de-açúcar é resultado de compromissos ambientais assumidos em grandes regiões produtoras como São Paulo e Minas Gerais, que já atingiram metas significativas de eliminação na queima da cana. No entanto, essa solução capitalista das questões socioeconômica e ambiental do setor sucroalcooleiro, apresenta, como não poderia deixar de ser, alguns “gargalos”.

Marques e Scopinho (2012) afirmam que a preocupação com o desemprego no setor sucroalcooleiro também gera uma dúvida social, que é a “eleição” dos trabalhadores que irão permanecer na empresa após serem devidamente disciplinados e tecnicamente qualificados, passando a ocupar cargos fixos e não mais temporais. Isso resultará em drástica redução dos postos de trabalho, na medida em que a parceria das usinas com entidades profissionalizantes, como é o caso do SENAI, só conseguirão absorver a mão de obra daqueles trabalhadores com maior grau de escolaridade e, portanto, mais aptos a se capacitarem para a nova função.

Percebe-se, então, que esse novo cenário que está se desenvolvendo nos canaviais, por meio da corrida acelerada pela mecanização, deve levar em conta as questões socioeconômicas. Se por um lado há a sustentabilidade na produção da cana-de-açúcar, com o maior potencial de aproveitamento da palha que deixa de ser queimada, minimizando as emissões atmosféricas, por outro lado, há uma mão de obra que será dispensada sem ter um destino certo, uma vez que os trabalhadores, em sua maioria, não possuem formação e/ou

experiência para desempenhar outras atividades diferentes daquelas relacionadas à produção de cana-de-açúcar. A realocação dessa mão de obra também exigirá a qualificação dos trabalhadores, o que requer investimentos e tempo.

Esse processo migratório que se estabeleceu no setor, por conta da mecanização da colheita, também afeta outros agentes além dos trabalhadores, como é o caso dos fornecedores de cana-de-açúcar. Muitos desses fornecedores são detentores de pequenas áreas usadas para a lavoura da cana-de-açúcar e, portanto, apresentam dificuldades financeiras para viabilizar a mecanização de suas colheitas, que passará a ser cada vez mais exigida pelos grandes empreendimentos do setor, a fim de cumprirem as exigências legais do corte mecanizado.

4.4.2 Potencial de emissões atmosféricas a partir da queima do bagaço de cana no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais

Para a análise das emissões atmosféricas originadas com a queima do bagaço de cana pelo setor sucroalcooleiro de Minas Gerais, foram feitas algumas considerações. Primeiramente, é importante destacar que a distribuição desses empreendimentos no espaço territorial se dá de forma heterogênea, havendo regiões onde a concentração de unidades produtivas é consideravelmente maior, como é o caso do Noroeste e do Triângulo Mineiro.

Outro fator importante levado em consideração para estimar as emissões provenientes da queima do bagaço de cana do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais, foi a existência de documentos e estudos ambientais aprovados ou em análise técnica pelo órgão ambiental estadual competente. Dessa forma, foram considerados doze empreendimentos pertencentes às regiões mais produtoras (Noroeste e Triângulo Mineiro), que possuem estudos ou documentos, sobretudo o Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – RADA, que contém dados sobre as emissões atmosféricas da cogeração. Neste caso, foram consideradas as caldeiras dos empreendimentos.

Levando em conta as considerações feitas anteriormente, foram definidos os empreendimentos que representarão as emissões atmosféricas para o Estado de Minas Gerais (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Seleção de empreendimentos sucroalcooleiros do Estado de Minas Gerais para avaliação das emissões atmosféricas

Ref. Empreendimento	Município	Região do Estado
7	João Pinheiro	Noroeste de Minas
9	Ituiutaba	Triângulo Mineiro
14	Uberaba	Triângulo Mineiro
19	Tupaciguara	Triângulo Mineiro
22	João Pinheiro	Noroeste de Minas
27	Campo Florido	Triângulo Mineiro
29	Iturama	Triângulo Mineiro
37	Conceição das Alagoas	Triângulo Mineiro
38	Delta	Triângulo Mineiro
40	Itapagipe	Triângulo Mineiro
42	Pirajuba	Triângulo Mineiro
46	João Pinheiro	Noroeste de Minas

Fonte: Elaboração própria.

O licenciamento ambiental dos empreendimentos determina que, para acompanhamento das emissões de poluentes atmosféricos, os empreendimentos do setor sucroalcooleiro estão obrigados a realizar, anualmente, campanhas de amostragem em chaminé das caldeiras. Assim, a partir das informações a respeito do monitoramento ambiental das emissões atmosféricas dos empreendimentos, foi elaborada a Tabela 4.9 que apresenta a amostragem das emissões atmosféricas pela queima do bagaço de cana em caldeiras. A unidade é expressa em mg/Nm^3 . Como essa unidade depende da pressão e da temperatura, utiliza-se como referência as condições normais (0°C e 1 atm). Os dados da Tabela 4.9 são, posteriormente, comparados com os padrões de emissão para fonte fixa previstos na legislação ambiental pertinente.

É importante salientar que o parâmetro que define o potencial poluidor atmosférico desses empreendimentos é a produção de vapor através da queima de bagaço de cana de açúcar para produção de energia termoelétrica. Na análise do efluente atmosférico da chaminé da caldeira, tomou-se como indicador para este efluente, a concentração de material particulado. As emissões de metano (CH_4) na queima de bagaço em caldeiras só ocorrem caso haja concentrações significativas durante operação transiente ou perturbações não controladas do processo de combustão. Neste caso, como a operação das caldeiras nesse setor é praticamente contínua, em regime permanente, durante a maior parte do tempo em que há produção industrial, despreza-se a emissão de metano. Além disso, os empreendimentos selecionados, com exceção do empreendimento nº 37, adotam sistemas de tratamento dos efluentes atmosféricos emitidos pela chaminé da caldeira.

Tabela 4.9 – Amostragem das emissões atmosféricas em caldeiras a bagaço de cana

Ref. Empreendimento	Capacidade instalada moagem de cana-de-açúcar	Bagaço consumido	Potência térmica nominal ⁽¹⁾	Emissões de material particulado	Safra
	(t/d)	(t/d)	(MW)	(mg/Nm ³)	(d)
7	15.000	3.321,60	289,83	563,25	270
9	12.000	1.769,42	154,39	Caldeira 1- 111,44	202
14	21.600	4.207,92	367,17	Caldeira 1 – 239,87 Caldeira 2 – 132,73	187
19	1.230,77	296,40	25,86	150,0	200
22	768	195,36	17,05	170,55	270
27	22.500	4.200,00	366,48	Caldeira 1 – 304,74 Caldeira 2 – 256,73	270
29	18.000	1.460,88	127,47	Caldeira 1 – 359,0 Caldeira 2 – 244,0	270
37	20.400	4.728,00	412,55	Caldeira 1 – 179,72 Caldeira 2 – 330,35 Caldeira 3 – 411,45	240
38	19.440	5.817,12	507,58	Caldeira 1 – 120,69 Caldeira 2 – 212,33 Caldeira 3 – 301,10	240
40	8.190	1.344,00	117,27	276,5	270
42	18.000	4.500,00	392,66	Caldeiras 1 e 2 – 98,19 (média)	270
46	10.520,5	2,772,24	241,90	446,17	210

(1) A potência térmica nominal é definida pela Resolução Conama Nº 382/06, em seu Anexo III. Obtêm-se o seu valor multiplicando o potencial calorífico inferior do bagaço (PCI_B) pela quantidade potencial de bagaço a ser queimada. Foi utilizado o PCI_B = 7.539 kJ/kg, calculado no Apêndice 1.

Fonte: Extraído e adaptado de SEMAD (vários anos).

Os padrões de emissão para o parâmetro material particulado – MP, apresentado na Tabela 4.9, são estabelecidos pela Deliberação Normativa COPAM Nº 011, de 16 de dezembro de 1986, que é a legislação vigente no Estado de Minas Gerais, e pela legislação nacional, a Resolução CONAMA Nº 382, de 26 de dezembro de 2006, conforme Tabela 4.10. A Resolução CONAMA Nº 382/06 ainda prevê padrão de emissão para de óxidos de nitrogênio – NO_x, exigindo, então, a realização de análises da concentração desses poluentes no fluxo gasoso da chaminé das caldeiras.

Tabela 4.10 – Padrões de emissão para MP e NOx segundo Deliberação Normativa COPAM Nº 011/86 e Resolução CONAMA Nº 382/06

Resolução CONAMA Nº 382/06			Deliberação Normativa COPAM Nº 011/86
Potência Instalada (MW)	MP (mg/Nm ³)	NOx (mg/Nm ³)	MP ≤ 600 mg/Nm ³
< 10	280	N.A. ⁽¹⁾	
10 < MW < 75	230	350	
> 75	200	350	
1- não se aplica			

Fonte: Adaptado de SEMAD (vários anos)

A partir da análise comparativa dos resultados de monitoramento de material particulado nos efluentes das chaminés das caldeiras dos doze empreendimentos listados na Tabela 4.9 e os padrões de emissão da Tabela 4.10, foi evidenciado que todos os empreendimentos atenderam ao limite imposto pela Deliberação Normativa COPAM Nº 011/86 e apenas quatro atenderam ao limite imposto pela Resolução CONAMA Nº 382/06. No entanto, lembrando que um mesmo empreendimento pode ter mais de uma caldeira, em termos de equipamentos, sete caldeiras apresentaram valores dentro do limite da Resolução CONAMA Nº 382/06.

Apesar da Resolução CONAMA 382/06 ser mais restritiva, definindo que o padrão para lançamento de material particulado na atmosfera seja de 200 a 280 mg/Nm³, tal parâmetro restritivo não se aplica aos empreendimentos em que os equipamentos foram implantados anteriormente a esta Resolução, conforme determina em seu Art.7º: “*As fontes fixas existentes, por já estarem em funcionamento ou com a licença de instalação requerida antes da publicação desta Resolução, deverão ter seus limites de emissão fixados pelo órgão ambiental licenciador, a qualquer momento ou no processo de renovação de licença, mediante decisão fundamentada*”. Assim, apenas os empreendimentos nº 9 e nº 14 precisam estar dentro dos limites impostos por essa resolução. O empreendimento nº 14 apresentou apenas um equipamento com emissão inferior a 200 mg/Nm³.

A concentração de NOx não foi considerada na Tabela 4.9, pois apenas os empreendimentos que, recentemente, já obtiveram a revalidação da licença de operação ou estão em processo de revalidação realizaram monitoramento desse parâmetro. Nesse caso, todos os empreendimentos que realizaram monitoramento das concentrações de NOx apresentaram valores inferiores ao limite estabelecido na Resolução CONAMA Nº 382/06, conforme Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Monitoramento da concentração de NOx nas caldeiras a bagaço de cana

Empreendimento	Emissões de NOx (mg/Nm³)
27	Caldeira 1 – 164,33 / Caldeira 2 – 214,76
9	340,9
42	39,83 (média das caldeiras 1 e 2)
14	Caldeira 1- 82,26 / Caldeira 2 – 110,48
40	161,67

Fonte: Adaptado de SEMAD (vários anos)

Vale ressaltar que em Minas Gerais as emissões atmosféricas do setor sucroalcooleiro são controladas por meio de lavador de gases. Apenas o empreendimento nº 37 não apresenta nenhum sistema de controle de suas emissões, mas, mesmo assim, apresentou resultados dentro do limite estabelecido pela Deliberação Normativa COPAM Nº 011/86.

4.4.3 Emissões de gases de efeito estufa provenientes do setor sucroalcooleiro de Minas Gerais

A emissão potencial de gases de efeito estufa (GEE) para o setor sucroalcooleiro, relacionados à queima do bagaço de cana, pode ser estimada utilizando-se fatores de emissão de poluentes estabelecidos pela *US Environmental Protection Agency* (USEPA, 1996) e pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 1996), conforme Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Fator de emissão de poluentes nos gases provenientes da queima do bagaço de cana em caldeiras

Parâmetro	Fator de Emissão	
	USEPA (kg/t bagaço)	IPCC (kg/t cana)
Material Particulado		
sem sistema de controle	6,8	2,58
com ciclone	3,6	-
com lavador de gases	0,45	-
Dióxido de Carbono	707,6	-
Óxidos de Nitrogênio	0,54	0,15
Óxidos de Carbono	-	2,1
Metano	-	0,062
Óxido Nitroso	-	0,0084

Fonte: USEPA (1996); IPCC (1996)

Outra importante ferramenta que permite a contabilização das emissões dos gases de efeito estufa é o conceito de *Global Warming Potential* (GWP), um índice baseado na força radiativa dos diversos gases de efeito estufa, que permite estimar o potencial impacto de cada gás no equilíbrio climático terrestre com relação ao impacto de um gás de referência, o CO₂. Os valores de GWP (Tabela 4.13) permitem estimar a massa equivalente de carbono (CO₂e) correspondente a uma dada massa de outro gás de efeito estufa, num dado intervalo de tempo (MATEUS, 2010).

Tabela 4.13 – Valores de GWP para o potencial global de aquecimento dos gases de efeito estufa

Gases de Efeito Estufa	GWP - 100
Dióxido de Carbono	1
Monóxido de Carbono	1
Metano	23
Óxidos de Nitrogênio	5
Óxido Nitroso	296

Fonte: MATEUS (2010); IPCC (2001)

Com base nos fatores de emissão para gases de efeito estufa estabelecido pelo IPCC e com os valores de GWP, LEME (2005) desenvolveu uma estimativa para o total das emissões, em massa, geradas na queima de bagaço de cana. O valor encontrado foi de 6,75 kgCO₂e/t de cana.

Diante desses dados, foi calculado o valor de emissão potencial de gases de efeito estufa para o setor sucroalcooleiro de Minas Gerais, considerando os valores de NO_x e material particulado do IPCC (Tabela 4.12) e de LEME (2005). O total de bagaço gerado pelos empreendimentos, estudados anteriormente, foi calculado com base nos dados da Tabela 4.9. Os resultados da emissão potencial de gases e efeito estufa para o Estado de Minas Gerais são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Emissão potencial de gases de efeito estufa, óxidos de nitrogênio e material particulado em Minas Gerais relativos à queima de bagaço

Bagaço (10 ³ t)	CO ₂ e (t)	NO _x (t)	MP (t)
8.372,48	56.514,24	1.255,87	21601,00

Fonte: Adaptado de IPCC (1996); MATEUS (2010); LEME (2005); SEMAD (vários anos)

A Figura 4.3, a seguir, apresenta a participação do bagaço de cana com relação às emissões de outras fontes energéticas.

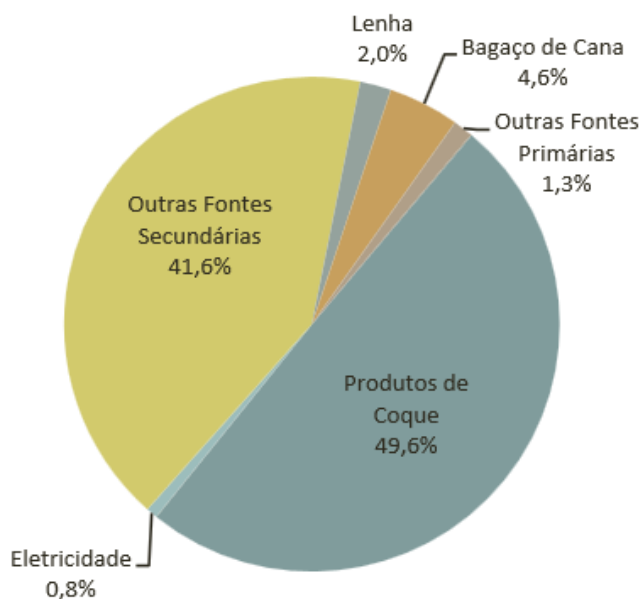


Figura 4.3 – Participação das fontes energéticas nas emissões de GEE em Minas Gerais

Fonte: FEAM (2013)

Segundo FEAM (2013) o bagaço de cana está entre as fontes menos poluentes, com participação de 4,6% no total das emissões de GEE para o ano de 2010. A maior concentração das emissões originou-se do consumo dos produtos de coque, consumidos nas centrais autoprodutoras.

Apesar de seu potencial poluente ser menor em comparação às fontes energéticas não renováveis, a cadeia agroenergética da cana-de-açúcar não está livre das emissões atmosféricas, que são geradas tanto na fase agrícola, quanto na etapa industrial.

A própria lavoura de cana-de-açúcar envolve práticas com grande potencial de emissões, como é a prática das queimadas na colheita manual, que ainda é uma técnica adotada no cenário nacional.

Por outro lado, a mecanização da produção de cana-de-açúcar apresenta-se como uma importante ferramenta no combate às queimadas, deixando de lançar na atmosfera toneladas de gases que contribuem para o aquecimento global. Além disso, a eliminação da queima promove significativa redução no consumo de água no processo industrial, que se destina à limpeza da cana-de-açúcar antes de iniciar o processo de moagem. A palha deixada no solo proporciona ganhos consideráveis para o setor como: (a) enriquecimento do mesmo,

protegendo-o contra as erosões e os efeitos do sol; (b) aumento de matéria-prima para a produção de etanol celulósico (etanol de segunda geração); (c) aumento do potencial energético de cogeração.

