



ETANOL VERSUS BIOELETRICIDADE: APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE
FRONTEIRA EFICIENTE DE MARKOWITZ PARA O APROVEITAMENTO DO
BAGAÇO RESIDUAL DO SETOR SUCROENERGÉTICO

Rafael Barros Araujo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientador: Lucio Guido Tapia Carpio

Rio de Janeiro

Abril de 2017

ETANOL VERSUS BIOELETRICIDADE: APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE
FRONTEIRA EFICIENTE DE MARKOWITZ PARA O APROVEITAMENTO DO
BAGAÇO RESIDUAL DO SETOR SUCROENERGÉTICO

Rafael Barros Araujo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Lucio Guido Tapia Carpio, D.Sc.

Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey, Ph.D.

Prof. Raad Yahya Qassim, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2017

Araujo, Rafael Barros

Etanol versus bioeletricidade: aplicação dos conceitos de fronteira eficiente de Markowitz para o aproveitamento do bagaço residual do setor sucroenergético / Rafael Barros Araujo. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIII, 77p.: il.; 29,7 cm

Orientador: Lucio Guido Tapia Carpio

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 67-75.

1. Carteira Eficiente. 2. Bioeletricidade. 3. Etanol Lignocelulósico. I. Carpio, Lucio Guido Tapia. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título

DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação aos meus pais, Douglas e Mirian, e à minha esposa e filhos, Camila, Beatriz e Guilherme, os quais me apoiaram e incentivaram a atingir meus objetivos com determinação e sabedoria, cada um a sua maneira.

Amo todos vocês.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Camila, por todo seu companheirismo e paciência ao longo dessa jornada, em tantos finais de semana de muito estudo e trabalho.

À minha família, fundamentais em todas as etapas da minha vida, por me incentivarem a continuar nos momentos mais difíceis e por estarem ao meu lado nas minhas principais vitórias.

Ao meu orientador, Professor Lucio Guido Tapia Carpio, que cumpriu com louvor seu papel de me conduzir na elaboração dessa dissertação.

Aos professores Luiz Fernando Loureiro Legey e Raad Yahya Qassim, pela participação na banca de mestrado.

Aos demais professores do PPE, pela formação complementar que me forneceram no programa.

Aos amigos que fiz no Programa de Planejamento Energético, especialmente aos que batalharam comigo, ombro a ombro, na difícil tarefa especialização acadêmica em conjunto com o trabalho.

À Empresa de Pesquisa Energética - EPE pelo apoio institucional, aos Superintendentes Ricardo Nascimento e Silva do Valle e Giovani Vitória Machado, aos Diretores Elson Ronaldo Nunes e José Mauro Ferreira Coelho por terem permitido e me incentivado a realizar e finalizar este mestrado. E por entenderem a importância da qualificação e capacitação do corpo técnico para a empresa.

Aos meus colegas de trabalho que já passaram pela ou continuam na Diretoria de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (DPG) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), André Santos, Henrique Fonseca, Juliana Rangel, Leônidas Bially, Marcelo Cavalcanti, Marina Besteti, Patrícia Stelling, Pedro Ninô e Rachel Henriques pelas valiosas contribuições, por todo incentivo e apoio ao longo desses anos de convivência. E um agradecimento especial a três grandes companheiros de trabalho, que tiveram grande contribuição na minha formação profissional e pessoal, Angela Costa, Antonio Carlos Santos e Euler Silva.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ETANOL VERSUS BIOELETRICIDADE: APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE
FRONTEIRA EFICIENTE DE MARKOWITZ PARA O APROVEITAMENTO DO
BAGAÇO RESIDUAL DO SETOR SUCROENERGÉTICO

Rafael Barros Araujo

Abril / 2017

Orientador: Lucio Guido Tapia Carpio

Programa: Planejamento Energético

O presente trabalho analisa a competição pelo bagaço de cana de açúcar para a produção de etanol lignocelulósico e de eletricidade, através do uso da teoria de portfólio desenvolvida por Harry Markowitz, dado que o setor pode diversificar ainda mais a sua produção, reduzindo riscos e aumentando retornos.

Após a revisão da literatura, acerca do setor sucroenergético e das tecnologias de produção desses dois biocombustíveis, foram apresentados os conceitos da Teoria de Carteira Eficiente de Markowitz, a partir dos quais, elaborou-se um modelo para esse setor. Por fim, foi analisada a competitividade pelo bagaço, sob a ótica risco/retorno, em cinco diferentes cenários para a produção do etanol de segunda geração e da bioeletricidade.

Por meio do presente estudo, foi possível concluir que no estágio atual de desenvolvimento da produção do etanol lignocelulósico, o portfólio de menor risco possui grande alocação do bagaço para a bioeletricidade vendida no ambiente regulado. Quando são analisados cenários inserindo pacotes tecnológicos de efficientização da produção do etanol de segunda geração (E2G), os riscos dos portfólios diminuem consideravelmente e seus retornos crescem em grande magnitude, nesses cenários, o portfólio de menor risco passa a ser aquele que contém maior alocação do bagaço para o E2G. A aplicação do modelo mostrou-se eficaz, consistindo em um importante instrumento para auxiliar o gestor a distribuir os ativos de uma carteira eficientemente.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ETHANOL VERSUS ELECTRICITY: APPLICATION OF MARKOWITZ'S
EFFICIENT BORDER CONCEPTS FOR RESIDUAL BAGASSE USE FROM
SUCROENERGY SECTOR

Rafael Barros Araujo

April / 2017

Advisor: Lucio Guido Tapia Carpio

Department: Energy Planning

This work analyzes the competition for bagasse in the lignocellulosic ethanol and electricity productions using the modern portfolio theory developed by Markowitz, as the sector can further diversify its production, reducing risks and increasing returns.

After literature review, about sugar-energy sector and these two biofuels production technologies, the concepts of the Markowitz Efficient Portfolio Theory were presented. Then, a model was developed to this sector, based on this theory. Finally, the competitiveness of bagasse, under the risk / return perspective, was analyzed in five different scenarios, applying technological packages to the advanced ethanol production and bioelectricity, as well as introducing subsidies.