Em 2010, as emissões de gases de efeito estufa na queima dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar totalizaram 166,25 mil tCO₂e (FEAM, 2013). Esse valor considerou que somente 20% da área cultivada no estado foi queimada. A composição dessas emissões pode ser verificada na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Emissões da queima de resíduos agrícolas no Estado de Minas Gerais

	Emissões (10³ t)	Emissões totais de CO₂e (10³ t)
CH₄	4,58	96,2
N₂O	0,225	70
Total		166,2

Fonte: Adaptado de FEAM (2013)

Ao longo dos anos, em função do compromisso de eliminação da queima da palha, assumido pelos produtores do setor, através do Protocolo de Intenções Agro-socioambiental do Setor Sucroalcooleiro, criado em 2008, esse percentual de queima da área cultivada vem diminuindo. De acordo com Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais – SIAMG, o estado registrou um índice de mecanização de 97% da lavoura, com investimentos da ordem de US\$ 3 bilhões na aquisição de máquinas e equipamentos. Os 3% restantes são constituídos por áreas com declividade acima de 12% e, portanto inviáveis para a mecanização. Essas áreas estão concentradas na Zona da Mata e no Sul de Minas.

Com base em FEAM (2013), SIAMG (2013) e da área total cultivada no estado por safra (CANASAT, 2015), foi possível calcular a emissão evitada em 2010 e para o período de 2010 a 2014, que foi de aproximadamente 5.286,3 mil tCO₂e, conforme apresentado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Emissão de gases de efeito estufa (GEE) evitada com a eliminação da queima da cana em Minas Gerais

Ano Safra	Área total cultivada (ha)	Índice de mecanização (%)	GEE evitado (tCO₂e)⁽¹⁾
2010	726.346	73,0	786.865
2011	776.340	82,3	948.169
2012	809.409	87,9	1.055.822
2013	856.922	94,3	1.199.187
2014 ⁽²⁾	900.511	97,0	1.296.268
<i>Total</i>			<i>5.286.311</i>
1- A substituição da colheita manual (queima) pela mecanizada evita a emissão de GEE da ordem de 1,484 tCO ₂ e/ ha/ano (La Scala Jr; Figueiredo, 2011).			
2- Projeção para safra 2014/2015.			

Fonte: SIAMG (2014); CANASAT (2015)

Os resultados da análise das emissões de gases de efeito estufa para o setor sucroalcooleiro de Minas Gerais encontram-se agrupados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Resultados da análise das emissões de gases de efeito estufa para o setor sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais

Emissões de CO₂e pela queima do bagaço de cana (10³t)	Emissões de CO₂e pela queima na colheita manual da cana (10³t)	Emissões de GEE evitadas pela mecanização da colheita da cana (10³t)
56.514,24	166,20 (em 2010)	5.286,31 (2010 a 2014)

A utilização do bagaço de cana como fonte de energia contribui não apenas para a diversificação da matriz elétrica brasileira, mas também tem impacto direto na minimização das emissões atmosféricas, contribuindo para as ações que combatem as mudanças climáticas, que é um dos temas mais discutidos mundialmente. O Apêndice 2 traz uma abordagem sobre as mudanças climáticas e como essa questão tem sido tratada no Brasil, com destaque para o Estado de Minas Gerais.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelo presente trabalho, foi possível verificar que o bagaço de cana constitui um importante recurso energético para a matriz elétrica nacional, sobretudo no contexto atual da busca por fontes renováveis, a fim de atender às demandas da redução das emissões atmosféricas. Porém, sua geração e seu aproveitamento energético estão direta e indiretamente ligados à diversas questões que permeiam o setor sucroalcooleiro.

Diante dos desdobramentos do setor sucroalcooleiro ao longo dos anos, percebe-se que o mesmo tem relação direta com a produção de cana-de-açúcar que, por sua vez, depende de fatores internos, como é o caso de investimentos financeiros em melhoria dos canaviais e, externos, como é o caso da variabilidade dos períodos chuvosos e das estiagens. Todavia, a produção de cana-de-açúcar vem apresentando bons resultados, recuperando-se de quedas sofridas em safras passadas. O BEN de 2014 divulgou que, para a safra de 2013/2014, por exemplo, a produção de cana-de-açúcar superou o recorde de 2009, alcançando 648,1 milhões de toneladas (EPE, 2014a). Gerado a partir do processo de extração do caldo da cana, o bagaço também tem sua produção aumentada.

O etanol apresenta-se como importante vetor econômico do setor sucroalcooleiro, na medida em que a gasolina utilizada no país sofre adição desse produto. Esse processo, não é algo novo. No início do século passado, já se buscava a adição de 2% de etanol à gasolina, mas isso só se tornou realidade a partir da criação do Proálcool, em 1975, que também introduziu os carros movidos, exclusivamente, a álcool. A mistura obrigatória do etanol anidro à gasolina foi estabelecida em 22%, através da Portaria CNP N° 144/1984 e do PROCONVE. Anos mais tarde, a introdução dos carros *flex fuel* abriram uma nova oportunidade para o setor sucroalcooleiro e para o mercado consumidor desse combustível. No entanto, apresentando, em grande parte dos empreendimentos do setor, uma configuração mista, os usineiros definem o destino de suas produções, que acabam indo a favor do açúcar, por esse ser comercializado sobretudo internacionalmente.

As projeções para o setor sucroalcooleiro apontam uma produção superior à 800 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, em 2020, com geração de 42 milhões m³ (PDE 2023) à 48 milhões m³ (PNE 2030) de etanol. Esses cenários também mostram que a produção de etanol de segunda geração deverá aumentar consideravelmente, o que é um fator importante para o bagaço de cana, pois esse passará a competir com o caldo extraído da cana na produção de etanol. Embora isso possa soar como alarme para o aproveitamento do potencial energético do bagaço, o mesmo também passará a contar com a palha, aumentando seu poder energético.

A produção de palha prevista para o ano de 2020 pode alcançar 128 milhões de toneladas, segundo PDE 2023 (EPE, 2007; MME, EPE, 2014).

A respeito do aproveitamento energético da palha, a realidade de alguns estados produtores ainda é incerta. Em Minas Gerais, com a mecanização das lavouras, segundo SIAMG (2014), quase toda a palha gerada é deixada nos campos com o objetivo de enriquecer e proteger o solo. Por esse motivo, pode-se esperar um prazo mais longo para se obter resultados a partir de sua queima junto ao bagaço nas usinas de cogeração do setor sucroalcooleiro mineiro.

No Brasil, Minas Gerais está entre as maiores regiões produtoras de cana-de-açúcar e possui 46 empreendimentos, com previsão de mais 20 empreendimentos que poderão entrar em operação nas próximas safras. Com esse número significativo de empreendimentos, Minas Gerais destaca-se na questão da cogeração de energia elétrica a partir da queima do bagaço.

Para a análise do setor sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais, foram considerados 39 empreendimentos em operação, com capacidade instalada de moagem de cana e de cogeração de 397.300,77 t/d e 1.096,16 MW, respectivamente. Dentre esses empreendimentos, identificou-se que os rendimentos energético e exergético das usinas de cogeração apresentam valores baixos, com exceção de alguns empreendimentos. Essa variação é justificada pelas características tecnológicas das usinas de cogeração, em função da existência de equipamentos que operam a baixas pressões de vapor e temperaturas. Contudo, foram também identificados empreendimentos com equipamentos mais modernos e de tecnologia aprimorada nesse sentido. Os maiores rendimentos energético e exergético encontrados para o setor em questão foram 37% e 27,5%, respectivamente.

A geração de bagaço excedente, conforme informações obtidas pelos processos ambientais de quinze empreendimentos em operação no Estado de Minas Gerais, foi estimada em 167,72 t/h. Aplicando-se à esse total de bagaço excedente os melhores rendimentos encontrados nas usinas de cogeração em operação, estima-se que o setor sucroalcooleiro mineiro tem potencial de comercialização de energia elétrica em torno de 847 MWh, considerando-se a energia disponível, e de 825 MWh, considerando-se a energia útil. Tomando-se os dados do 29º Balanço Energético de Minas Gerais – BEEMG, de 2013, isso significa que o excedente elétrico produzido pelo setor sucroalcooleiro poderia suprir pouco mais de 1% da demanda estadual de energia elétrica, proveniente de hidrelétricas. Se comparada à oferta de energia elétrica proveniente das centrais térmicas, esse excedente responderia por cerca de 15% da oferta de energia elétrica no Estado.

A geração de energia elétrica excedente proveniente dos novos empreendimentos do setor sucroalcooleiro em Minas Gerais não foi considerada nos cálculos realizados. Contudo, com uma capacidade instalada total de cogeração de 554,90 MW, espera-se que os mesmos, quando entrarem em operação, possam gerar consideráveis excedentes de energia elétrica.

Os desdobramentos dos fatores que influenciam a produção de energia elétrica pelo setor sucroalcooleiro de Minas Gerais são comuns a outras regiões produtoras. Destacam-se, entre eles, a limitação financeira quanto aos custos da instalação de linhas de transmissão de energia e/ou da modernização dos equipamentos. Há, também, o fato de a eletricidade excedente ocorrer somente durante o período de safra, mas essa situação acaba agregando relevância ao bagaço de cana perante a energia hidráulica, em razão da colheita da cana-de-açúcar acontecer no período de estiagem.

Logo, entende-se que a análise da geração de excedentes de energia elétrica, a partir da queima do bagaço, é um estudo multidisciplinar, que requer uma avaliação minuciosa em função das particularidades das safras, levando em conta os aspectos sazonais dos períodos chuvosos e das estiagens, dos equipamentos empregados na cogeração, das projeções realizadas para o setor, dos incentivos políticos e econômicos e da ampliação de fontes energéticas renováveis na matriz elétrica nacional.

Outro ponto relevante é o fato de o bagaço de cana ser uma fonte renovável de energia. Contudo, isso não significa que não há geração de poluentes. Pelo contrário, as atividades desse setor gera sérios problemas nesse sentido, como é o caso da vinhaça, resultante do processamento industrial da cana-de-açúcar. Por sua vez, a queima do bagaço de cana gera emissões atmosféricas, que têm sido controladas, conforme apresentado nesse trabalho, a fim de se manterem dentro dos padrões legais vigentes no país. Ainda assim, há uma parcela que é emitida. Verificam-se, também, as emissões de gases de efeito estufa na queimada dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar tendem a diminuir significativamente, uma vez que a mecanização da lavoura, segundo a SIAMG (2014), já representa 97% das áreas com declividade inferior a 12%.

Conclui-se, portanto, que o tema abordado permite abrir um leque muito rico de interpretações, abrindo caminhos para outros trabalhos. Há, por exemplo, o grande desafio de se estudar a questão da transposição das barreiras na transmissão dessa energia procurando, até mesmo, mostrar a possibilidade de se criar um sistema interligado entre as regiões produtoras de cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. *Governo zera PIS e Cofins para importação de álcool*. Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2013-12-27/governo-zera-pis-e-cofins-para-importacao-de-alcool>>. Acesso em 30 jan. 2014.

AGÊNCIA BRASIL. *Estudo mostra condições precárias de trabalho nos canaviais paulistas*. Publicado em 05/01/2011. Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2011-01-05/estudo-mostra-condicoes-precarias-de-trabalho-nos-canaviais-paulistas>>. Acesso em 30 out. 2015.

ANÁLISE ENERGIA. *Etanol: O desafio político de criar a política nacional*. Anuário 2012. São Paulo: Análise Editorial, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MEDICINA NO TRABALHO [ABMT]. *Artigo Bagaçose – Pulmões em Alerta*. Março, 2003. Disponível em: <http://www.abmt.org.br/documento/Artigo_Bagacose.pdf>. Acesso em 25 out. 2012.

ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS SUCROENERGÉTICAS DE MINAS GERAIS [SIAMG]. *Produção ecológica da cana-de-açúcar*. Belo Horizonte: SIAMG, 2014. Disponível em: <<http://www.aea.org.br/premio/downloads/2015/trabalhos/TB000328.pdf>>. Acesso em 10 nov. 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES [ANFAVEA]. *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2015*. São Paulo: ANFAVEA, 2015.

BALESTIERI, J.A.P. *Cogeração, geração combinada de eletricidade e calor*. Florianópolis, Editora da UFSC, 2002.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL [BNDES]. Centro de Gestão de Estudos Estratégicos [CGEE] (organização). *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 316 p.

BANERJEE, R., PANDEY, A.; *Bioindustrial Application of Sugarcane Bagasse: a Technology Perspective*. Int. Sugar J.; vol. 1; pp. 3–7; 2002.

BITTENCOURT, Geraldo Moreira; FONTES, Rosa Maria Olivera; CAMPOS, Antônio Carvalho. *Determinantes das exportações brasileiras de etanol*. Revista de Política Agrícola. Ano XXI. n.4. Out./Nov./Dez. 2012. Pags. 4-19.

BLOG INFOPETRO. Losekan L. *Etanol: de promessa a problema*. Rio de Janeiro. 2011. Disponível em: <www.infopetro.wordpress.com>. Acesso em: 20 fev. 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL]. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília: ANEEL, 2008. 236p.

_____. Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL]. Banco de Informações de Geração – BIG. *Capacidade de geração do Brasil*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 20 de out. 2015.

_____. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível [ANP]. Superintendência de Biocombustíveis e Qualidade de Produtos. Rita Capra Vieira (apresentação). *Novo marco regulatório do etanol combustível no Brasil*. Novembro de 2011. Disponível em: <http://www.ie.ufrj.br/images/infosucro/Rita_Capra_Vieira.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2015.

_____. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. [ELETROBRAS]. Programas. Proinfra. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/Proinfra/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>>. Acesso em 22 jul. 2015.

_____. Decreto Federal n. 2.665, de 10 de julho de 1998. Publicação: Diário Oficial da União. 13 jul. 1998.

_____. Decreto Federal n. 2003, de 10 de setembro de 1996. Publicação: Diário Oficial da União. 11 set. 1996.

_____. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. *Balanco Energético Nacional 2008: Ano base 2007*. Rio de Janeiro: EPE, 2008.

_____. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. *Balanco Energético Nacional 2014: Ano base 2013*. Rio de Janeiro: EPE, 2014a.

_____. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. *Balanco Energético Nacional 2015 – Ano Base 2014: Relatório Síntese*. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

_____. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. Balanco Energético Nacional. *Séries completas*. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>>. Acesso em 29 nov. 2015.

_____. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. Informe à imprensa. *Leilão de Energia de Reserva. Leilão de Energia de Reserva negocia 2.379MW de térmicas a biomassa*. Rio de Janeiro, 14/08/2008. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20080814_1.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2015.

_____. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. Informe à imprensa. *Leilão FA 2015 negocia energia de 11 usinas com deságio de 1,96%*. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Fontes%20Alternativas%202015/Leil%C3%A3oFA2015negociaenergiade11usinascomdes%C3%A1giode1,96.aspx>>. Acesso em: 30 nov. 2015.

_____. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. Informe à imprensa: *Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2021: Derivados da cana e eólica sustentarão aumento de*

participação das fontes renováveis ao longo dos próximos 10 anos. Rio de Janeiro; 26/09/2012.

_____. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. *Plano Nacional de Energia 2030*. Rio de Janeiro: EPE, 2007.

_____. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. Série Estudos da Demanda de Energia. Nota técnica DEA 13/14. *Demanda de energia 2050*. Rio de Janeiro: EPE, 2014b.

_____. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis [IBAMA]. Programas de Controle de Emissões Veiculares. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas-qa/programa-proconve>>. Acesso em: 30 out. 2015.

_____. Lei Federal n. 12.351, de 22 de dezembro de 2010. Publicação: Diário Oficial da União. 23 dez. 2010.

_____. Lei Federal n. 10.848, de 15 de março de 2004. Publicação: Diário Oficial da União. 16 mar. 2004.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento [MAPA]. SAPCANA – Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira. Relação de instituições cadastradas no *Departamento de Cana-de-açúcar e Agroenergia*. Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sapcana/downloadBaseCompletaInstituicao!downloadArquivo.action>>. Acesso em: 24 jul. 2015.

_____. Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação [MCTI]. *Texto do Protocolo de Quioto, Artigo 05*. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/4093/Artigo_5___Pesquisa_e_Observacao_Sistemica.html> Acesso em 20 nov. 2014.

_____. Ministério de Minas e Energia [MME]. *Balço de Energia Útil – BEU 2005*. 71p.

_____. Ministério de Minas e Energia [MME]. *Capacidade instalada de geração elétrica – Brasil e Mundo (2014)*. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/0/Capacidade+Instalada+de+EE+2014.pdf/cb1d150d-0b52-4f65-a86b-b368ee715463>>. Acesso em 20 jul. 2015.

_____. Ministério de Minas e Energia [MME]. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023*. Brasília: MME/EPE, 2014.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior [MDCI]. Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. *Energias renováveis*. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=3&menu=3631>>. Acesso em: 22 fev. 2013.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Publicação: Diário Oficial da União. 2 jan. 2007.