It was possible to conclude that, in the current stage of lignocellulosic ethanol production, the lowest risk portfolio has a large allocation of bagasse to bioelectricity sold in the regulated market. When efficient technology package is introduced, the bagasse allocation in the lowest risk portfolio changes to second generation ethanol. The model proved effective, constituting an important auxiliary tool in assisting managers to distribute assets of a portfolio in a more efficient way.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xiii
Capítulo I – Introdução.....	1
I.1. Contextualização.....	1
I.2. Objetivo	3
Capítulo II – Fundamentação Teórica	5
II.1. Descrição do Problema.....	5
II.2. O Setor Sucroenergético	6
II.2.1. Açúcar	7
II.2.2. Etanol	7
II.2.3. Bioeletricidade da Cana (Cogeração)	9
II.2.4. Alocação de Insumos	10
II.3. Biorrefinaria	10
II.3.1. Cana-de-açúcar	11
II.3.2. Processo Produtivo Convencional	12
II.4. Bioeletricidade no Sistema Elétrico Brasileiro	14
II.4.1. Comercialização de Energia.....	14
II.4.2. Cogeração a partir da biomassa da cana	16
II.4.3. Rendimentos e Custos de cogeração.....	21
II.4.3.1. Rendimento	21
II.4.3.2. Custo Operacional de geração bioeletricidade	23
II.5. Etanol Lignocelulósico	24
II.5.1. Rotas de conversão.....	25
II.5.2. Processo produtivo.....	25
II.5.2.1. /Pré-Tratamento	26
II.5.2.2. Hidrólise	28
II.5.2.3. Fermentação	29
II.5.2.4. Integração E1G e E2G	30
II.5.3. Rendimentos e Custos de Produção	30
II.5.4. E2G no Brasil e no mundo	35

II.5.4.1. Incentivos e Mandatos	35
II.5.4.2. Questões a solucionar.....	38
II.5.5. Comercialização do Etanol Anidro	38
Capítulo III – Metodologia	40
III.1. Carteira Eficiente (Harry Markowitz).....	40
III.1.1. Teoria do risco-retorno.....	40
III.1.2. Teoria da carteira de investimentos	40
Capítulo IV – Fronteira eficiente para o aproveitamento do bagaço residual do setor sucroenergético.....	44
IV.1. Modelo de alocação eficiente do bagaço.....	44
IV.1.1. Retorno (Margem)	47
IV.2. Premissas	48
IV.2.1. Preços de comercialização	51
IV.2.1.1. Preços da Bioeletricidade e do Etanol	51
IV.2.1.2. Preços do Etanol Anidro.....	52
IV.3. Resultados.....	54
Capítulo V – Conclusão.....	65
Referências Bibliográficas	67
Anexo A	76
ANEXO B.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Processamento da cana para produção de açúcar e etanol.....	12
Figura 2: Sistema de cogeração baseado no ciclo Rankine, com turbinas de contrapressão	18
Figura 3: Sistema de cogeração baseado no ciclo Rankine, turbinas de condensação...	20
Figura 4: Fluxograma do processo de produção de etanol lignocelulósico.....	26
Figura 5: Cenários de produção de E2G.....	34
Figura 6: Portfólio eficiente para dado nível de risco	43
Figura 7: Produtos derivados da biomassa da cana e seus mercados	45
Figura 8: Produtos da cana por uso	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros e rendimentos de sistemas de cogeração	22
Tabela 2 - Processos para pré-tratamento da biomassa para hidrólise	27
Tabela 3 - Opções para a hidrólise da celulose	28
Tabela 4 - Estimativas de rendimentos e custos de produção de bioetanol.....	31
Tabela 5 - Cenários para a produção de etanol.....	32
Tabela 6 - Consumo de etanol e de eletricidade, consumo de vapor e material lignocelulósico (ML) e análise econômica.....	33
Tabela 7 - Estimativa dos rendimentos e dos custos de produção do E2G e da bioeletricidade	35
Tabela 8 – Cenários para a bioeletricidade e o E2G.....	48
Tabela 9 - Características da unidade produtora de referência.....	49
Tabela 10 – Custos de produção e rendimentos por estágio tecnológico e produto.....	50
Tabela 11 - Incentivos ao etanol celulósico brasileiro no mercado dos EUA.....	52
Tabela 12 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 1)	54
Tabela 13 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 2)	56
Tabela 14 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 3)	58
Tabela 15 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 4)	60
Tabela 16 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 5)	62
Tabela 17 - Mandatos mundiais de etanol*	77

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Consumo de etanol carburante	8
Gráfico 2: Energia contratada e extra certame das usinas vencedoras nos Leilões de Energia.....	16
Gráfico 3: Preço de Liquidação das Diferenças (sub-mercado SE/CO) e Preço médio dos leilões de energia (Termelétricas a biomassa de cana)	52
Gráfico 4: Preço do etanol anidro na Usina (SP) e da Califórnia (EUA) internalizado no Brasil.....	53
Gráfico 5: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 1).....	55
Gráfico 6: Fronteira Eficiente do Cenário 1	55
Gráfico 7: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 2).....	57
Gráfico 8: Fronteira Eficiente do Cenário 2	57
Gráfico 9: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 3).....	59
Gráfico 10: Fronteira Eficiente do Cenário 3	59
Gráfico 11: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 4).....	61
Gráfico 12: Fronteira Eficiente do Cenário 4	61
Gráfico 13: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 5).....	63
Gráfico 14: Fronteira Eficiente do Cenário 5	63

Capítulo I – Introdução

I.1. Contextualização

A revolução industrial foi o fator determinante para a alteração da forma da utilização da energia no mundo. Inicialmente, a sociedade migrou de uma economia que utilizava o processo de produção artesanal para uma economia de combustíveis fósseis, que utilizava máquinas a vapor em seus processos produtivos e no transporte. Em decorrência disto, houve um movimento de concentração da população nas cidades e alteração de suas necessidades de consumo.

A partir de 1880, com a massificação do uso das máquinas a vapor, como, por exemplo, caldeiras em fábricas, locomotivas e navios, o carvão atingiu cerca de 20% da energia total consumida no mundo. Neste período, o petróleo e seus derivados já eram utilizados, mas em pequena escala. No entanto, apesar do desenvolvimento do processo de refino de petróleo ter fornecido a base para a entrada na “Era do Petróleo”, a grande invenção que realmente fez decolar o uso dessa fonte energética e de seus derivados foi o desenvolvimento de motores a combustão interna (BITHAS, E KALIMERIS, 2016).

Ao longo dos anos a biomassa perdeu representatividade na matriz energética mundial, saindo de 80% em 1880, passando a 25% em 1960 e correspondendo a aproximadamente 10% do total em 2010. Em 1960, os combustíveis fósseis já representavam praticamente os 75% restantes (predominantemente carvão e petróleo) (LIKVERN, R, 2014). Essa alteração do perfil de utilização das fontes de energia, juntamente com a elevação da intensidade de seu uso, tem contribuído para as mudanças climáticas¹ globais verificadas nas últimas décadas.

Muitas nações e/ou comunidades menos desenvolvidas ainda utilizam biomassa para atividades básicas, como cocção e aquecimento doméstico (metade do uso total de biomassa, em 2010). No entanto, é no uso moderno da biomassa que reside o maior potencial de expansão de energia renovável (IRENA, 2014).

¹ Cita-se como exemplo das mudanças climáticas globais, o aumento de temperaturas médias globais do ar e do oceano, extremos de temperaturas regionais e elevação do nível global do mar, que não só afetam a economia mundial, como também a vida na terra (RIBAS, 2008).

Segundo dados levantados pela *International Energy Agency* - IEA (2017), o uso moderno de biomassa contribuiu com 17,5 EJ (cerca de 3%) para o consumo energético mundial, em quatro categorias: usos industriais (8 EJ); calor para uso doméstico (4,5 EJ); biocombustíveis (3 EJ) e bioeletricidade (2 EJ). De acordo com a *International Renewable Energy Agency* (2014), em 2030, estima-se que a produção de biomassa varie de 97 a 147 EJ, sendo 38-45% proveniente de resíduos agrícolas e lixo e o restante de culturas energéticas e produtos florestais, incluindo resíduos florestais. Grande parte deste crescimento advém da categoria dos biocombustíveis.

Apesar de ter apresentado crescimento do consumo de energia primária maior que o dobro do mundo (5,3% contra 2,55% a.a.), entre 1965 e 2015, a matriz energética brasileira destaca-se por ser uma das mais limpas do mundo, apresentando uma participação de fontes renováveis, neste último ano, de 42%, sendo que os produtos da cana apresentam grande relevância na segunda posição com 18%. No entanto, o petróleo é a fonte energética que possui maior representatividade, com 44%. Somando-a com gás natural e com o carvão mineral, as fontes fósseis alcançam uma participação de 57%. Ainda assim, no Brasil, o conjunto destas fontes fósseis é inferior à média mundial em 29 pontos percentuais (EPE, 2016a).

Segundo consenso de grande parte da comunidade científica, a elevada concentração de CO₂ na atmosfera, proveniente, principalmente, da queima de combustíveis fósseis² é o fator responsável pelas mudanças climáticas globais (RIBAS, 2008). A energia renovável da biomassa evitou a emissão de 1,7 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente. em 2014, quando as emissões globais atingiram 35,7 bilhões de toneladas. No Brasil, o total de emissões evitadas foi de 28,7 milhão de toneladas de CO₂eq, neste mesmo ano (IRENA, 2017).

² A queima dos combustíveis fósseis tem sido a maior fonte de emissões antrópicas de SO_x, NO_x e CO₂. A oxidação eventual do SO_x e do NO_x produz os sulfatos e nitratos responsáveis pela deposição ácida regional e semi-continental. A alta concentração CO₂ na atmosfera aumenta a absorção da radiação infravermelha refletida pela superfície terrestre, impedindo que ela retorne para o espaço (SMIL, 1984).

Os compromissos de longo prazo para reduzir as emissões mundiais de CO₂, como ocorrido em 1997, na cidade de Kyoto, e mais recentemente, em dezembro de 2016, em Paris³, são incentivos adicionais à expansão da biomassa como fonte energética.

Para o caso brasileiro, o aproveitamento energético da biomassa se dá principalmente no setor sucroenergético, a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar para geração de eletricidade. Assim, associada ao desenvolvimento de novos produtos, como o etanol lignocelulósico, proporcionam uma sinergia com o açúcar e o etanol convencional (E1G), capaz de reduzir os custos de produção e aumentar a competitividade do negócio. Além disso, fornece sua parcela de contribuição na oferta de energia e na mitigação da emissão de gases de efeito estufa (GEE), com consequente redução do aquecimento global.

O capítulo IV desta dissertação teve como base o artigo "*Optimal allocation of the sugarcane bagasse to produce bioelectricity and second-generation ethanol in Brazil*", a ser publicado em 2017 (CARPIO, 2017). Como principal diferença, foi considerada na análise a possibilidade de venda do etanol lignocelulósico na Califórnia, dados os incentivos a esse biocombustível no mercado americano. Também foram alterados alguns parâmetros da unidade produtora, assim como os custos operacionais do etanol lignocelulósico e da bioeletricidade.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar a relação risco/retorno da utilização do bagaço de cana-de-açúcar do setor sucroalcooleiro, para a produção de etanol lignocelulósico (ou de segunda geração) e para a produção de eletricidade, considerando a competição pelo seu uso, visto que é insumo comum aos dois processos. Mais especificamente, pretende-se apresentar uma adaptação de uma ferramenta de finanças, para se determinar uma carteira eficiente, segundo a teoria moderna do portfólio desenvolvida por Markowitz

³ A 21ª Conferência das Partes: Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP 21) teve como objetivo limitar o aumento da temperatura no globo terrestre a um máximo de 2°C até 2100 e contou com a presença do governo de cerca de 190 países. O Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de GEE em 37% e 43% até 2025 e 2030, respectivamente, tendo como base os níveis de 2005. (ONU, 2016)

(1952), considerando as particularidades do setor sucroenergético e a introdução desta nova tecnologia de produção de etanol. Há também o objetivo secundário de avaliar o impacto na relação risco/retorno, a partir da introdução de pacotes tecnológicos na produção desses dois biocombustíveis derivados da biomassa da cana, assim como, da introdução de um prêmio para o etanol avançado.

De forma a tentar vislumbrar diferentes perspectivas para a formação de um “portfólio eficiente”, nos mercados nacional e californiano, para o E2G e nos ambientes de contratação livre e regulado, para a bioeletricidade, foram simulados quatro cenários, que diferem entre si pelos rendimentos e pelos custos de produção desses biocombustíveis. O quinto e último cenário considera o estabelecimento de um prêmio para o etanol lignocelulósico, comercializado no estado de São Paulo.

Em suma, este estudo pretende fornecer subsídios para a tomada de decisão sobre a melhor alocação do bagaço para a produção de etanol anidro e bioeletricidade, em seus diferentes mercados, considerando a relação risco/retorno, além de apresentar possíveis tecnologias para o desenvolvimento da produção de energia renovável no Brasil.

Capítulo II – Fundamentação Teórica

II.1. Descrição do Problema

A demanda mundial de energia é crescente, tendo apresentado uma taxa de crescimento de 2,3% a.a. entre 2005 e 2015 (BP, 2016). Conforme mencionado no item I.1, as fontes fósseis tem grande participação na matriz energética mundial, até mesmo no Brasil. A queima destes combustíveis emite gases de efeito estufa, dentre eles o CO₂, ocasionando as mudanças climáticas globais. Uma das formas de reduzir os problemas climáticos globais e atender à crescente demanda de energia seria desenvolver e incentivar combustíveis que apresentem menor geração de GEE que os combustíveis fósseis.

O setor sucroenergético pode suprir parte da demanda de energia através da produção de etanol e bioeletricidade, com a efficientização das tecnologias existentes e o desenvolvimento de outras novas, contribuindo para a mitigação de GEE e para a descarbonização da matriz.