_____. Plano Nacional sobre Mudanças do Clima – PNMC. Brasília, dezembro de 2008. 132 p.

_____. Resolução ANP n. 26, de 8 de agosto de 2012. Publicação: Diário Oficial da União. 31 ago. 2012.

CAMARGO, C. A. (Coord.) *Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool*, Manual de Recomendações. 1 ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) (Publicação IPT, v. 1871), 1990.

CÂMERA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA [CCEE]. Fontes. *Biomassa*. Disponível em: < http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=hjqdp4wt8_77&_afLoop=765590900760017#%40%3F_afLoop%3D765590900760017%26_adf.ctrl-state%3Dmemivnb9s_17>. Acesso em: 20 jul. 2015a.

_____. Setor elétrico. *Entenda o modelo brasileiro*. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/setor_eletrico?_adf.ctrl-state=hjqdp4wt8_77&_afLoop=1789448200224551>. Acesso em: 20 jul. 2015b.

CANAL RURAL [RURALBR]. *Exportação de etanol dos Estados Unidos deve aumentar se percentual de mistura à gasolina for reduzido*. Notícias. Agricultura. Disponível em: <<http://www.canalrural.com.br/noticias/agricultura/exportacao-etanol-dos-estados-unidos-deve-aumentar-percentual-mistura-gasolina-for-reduzido-24805>>. Acesso em 10 dez. 2014.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA [CEPEA]. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” [ESALQ]. Universidade de São Paulo. Alertas de Mercado. *Açúcar: Preços podem ser sustentados por déficit mundial*, 07/01/2010. Disponível em: <<http://cepea.esalq.usp.br/imprensa/?page=340&id=3221>>. Acesso em 13 fev. 2014.

CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS [CGEE]. *Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil* - Brasília, DF, 2009. 536 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO [CONAB]. *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar*. v.1. Brasília: CONAB, 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_15_15_44_37_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_14.pdf>. Acesso em 02 jan. 2015.

_____. *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar*. v. 1 – Safra 2014/15, n.4 – Quarto Levantamento. Brasília: CONAB, abr. 2015a. 29p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_14-15.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2015.

_____. *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar*. v. 2 – Safra 2015/16, n.3 – Terceiro Levantamento. Brasília: CONAB, dez. 2015b. 70p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_12_17_09_03_29_boletim_cana_portugues_-_3o_lev_-_15-16.pdf>. Acesso em: 30 dez. 2015.

_____. *A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil. Análise do Desempenho da Safra 2009-2010*. Brasília: CONAB, março de 2011. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_geracao_termo_baixa_res..pdf>. Acesso em 02 jan. 2015.

CORRÊA NETO, Vicente; RAMON, Dan. *Análises de opções tecnológicas para projetos de cogeração no setor sucroalcooleiro*. Vibhava Consultoria Empresarial S/C Ltda. SETAP Brazil Representation. Brasília, May, 2002. Disponível em: <http://www.nuca.ie.ufrj.br/infosucro/biblioteca/bim_CorreaNeto_OpcoesCogeracao.pdf> Acesso em 06 nov. 2012.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa (coordenador). *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade*. São Paulo: Blucher, 2010.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares (organização). *Biomassa para energia*. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008.

CREMONEZ, Luiz Fernando. *Análise termodinâmica, termoeconômica e econômica de uma usina sucroalcooleira para diferentes mix de produção*. 2013. 169 fl. (Dissertação) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira/SP, 2013.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S/A. Distribuição Rondônia. TGE – Gerência de Expansão de Sistemas. *Planilha quantidades e preços*. Construção da linha de transmissão 138 kV – SE Eletronorte/ SE Pimenta Bueno. Construção da linha de transmissão 69 kV – SE Vilhena I/ SE Vilhena II. 2010. Disponível em: <http://www.eletrorasrondonia.com/www/down_anx/CC0062007_Orcamento%20Basico.pdf>. Acesso em 14 nov. 2015.

ENSINAS, Adriano V.; ARNAO, Juan Harold Sosa; NEBRA, Silvia Azucena. Aumento de eficiência energética em plantas produtoras de açúcar, etanol e energia elétrica. 2010 In: CORTEZ, Luís Augusto Barbosa (coord.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade*. São Paulo: Blucher, 2010. p. 583-600.

FAUSTO, Boris. *História do Brasil*. 2. Ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Fundação do Desenvolvimento da Educação, 1995.

GARDOS, I.; PRAIS, M.; FURST, R. D. A integração das usinas: a biomassa e o seu benefício para a operação do Sistema Interligado Nacional – SIN – período 2009 e 2010. In: XII Anais do Congresso Brasileiro de Energia. Desafios do Setor Energético Brasileiro, 2008, Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

GENTIL, Luiz Vicente. Uma investigação com propostas de Marco Legal e de Política Nacional de eletricidade gerada com biomassa residual da cana-de-açúcar. Universidade Federal de Campinas. Departamento de Energia, Pós-Doutorado em Energia de Biomassa. Campinas, SP, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/11891/1/PD%20Final%2012%2012%2012%20Mo do%20Compat.pdf>>. Acesso em 30 out. 2015.

HUGOT, E. Handbook of cane sugar engineering. 3 ed. Amsterdam: Elsevier,1986.

INSTITUTO ACENDE BRASIL. *3º Leilão de Fontes Alternativas. Análise Pós-leilão*. Realização: 27/04/2015. Disponível em: <http://www.acendebrasil.com.br/media/analises/20150427_AnalisePos_LeilaodeFontesAlternativas.pdf>. Acesso em 20 de jul. 2015.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA [IPAM]. *Mudanças Climáticas, o Protocolo de Quioto e mercado de carbono*. Brasil, 2014. Disponível em: <<http://www.ipam.org.br/>>. Acesso em 15 dez. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA [INEE]. GD e Cogeração. O que é cogeração. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp?Cat=gd>. Acesso em 20 jul. 2015.

INTERNATIONAL SUGAR ORGANIZATION – ISO. *Cogeneration – Opportunities in the World Sugar Industries*. MECAS(09)05; April; 2009. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/26300484/Co-Generation-in-Sugar-Industry>>. Acesso em 25 out. 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. *Climate Change 2014 Synthesis Report Fifth Assessment Report*. Disponível em: <<http://ar5-syr.ipcc.ch/>>. Acesso em 30 nov. 2015.

KALUCZ, Rafael. Planejamento de sistemas de transmissão de energia elétrica. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica. 2013. Disponível em: <http://clodomirolaunsihuay.weebly.com/uploads/1/0/2/1/10218846/construo_de_linhas_de_transmisso.pdf>. Acesso em 30 out. 2015.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. *As Queimadas da Cana*. São José dos Campos, SP: Transtec Editorial, 1991. 92p.

LEITE, Antônio Dias. *A energia do Brasil*. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LEITE, Rogério Cezar de Cerqueira. A estratégia brasileira para o etanol. In: CORTEZ, Luís Augusto Barbosa (coord.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade*. São Paulo: Blucher, 2010. p. 17-18.

LEME, R. M. *Estimativa das emissões de poluentes atmosféricos e uso de água na produção de eletricidade com biomassa de cana-de-açúcar*. 2005. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Universidade de Campinas, Campinas, 2005.

LOPES, Otavio Augusto. Avaliação de métodos avançados de geração de energia elétrica na indústria de açúcar e bioenergia. Dissertação (mestrado). Escola de Economia de São Paulo. Fundação Getúlio Vargas. 2013.

MACEDO, Isaias de Carvalho; SOUZA, Eduardo L. Leão (coordenação). *Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética*. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010. 314p.

MARQUES, Rejane Siqueira Silva; SCOPINHO, Rosemeire Aparecida. *Qualificação profissional dos trabalhadores rurais canavieiros: quem são os eleitos?*. Revista Rede de Estudos do Trabalho. Ano V. n. 11. 2012.

MATEUS, Liliana Adriana Nappi. *Análise dos aspectos ambientais e energéticos do setor sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais*. 2010. 199 fl. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental) – Universidade Federal de Ouro, Ouro Preto, 2010.

MILANEZ, A.Y. et al. *O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política*. BNDES Setorial 35, p. 277-302. Rio de Janeiro. 2012.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa do COPAM nº 011, de 16 de dezembro de 1986. Publicação: Diário Oficial “Minas Gerais.” 10 jan. 1987.

_____. Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa do COPAM nº 74, de 9 de setembro de 2004. Publicação: Diário Oficial “Minas Gerais.” 2 out. 2004.

_____. Companhia Energética de Minas Gerais [CEMIG]. *29º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG 2014: ano base 2013*. Belo Horizonte, MG: Cemig, 2015.

_____. Deliberação Normativa do COPAM Nº 74, de 9 de setembro de 2004. Publicação. Diário Oficial “Minas Gerais” 2 out. de 2004.

_____. Fundação Estadual do Meio Ambiente [FEAM]. *Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais – Ano base 2010*. Belo Horizonte: FEAM, 2013.

_____. Fundação Estadual do Meio Ambiente [FEAM]. *Estratégias de adaptação regional para Minas Gerais*. Belo Horizonte: FEAM, 2014a. 11p.

_____. Fundação Estadual do Meio Ambiente [FEAM]. *Estudo de vulnerabilidade regional às mudanças climáticas de Minas Gerais*. Belo Horizonte: FEAM, 2014b. 139p.

_____. Fundação Estadual do Meio Ambiente [FEAM]. *Plano de Energia e Mudanças do Clima de Minas Gerais: cenários de emissões de gases de efeito estufa*. Belo Horizonte: FEAM, 2014c. 69p.

_____. Fundação Estadual do Meio Ambiente [FEAM]. *Potencial de energias renováveis. Biomassa, resíduos, hidroeletricidade*. v.2. Plano de Energia e Mudanças do Clima de Minas Gerais (PEMC). Belo Horizonte: FEAM, 2014d. 131p.

_____. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável [SEMAD]. Sistema Integrado de Informações Ambientais. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/siam/login.jsp>>.

NASTARI, Plínio Mário. *A pendente decisão do E.P.A. e o futuro do etanol nos EUA*. Idea OnLine Cana – Açúcar – Bioenergia – Etanol. Publicado em 07/02/2014. Disponível em: <<http://www.ideaonline.com.br/artigo/a-pendente-decisao-do-epa-e-o-future-do-etanol-nos-eua-plinio-nastari.html>>. Acesso em 30 abr. 2015.

NASTARI, Plínio Mário. *As exportações de álcool do Brasil*. Revista Opiniões. Os Especialistas. Abr./Jun. 2005. Disponível em: <<http://revistaonline.revistaopinioes.com.br/revistas/suc/52/>>. Acesso em: 02 abr. 2015.

NYKO, Diego; FARIA, Jorge Luiz Garcia; MILANEZ, Artur Yabe. CASTRO, Nivalde José de; BRANDÃO, Roberto; DANTAS, Guilherme de A. *Determinantes do baixo aproveitamento do potencial elétrico do setor sucroenergético: uma pesquisa de campo*. Bioenergia. BNDES Setorial 33, p. 421-476. 2011. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3312.pdf>. Acesso em 15 jul. 2015.

NOVACANA. *Etanol*. História da legislação sobre o etanol. Disponível em: <<http://www.novacana.com/etanol/historia-legislacao/>>. Acesso em: 13 abr. 2015.

NOVACANA. *Na projeção do MME, o Brasil não terá condições de atender a demanda por etanol ou gasolina com combustível nacional e, até 2023, o problema crescerá de forma expressiva e preocupante*. Política. 10/04/2015. Disponível em: <<http://www.novacana.com/n/etanol/politica/mme-problema-oferta-etanol-gasolina-sucroalcooleiro-100415/>>. Acesso em: 17 abr. 2015.

OLIVEIRA et al.; *Sugarcane Bagasse Ash as a Partial Portland Cement Replacement Material*; Dyna; vol. 77; N° 163, pp. 47-54; 2009.

PINHEIRO, Paulo César da Costa; CERQUEIRA, Sérgio Augusto Araújo da Gama. *Método de cálculo do balanço térmico de caldeiras*. Trabalho apresentado no XVII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, Volta Redonda, RJ, 26 a 28/09/1995. Disponível em: <<http://www.geocities.ws/paulocpinheiro/papers/balanco.pdf>>. Acesso em 05 dez. 2012.

PORTAL BRASIL. *Pacote de incentivos do setor de combustíveis beneficiará produtores de cana-de-açúcar*. Publicado: 23/04/2013. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2013/04/produtores-de-etanol-terao-pacote-de-incentivos-para-estimular-o-setor>>. Acesso em: 20 out. 2015.

REPÓRTER BRASIL. *Escravo, nem pensar!* As condições de trabalho no setor sucroalcooleiro. Sumaré, SP, 2014.

RIBAS, Sara Lúcia da Silva. *Etanol brasileiro: uma análise da atual crise vivenciada pelo setor sucroalcooleiro*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro, Ouro Preto, 2014.

ROSSETO, Raffaella; SANTIAGO, Antônio Dias. *Adubação: resíduos alternativos*. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html#>. Acesso em 01 dez. 2015.

SAINT-MARTIN, L. F. *Análise Exergética da Co-geração a partir de Resíduos da Cana-de-Açúcar em Usinas Sucroalcooleiras*. Dissertação de Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SALLA, Diones Assis et al . Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. *Cienc. Rural*, Santa Maria , v. 39, n. 8, p. 2516-2520, nov. 2009 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782009000800038&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 01 jul. 2015.

SANTOS, Nelson Oliveira dos. *Termodinâmica aplicada às termelétricas: teoria e prática*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

SÃO PAULO. Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo [CONSECANA]. *Manual de Instruções*. 5.^a Ed. Piracicaba, SP: CONSECANA, 2006. 112p.

SILVA, Lucas Soares. *A cana-de-açúcar e seus produtos na história do Brasil: seus usos, importância e mercado*. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro, Ouro Preto, 2010.

SILVA, Ozires; FISCHETTI, Decio. *Etanol a Revolução Verde e Amarela*. 1. ed. São Paulo: Bizz Comunicação, 2008.

SOUZA, Zilmar José de. *Bioeletricidade: o que falta para esta alternativa energética deslançar*. *Revista Mercado Empresarial. Edição nº 41. Especial FENASUCRO 2012. Págs. 52-54*.

SUZOR, n. C.; BOUVET, P. E. *Identifying the basic conditions for economic generation of public electricity from surplus bagasse in sugar mills*. World Bank, Washington, 1991.

TUDESCHINI, Luís Gustavo. *A bioeletricidade sucroenergética na diversificação da matriz elétrica brasileira: potenciais, barreiras e perspectivas*. Monografia. Curso de Ciências Econômicas. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR [UNICA]. *Etanol e setor sucroenergético: situação atual e perspectivas*. São Paulo. 2012. Disponível em: <http://www.senado.gov.br/comissoes/CRA/AP/AP20121122_AntonioDePaduaRodrigues.pdf>. Acesso em abr/2013.

_____. Notícias. Sustentabilidade. *São Paulo fecha safra 2013/2014 com colheita mecanizada em 83% dos canaviais*. 19/05/2014. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/6551584920310621254/sao-paulo-fecha-safra-2013-por->>

cento2F2014-com-colheita-mecanizada-em-83-por-cento-dos-canaviais/>. Acesso em 21 mar. 2015.

_____. *Produção e uso do etanol combustível no Brasil*. Respostas às questões mais frequentes. ÚNICA, março de 2007. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/publicacoes/etanol/producao_etanol_unica.pdf>. Acesso em 7 mar. 2015.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA [UDOP]. *Unica contesta proposta de redução no uso de biocombustíveis nos EUA*. Últimas notícias. Publicado em 29/01/2014. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php/index.php?item=noticias&cod=1109920>>. Acesso em 20 jun. 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. The Clean Air Act [As Amended Through P.L. 108–201, February 24, 2004]. Disponível em: <<http://www.epw.senate.gov/envlaws/cleanair.pdf>>. Acesso em 01 nov. 2015.

VALLE, Pedro Wallace de Paula Amaral do. *Análise exergetica da produção de biogás a partir do vinhoto do caldo-de-cana, em uma microdestilaria*. 2004. 336f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2004.

VANINI, Felipe. *Fim do sonho doce do etanol brasileiro*. EL PAÍS. Economia. Edição Brasil. São Paulo, 09/12/2013. Disponível em: <http://brasil.elpais.com/brasil/2013/12/10/economia/1386635197_164006.html>. Acesso em 17 de abr. 2015.

WILSON, Charlotte. *A era da Energia Extrema*. Disponível em: <<http://outraspalavras.net/posts/18180/>>. Publicado em 19 ago. 2013. Acesso em 17 jun. 2014.