Recentemente, uma nova tecnologia de produção de etanol pode ser considerada como uma quebra de paradigma na produção de biocombustíveis, pois utiliza resíduos da produção agrícola como insumo, como a biomassa da cana, sem aumento de área produtiva. Apesar disso, atualmente esta tecnologia ainda apresenta alguns problemas que fazem com que sua produção seja intermitente e apresente custos de produção superiores aos do etanol de primeira geração. Com o desenvolvimento e a disseminação desta tecnologia haverá um *trade-off* para o uso energético do bagaço, anteriormente dedicado à queima para geração elétrica. Assim sendo, será necessário responder a algumas perguntas como, por exemplo: “Qual a melhor alocação do bagaço?” e “Qual a relação risco / retorno mediante cada alocação do bagaço entre esses dois ativos?”.

De forma a auxiliar o empresário na análise da competição pelo bagaço da cana, para a produção do E2G e da bioeletricidade, serão utilizados os conceitos da teoria da carteira eficiente de Harry Markowitz. Com essa ferramenta, busca-se representar uma situação real, onde o tomador de decisão alocará o bagaço disponível entre esses dois biocombustíveis, buscando o máximo retorno, dada a sua predisposição a um nível de

risco, ou o mínimo risco para um retorno esperado. Esta situação real considera uma unidade sucroenergética integrada (produção de E1G e de E2G) operacional, em diferentes estágios tecnológicos (com diferentes custos de produção e rendimentos) para cada um dos cenários adotados.

Neste trabalho, não foram considerados na análise os custos de capital para a implantação e/ou efficientização dos processos produtivos desses dois biocombustíveis. O objetivo é auxiliar o empresário a realizar uma análise prévia aos Estudos de Viabilidade Técnica-Econômica - EVTE, visto que possibilita identificar qual o nível de custo de produção de E2G, a partir do qual ocorre uma considerável redução dos riscos e um crescimento dos retornos com a introdução desta tecnologia.

II.2. O Setor Sucroenergético

A maior parte do território brasileiro está localizada entre os trópicos de Câncer e de Capricórnio, conferindo uma grande incidência de radiação solar. Além disso, o país conta com disponibilidade de água e boa qualidade dos solos. Essas características conferem uma competitividade natural para a cultura da cana-de-açúcar (MALUF, 2014).

Segundo a Conab (2016), a área colhida de cana-de-açúcar, destinada ao setor sucroenergético, foi de 8,6 milhões de hectares na safra 2015/16, com uma quantidade de cana processada de 665,6 milhões de toneladas, em cerca de 380 unidades produtoras de açúcar e etanol. A região Centro-Sul correspondeu a 92,7% da produção total, sendo o estado de São Paulo o maior produtor com 55%, seguido por Goiás e Minas Gerais, com 11% e 9,8%, respectivamente.

O setor sucroenergético é um setor intensivo em mão de obra, especialmente na área agrícola, e estima-se que representou 1,3% dos empregos formais de 2015, ou seja, aproximadamente 620 mil empregados. Se forem considerados os empregos sazonais, gerados no pico da colheita, esse percentual sobe para 2% (cerca de um milhão). A relação de empregos formais gerados sobe para 7%, caso se considere os empregos indiretos (MTE, 2016).

O Produto Interno Bruto (PIB) para a cadeia produtiva da cana-de-açúcar no ano de 2015 foi estimado em R\$ 152 bilhões (CEPEA, 2016), o que equivale a quase 2% do PIB nacional nesse mesmo ano. A receita auferida é resultado, principalmente, das vendas açúcar, etanol e bioeletricidade. A Figura 8 no Anexo A apresenta as utilizações possíveis dos produtos da cana.

II.2.1. Açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de açúcar com cerca de 34 milhões de toneladas produzidas em 2015, além disso, também é o maior exportador, com uma participação de 40% de todo o comércio mundial, neste mesmo ano, cerca de 23 milhões de toneladas. (MAPA, 2016).

II.2.2. Etanol

O início da utilização do etanol como combustível no Brasil ocorreu na década de 1930, com a adição do etanol anidro na gasolina com percentuais variando de acordo com a região, tendo como objetivo estabilizar o preço do açúcar no mercado interno (BNDES, 2007). Após algumas décadas de altos e baixos, passando pela introdução do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975 (motivado pelas crises mundiais do petróleo, em 1973 e 1979), e pela extinção do programa⁴ em 1990 (após uma grave crise de desabastecimento entre 1989 e 1990), as vendas de etanol cresceram consideravelmente a partir de 2005, com o desenvolvimento e a introdução dos veículos *flexfuel* em 2003⁵.

As vendas deste tipo de veículo cresceram rapidamente, saindo de 21,6% do total de veículos leves em 2004, para 85,6% em 2007. Com isto, a frota de veículos leves com esse tipo de motor vem crescendo significativamente, tendo impacto direto na demanda

⁴ Os fatores que levaram à extinção do programa foram: a queda do preço do petróleo no mercado internacional e a sua manutenção em patamares mais baixos entre 1985 e 1990; o aumento gradativo da produção de brasileira de petróleo, reduzindo a dependência externa pela *commodity*; a recuperação dos preços internacionais do açúcar no fim da década de 1980 e a piora da situação econômica do Brasil, levando o Governo a retirar os subsídios e os recursos para o financiamento do setor (MACÊDO, 2011).

⁵ Os veículos movidos exclusivamente a etanol combustível deixaram de ser produzidos em 2006.

de etanol e alavancando a produção brasileira do biocombustível (BASTOS, V. D, 2007). Em 2015, os veículos *flexfuel* representaram aproximadamente 88% das vendas de veículos leves, atingindo uma participação de 65% na frota total, nesse mesmo ano (EPE, 2016b).

Através do Gráfico 1 é possível visualizar as oscilações do consumo de etanol anidro⁶ e hidratado carburantes, de acordo com as mudanças institucionais relativas a esses biocombustíveis. Ressalta-se que, em 2015, o consumo total de etanol carburante foi de cerca de 30 bilhões de litros, com 10,9 bilhões de litros de anidro e 18,8 bilhões de litros de hidratado.