ANEXO 1

Relação dos empreendimentos sucroalcooleiros de Minas Gerais

Ref.	Nome da usina	Município	N. Processo do licenciamento ambiental
Empreendimentos em operação			
1	Agroindustrial Santa Juliana S/A	Santa Juliana	1047/2003
2	Agropéu – Agroindustrial de Pompeu S/A	Pompéu	071/1981
3	Alcana Destilaria de Álcool de Nanuque S/A	Nanuque	062/1983
4	Araporã Bioenergia S/A (ex Usina Alvorada Açúcar e Álcool Ltda.)	Araporã	021/1981
5	BambuÍ Bioenergia S/A (ex Total Agroindústria Canavieira S/A)	BambuÍ	10336/2006
6	Bioenergética Aroeira Ltda.	Tupaciguara	11341/2007
7	Bioenergética Vale do Paracatu S/A (BEVAP)	João Pinheiro	10808/2007
8	Biosev S/A (ex LDC Bioenergia S/A)	Lagoa da Prata	009/1979
9	BP Ituiutaba Bioenergia Ltda.	Ituiutaba	10201/2006
10	Cabrera Central Energética Açúcar e Álcool	Limeira do Oeste	10314/2006
11	Central Bionergética Enervale S/A	João Pinheiro	7399/2010
12	Cia Agrícola Pontenovense	Urucânia	012/1979
13	Cia Energética Vale do São Simão	Santa Vitória	4978/2007
14	Cia Energética Vale do Tijuco Ltda.	Uberaba	2327/2007
15	DAMFI – Destilaria Antônio Monti Filho Ltda.	Canápolis	6215/2004
16	Destilaria Alpha	Cláudio	018/1984
17	Destilaria Alvorada do Bebedouro S/A – Açúcar e Álcool	Guaranésia	008/1981
18	Destilaria Atenas Ltda.	São Pedro dos Ferros	063/1985
19	Destilaria Cachoeira Ltda.	Tupaciguara	013/1983
20	Destilaria de Álcool Serra dos Aimorés S/A (DASA)	Serra dos Aimorés	063/1983
21	Destilaria Junivan S/A	Senhora de Oliveira	107/1981
22	Destilaria Rio do Cachimbo Ltda.	João Pinheiro	002/1980
23	Destilaria Vale do Paracatu Agroenergia Ltda.	Paracatu	10268/2006
24	Destilaria Veredas Indústria de Açúcar e Álcool Ltda.	João Pinheiro	383/2004
25	Laginha Agro-industrial S/A - Triálcool	Canápolis	076/1980
26	Laginha Agro-industrial S/A – Vale do Paranaíba	Capinópolis	581/2001
27	S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool	Campo Florido	178/2000
28	S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool	Carneirinho	1842/2006
29	S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool	Iturama	060/1983
30	S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool	Limeira do Oeste	1650/2003
31	SADA Bioenergia e Agricultura Ltda.	Jaíba	10397/2006
32	Santa Vitória Açúcar e Álcool (ex Criystalsev Comércio e Responsabilidade Ltda.)	Santa Vitória	3940/2006
33	Usina Açucareira Passos S/A (ex Usina Itaiquara de Açúcar e Álcool S/A)	Passos	016/1981
34	Usina Araguari Ltda. (ex Planalto Agroindustrial Ltda.)	Ibiá	990/2003
35	Usina Cerradão Ltda.	Frutal	10203/2006
36	Usina Conquista de Minas (ex Usina Mendonça Agroindustrial e Comercial Ltda.)	Conquista	010/1979
37	Usina Delta S/A (ex Usina Caeté S/A – Filial Volta Grande)	Conceição das Alagoas	201/1995
38	Usina Delta S/A (ex Usina Caeté S/A – Filial Delta)	Delta	030/1980
39	Usina Frutal Açúcar e Álcool S/A	Frutal	14212/2005
40	Usina Itapagipe Açúcar e Álcool Ltda.	Itapagipe	1855/2003
41	Usina Monte Alegre	Monte Belo	017/1981
42	Usina Santo Ângelo Ltda.	Pirajuba	055/1985
43	Usina Senhora da Glória Ltda.	Santo Hipólito	098/2005
44	Usina Uberaba S/A	Uberaba	1962/2003

Relação dos empreendimentos sucroalcooleiros de Minas Gerais - continuação

Ref.	Nome da usina	Município	N. Processo do licenciamento ambiental
Empreendimentos em operação			
45	Vale do Ivaí S/A – Açúcar e Alcool	Fronteira	022/1981
46	WD Agroindustrial Ltda.	João Pinheiro	320/1996
Empreendimentos em fase de implantação e projeto			
47	Agroerg das Minas Gerais	Centralina	18690/2007
48	Campina Verde Bioenergia Ltda.	Campina Verde	10202/2006
49	Central Energética de Veríssimo Ltda.	Veríssimo	3437/2006
50	Cia Energética de Açúcar e Alcool Triângulo Mineiro	Uberlândia	10389/2006
51	COSAN S/A Açúcar e Alcool (ex Usina Zanin Açúcar e Alcool Ltda.)	Prata	11508/2006
52	Destilaria Cristais Ltda.	Cristais	18016/2007
53	Destilaria R & M Ltda.	João Pinheiro	4036/2006
54	Destilaria Senhora do Bonfim Ltda.	Varjão de Minas	269/1998
55	Destilaria Visconde Ltda.	Visconde do Rio Branco	1739/2004
56	FLE Empreendimentos Ltda.	Gurinhatã	12914/2006
57	ICAL Energética Ltda.	Felixlândia	1467/2007
58	Patos de Minas Agroindustrial Ltda.	Patos de Minas	10575/2006
59	SICOOB COCRED – Cooperativa de Créditos dos Produtores Rurais e Empresários Paulistas (PAM Destilaria S/A)	Paracatu	3347/2007
60	Transcap Alcool e Açúcar S/A (Paulo Roberto Nascimento Filho)	Capinópolis	1114/2007
61	União de Minas Agroindustrial Açúcar e Alcool Ltda.	União de Minas	4778/2006
62	Usina Agroenergia II Ltda.	Paracatu	2874/2010
63	Usina Araguari Ltda.	Araguari	15925/2006
64	Usina Caeté Ltda. – Unidade Volta Grande (ex Unidade Águas Claras)	Uberaba	4718/2006
65	Usina de Açúcar e Alcool do Vale do Urucuia Ltda.	Buritis	14730/2006
66	Usina Tupacigura Ltda.	Tupaciguara	12616/2006

ANEXO 2

Empreendimentos sucroalcooleiros em operação (até Nov/2015)

Ref.	Empreendimento	Licenciamento ambiental	Situação do licenciamento	Cadastro em órgãos federais ⁽²⁾	
				ANEEL	MAPA
		SEMAD			
1	Agroindustrial Santa Juliana S/A	RevLO (2015)	Em análise técnica	X	X
2	Agropéu – Agroindustrial de Pompéu S/A	RevLO (2014)	Em análise técnica		X
3	Alcana Destilaria de Álcool de Nanuque S/A	LOC (2013)	Em análise técnica		X
4	Araporã Bioenergia S/A	LO (2009)	Licença concedida	X	X
5	Bambuí Bioenergia S/A	RevLO (2014)	Em análise técnica	X	X
6	Bioenergética Aroeira Ltda.	LO (2011), AAF (2013)	Em análise técnica		X
7	Bioenergética Vale do Paracatu S/A (BEVAP)	RevLO (2014)	Em análise técnica	X	X
8	Biosev S/A	RevLO ((2009), AAF (2012)	Licenças concedidas	X	X
9	BP Ituiutaba Bioenergia Ltda.	RevLO (2014), AAF (2013)	Licenças concedidas	X	X
10	Cabrera Central Energética Açúcar e Álcool	RevLO (2015)	Em análise técnica	X	X
11	Central Bionergética Enervale S/A	AAF (2011)	Licença concedida		
12	Cia Agrícola Pontenovense	RevLO (2012)	Em análise técnica		X
13	Cia Energética Vale do São Simão	RevLO (2014), AAF (2013)	Em análise técnica	X	X
14	Cia Energética Vale do Tijucu Ltda.	RevLO (2014)	Em análise técnica	X	X
17	Destilaria Alvorada do Bebedouro S/A – Açúcar e Álcool	RevLO (2009)	Licença concedida		X
19	Destilaria Cachoeira Ltda.	RevLO (2014)	Em análise técnica		X
20	Destilaria de Álcool Serra dos Aimorés S/A (DASA)	LO (2013)	Licença concedida	X	X
22	Destilaria Rio do Cachimbo Ltda.	RevLO (2008)	Licença concedida		X
23	Destilaria Vale do Paracatu Agroenergia Ltda.	RevLO (2014)	Licença concedida	X	X
24	Destilaria Veredas Açúcar e Álcool Ltda.	LOC (2015)	Em análise técnica		X
25	Laginha Agro-industrial S/A - Triálcool	RevLO (2012)	Licença indeferida	X	
26	Laginha Agro-industrial S/A – Vale do Paranaíba	RevLO (2007)	Em análise técnica		X
27	S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool	RevLO (2012)	Licença concedida	X	X
28	S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool	RevLO (2014)	Em análise técnica	X	X
29	S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool	RevLO (2010), AAF (2010)	Licenças concedidas	X	X

Empreendimentos sucroalcooleiros em operação (até Nov/2015) - continuação

Ref.	Empreendimento	Licenciamento ambiental	Situação do licenciamento	Cadastro em órgãos federais ⁽²⁾	
				ANEEL	MAPA
		SEMAD			
30	S/A Usina Coruripe Açúcar e Alcool	RevLO (2009)	Licença concedida	X	X
31	SADA Bioenergia e Agricultura Ltda.	RevLO (2014), AAF (2014)	RevLO em análise/ AAF concedida	X	X
32	Santa Vitória Açúcar e Alcool	LO (2014), AAF (2013)	LO em análise/ AAF concedida	X	X
33	Usina Açucareira Passos S/A	RevLO (2010), AAF (2013)	RevLO em análise/ AAF concedida	X	X
35	Usina Cerradão Ltda.	RevLO (2015), AAF (2013)	RevLO em análise/ AAF concedida	X	X
36	Usina Conquista de Minas	RevLO (2009)	Licença concedida	X	X
37	Usina Delta S/A (Conceição das Alagoas)	RevLO (2010)	Licença concedida	X	X
38	Usina Delta S/A (Delta)	LO (2015), AAF (2014)	LO em análise/ AAF concedida	X	X
39	Usina Frutal Açúcar e Alcool S/A	RevLO (2012), AAF (2014)	RevLO em análise/ AAF concedida	X	X
40	Usina Itapagipe Açúcar e Alcool Ltda.	RevLO (2010)	Em análise técnica	X	X
41	Usina Monte Alegre	RevLO (2010)	Em análise técnica	X	X
42	Usina Santo Ângelo Ltda.	RevLO (2014), AAF (2011)	RevLO em análise/ AAF concedida	X	X
44	Usina Uberaba S/A	RevLO (2013)	Em análise técnica	X	X
46	WD Agroindustrial Ltda.	RevLO (2015), AAF (2015)	Em análise técnica	X	X

1- RevLO: Revalidação de Licença de Operação; AAF: Autorização Ambiental de Funcionamento; LOC: Licença de Operação Corretiva.
 2- Usinas do tipo biomassa de bagaço de cana em operação segundo Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e Instituições cadastradas no Departamento de Cana-de-Açúcar e Agroenergia do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA.

Fonte: SEMAD (vários anos); ANEEL (2015); MAPA (2015)

Anexo 3

Empreendimentos em Operação no Setor Sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais

Ref.	Equipamento utilizado na etapa de moagem	Capacidade instalada de moagem de cana-de-açúcar	Capacidade instalada de produção de açúcar	Capacidade instalada de produção de etanol	Quantidade média de bagaço consumido ⁽¹⁾	Capacidade instalada de cogeração	Comércio de energia elétrica na Safra 2008/2009	Linhas de transmissão de energia elétrica		Safra
		t/d	t/d	m ³ /d	t/d	MW	kWh	kV	km	d
1	moenda	22.500,00	1.045,00	1.364,00	5.208,00	80,00	ni	138	36	180
2	moenda	7.800,00	750,00	622,00	1.704,00	30,00	ni	ni	ni	155
3	moenda	4.008,00	500,00	460,00	1.314,72	5,50	não comercializava	ni	ni	270
4	difusor	12.000,00	1.000,00	600,00	ni	25,00	não comercializava	ni	ni	ni
5	moenda	8.000,00	ni	ni	ni	25,00	ni	ni	ni	ni
6	difusor	3.000,00	ni	260,00	ni	16,00	ni	ni	ni	ni
7	difusor	15.000,00	1.000,00	1.500,00	3.321,60	80,00	ni	ni	ni	270
8	moenda	16.800,00	1.500,00	961,00	4.152,00	75,00	64.800.000,00	ni	ni	ni
9 ⁽²⁾	difusor	12.000,00	750,00	300,00	1.769,42	56,00	ni	138	29	202
10	moenda	12.000,00	957,80	355,05	ni	25,00	não comercializava	ni	ni	210
11	ni	ni	ni	ni	ni	30,00	ni	ni	ni	ni
12	moenda	6.000,00	500,00	240,00	1.240,80	4,30	não comercializava	ni	ni	150
13	difusor	10.800,00	1.000,00	600,00	3.014,40	50,00	ni	69	11,8	173
14	moenda	21.600,00	1.000,00	729,00	4.207,92	85,00	ni	ni	ni	187
15	moenda	1.000,00	ni	90,00	ni	1,00	não comercializava	ni	ni	ni
16	moenda	1.200,00	ni	120,00	ni	0,50	ni	ni	ni	ni
17	moenda	6.800,00	399,00	342,00	1.848,00	8,00	5.227.200,00	ni	ni	270
18	moenda	1.680,00	ni	110,00	ni	1,50	ni	ni	ni	ni
19 ⁽³⁾	moenda	1.230,77	ni	ni	296,40	1,00	não comercializava	ni	ni	200

Empreendimentos em Operação no Setor Sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais - continuação

Ref.	Equipamento utilizado na etapa de moagem	Capacidade instalada de moagem de cana-de-açúcar	Capacidade instalada de produção de açúcar	Capacidade instalada de produção de etanol	Quantidade média de bagaço consumido ⁽¹⁾	Capacidade instalada de cogeração	Comércio de energia elétrica na Safra 2008/2009	Linhas de transmissão de energia elétrica		Safra
		t/d	t/d	m ³ /d	t/d	MW	kWh	kV	km	d
20	moenda	4.080,00	ni	500,00	816,00	4,20	não comercializava	ni	ni	194
21	moenda	864,00	ni	35,51	60,00	0,70	ni	ni	ni	ni
22	moenda	768,00	ni	69,14	195,36	2,50	ni	ni	ni	270
23	ni	5.580,00	ni	ni	1.248,00	30,00	ni	ni	ni	270
24	moenda	3.800,00	ni	400,00	720,00	4,50	não comercializava	ni	ni	208
25 ⁽⁴⁾	moenda	9.600,00	600,00	450,00	1.387,01	15,00	12.540.000,00	ni	ni	217
26	difusor	9.000,00	466,67	500,00	2.640,00	15,00	não comercializava	ni	ni	240
27	moenda	22.500,00	2.500,00	950,00	4.200,00	30,00	ni	ni	ni	270
28	moenda	12.000,00	ni	ni	ni	54,00	ni	138	28	270
29	moenda	18.000,00	1.250,00	600,00	1.460,88	20,00	ni	ni	ni	270
30	moenda	9.000,00	ni	1.100,00	ni	5,00	ni	ni	ni	270
31	moenda	8.000,00	750,00	824,00	ni	30,00	21.432.000,00	ni	ni	210
32	difusor	12.982,00	ni	600,00	5.145,60	40,00	ni	138	21	193
33	moenda	10.000,00	950,00	300,00	2.060,88	11,26	não comercializava	ni	ni	365
34	moenda	12.000,00	ni	ni	ni	2,70	não houve comercialização	ni	ni	ni
35	moenda	11.040,00	1.250,00	600,00	2.448,00	30,00	ni	138	26,5	215
36	moenda	5.520,00	572,00	ni	1.224,00	2,40	não houve comercialização	138	ni	210
37	moenda	20.400,00	1.440,00	1.106,00	4.728,00	59,00	155.972,90	ni	ni	240
38	moenda	19.440,00	2.202,60	488,00	5.817,12	30,00	72.148.221,00	69	8,3	240
39	difusor	10.500,00	750,00	500,00	2.304,00	15,00	não houve comercialização	138	ni	ni

Empreendimentos em Operação no Setor Sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais - continuação

Ref.	Equipamento utilizado na etapa de moagem	Capacidade instalada de moagem de cana-de-açúcar	Capacidade instalada de produção de açúcar	Capacidade instalada de produção de etanol	Quantidade média de bagaço consumido ⁽¹⁾	Capacidade instalada de cogeração	Comércio de energia elétrica na Safra 2008/2009	Linhas de transmissão de energia elétrica		Safra
		t/d	t/d	m ³ /d	t/d	MW	kWh	kV	km	d
40	moenda	8.190,00	750,00	400,00	1.344,00	6,00	não comercializava	138	ni	270
41	moenda	6.000,00	484,20	193,00	1.387,01	16,00	38.880.000,00	ni	ni	270
42	moenda	18.000,00	1.411,40	468,80	4.500,00	40,00	não houve comercialização	ni	ni	270
43	moenda	4.800,00	ni	67,10	ni	2,00	não comercializava	ni	ni	ni
44	moenda	9.000,00	ni	725,00	ni	12,00	não houve comercialização	ni	ni	212
45	moenda	3.000,00	ni	350,00	ni	50,00	não houve comercialização	ni	ni	ni
46	moenda	10.520,00	614,07	215,85	2.742,24	28,50	ni	138	21,0	210
<i>Total:</i>		428.002,77			74.505,36	1.154,56				