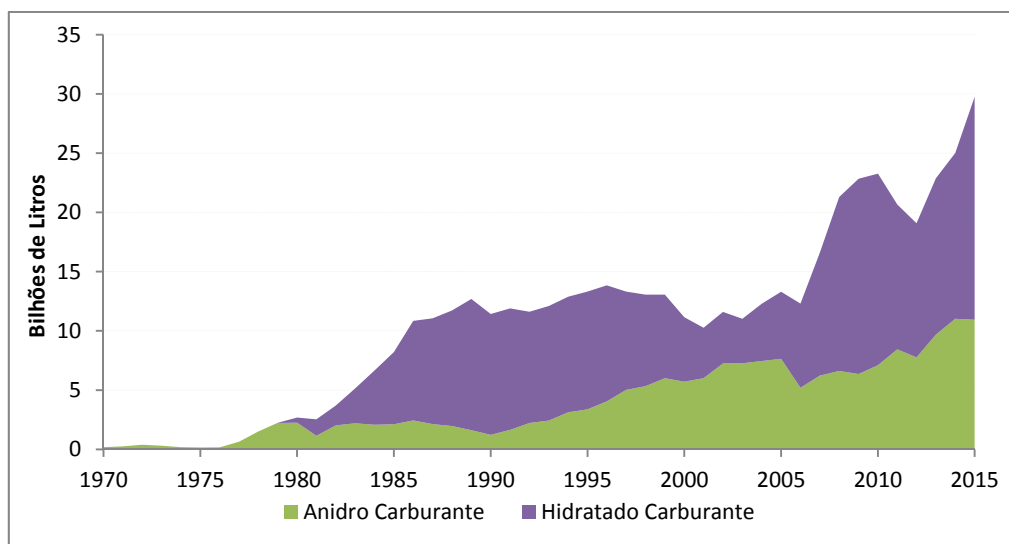


Gráfico 1: Consumo de etanol carburante

Fonte: (BEN, 2016)

Os biocombustíveis tiveram, inicialmente, a função de estabelecer uma alternativa doméstica que complementasse os combustíveis fósseis em países não produtores ou sem autossuficiência em petróleo/derivados, com a consequente diminuição dos gastos com importação. Posteriormente, surgiram as preocupações com as mudanças climáticas e com o aquecimento global e poluição local. Com isso, os biocombustíveis

⁶ O consumo de etanol anidro carburante se dá através de sua mistura na gasolina A, com um teor de 27% no volume total, segundo portaria do MAPA (2015).

ganharam peso na pauta do comércio internacional de forma a contribuir para a mitigação dos impactos ambientais globais. Ressalta-se que, em 2014, foram comercializados 7,1 bilhões de litros de etanol no mundo, tendo como principais *players* EUA e Brasil, com 45% e 20%, respectivamente. O principal destino das exportações brasileiras desse biocombustível foram os EUA, com 728 milhões de litros, de um total de 1,4 bilhões de litros (ISO, 2015).

Diversos países estabeleceram metas de uso de biocombustíveis em suas matrizes, como se pode observar através da Tabela 17 no anexo B (BIOFUELSDIGEST, 2016). Os países que possuem as metas mais contundentes, além da brasileira, são os Estados Unidos e os da União Europeia (metas determinadas pelo bloco econômico).

II.2.3. Bioeletricidade da Cana (Cogeração)

Em novembro de 2016, o setor sucroenergético registrou uma potência outorgada⁷ de 11,1 GW, aproximadamente 7% do total outorgado no Brasil. A geração elétrica a partir da biomassa da cana, comumente chamada de cogeração⁸, é a terceira mais importante na matriz elétrica brasileira em termos de capacidade instalada, atrás somente da fonte hídrica e das termelétricas com gás natural (ANEEL, 2016).

Em 2015, as usinas sucroenergéticas produziram 34,2 TWh a partir da biomassa da cana, sendo 13,7 TWh consumidos internamente no processo de produção do etanol, do açúcar e consumo industrial e a parcela restante, de 20,4 TWh, vendida e injetada no Sistema Interligado Nacional – SIN (BEN, 2016). Ressalta-se a complementaridade com a fonte hídrica, uma vez que o aumento da geração da bioeletricidade ocorre durante o período de estiagem.

A comercialização de energia elétrica no Sistema elétrico brasileiro ocorre nos Ambientes de Contratação Regulada - ACR e Livre - ACL. No ACR, estão

⁷ A potência outorgada é aquela considerada no Ato de Outorga.

⁸ A cogeração é definida como o processo combinado de produção de energia elétrica e térmica, destinando-se ambas ao consumo próprio ou de terceiros, conforme definido no decreto de lei n.º 186/95.

concentradas as operações de compra e venda de energia por meio de leilões. No ACL, atuam os agentes de geração, de comercialização, de importação, de exportação e os consumidores livres, em contratos bilaterais de compra e venda de energia, livremente negociados (TATONI, 2012). Em 2015, das 376 unidades sucroenergéticas em operação, apenas 40% exportaram energia para o SIN, seja através do ACL ou do ACR (EPE, 2016b).

II.2.4. Alocação de Insumos

No negócio da cana existe a disputa pelos açúcares⁹ contidos nessa planta, para a fabricação de açúcar e etanol. Com isso, é necessário alocar esses insumos de forma a se obter a maior rentabilidade, considerando os custos de produção e os preços de mercado de cada um dos produtos finais, assim como as demandas obrigatórias, como mandatos de biocombustíveis no mundo.

A introdução e a disseminação do etanol lignocelulósico trará uma nova utilidade para a biomassa da cana, anteriormente dedicada à queima para geração elétrica. Isto acarretará na competição por esse insumo, da mesma forma que o açúcar e o etanol competem pelos açúcares da cana.

Em suma, o Brasil possui grande potencial produtor capaz de atender tanto às demandas de segurança energética nacional, quanto de redução da emissão de GEE, através do uso de fontes renováveis em sua matriz energética, como o etanol e a bioeletricidade da cana. No entanto, a disponibilidade de recursos por si só não garante a viabilidade do negócio, os insumos devem ser alocados da melhor forma possível, considerando o risco que se está disposto a correr e o retorno que se deseja.

II.3. Biorrefinaria

Uma biorrefinaria pode ser definida como um complexo integrado capaz de produzir, por rota química ou biotecnológica, combustíveis, químicos e eletricidade, tendo como

⁹ Sacarose e pelos açúcares redutores (glicose e frutose).

insumo matérias-primas renováveis e/ou seus resíduos, de maneira integral e diversificada (BASTOS, 2007, ONDREY, 2006).

Segundo Ondrey (2006), especialistas acreditam que as biorrefinarias possam se tornar uma indústria-chave do século XXI, em virtude da importância das tecnologias que empregam e dos efeitos sobre o paradigma industrial.

As unidades sucroenergéticas brasileiras podem ser consideradas exemplos de biorrefinaria, com a produção combinada de açúcar, etanol e outros produtos químicos, assim como energia elétrica e calor com base na biomassa residual (MACEDO, 2005).

II.3.1. Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é originária da Ásia Meridional e pertence ao gênero *Saccharum*, da família das gramíneas. Esta pode ser dividida em sistema radicular, colmos, pontas e folhas (verdes e secas).

Sua composição pode variar de acordo com a variedade, com o solo, o clima, a disponibilidade de água e a época de colheita na safra, dentre outros aspectos. Em média, cada tonelada de cana contém, cerca de 150 kg de açúcares (principalmente sacarose, que é utilizada para a produção de açúcar e etanol), 125 kg de fibra (principal componente do bagaço, que é utilizado para gerar calor de processo e eletricidade para a indústria), 140 kg de pontas e folhas (a maior parte é deixada no campo após a colheita da cana crua e uma pequena parte é levada para a queima na indústria junto com a cana colhida mecanicamente¹⁰) e 585 kg de água (HASSUANI *et al.*, 2005).

O bagaço de cana-de-açúcar é o subproduto resultante dos procedimentos de limpeza, preparo e extração do caldo de cana (por meio de ternos de moagem ou de difusores). Este possui de 40 a 60% de celulose (polímero linear de glicose, rígido e difícil de ser quebrado) sua hidrólise gera glicose, um açúcar de seis carbonos (C6), de 20 a 40%

¹⁰ Algumas unidades estão pesquisando e investindo em formas de recuperação econômica da palha, seja por enfardamento ou por diminuição da velocidade do ventilador das colhedadeiras, para a queima junto com o bagaço durante a entressafra, o que aumentaria o período de geração.

hemicelulose (polímero amorfo, constituído, em geral, por uma cadeia principal de xilose (C5) com várias ramificações de manose (C6), arabinose (C5), galactose (C6), ácido glicurônico etc.); o restante (10%-25%) é composto majoritariamente por lignina (esse material pode ser usado como fonte de energia para os processos) e por traços de minerais, ceras e outros compostos (BNDES, 2008).

A composição das palhas e pontas apresenta semelhança com a do bagaço quanto à celulose e à hemicelulose, porém possui menor quantidade de lignina, aproximadamente 30% menor, e um maior teor de cinzas.

II.3.2. Processo Produtivo Convencional

Após o corte da cana-de-açúcar no campo, esta é carregada até a unidade industrial para se realizar o processamento. Em termos de processo industrial, as tecnologias de produção do etanol e do açúcar são muito semelhantes nas unidades sucroenergéticas, apesar de haver variações nos tipos e qualidades dos equipamentos, controles operacionais e, principalmente, nos níveis gerenciais.

A unidade industrial pode ser dividida em várias seções, dentre as quais se destacam, recepção/preparo/moagem, fábrica de açúcar e destilaria de etanol. A Figura 1 mostra um diagrama de blocos do processamento da cana.

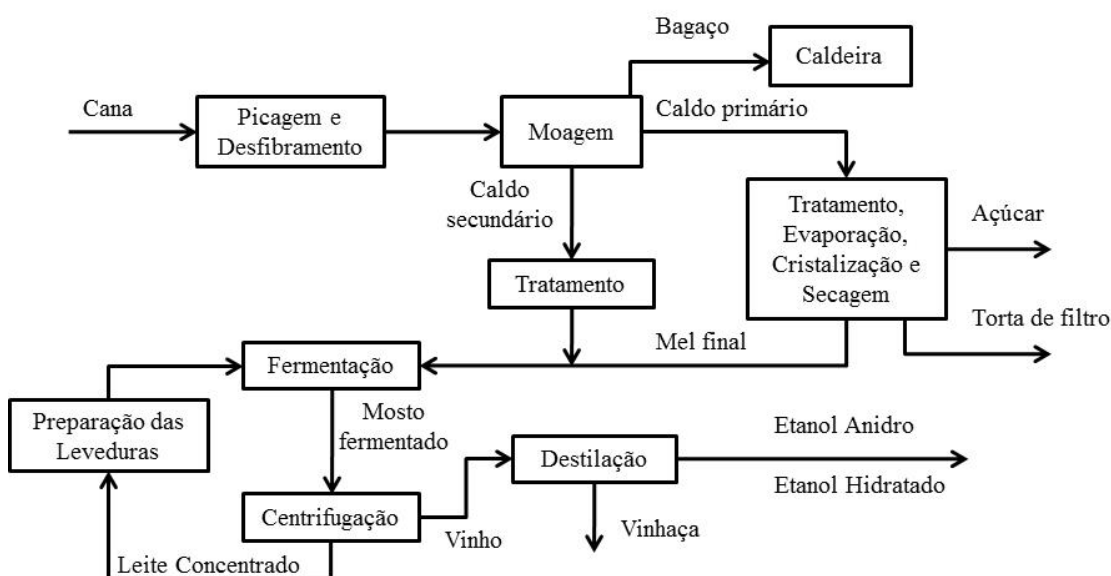


Figura 1 - Processamento da cana para produção de açúcar e etanol

Fonte: Elaboração Própria a partir de CGEE, 2009

Dentro da usina, é realizada a limpeza da cana para reduzir as impurezas, que afetam negativamente a eficiência geral do processo. Aquela colhida manualmente (cana inteira) é lavada na própria mesa de recepção e aquela, cujo corte ocorreu por intermédio de colhedoras (cana picada), passa por um sistema de limpeza a seco, que é baseado em jatos de ar (CGEE, 2009).

Após a limpeza, a cana segue para o sistema de preparo e extração, realizada pelos processos de moagem e difusão, sendo o primeiro mais utilizado no Brasil. No sistema de moagem, a extração do caldo se realiza sob a pressão de rolos, montados em conjuntos sucessivos de ternos de moenda, com o objetivo de separar o caldo das fibras, que são utilizadas como combustível na planta de energia da usina. No sistema de difusores, a cana picada e desfibrada passa por lavagens com água quente, liberando seus açúcares por lixiviação, e, por fim, passa por um rolo de secagem, do qual sai o bagaço a ser utilizado nas caldeiras (CGEE, 2009, BNDES, 2008).

O caldo resultante do processo de extração é tratado e, posteriormente, destinado à produção de açúcar ou etanol. Para a produção de açúcar, o caldo tratado é concentrado em evaporadores e cozedores para cristalização da sacarose.

Para a produção do biocombustível, o caldo tratado é evaporado e, eventualmente, é misturado com o melaço, resultando em uma solução açucarada (mosto), pronta para ser fermentada. Nas dornas de fermentação são adicionadas leveduras ao mosto, que, após um período de 8 a 12 horas, dá origem ao vinho (concentração de 7% a 10% de álcool). Este é destilado nas colunas de destilação, resultando no etanol hidratado e a vinhaça ou vinhoto¹¹. Caso o objetivo seja o etanol anidro, é necessário realizar a desidratação nas colunas de desidratação, utilizando-se alguns produtos / equipamentos como: cicloexano, monoetilenoglicol ou peneiras moleculares (CGEE, 2009, BNDES, 2008).

¹¹ O vinhoto é caracterizado como efluente das destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante e tem uma proporção de 10 a 13 litros por litro de etanol produzido (CGEE, 2009).

II.4. Bioeletricidade no Sistema Elétrico Brasileiro

II.4.1. Comercialização de Energia

Em 2004, o critério utilizado para concessão de novos empreendimentos de geração foi alterado. Anteriormente, o maior valor oferecido pela outorga determinaria o vencedor, e, a partir daquele ano, o investidor que oferecesse o menor preço para a venda da energia produzida pelas futuras usinas passou a vencer os leilões (ANEEL, 2008).