Empreendimentos em Fase de Projeto e de Instalação no Setor Sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais

Ref.	Equipamento utilizado na etapa de moagem	Capacidade instalada de moagem de cana-de-açúcar	Produção de açúcar	Produção de etanol	Capacidade instalada de cogeração	Linhas de transmissão de energia	
		t/d	t/d	m ³ /d	MW	kV	km
47	ni	12.000,00	0,00	ni	66,00	ni	ni
48	difusor	12.000,00	750,00	473,40	56,00	ni	ni
49	moenda	6.513,16	0,00	583,20	4,00	ni	ni
50	moenda	12.000,00	20.000,00	700,00	45,00	13,8	ni

Empreendimentos em Fase de Projeto e de Instalação no Setor Sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais - continuação

Ref.	Equipamento utilizado na etapa de moagem	Capacidade instalada de moagem de cana-de-açúcar	Produção de açúcar	Produção de etanol	Capacidade instalada de cogeração	Linhas de transmissão de energia	
		t/d	t/d	m ³ /d	MW	kV	km
51	difusor	12.500,00	1.100,00	800,00	30,00	ni	ni
52	moenda	550,00	ni	44,00	0,70	ni	ni
53	moenda	1.800,00	0,00	90,00	1,20	ni	ni
54	moenda	600,00	ni	90,00	ni	ni	ni
55	moenda	840,00	0,00	67,00	0,80	ni	ni
56	difusor	8.000,00	0,00	600,00	55,00	ni	ni
57	moenda	3.000,00	0,00	11,00	5,00	138,0	ni
58	moenda	3.000,00	0,00	500,00	15,00	ni	ni
59	moenda	1.800,00	0,00	90,00	1,20	ni	ni
60	difusor	3.000,00	0,00	11,00	5,00	ni	ni
61	difusor	12.500,00	1.100,00	800,00	30,00	138,0	ni
62 ⁽⁵⁾	moenda	14.492,75	ni	ni	60,00	138,0	40
63	moenda	12.000,00	0,00	690,00	60,00	138,0	40
64	moenda	8.400,00	0,00	725,00	60,00	138,0	ni
65	moenda	10.000,00	0,00	456,00	30,00	ni	ni
66	moenda	6.700,00	468,75	262,00	30,00	138,0	ni
<i>Total:</i>		141.695,91			554,90		

1 - Bagaço queimado na caldeira em relação à capacidade instalada de moagem de cana; 2 - bagaço consumido considerando uma moagem de cana de 243,42 t/h; 3 - produz 176,67 m³ de aguardente por dia; 4 - bagaço consumido considerando uma moagem de cana de 300 t/h; 5 - O empreendimento apresenta previsão para a comercialização de 46.980,00 kWh/safra; ni: não informado ou não possui

Fonte: MATEUS (2010), SEMAD (vários anos)

ANEXO 4

Especificações dos equipamentos utilizados na cogeração

CALDEIRAS				
Ref. Empreendimento	Tipo/ Fabricante	Capacidade (t _{vapor} /h)	Pressão de operação (MPa)	Temperatura de operação (K)
1	Caldema	120	2,94	683
	Iplan	120	4,41	723
	IESA	300	6,37	763
2	ni	70	4,23	703
	ni	130		
3	ni	70	ni	ni
		70	ni	ni
4	ni	250	6,57	793
5	Aquatubular	100	6,57	758
6	ni	100	4,12	683
7	Aquatubular	200	6,57	783
8	Termoelétrica	110	ni	ni
	Termoelétrica	85	ni	ni
	Termoelétrica	220	ni	ni
9	VS-500/2 HPB	275	6,57	788
10	22 ATA	240	ni	573
	22 ATA			
12	Dedini V2/4	65	2,16	ni
	Dedini V2/4	55		ni
	Zanine	25		ni
13	ni	150	6,37	788
	ni	150		
14	Aquatubular Caldema	200	6,37	783
	Aquatubular Equipalcool	250	6,57	
17	Aquatubular São Caetano	90	2,06	603
	Aquatubular CBC	80		593
19	Caldema A2C-14-4GB-DOO	40	2,06	573
20	ni	90		ni
22	Conterma	36	ni	ni
23	Biochamm	135	4,12	713
24	ni	90	2,06	603
25	S16180	80	2,06	ni
	V24	85		ni
26	Aquatubular	120	2,45	ni
	Aquatubular	120		ni
27	ni	120	ni	ni
		150		

CALDEIRAS – continuação				
Ref. Empreendimento	Tipo/ Fabricante	Capacidade (t_{vapor}/h)	Pressão de operação (MPa)	Temperatura de operação (K)
28	Termoelétrica	150	ni	ni
	Termoelétrica	160		
29	Termoelétrica	95	ni	ni
	Termoelétrica	60		
30	ni	110	2,06	558
31	Aquatubular	90	4,12	713
32	ni	200	ni	808
33	Correia	90	ni	ni
	Caldema	80		
	Zanine	45		
35	ni	200	ni	ni
	ni	200		
36	Tecomil TS3.20A	60	ni	ni
	Tecomil TS3.20A			
37	Aquatubular	120	4,12	673
	Aquatubular	120	6,37	800
	Aquatubular	200		783
38	ni	90	2,06	ni
	ni	130		ni
	ni	150	ni	ni
39	ni	200	6,57	793
40	ni	120	2,06	ni
41	Sermatec	130	6,67	753
42	ni	100	2,06	ni
		170	4,12	ni
44	Aquatubular	150	2,06	573
	Aquatubular	120		
46	ni	120	2,16	ni
	ni	120		ni

TURBINAS					
Ref. Empreendimento	Tipo/ Fabricante	Capacidade (t _{vapor} /h)	Potência instalada (kw)	Pressão de operação (MPa)	Temperatura de Vapor (K)
4	ni	70	ni	6,37	793
9	Contrapressão	139	ni	2,26	623
	Contrapressão	200	ni	6,57	793
	Condensação	66	ni		
22	NG	ni	ni	2,06	573
27	ni	ni	ni	4,3	ni
28	ni	ni	ni	4,12	ni
32	Contrapressão	ni	10000	2,2	ni
37	Contrapressão	ni	ni	6,4	783
	Contrapressão	ni	ni		
	Contrapressão	ni	ni		
39	CT50	ni	30000	6,57	793
41	MG-Metalúrgica	ni	18000	ni	ni

GERADORES						
Ref.	Tipo	Capacidade (kw)	Pressão (MPa)	Pressão saída (MPa)	Temperatura de operação (K)	Tensão
4	Turbogerador de contrapressão	27500	ni	ni	ni	ni
	Turbogerador de condensação	22500				
5	Turbogerador de contrapressão	15000	4,7	0,25	753	13800
	Turbogerador de contrapressão	10000	6,5	0,25	753	13800
	Turbogerador de contrapressão					
	Turbogerador de contrapressão	7000	6,5	0,25	753	13800
37	Trifásico	35000	ni	ni	ni	13800
	Trifásico		ni	ni	ni	13800
	Trifásico	40000	ni	ni	ni	13800
38	Turbogerador de contrapressão	50000	ni	ni	ni	ni
	Turbogerador de condensação	45000	ni	ni	ni	ni
41	WEG	15200	ni	ni	ni	ni
44	Turbogerador de contrapressão	3000	2	0,15	ni	ni
	Turbogerador de contrapressão					
	Turbogerador de contrapressão	8000	2	0,15	ni	ni
46	Turbogerador de contrapressão	28500	ni	ni	ni	ni

ni - não informado

Fonte: SEMAD (vários anos)

APÊNDICE 1: ANÁLISES ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UM SISTEMA TERMODINÂMICO

Neste apêndice, apresenta-se a análise energética e a análise exergética de um sistema aberto, especificamente, de um volume de controle, calcula-se a exergia química específica do bagaço da cana-de-açúcar e mostram-se fórmulas explícitas para o cálculo dos rendimentos energético e exergético de uma termoelétrica.

i. Introdução

Os princípios da conservação da energia e da não diminuição da entropia dos sistemas isolados, enunciados pela Primeira e pela Segunda Leis da Termodinâmica, são os fundamentos da análise dos sistemas termodinâmicos.

De modo bem geral, a análise dos sistemas termodinâmicos emprega a lei da conservação da massa, a lei da conservação da energia, a lei do balanço da entropia e a lei do balanço da exergia.

A análise exergética dos sistemas termodinâmicos é utilizada na engenharia principalmente quando se visa quantificar as irreversibilidades termodinâmicas em cada etapa ou na totalidade do processo.

Fluxos de matéria, energia, entropia e exergia estão presentes em cada equipamento de uma central termoelétrica. Logo, trata-se da análise termodinâmica de sistemas abertos. Por isso, a análise emprega volumes de controle.

Consideram-se os volumes de controle com várias entradas e várias saídas. Então, os fluxos de entrada e de saída de qualquer grandeza termodinâmica envolvem somatórias sobre todas as entradas e todas as saídas.

Se o sistema estiver em regime estacionário ou permanente, a taxa de variação de qualquer grandeza termodinâmica no interior do volume de controle é zero.

Pode-se adotar essa hipótese, mesmo no caso de grandes volumes de controle, como são os casos de uma caldeira, de um turbogerador ou de uma termoelétrica, pois não ocorrem grandes variações com o tempo de matéria ou de outras propriedades termodinâmicas no interior desses sistemas termodinâmicos.

A análise não considera variações da energia cinética e da energia potencial, por serem pequenas quando comparadas às variações de outras formas de energia presentes nos processos que ocorrem numa central termoelétrica.

Com efeito, à variação de 0kJ/kg a 1kJ/kg da energia cinética corresponde uma variação de velocidade de 45m/s, isto é, 162km/h. Porém, as velocidades da água e dos gases nos equipamentos de uma central termoelétrica estão bem abaixo desse valor.

Analogamente, à variação de 1kJ/kg da energia potencial gravitacional corresponde uma diferença de altitude de 102m. As diferenças entre as cotas de entrada e de saída de matéria dos equipamentos das centrais termoelétricas sob análise estão bem abaixo desse valor.

ii. Balanço de massa

O balanço de massa de um volume de controle se expressa pela equação:

$$\dot{m}(t) = \Sigma_e \dot{m}_e(t) - \Sigma_s \dot{m}_s(t), \quad \text{A.01}$$

onde empregou-se a notação de Newton para a derivada em relação ao tempo, isto é, uma letra encimada por um ponto denota a derivada da grandeza em relação ao tempo,

$$\frac{dm}{dt}(t) = \dot{m}(t). \quad \text{A.02}$$

Na primeira equação, o termo do lado esquerdo é a taxa de variação da massa no interior do volume de controle e os termos do lado direito são, respectivamente, o fluxo total de matéria que entra e que sai do volume de controle.

Se o sistema operar em regime estacionário, a taxa de variação da massa no interior do volume de controle é zero:

$$\dot{m}(t) = 0. \quad \text{A.03}$$

Portanto, em regime estacionário, o fluxo total de massa que entra no volume de controle é igual ao fluxo total de massa que sai do volume de controle, o que se expressa formalmente pela equação:

$$\Sigma_e \dot{m}_e(t) = \Sigma_s \dot{m}_s(t). \quad \text{A.04}$$

iii. Balanço de energia

De modo análogo, o balanço de energia de um volume de controle se expressa pela equação:

$$\dot{E}(t) = \Sigma_e \dot{E}_e(t) - \Sigma_s \dot{E}_s(t), \quad \text{A.05}$$

onde o termo do lado esquerdo é a taxa de variação da energia no interior do volume de controle e os termos do lado direito são, respectivamente, o fluxo total de energia que entra e que sai do volume de controle.

O fluxo de energia em cada entrada ou saída é constituído por calor e trabalho e pela energia contida na massa transferida. Então,

$$\dot{E} = \dot{Q} - \dot{W} + \Sigma_e \dot{E}_e^m - \Sigma_s \dot{E}_s^m, \quad \text{A.06}$$

onde se adotou a convenção de que o calor que entra no volume de controle e o trabalho realizado pelo volume de controle são positivos, e a partir desse parágrafo se considera implícita a dependência das grandezas termodinâmicas em relação ao tempo.

Considere um elemento infinitesimal da corrente de entrada adjacente e externo à fronteira de controle. Sejam dm_e e dV_e a massa e o volume desse elemento e p_e a pressão exercida pelo fluido que o sucede na corrente. Então, a potência do elemento infinitesimal que adentra o volume de controle é dada por:

$$\dot{W}_e^m = \frac{dW_e^m}{dt} = p_e \frac{dV_e}{dt} = p_e \frac{dV_e}{dm_e} \frac{dm_e}{dt} = p_e \bar{v}_e \frac{dm_e}{dt} = p_e \bar{v}_e \dot{m}_e, \quad \text{A.07}$$

onde \bar{v} denota o volume específico, isto é, o volume por unidade de massa.

Além disso, esse elemento infinitesimal de corrente que adentra o volume de controle transporta energia interna, energia cinética e energia potencial. Logo,

$$\dot{E}_e = p_e \bar{v}_e \dot{m}_e + u_e \dot{m}_e + \frac{1}{2} v_e^2 \dot{m}_e + g z_e \dot{m}_e, \quad \text{A.08}$$

onde u é a energia interna específica, isto é, a energia interna por unidade de massa.

Com a introdução da entalpia específica, definida por:

$$h = u + p \bar{v}, \quad \text{A.09}$$

obtém-se:

$$\dot{E}_e = (h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e) \dot{m}_e. \quad \text{A.10}$$

Analogamente,

$$\dot{E}_s = (h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gz_s)\dot{m}_s, \quad \text{A.11}$$

é o fluxo de energia na corrente de saída.

Substituindo as duas últimas equações na equação 05, obtém-se a equação do balanço de energia para o volume de controle:

$$\dot{E} = \dot{Q} - \dot{W} + \Sigma_e \left(h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gz_e \right) \dot{m}_e - \Sigma_s \left(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gz_s \right) \dot{m}_s. \quad \text{A.12}$$

Numa central termoelétrica, a energia cinética e a energia potencial são desprezíveis relativamente às outras formas de energia. Então,

$$\dot{E} = \dot{Q} - \dot{W} + \Sigma_e h_e \dot{m}_e - \Sigma_s h_s \dot{m}_s. \quad \text{A.13}$$

Costuma-se decompor o trabalho segundo:

$$\dot{W} = \dot{W}_u - p_0 \dot{V}, \quad \text{A.14}$$

onde os termos do lado direito são, respectivamente, a potência no eixo ou a potência elétrica e a taxa de trabalho correspondente à contração ou à expansão do volume de controle.

Então, a equação do balanço de energia do volume de controle assume a forma:

$$\dot{E} = \dot{Q} - (\dot{W}_u - p_0 \dot{V}) + \Sigma_e h_e \dot{m}_e - \Sigma_s h_s \dot{m}_s. \quad \text{A.15}$$

Se o sistema operar em regime estacionário:

$$\dot{E}(t) = 0 \quad e \quad \dot{V}(t) = 0, \quad \text{A.16}$$

para todo o t.

Portanto, o fluxo total de energia que entra no volume de controle é igual ao fluxo total de energia que sai do volume de controle, o que se expressa por:

$$\dot{Q} - \dot{W}_u + \Sigma_e h_e \dot{m}_e - \Sigma_s h_s \dot{m}_s = 0. \quad \text{A.17}$$

iv. Balanço de entropia

A taxa de variação da entropia no interior do volume de controle é expressa pela equação:

$$\dot{S}(t) = \Sigma_e \dot{S}_e^t(t) - \Sigma_s \dot{S}_s^t(t) + \dot{S}^i(t), \quad \text{A.18}$$

onde o termo do lado esquerdo é a taxa de variação da entropia no interior do volume de controle, e os termos do lado direito são, respectivamente, as taxas de entrada e de saída de entropia através da fronteira de controle e a taxa de produção de entropia no interior do volume de controle, devida a processos irreversíveis.

Então, pela Segunda Lei da Termodinâmica, deve-se ter:

$$\dot{S}^i(t) \geq 0, \quad \text{A.19}$$

onde a igualdade se verifica para processos reversíveis.

Em um sistema aberto, como é o caso do volume de controle, a entropia é transportada através da fronteira de controle pela transferência de calor e pelas correntes de matéria. Então,

$$\dot{S}_e^t(t) = \dot{S}_e^q(t) + \dot{S}_e^m(t). \quad \text{A.20}$$

Pela Segunda Lei da Termodinâmica, o transporte de entropia conjugado à transferência de calor através da fronteira de controle é dado pela expressão:

$$\dot{S}_k^q = \frac{1}{T_k} \dot{Q}_k, \quad \text{A.21}$$

onde o índice inferior designa uma região dada da fronteira, e a partir desse parágrafo se considera implícita a dependência das grandezas termodinâmicas em relação ao tempo.

O transporte de entropia conjugado à transferência de matéria que entra através da fronteira de controle é dado pela expressão:

$$\dot{S}_e^m = s_e \dot{m}_e, \quad \text{A.22}$$

onde s é a entropia específica, isto é, a entropia por unidade de massa.