Além disso, foram instituídos dois ambientes para a celebração de contratos de compra e venda de energia. O Ambiente de Contratação Regulada (ACR), que é exclusivo para geradores e distribuidores, e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), do qual participam geradores, comercializadores, importadores, exportadores e consumidores livres e especiais. Há ainda o mercado de curto prazo (ou mercado de diferenças), onde se realizam os ajustes entre os volumes contratados e os volumes medidos de energia (CCEE, 2016).

De acordo com o modelo institucional do setor, o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) é a única forma de as distribuidoras contratarem grandes volumes de suprimento de energia para o longo prazo (TOLMASQUIM, 2016). Como são obrigadas a contratar 100% de sua demanda, necessitam estimar a evolução do consumo de seus clientes, a qual deve ser comunicada à Empresa de Pesquisa Energética, para que seja estimada a quantidade de energia a ser contratada dos geradores nos futuros leilões.

A quantidade de energia comercializada nos leilões é um percentual da capacidade de geração da usina (limitada pela garantia física), podendo o restante da energia ser comercializado no Ambiente de Contratação Livre. Portanto, o gerador deve elaborar uma estratégia de preços e quantidades de energia a serem ofertados nos leilões visando a melhor rentabilidade do seu empreendimento (TOLMASQUIM, 2016).

No Ambiente de Contratação Livre, a negociação se dá entre vendedores e compradores que negociam as cláusulas dos contratos¹², como volumes, preços, prazos de suprimento e condições de entrega. Os vendedores são aqueles geradores enquadrados como título de serviço público, autoprodutores e produtores independentes (TOLMASQUIM, 2016). Enquanto que os compradores são os consumidores com demanda superior a 0,5 MW (megawatt), que adquirem a energia para uso próprio (ANEEL, 2008). Estas operações são acordadas por meio de Contratos de Compra de Energia registrados na CCEE.

O Mercado de Curto Prazo ou Mercado de Diferenças ou Mercado “Spot” é o local onde são contabilizadas as diferenças entre a quantidade de energia contratada pelos agentes e a quantidade de geração e de consumo efetivamente verificados e atribuídos aos respectivos agentes. Essas diferenças são liquidadas posteriormente, valoradas ao Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) (TOLMASQUIM, 2016).

Considerando os quarenta e nove leilões de energia¹³, realizados até maio de 2016, as usinas sucroalcooleiras realizaram vendas em vinte e um deles, o que proporcionará um total de 1,8 GW_{méd} ao fim de 2021, valor que poderá ser ampliado com contratação adicional em futuros leilões. Adicionalmente, ainda existe um montante extra certame que pode ser comercializado no ACL. O Gráfico 2 apresenta a quantidade de energia já contratada no ambiente regulado e aquela passível de comercialização no mercado livre, em acordos bilaterais (EPE, 2016a).

¹² As transações geralmente são intermediadas pelas empresas comercializadoras, cuja função é estabelecer o contato entre as duas pontas e dar liquidez ao mercado (ANEEL, 2008).

¹³ 23 Leilões de Energia Nova (A-3 e A-5), 15 de Energia Existente (A-1), 3 de Fontes Alternativas (LFA) e 8 de Energia de Reserva (LER).

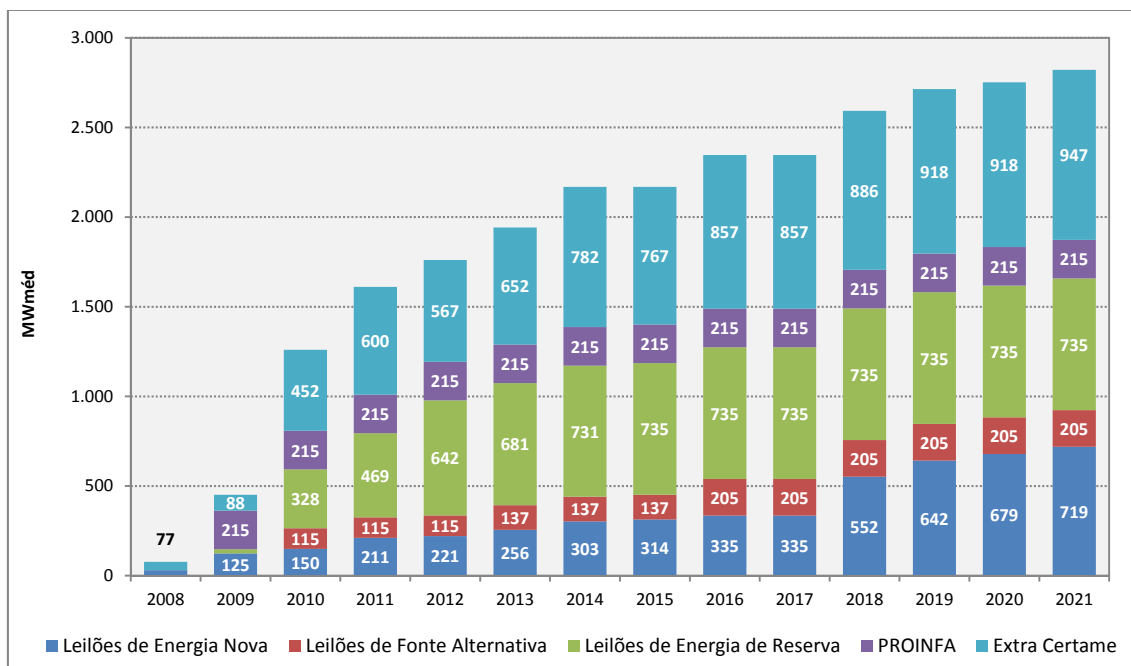


Gráfico 2: Energia contratada e extra certame das usinas vencedoras nos Leilões de Energia

Fonte: Adaptado de EPE (2016a)

II.4.2. Cogeração a partir da biomassa da cana

O processo de cogeração é definido pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2006), como um “...processo de produção combinada de calor útil e energia mecânica, geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia química disponibilizada por um ou mais combustíveis.”. Este processo apresenta uma eficiência maior (75% - 90%) que a obtida em sistemas de geração exclusiva de vapor ou potência (30% - 50%). No entanto, apesar de ser uma tecnologia eficiente, o montante de energia gerado e o nível de eficiência do sistema dependem também da rota tecnológica adotada, como, tipo e porte da caldeira, tipo de turbina e tipo de ciclo termodinâmico (DANTAS, 2013).

Os primeiros sistemas de cogeração surgiram juntamente com a indústria da energia elétrica no final do século XIX, na Europa, e início do século XX, nos EUA. Nesta época, o fornecimento de eletricidade proveniente de grandes centrais ainda era incipiente, levando consumidores de médio e grande porte a instalarem suas próprias

centrais geradoras. Os eventuais excedentes de eletricidade e vapor eram vendidos a consumidores próximos (SANTOS, 2010).