De modo análogo,

$$\dot{S}_s^m = s_s \dot{m}_s, \quad \text{A.23}$$

é o transporte de entropia conjugado à transferência de matéria que sai através da fronteira de controle.

Substituindo as três últimas equações na equação 18, obtém-se a equação do balanço de entropia para o volume de controle:

$$\dot{S} = \sum_k \frac{1}{T_k} \dot{Q}_k + \sum_e s_e \dot{m}_e - \sum_s s_s \dot{m}_s + \dot{S}^i, \quad \text{A.24}$$

onde a primeira soma se faz sobre todas as regiões em que se dividiu a fronteira de controle, considerando-se os valores da temperatura e da taxa de transferência de calor.

v. Balanço de exergia

Considere um sistema termodinâmico num dado estado. Na engenharia, interessa a quantidade de energia disponível nesse sistema para realizar trabalho. Assim, fala-se do potencial de trabalho útil do sistema.

Suponha a transformação de um sistema de um estado inicial a um estado final. Por não ser uma grandeza de estado, o trabalho realizado depende do processo empregado e dos estados inicial e final.

Para um dado estado inicial, obtém-se o máximo trabalho útil quando se utilizam somente processos reversíveis e o estado final é o estado morto. Portanto, no estado final, o sistema deve estar em equilíbrio termomecânico com o ambiente. Logo, a pressão e a temperatura do sistema devem ser iguais à pressão e à temperatura do ambiente.

A equação do balanço de exergia de um volume de controle é deduzida a partir da equação do balanço de energia e da equação do balanço de entropia, por meio da expressão:

$$\dot{X}(t) = \dot{E}(t) - T_0\dot{S}(t). \quad \text{A.25}$$

Então, multiplicando-se a equação 24 por T_0 e subtraindo-a da equação 15, obtém-se:

$$\dot{X} = \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - (\dot{W}_u - p_0\dot{V}) + \sum_e e_{ce}\dot{m}_e - \sum_s e_{cs}\dot{m}_s - \dot{X}^i, \quad \text{A.26}$$

em vista de:

$$\dot{Q}(t) = \sum_k \dot{Q}_k, \quad \text{A.27}$$

pois a taxa de transferência de calor através da fronteira de controle é igual à soma das taxas de transferência de calor através de todas as regiões que a compõem;

$$e_c = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{1}{2}v^2 + gz, \quad \text{A.28}$$

é a exergia específica da corrente de matéria;

$$\dot{X}^i = T_0\dot{S}^i, \quad \text{A.29}$$

é a taxa de destruição de exergia, que não é negativa, pois o primeiro termo do lado direito é positivo e o segundo, pelo princípio da entropia, representado pela relação 19, não é negativo, sendo que se considera implícita a dependência das grandezas termodinâmicas em relação ao tempo a partir desse parágrafo.

Em regime estacionário, $\dot{X}(t) = 0$ e $\dot{V}(t) = 0$, para todo o t, portanto:

$$\dot{W}_u = \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k + \sum_e e_{ce} \dot{m}_e - \sum_s e_{cs} \dot{m}_s - \dot{X}^i. \quad A.30$$

A equação A.25 mostra que a exergia é uma grandeza extensiva, pois a energia e a entropia são grandezas extensivas e a temperatura é uma grandeza intensiva.

Pode ser desejável expressar a exergia como a soma de várias contribuições, para colocar em evidência alguns pontos relevantes à análise:

$$\dot{X} = \dot{X}^K + \dot{X}^V + \dot{X}^F + \dot{X}^Q - \dot{X}^i, \quad A.31$$

onde o termo do lado esquerdo é a taxa de variação da exergia total e os termos do lado direito são, respectivamente, as taxas de variação das exergias cinética, potencial, física e química e de destruição de exergia.

As energias cinética e potencial podem ser convertidas integralmente em trabalho útil. Logo, a exergia cinética é a energia cinética e a exergia potencial é a energia potencial. Formalmente,

$$\dot{X}^K = \sum_i \frac{1}{2} v_i^2 \dot{m}_i \quad A.32$$

e

$$\dot{X}^V = \sum_i g z_i \dot{m}_i. \quad A.33$$

Como nas centrais termoelétricas sob análise as variações de energia cinética e potencial são pequenas relativamente às outras formas de energia, as taxas de variação de exergia cinética e potencial são desprezíveis. Portanto,

$$\dot{X} = \dot{X}^F + \dot{X}^Q - \dot{X}^i. \quad A.34$$

Numa central termoelétrica, que emprega bagaço de cana-de-açúcar como combustível, os efeitos nucleares, magnéticos e de tensão superficial estão ausentes. Logo, a exergia física é obtida a partir das diferenças entre a temperatura e a pressão do estado em que o sistema se encontra e as do estado morto.

A exergia química está conjugada a ocorrência de reações químicas nos processos que se desenvolvem nos sistemas sob análise.

Dada a especificidade dessa tese, somente será preciso calcular a exergia química do bagaço da cana-de-açúcar, que é o combustível utilizado nas centrais termoelétricas objeto desse estudo, pois não ocorrem reações químicas nos fluidos de trabalho.

Se o sistema operar em regime estacionário, a taxa de variação da exergia no interior do volume de controle é zero. Portanto, a diferença entre a soma dos fluxos de entrada de exergia física e de exergia química e a soma dos fluxos de saída de exergia física e de exergia química é a igual à taxa de destruição de exergia no interior do volume de controle. Formalmente,

$$\dot{X}^i = \dot{X}^F + \dot{X}^Q. \quad \text{A.35}$$

De ponto de vista físico, a transferência de calor sob diferença finita de temperatura, a realização de trabalho sob diferença finita de pressão, a ocorrência de reações químicas, o atrito entre sólidos em movimento relativo e entre sólidos e fluidos em movimento relativo, a viscosidade em fluidos em movimento e os processos de mistura são processos irreversíveis. Portanto, são processos que produzem entropia. Logo, que destroem exergia.

vi. Cálculo da exergia do bagaço da cana-de-açúcar

A exergia física do bagaço da cana-de-açúcar empregado como combustível em centrais termoelétricas é nula, em vista de ele ser introduzido na caldeira à temperatura e à pressão ambientes.

Portanto, sua exergia é igual à sua exergia química, uma vez que o processo de combustão envolve reações químicas, que têm como principais produtos finais o dióxido de carbono e o vapor d'água.

A literatura corrente emprega o procedimento de cálculo da exergia química da madeira encontrado em Szargurt, Morris, Stewart (1988) ao cálculo da exergia química do bagaço da cana-de-açúcar, com o argumento de que os dois combustíveis são essencialmente compostos de celulose e lignina.

Dessa perspectiva, a exergia química específica do bagaço da cana-de-açúcar é calculada pela expressão:

$$x_B^Q = \beta(c_B + l_A \times z_A) + (x_S^Q - c_S) \times z_S + x_Z^Q \times z_Z + x_A^Q \times z_A, \quad \text{A.36}$$

onde x_S^Q , x_Z^Q e x_A^Q são as exergias químicas específicas padrão do enxofre, das cinzas e da água, respectivamente, c_B e c_S são os poderes caloríficos inferiores do bagaço de cana-de-açúcar e do enxofre, respectivamente, l_A é a entalpia específica de vaporização da água a 25°C, especificamente 2.442kJ/kg, z_A , z_S e z_Z são as frações mássicas da água, do enxofre e das cinzas, respectivamente, e o parâmetro β é determinado pela equação:

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,216 \times \frac{z_{H2}}{z_C} - 0,2499 \times \frac{z_{O2}}{z_C} \times \left(1 + 0,7784 \times \frac{z_{H2}}{z_C}\right) + 0,045 \times \frac{z_{N2}}{z_C}}{1 - 0,3035 \times \frac{z_{O2}}{z_C}}, \quad A.37$$

onde z_C , z_{H2} , z_{N2} e z_{O2} são as frações mássicas do carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio presentes no bagaço da cana-de-açúcar, que tem domínio de validade determinado por:

$$\frac{z_{O2}}{z_C} \leq 2,67. \quad A.38$$

Segundo Hugot (1986), $z_{O2} = 0,44$ e $z_C = 0,47$ para o bagaço da cana-de-açúcar seco. Então,

$$\frac{z_{O2}}{z_C} = 0,94. \quad A.39$$

Também segundo Hugot (1986), $z_{O2} = 0,21$ e $z_C = 0,23$ para o bagaço da cana-de-açúcar úmido. Então,

$$\frac{z_{O2}}{z_C} = 0,91 \quad A.40$$

Substituindo-se os valores das frações mássicas dadas por Hugot (1986), obtém-se o valor do parâmetro β :

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,216 \times \frac{6,5}{47} - 0,2499 \times \frac{44}{47} \times \left(1 + 0,7784 \times \frac{6,5}{47}\right) + 0,045 \times \frac{00}{47}}{1 - 0,3035 \times \frac{44}{47}} = 1,1342. \quad A.41$$

No caso do bagaço da cana-de-açúcar úmido, considerando as frações mássicas encontradas em Hugot (1986), obtém-se:

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,216 \times \frac{3}{23} - 0,2499 \times \frac{21}{23} \times \left(1 + 0,7784 \times \frac{3}{23}\right) + 0,045 \times \frac{00}{23}}{1 - 0,3035 \times \frac{21}{23}} = 1,1313. \quad A.42$$

O poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar, expresso em kcal/kg, varia com as frações mássicas de umidade e de sacarose, de acordo com a fórmula encontrada em Lorenz (1987):

$$c_B = 4.250 - 4.850 \times z_U - 1.200 \times z_C, \quad A.43$$

onde z_U é a fração mássica de umidade e z_C é a fração mássica de sacarose.

Os processos de licenciamento das termoelétricas desse estudo informam que $z_U = 0,50$ e em Hugot (1986) encontra-se $z_C = 0,02$. Então,

$$c_B = 4.250 - 4.850 \times 0,50 - 1.200 \times 0,02 = 1.801 \frac{kcal}{kg} = 7.539 \frac{kJ}{kg}, \quad A.44$$

Convertendo para a notação corrente na literatura especializada, o poder calorífico inferior do bagaço de cana-de-açúcar se expressa por:

$$PCI_B = c_B = 7.539 \frac{kJ}{kg}. \quad A.45$$

Substituindo-se a fração mássica da água $z_A = 0,50$ e os resultados obtidos em A.42 e A.44 na equação A.36, obtém-se a exergia química específica do bagaço da cana-de-açúcar úmido:

$$x_B^Q = 1,1313(7.539 + 2.442 \times 0,50) + 0 + 0 + 50 \times 0,50 = 9.935 \frac{kJ}{kg}, \quad A.46$$

uma vez que o bagaço da cana-de-açúcar não contém enxofre e a fração mássica de cinzas é de apenas 1%, de acordo com Hugot (1986).

vii. Eficiência energética e eficiência exergética

De modo geral, a eficiência na termodinâmica é uma medida do grau de sucesso num processo de conversão ou de transferência, que se expressa pela razão entre o objetivo alcançado e o investimento necessário.

Uma central termoelétrica a bagaço de cana-de-açúcar converte a energia química embarcada nesse combustível em energia elétrica. Logo, define-se o seu rendimento energético por:

$$\eta = \frac{\dot{W}_u}{\dot{m}_B PCI_B}, \quad A.47$$

onde, recordando, o numerador é a potência elétrica gerada e o denominador é o produto da vazão mássica do bagaço da cana-de-açúcar multiplicada pelo seu poder calorífico inferior.

De modo análogo, o rendimento exergético de uma central termoelétrica é definido por:

$$\chi = \frac{\dot{W}_u}{\dot{m}_B x_B^Q}, \quad A.48$$

pois a exergia elétrica é igual à energia elétrica e o denominador é o produto da vazão mássica do bagaço da cana-de-açúcar pela sua exergia específica.

Das duas últimas equações, vemos que os rendimentos exergético e energético de uma central termoelétrica estão relacionados por:

$$\chi = \eta \frac{PCI_B}{x_B^Q}. \quad A.49$$

Como

$$PCI_B < x_B^0, \quad \text{A.50}$$

vem que

$$\chi < \eta, \quad \text{A.51}$$

isto é, o rendimento exergético é menor do que o rendimento energético.

APÊNDICE 2: MUDANÇAS CLIMÁTICAS VERSUS PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL

i. Introdução

A respeito das mudanças climáticas, o mundo vem se posicionando no combate às fontes geradoras desse *mal do século*, sobretudo, no que tange ao quesito energia renovável. Não obstante, as fontes não renováveis de energia, como é o caso das fontes derivadas de combustíveis fósseis, vem gerando sua própria resistência, que pode ser traduzida como a “era das energias extremas”. Isso porque a indústria de combustíveis fósseis começou a ficar na defensiva com a pressão para cortar as emissões de gases de efeito estufa, como por exemplo, de dióxido de carbono (CO₂).

Segundo Wilson (2013), hoje o quadro é outro. A indústria dos combustíveis fósseis passou a atuar na ofensiva e está cada vez mais empenhada na expansão maciça da extração de combustíveis fósseis. Para tanto, passou a encarar o problema como uma oportunidade de inovação tecnológica e de negócio, pois o “*o foco está no surgimento dos planos de suposta reparação, por meio de tecnologias como captura e armazenagem de carbono ou geo-engenharia, em um futuro distante*”. Contudo, além da necessidade de altíssimos investimentos financeiros, que irão refletir em um aumento dos custos energéticos, ainda haverá a questão do aquecimento global. Isso sem mencionar outros efeitos adversos à natureza, como a destruição de florestas e os impactos socioeconômicos.

Na contramão dessa ofensiva estão as fontes renováveis, que se tornaram uma espécie de símbolo verde para as medidas de redução de emissões de gases de efeito estufa. Aliás, a questão das mudanças climáticas carrega em si muito mais do que uma ideologia de sustentabilidade, pois está pautada em estudos, projetos, programas e planos em nível internacional. Ou seja, existe toda uma estrutura envolvendo esse tema.

Inicialmente, é preciso fazer uma análise do nascimento da preocupação com as questões ambientais. A industrialização observada, sobretudo, após a Segunda Guerra Mundial, causou elevados níveis de poluição e degradação ambiental. Tanto que já na década de 1960, a percepção dos efeitos devastadores da poluição ambiental deu início ao chamado “movimento ambientalista”, que teve como marco inicial a publicação do livro de uma bióloga americana (Rachel Louise Carson), em 1962, intitulado “A Primavera Silenciosa”, que chamou a atenção para as consequências negativas do uso indiscriminado de pesticidas químicos sintéticos, como o DDT.

Mais adiante, teve início o debate no nível internacional sobre as questões ambientais em um mundo ávido por desenvolvimento a qualquer custo e pautado na formação de uma sociedade consumista. Assim, foram promovidas pela Organização das Nações Unidas – ONU, as conferências internacionais sobre meio ambiente, a saber: Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, realizada em Estocolmo, na Suécia, em 1972; a instituição da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – CNUMAD, que publicou em 1987 o documento “Nosso Futuro Comum”, introduzindo a proposta de um novo modelo econômico pautado no que foi denominado “desenvolvimento sustentável”; Conferência Internacional de Água e Meio Ambiente, em Dublin, na Irlanda, em 1992, Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em 1992, que já teve duas sequências ao longo de vinte anos – a Rio + 10 ou Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, em Johannesburgo, na África, em 2002, e a Rio + 20 ou Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, também na cidade do Rio de Janeiro, em 2012.

Desses encontros surgiram importantes documentos (Tratados, Protocolos, Declaração sobre o Meio Ambiente Humano 1972, Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento 1992, Convenção da Biodiversidade 1992, Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – 1992, Agenda 21, dentre outros) que resultaram na construção de um arcabouço sobre o tema em vários países, sempre com o objetivo principal de difundir a preocupação com o meio ambiente, a importância da preservação dos recursos naturais e a qualidade de vida dos seres humanos.

A respeito das mudanças climáticas, em 1988, foi criado Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas – IPCC, pela Organização Meteorológica Mundial – OMM e Organização das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA. Atualmente composto por delegações de 130 governos, o IPCC foi idealizado com o objetivo de analisar as mudanças do clima sob uma ótica científica, através da elaboração de estudos sobre seus efeitos ambientais e socioeconômicos, que tem servido como instrumentos para traçar estratégias para dar soluções adequadas ao fenômeno. Ele está aberto a todos os países-membros do PNUMA e da OMM, sendo que cada governo possui um grupo de especialistas para coordenar as atividades relacionadas com o Painel no seu respectivo país.

Dois anos após sua criação, o IPCC publicou seu primeiro relatório (First Assesment Report, 1990) apontando as atividades humanas como possíveis causadoras da intensificação do “efeito estufa”, o qual levou a consolidação do documento “Convenção Quadro das

Nações Unidas Sobre Mudança do Clima” (UNFCCC), na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1992. A UNFCCC entrou em vigor, em 1994, com o objetivo de discutir e definir ações para estabilizar as emissões atmosféricas dos GEE de forma a impedir que atividades antrópicas interfiram perigosamente no clima do planeta. (MCTI, 2014)

Como seguimento das ações, a partir de 1995 foram realizadas as chamadas “Conferências das Partes” ou simplesmente “COPs”, que são reuniões anuais voltadas para o direcionamento dos trabalhos sobre as mudanças climáticas. Até o presente momento, já foram realizadas 21 COPs no total, sendo que durante a COP 3, realizada em 1997, em Quioto, no Japão, foi criado o Protocolo de Quioto, que se tornou o marco mais importante, desde a aprovação da UNFCCC, do combate às mudanças climáticas. Esse protocolo foi criado com o objetivo de regulamentar a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima e, assim, determinar metas específicas de redução de emissões de seis dos principais gases causadores do efeito estufa: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hexafluoreto de enxofre (SF₆), hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorcarbonos (PFCs), a serem alcançadas pelos países desenvolvidos (IPAM, 2014). Dessa forma, foi estabelecida para os países-membros, constantes no Anexo I (países desenvolvidos) do Protocolo de Quioto, a obrigação de reduzir a emissão dos mesmos em, pelo menos, 5% em relação aos níveis de 1990, no período entre 2008 e 2012.

Entretanto, o Protocolo de Quioto entrou em vigor apenas no ano de 2005, quando o mesmo foi ratificado por 55 países que, juntos, somavam 55% das emissões globais de GEE.

É importante destacar que a ratificação do Protocolo de Quioto pela Rússia foi que viabilizou a sua entrada em vigor. Apesar disso, vários países, entre eles os Estados Unidos, não ratificaram o documento e decidiram não seguir as metas, alegando prejuízos ao desenvolvimento econômico.

Para os países não listados no Anexo I, incluindo nesse grupo o Brasil, não foi determinada a redução mencionada anteriormente, contudo ficou estabelecido que tais países iriam adotar medidas voluntárias para reduzir suas emissões, contando, para isso, com recursos financeiros e acesso à tecnologia dos países industrializados, listados no Anexo I. Dessa forma, foram estabelecidos três “mecanismos de flexibilidade¹” para que os países do

¹ Os mecanismos de flexibilidade do Protocolo de Quioto são o Comércio de Emissões, a Implementação Conjunta e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Através do MDL um país desenvolvido pode comprar reduções de emissões provenientes de atividades exercidas por ele em países em desenvolvimento tenham assinado o Protocolo. O governo do país em desenvolvimento precisa concordar que se trata de uma ação

Anexo I pudessem alcançar a redução de suas emissões de GEE, por meio de ações externas, isto é, fora de seus domínios territoriais.

Apesar dos ganhos ambientais consideráveis pela introdução de tais mecanismos, como é o caso dos créditos de carbono, os mecanismos de flexibilidade são muito criticados, pois apresentam falhas como o fato de um determinado país repassar a outro país suas metas de redução.

Recentemente, as metas do Protocolo de Quioto, que deveriam ter sido alcançadas em 2012, foram prorrogadas até 2020, conforme decisão tomada no encontro da Convenção de Doha (COP-18), em 2012 no Catar. A União Europeia foi a principal liderança a aceitar se comprometer com o segundo período do Protocolo de Quioto. Contudo, o acordo saiu fragilizado, uma vez que dos 193 países participantes, apenas 36 assumiram o compromisso de participar da segunda etapa do protocolo. Além disso, mais uma vez não se obteve apoio dos Estados Unidos. Países como a Rússia, o Japão, o Canadá, a Nova Zelândia decidiram não fazerem mais parte do acordo com a justificativa de não serem previstas metas obrigatórias para os países emergentes.

Outra novidade nesse tema foi a publicação, em 2014, do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, que continua reforçando as tendências apresentadas nos relatórios anteriores. Mas, foram adicionadas a esse Relatório novas componentes mais complexas e interessantes aperfeiçoando os modelos matemáticos. O quinto relatório afirma com maior certeza que o homem é o principal responsável pelo atual aquecimento do planeta e que seus efeitos já estão ocorrendo em todos os continentes e oceanos (IPCC, 2014). Mais do que isso; o relatório deixa clara a necessidade de se interromper as emissões de GEE. Para tanto, muitos cientistas acreditam que para acelerar essa redução das emissões é preciso investir em fontes renováveis de energia. Ora, em um mundo totalmente dependente da energia, não é difícil perceber como os combustíveis fósseis contribuem severamente para agravar o problema.

A COP 21 realizada em Paris, entre os dias 30 de novembro a 12 de dezembro de 2015, resultou no Acordo de Paris, que entrará em vigor em 2020. O documento prevê limitar o crescimento da emissão de gases de efeito estufa a 1,5°C, e a criação de um fundo global de US\$ 100 bilhões, financiado pelos países ricos, a partir de 2020, para limitar o aquecimento global a 1,5°C, em relação aos valores médios da era pré-industrial. Ao todo, participaram da

voluntária do país que exerce tais atividades e que contribui para o desenvolvimento sustentável nacional (MME, 2015). Os outros dois mecanismos só permitem projetos de redução das emissões de GEE entre países que fazem parte do Anexo I.

COP 21 líderes representantes de 195 países, tanto desenvolvidos como em desenvolvimento. Entre eles estão os Estados Unidos e a China, considerados maiores contribuidores para a emissão dos gases de efeito estufa.

A questão climática tem, inclusive, ultrapassado os limites do meio científico. Em julho de 2015 o papa Francisco publicou o primeiro documento papal dedicado ao meio ambiente, intitulado Carta Encíclica *Laudato Si'* do Santo Padre Francisco Sobre o Cuidado da Casa Comum. Trata-se de pedido por mudanças posturais da sociedade, atacando diretamente a cultura do consumismo, do descartável, da negligência dos países com a questão ambiental, daqueles que colocam o lucro acima de tudo e de todos. O documento, que também aborda a questão da pobreza, traz consigo um imediatismo no tratamento das mudanças climáticas que, segundo o papa Francisco, está no ápice de sua resistência e coloca o problema como “comum à todos” hoje, não no futuro.

Diante desse cenário, o Brasil é o país que ocupa maior posição de destaque nesse quesito, já que a participação de renováveis em sua matriz energética é de cerca de 41%, em detrimento de apenas 13% considerando toda a energia renovável do mundo (EPE, 2014a). Além das fontes hidráulica, solar e eólica, está também presente de forma significativa na matriz energética brasileira a energia da biomassa.

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2014, a biomassa – que inclui lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações – contribuiu, em 2013, com 7,6% para a Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil.

Considerando o contexto em que se insere a avaliação do potencial da biomassa como recurso energético, as políticas de governo voltaram sua atenção para as fontes de biomassa de escala compatível com a integração ao sistema elétrico e para as culturas que apresentam condições atuais e perspectivas futuras de escala no país, considerando tanto as culturas alimentares e seus resíduos, as culturas energéticas e a produção silvicultural, bem como os resíduos agroindustriais produzidos, entre os quais está o bagaço da cana-de-açúcar.

O uso de bagaço para a geração de energia elétrica permite reduzir as emissões de carbono para a atmosfera, já que substitui fontes mais poluentes como o óleo combustível e o gás natural nas termelétricas, que são mais acionadas exatamente na época de safra a qual corresponde aos períodos de baixa hidraulicidade e menor capacidade de geração hidrelétrica. Nesse caso, a redução de emissões é da ordem de 0,55 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de bagaço de cana utilizada (CGEE e BNDES, 2008). Essa redução de emissão de

GEE é elegível para a consolidação da participação de renováveis na matriz energética brasileira, matando-a como uma das mais limpas do mundo.

Em face dessas considerações, far-se-á, a seguir, uma breve análise das emissões de GEE provenientes do setor sucroalcooleiro, considerando os estudos contemplados no Plano Nacional sobre Mudanças do Clima e do Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais, que é o Estado de interesse do presente trabalho.

ii. Plano Nacional sobre Mudanças do Clima e o setor sucroalcooleiro

O Plano Nacional Sobre Mudança do Clima – PNMC foi publicado em novembro de 2007, por meio do Decreto Federal Nº 6.263. Dentre suas diretrizes estão presentes o incentivo ao desenvolvimento de ações colaborativas ao esforço mundial de combate ao problema das mudanças climáticas e a criação de condições internas necessárias para o enfrentamento de suas consequências.

Dos objetivos do Plano Nacional Sobre Mudanças do Clima, podem-se destacar os seguintes:

- Fomentar aumentos de eficiência no desempenho dos setores da economia na busca constante do alcance das melhores práticas.
- Buscar manter elevada a participação de energia renovável na matriz elétrica, preservando posição de destaque que o Brasil sempre ocupou no cenário internacional.
- Fomentar o aumento sustentável da participação de biocombustíveis na matriz de transportes nacional e, ainda, atuar com vistas à estruturação de um mercado internacional de biocombustíveis sustentáveis.
- Buscar a redução sustentada das taxas de desmatamento, em sua média quadrienal, em todos os biomas brasileiros, até que se atinja o desmatamento ilegal zero.
- Eliminar a perda líquida da área de cobertura florestal no Brasil, até 2015.
- Fortalecer ações intersetoriais voltadas para redução das vulnerabilidades das populações.
- Procurar identificar os impactos ambientais decorrentes da mudança do clima e fomentar o desenvolvimento de pesquisas científicas para que se possa traçar uma estratégia que minimize os custos socioeconômicos de adaptação do País.

Percebe-se que, embora o problema do desmatamento seja o grande vilão das emissões atmosféricas no país, também há a preocupação em minimizar as emissões provenientes das fontes de energia adotadas em sua matriz energética. Nesse sentido, a energia proveniente da biomassa de cana se encaixa perfeitamente nos objetivos do PNMC.

Com o intuito de reduzir as consequências das emissões dos GEE na atmosfera e atingir seus objetivos, o PNMC envolve importantes programas para promover o crescimento da diversificação da matriz energética nacional através de fontes renováveis, citando-se como exemplo o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, criado em 2004, sob a coordenação do Ministério de Minas e Energia, tendo como seu braço de implementação a Eletrobras.

Segundo a Eletrobras, o PROINFA é considerado o maior programa do mundo de incentivo à fontes alternativas de energia elétrica, tendo contribuído para a diversificação da matriz energética nacional, além de ter fomentado a geração de mais milhares de empregos diretos e indiretos em todo o país. Com relação às emissões de GEE, estima-se que o programa possibilite a redução de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de CO₂e/ano (ELETROBRAS, 2015)

Outro destaque nesse sentido é o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE criado pela Resolução CONAMA N° 18, de 6 de maio de 1986, sob a coordenação do IBAMA, com o objetivo de reduzir e controlar a contaminação atmosférica por fontes móveis (veículos automotores).

Frente à grande utilização do modal de transporte rodoviário no país, o PROCONVE veio como um fator determinante na promoção da redução dos níveis de emissão dos principais poluentes de automóveis, caminhões, ônibus e máquinas rodoviárias e agrícolas, incluindo entre eles monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP), óxidos de enxofre (SO_x) e outros. Para complementar as ações desse programa, foi criado em 2002 o PROMOT, voltado para o controle das emissões de motocicletas e similares.

Passados quase trinta anos de sua criação, o PROCONVE tem se mostrado muito eficiente, apresentando uma redução de 98% das emissões de poluentes. Para se ter uma ideia, em 1986 a emissão média, por exemplo, de CO de um veículo leve era de 54 g/km. Hoje, essa emissão é de aproximadamente 0,4 g/km. (IBAMA, 2015)

No que tange às emissões de GEE específicas do setor sucroalcooleiro, o etanol é de PNMC destaca que os ganhos com a utilização do etanol combustível, no período de 1970 a

2007, resultaram na substituição de 854 milhões de barris equivalentes de petróleo evitando, portanto, a descarga de 800 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera. Ainda segundo o PNMC, a utilização do etanol em substituição à gasolina deverá ser responsável por evitar o lançamento de cerca de 508 milhões de toneladas de CO₂ no período compreendido entre 2008 e 2017.

No entanto, apesar da renovabilidade do etanol como combustível e também do bagaço de cana como fonte de geração de energia elétrica, é preciso levantar a questão de que o setor sucroalcooleiro apresenta emissões atmosféricas, tanto durante o próprio cultivo da cana-de-açúcar, quanto na preparação de seus produtos (etanol e açúcar). Além disso, há a utilização de combustíveis fósseis nas etapas do ciclo produtivo. A utilização desses combustíveis está presente em operações das usinas, por meio de máquinas específicas para realização da colheita, corte e transporte da cana-de-açúcar. Ou seja, em todo o processo produtivo do setor sucroalcooleiro ocorrem emissões de GEE, como CO₂, CH₄ e N₂O. A diferença está justamente no balanço dessas emissões provenientes de combustíveis renováveis e de combustíveis fósseis.

A respeito dessa questão, o PNMC recomenda a redução gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar, conforme Decreto Federal N° 2.661, de 08 de julho de 1998, que regulamenta o parágrafo único do art.27 do antigo Código Florestal (art.38 da Lei Federal N° 12.651, de 25 de maio de 2012), estabelecendo normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, entre outras providências. Assim, o PNMC defende a redução do emprego do fogo, como método despalhador e facilitador do corte de cana-de-açúcar em áreas passíveis de mecanização da colheita.

Em termos de balanço de emissões atmosféricas de GEE, o setor sucroalcooleiro beneficia-se da fotossíntese durante o crescimento da planta. Porém, sofre prejuízo com a queima utilizada no processo de colheita manual, que ainda é muito significativo no país. Além disso, ainda há as emissões durante o transporte da cana-de-açúcar.

Diante dessa questão, em 25 de junho de 2009, foi firmado o Compromisso Nacional para Aperfeiçoar as Condições de Trabalho na Cana-de-Açúcar entre governo federal e entidades de trabalhadores e de empresários do setor sucroenergético. O Compromisso é resultado de uma experiência inédita, no Brasil, de diálogo e negociação nacional tripartite para enfrentar o desafio de melhorar as condições de vida e trabalho no cultivo manual da cana-de-açúcar.

Desde então, as regiões produtoras de cana-de-açúcar tem trabalhado para minimizar as emissões atmosféricas, com destaque para a mecanização da colheita e corte da cana-de-açúcar. O Estado de São Paulo, por exemplo, adiantou-se nesse objetivo, pois já conta com uma legislação específica sobre o assunto desde 2002 (Lei N° 11.241, de 19 de setembro de 2002) e um acordo de intenções firmado entre o setor público e privado, em 2007, chamado de Protocolo Ambiental. De acordo com a Unica (2014), São Paulo encerrou a safra de 2013/2014 com colheita mecanizada em 83% dos canaviais, gerando uma redução de 26,7 milhões de toneladas na emissão de poluentes, bem como 4,4 milhões de toneladas de gases de efeito estufa, algo equivalente à emissão anual de 77,5 mil ônibus movidos a diesel.

Minas Gerais também possui seu “Protocolo de Intenções Agrosocioambiental do Setor Sucroalcooleiro”, assinado em 2008 com o governo do estado, que é discutido no próximo subitem.

O PNMC ainda destaca outros planos e ações para promover a redução das emissões do setor sucroalcooleiro, como o desenvolvimento de biocombustíveis de segunda geração, por meio da hidrólise de lignocelulósicos, em particular de processos de produção de etanol via catálise enzimática. Esta alternativa, segundo o PNMC, é capaz de atender ao crescimento da demanda por este combustível, sem, no entanto, a necessidade de aumento da área de produção de cana-de-açúcar.

Para a implementação das ações proposta, estão contemplados no PNMC alguns instrumentos econômicos, como a criação do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima. Além disso, destaca a posição de destaque do Brasil frente às possibilidades de investimentos em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, alegando que dentro do setor sucroalcooleiro há grande oportunidade de utilização de bagaço de cana para cogeração, bem como oportunidades para projetos inovadores de uso de etanol. Entre os fatores que tornam o país atrativo para os países investidores no âmbito do MDL estão: i) a grande conscientização sobre a questão de mudança do clima por ter sediado a UNCED – Conferência de Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92) e também por ter sido o país que propôs a ideia do Fundo de Desenvolvimento Limpo (Clean Development Fund) que originou o MDL, adotado em Quioto e ii) a definição, em 1999, de uma Comissão Internacional sobre Mudança do Clima (CIMGC).

Posteriormente, a questão climática no Brasil ganhou mais um reforço legal, constituído pela Lei N° 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que criou a Política Nacional

sobre Mudança do Clima e do Decreto N° 7.390, de 9 de dezembro de 2010, que regulamenta essa lei.

iii. Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais e as ações que influenciam o setor sucroalcooleiro

O Plano de Energia e Mudanças Climáticas (PEMC) de Minas Gerais foi resultado de um grande esforço conjunto entre autoridades políticas, instituições estaduais, representantes de organizações não governamentais e população em geral, com vistas à mobilização dos diferentes stakeholders. Sua elaboração foi estruturada em quatro fases principais: preparação, diagnóstico e mobilização, construção e execução. Ressalta-se que a fase de diagnóstico e mobilização compreendeu amplo levantamento de informações e iniciativas relacionadas direta ou indiretamente à energia e mudanças climáticas no estado, tendo iniciado no segundo semestre de 2013 e finalizado no primeiro trimestre de 2014, conforme ilustra a Figura A.1.



Figura A.1 – Diagnóstico do Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais

Fonte: PEMC (2015)

Inovador e de caráter participativo, o PEMC conta com uma *home page* específica (<http://pemc.meioambiente.mg.gov.br/pt/>), que reúne o diagnóstico, os cenários elaborados, os resultados do processo participativo, assim como as ações definidas para o horizonte de 2015-2030. Possui como objetivos principais a promoção da transição para a economia de baixo carbono, a redução da vulnerabilidade às mudanças climáticas no território mineiro e a articulação coerente das diferentes iniciativas já desenvolvidas e planejadas, dentro de uma estratégia territorial integrada.

Com relação à redução das emissões de GEE, o PEMC afirma estar de acordo com o previsto na Política Nacional sobre Mudança do Clima, que estabelece a meta de redução dessas emissões entre 36,1% e 38,9% até o ano de 2020, em comparação com o cenário de referência.

No setor de energia, subsetor de transporte, as emissões relacionadas ao etanol no modal rodoviário constituíram apenas 0,3%, ficando o óleo diesel na liderança (67,1%) seguido da gasolina (29,4%), querosene (2,8%) e gás natural (0,4%). Destaca-se que o biodiesel e a eletricidade não entraram nos cálculos e as emissões do etanol foram calculadas com base nos fatores de emissão utilizados no 2º Inventário Nacional, para o ano de 2005.

O PEMC faz uma avaliação do potencial de geração de energia proveniente de fontes renováveis no estado de Minas Gerais considerando as oportunidades e barreiras existentes. Com isso, ele fornece uma base técnica para a construção dos cenários possíveis para ampliação da parcela de energia renovável na matriz energética e a identificação de ações prioritárias, contribuindo para a redução das emissões de GEE. Nesse quesito, foram preparados dois volumes do potencial de energias renováveis do estado, sendo que a biomassa é tratada no Volume II (FEAM, 2014d). Os dados disponibilizados serão tratados no próximo capítulo.

Outra novidade para o aprimoramento das análises sobre as mudanças climáticas trazidas pelo PEMC é a Adaptação às mudanças climáticas, que é constituído por um estudo de vulnerabilidade regional às mudanças climáticas e outro estudo de estratégia de adaptação regional.

O primeiro, chamado de “Estudo de vulnerabilidade regional às mudanças climáticas de Minas Gerais”, avalia, como o próprio nome diz, a vulnerabilidade do território mineiro a partir de uma análise integrada dos impactos e potenciais impactos climáticos nos sistemas naturais e socioeconômicos. A abordagem adotada permitiu alinhar conhecimentos existentes e aplicar indicadores quali-quantitativos identificando os setores e regiões prioritárias para a implementação de medidas de adaptação. Entre as vulnerabilidades identificadas em Minas Gerais que tem relação direta ou indireta com o setor sucroalcooleiro, podem ser citadas as seguintes (FEAM, 2014b):

- Uma economia dependente de setores sensíveis às mudanças climáticas – agricultura e pecuária, mineração, silvicultura.
- Produção elétrica muito dependente da hidroeletricidade, que é muito sensível às mudanças climáticas – as grandes usinas hidrelétricas representam quase 90% da potência instalada e

as pequenas e médias usinas hidrelétricas representam 3,21%. Já a geração termelétrica é responsável por 6,53% da produção de energia elétrica.

- Cerca de 58,8 milhões de hectares do território estadual tem uma ocupação majoritariamente ligada à pecuária e agricultura – encabeçando essa ocupação está a pecuária, em que as pastagens dedicadas, em sua maioria à pecuária extensiva, ocupa 30%. O cultivo de grãos representa 4,8% do território, seguido pelo café (4,8%), soja (1,7%) e cana-de-açúcar (1,4%). Além disso, observa-se um potencial aumento das áreas de pastagens (entre +11% e +15,2% no período 2070 – 2100) contra uma diminuição ao longo prazo das áreas de lavoura (entre -5% e -18% no período 2070 – 2100).
- Episódios frequentes de seca e estiagens na Região Norte e risco de chuvas intensas no Triângulo, Zona da Mata, Rio Doce e Central (Região Metropolitana de BH), que são as áreas de maior concentração dos canaviais.

As projeções do estudo de vulnerabilidades identificaram também dois cenários climáticos para o território mineiro. Simulações realizadas mostraram que os aumentos de temperatura se situariam entre 2°C e 4°C, variando conforme a região e a estação do ano. Um cenário mais pessimista mostrou que esse aumento pode variar entre 3°C e 5°C, sendo maior nas regiões do Jequitinhonha, Norte de Minas, Noroeste de Minas, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Já as estimativas de precipitação seriam mais heterogêneas entre as Regiões do estado. (FEAM, 2014b)

Apesar do clima ser um fator muito influente na produtividade da cana-de-açúcar, que é uma cultura de grande importância para a produção de etanol em Minas Gerais, o estudo de vulnerabilidades afirma que os resultados de projeções climáticas para o Brasil sugerem que as principais regiões produtoras continuarão nos limites de temperatura propícios à cana-de-açúcar, havendo a possibilidade de ocorrerem modificações de distribuição geográfica, mas o impacto a ser previsto sobre a produção de etanol é bastante pequeno.

A Figura A.2, a seguir, mostra o mapa de exposição do estado aos impactos considerados no Estudo de vulnerabilidade regional às mudanças climáticas de Minas Gerais por Região.

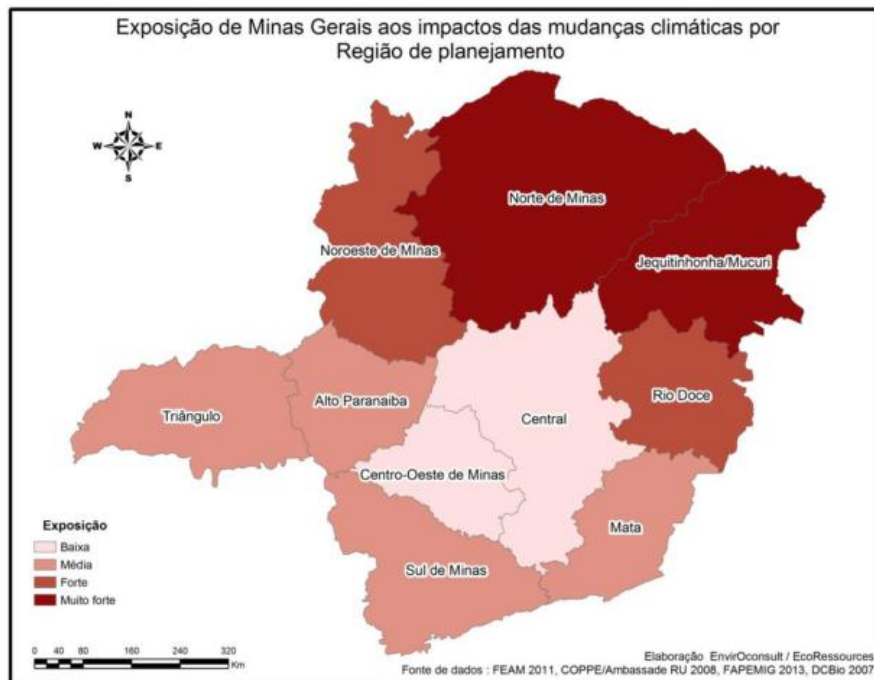


Figura A.2 – Mapa regional da exposição de Minas Gerais aos impactos das mudanças climáticas: sistema de avaliação e índice por região

Fonte: FEAM (2014b)

O outro estudo apresentado no PEMC é a “Estratégia de Adaptação Regional para Minas Gerais”, que adota a abordagem de redução das vulnerabilidades às mudanças climáticas e facilitadora de adaptação, incluindo a descentralização na tomada de decisões, o emprego de mecanismos de proteção contra degradação ambiental e a transferência ou diversificação dos riscos ao longo do tempo, espaço e nas instituições.

Esse último estudo chama a atenção para um problema no trato das questões climáticas. Isso porque mesmo diante da urgência na avaliação da vulnerabilidade dos sistemas e implementação de ações específicas de adaptação, a maior parte dos estudos sobre o tema estão voltados para a mitigação (redução) das emissões antrópicas de GEE, o que acaba deixando de lado a importância dos impactos projetados pela mudança do clima e as opções de adaptação. Ao invés disso, estratégias deveriam combinar a mitigação e adaptação de forma integrada. (FEAM, 2014a)

Os principais objetivos da estratégia de adaptação compreendem: promover a ação local no território, promover a tomada de decisão informada e promover a adaptação integrada e planejada no estado considerando as regiões e setores mais vulneráveis. Este último objetivo considera cinco eixos temáticos, que são os recursos hídricos, a agropecuária,

a biodiversidade, a capacidade institucional e a saúde humana. Além disso, o primeiro período de implantação das estratégias (2014 – 2018) dará ênfase às ações nas regiões Norte, Jequitinhonha – Mucuri, Rio Doce e Zona da Mata, em função da maior vulnerabilidade ali identificada. (FEAM, 2014a)

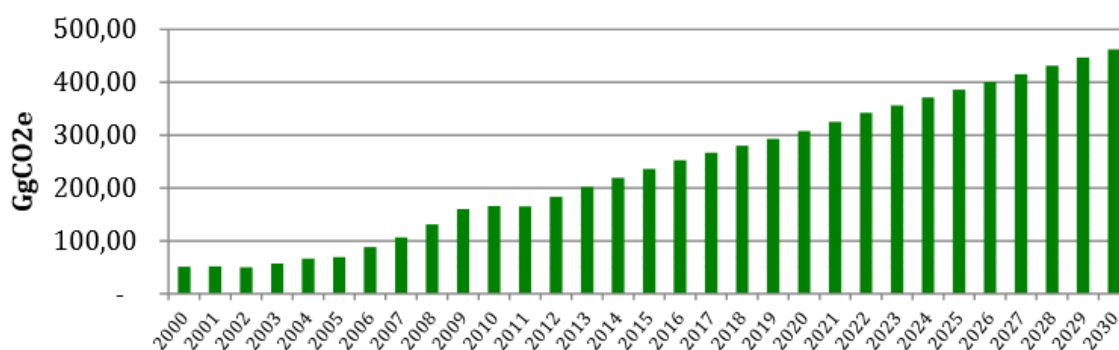
Uma análise do cenário climático minério realizada pelo PEMC afirma que as mudanças climáticas no estado já são uma realidade e, se nada for feito, o custo dos impactos decorrentes das mudanças climáticas para a economia podem alcançar, nas próximas décadas, cerca de R\$ 450 bilhões, sem incluir os gastos com os impactos dos eventos extremos. Para melhor entendimento, foram construídos três cenários hipotéticos, a saber (FEAM, 2014c):

- Cenário Business-As-Usual – BAU (cenário de referência): projeta as tendências passadas para simular como seria a evolução das emissões de GEE se nada mudasse no futuro.
- Cenário de contribuição federal – FED: baseado no compromisso voluntário do Brasil junto à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – UNFCCC de redução de emissões de GEE até 2020. Esse cenário aplica para o estado de Minas Gerais os objetivos de redução de emissões líquidas de GEE, que estão previstos no Plano Nacional sobre Mudanças do Clima e outro planos setoriais. Estima-se que tais objetivos representam aproximadamente uma redução entre 7% e 9% das emissões de GEE em comparação com a tendência para 2020 no estado.
- Cenário de baixa intensidade de carbono – BIC: baseado em ações estaduais adicionais de eficiência energética e redução (ou remoção) de GEE definidos no processo participativo. Esse cenário foi construído com auxílio das partes interessadas presentes no processo participativo do PEMC e apresenta uma redução de 9,4% das emissões de GEE em comparação com a tendência para 2030 no estado.

Para o primeiro cenário (BAU), para o setor energia, subsetor energético, em 20 anos (2010-2030), o consumo energético aumenta 60% e alcança 11 Mtep em 2030, contra 7 Mtep em 2010. Em 2010, a lenha é a fonte dominante com uma parcela de 69%, mas diminui até atingir 44% em 2030. Isso é associado ao aparecimento de energias alternativas, como é o caso do bagaço de cana, que atinge 21% do consumo em 2030, contra 16% do gás natural e 8% do coque de carvão mineral. Já o setor agropecuário, apenas a queima de resíduos agrícolas da cana-de-açúcar é contabilizada, o que correspondeu a 0,35% das emissões totais do setor em 2010. Como o cenário em questão não contempla mudanças futuras, as emissões

provenientes da queima do setor sucroalcooleiro alcançaram um aumento percentual de 178%, passando de 166 mil tCO₂e em 2010, para 462 mil tCO₂e em 2030, conforme mostra o Gráfico A.1. (FEAM, 2014c)

Gráfico A.1 – Evolução das emissões da queima de resíduos agrícolas da cana-de-açúcar segundo cenário BAU do Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais



Fonte: FEAM (2014c)

O segundo cenário (FED) considera as metas estabelecidas na Política Nacional sobre a Mudança do Clima (Lei Nº 12.187/2009). Para cumprimento do compromisso voluntário do Brasil junto à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de redução de emissões GEE entre 36,1% e 38,9% até 2020, foram estabelecidos instrumentos como é o caso do Plano Nacional sobre Mudança do Clima. Especificamente para o setor sucroalcooleiro, o Plano estabelece como meta o aumento da oferta de energia elétrica de cogeração, principalmente a bagaço de cana, para 11,4% da oferta total de eletricidade no país, em 2030.

No terceiro cenário considerado (BIC), que leva em conta o cenário de referência em comparação com as ações mitigadoras de GEE definidas no PEMC, destaca-se o maior percentual de redução (-9,8%). Contudo, esse percentual poderá ser ainda maior, pois nem todas as 38 ações mitigadora consideradas no PEMC puderam ser estimadas.

Em suma, o PEMC elaborado para Minas Gerais mostra-se bastante completo e contempla inúmeros documentos de extrema importância para buscar resultados cada vez mais positivos em termos de redução das emissões de GEE em todos os setores da economia.

GLOSSÁRIO

Autorização Ambiental de Funcionamento (AAF): É o ato administrativo que aprova a localização e autoriza a instalação e operação de um empreendimento, atividade ou obra com pequeno potencial poluidor/degradador do meio ambiente. Em Minas Gerais, a DN N°74/2004, aplica a AAF para empreendimentos quando o potencial poluidor encontra-se nas classes 1 e 2.

Bagaço excedente: Quantidade de bagaço que sobra após os empreendimentos sucroalcooleiros encerrarem a produção de uma safra de cana-de-açúcar.

CO₂e: É uma medida métrica utilizada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa baseado no potencial de aquecimento global de cada um. O CO₂ é utilizado como parâmetro. Por exemplo, o potencial de aquecimento global do gás metano (CH₄) é 21 vezes maior do que o potencial do CO₂, logo o CO₂e do metano é igual a 21. Ainda se emprega a nomenclatura CO₂eq.

Efeito estufa: A atmosfera terrestre é formada por uma camada de gases predominantemente constituída por nitrogênio (N₂), seguida de oxigênio (O₂) e outros gases. Entre esses outros gases, encontrados em pequenas quantidades, estão os Gases de Efeito Estufa (GEE), que são o gás carbônico (CO₂), metano (CH₄), N₂O (óxido nitroso) e vapor d água. A função desses gases é reter o calor na atmosfera, mantendo uma temperatura média em torno de 15°C, o que garante a vida no planeta. Contudo a intensificação desse efeito pode levar a consequências danosas à saúde dos seres vivos e ao equilíbrio do ecossistema como um todo, por meio das mudanças climáticas.

Licenciamento ambiental: É um procedimento administrativo realizado pelo poder público competente para a concessão de autorização ambiental de instalação, ampliação, modificação e operação de atividades ou empreendimentos. Envolve três etapas: a Licença Prévia, A Licença de Instalação e a Licença de Operação. Após o vencimento do prazo da Licença de Operação o empreendimento pode requer sua revalidação (RevLO) ou mesmo fazer uma correção na LO (LOC), em função de alterações em seus processos produtivos.

Licença Prévia (LP): Autorização ambiental concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade, aprovando sua localização e concepção, atestando sua viabilidade ambiental conforme requisitos básicos estabelecidos e medidas condicionantes a serem atendidas nas próximas fases de sua implantação.

Licença de Instalação (LI): Autorização ambiental para a instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações dos planos, programas e projetos aprovados na fase de LP, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes.

Licença de Operação (LO): Autorização ambiental para a operação do empreendimento ou atividade após cumprimento dos requisitos e condicionantes estabelecidos nas licenças anteriores. Medidas de controle ambiental para monitoramento das atividades desenvolvidas, bem como algumas condicionantes são determinadas para a operação.

RADA: Diz respeito ao relatório exigido pelo órgão ambiental ao empreendimento quando este último requer a revalidação de sua Licença de Operação. O RADA pode ser uma exigência para conceder uma nova licença de operação e, também, para casos onde o empreendimento, em operação, apresentar mudanças em seus processos, ampliação de sua capacidade produtiva.

Tep: Unidade de medida de energia e representa o calor liberado na queima de uma tonelada de petróleo cru que, segundo a Agencia Internacional de Energia, equivale a cerca de 42 GJ.