Ao longo dos anos, novas tecnologias e conceitos de geração de sistemas elétricos surgiram, se consolidando na forma de grandes centrais hidrelétricas, termelétricas, nucleares, carvão, gás natural e óleo combustível, de forma centralizada. Estas forneciam energia abundante a um baixo custo, fazendo com que os sistemas de cogeração diminuíssem sua participação na matriz elétrica (TATONI, 2012).

No setor sucroenergético, são necessários diversos tipos de energia para realizar o processamento industrial da cana: energia térmica para os processos de aquecimento e concentração; energia mecânica para acionar as moendas, bombas e ventiladores de grande porte e energia elétrica para acionamentos diversos, como bombeamento, sistemas de controle e iluminação, dentre outros (BNDES, 2008). A tecnologia de cogeração fornece todos estes tipos de energia, utilizando como combustível, principalmente, o bagaço, subproduto do processamento industrial da cana e, em menor parte, a palha que vem junto com a cana colhida mecanicamente.

Segundo SEABRA (2008), até o fim dos anos 1990, o objetivo das unidades sucroalcooleiras era a autossuficiência em energia elétrica, com poucos empreendimentos comercializando os excedentes de eletricidade produzidos. Os motivos eram a dificuldade de comercializar energia elétrica livremente, a dificuldade de estocagem do bagaço e a baixa relevância do mercado de bagaço (CASTRO *et al.*, 2008). Neste período, conforme DIAS (2011), o padrão tecnológico se baseava no Ciclo Rankine com turbinas de contrapressão e caldeiras de baixas pressão e temperatura (22 bar e 300°C).

Atualmente, existe uma grande variação de rotas tecnológicas no setor sucroenergético, devido, inclusive, ao tempo de vida útil médio de 25 anos de equipamentos como caldeiras e turbinas. Entretanto, pode-se exemplificar, através da Figura 2, a

configuração típica¹⁴ de uma planta de cogeração do setor sucroenergético, cujo objetivo é a autossuficiência energética da produção de etanol e de açúcar.

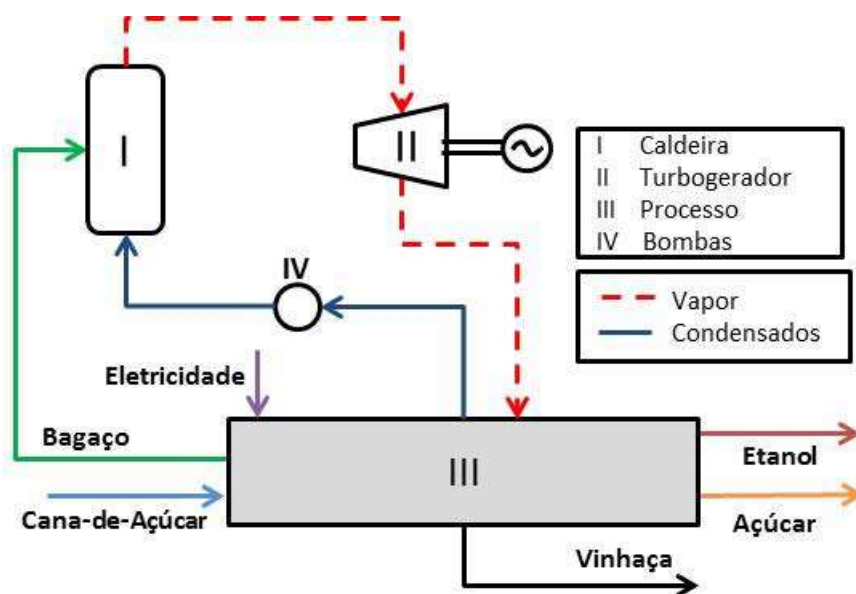


Figura 2: Sistema de cogeração baseado no ciclo Rankine, com turbinas de contrapressão

Fonte: Adaptado de Dias, 2011

O processo pode ser resumido da seguinte forma: a queima do bagaço nas caldeiras aquece o líquido de trabalho e produz vapor de alta pressão, que ao passar pelas turbinas gera energia elétrica e mecânica. O vapor de escape das turbinas e o vapor à jusante das válvulas de expansão se encontram a baixa pressão e atende aos usos térmicos da indústria.

Segundo Macedo *et al.* (2008), as usinas brasileiras consomem cerca de 16 kWh por tonelada de cana em acionamentos mecânicos (preparo e moagem da cana) e 14 kWh por tonelada de cana em demanda de energia elétrica em geral, totalizando 30 kWh por tonelada de cana. Portanto, plantas com capacidade de geração acima deste valor poderiam comercializar os excedentes energéticos no Sistema Interligado Nacional.

¹⁴ Existem variantes construtivas desta configuração que podem ampliar a produção de energia elétrica por tonelada de cana processada, mas requerem investimentos adicionais.

Existem formas de se aumentar os excedentes energéticos com a redução do consumo de vapor no processo¹⁵. No entanto, a utilização de caldeiras entre 65 bar e 100 bar em detrimento de caldeiras de 21 bar, proporciona um considerável aumento da energia gerada, com a mesma quantidade de biomassa, visto que estas trabalham com pressões e temperaturas maiores. Adicionalmente, conforme mencionado acima, o recolhimento de palhas e pontas proporciona uma quantidade adicional de combustível para geração na entressafra, inclusive. Neste caso, torna-se necessária a utilização de turbinas de condensação com extração.

A utilização de turbinas de condensação com extração, mesmo sem a adição de palhas e pontas, permite uma maior produção de eletricidade e de forma mais flexível. A presença de níveis de aquecimento na água que alimenta a caldeira aumenta expressivamente a eficiência global da planta de cogeração. Adicionalmente, a presença de um condensador no exaustor da turbina elimina o vínculo de produção entre o sistema de geração elétrica e a demanda térmica do processo, permitindo a operação no modo de cogeração, quando houver produção de etanol e açúcar e, no modo de geração elétrico puro, fora da safra. (CORRÊA NETO e RAMON, 2002). Visto o elevado investimento em sistemas de cogeração que operam com turbinas de condensação com extração, é necessário que o consumo de vapor de processo seja baixo para que as turbinas tenham condições de operar com altas vazões e gerar grandes quantidades de energia elétrica. A Figura 3 apresenta o fluxograma básico de funcionamento de uma planta de cogeração com turbinas de condensação e extração.

¹⁵ O consumo de vapor do processo pode ser reduzido através de alguns processos como, por exemplo: substituição de alguns acionamentos mecânicos por acionamentos elétricos; concentração do caldo em evaporadores múltiplo efeito; destilação de múltiplo efeito e desidratação com peneiras moleculares (DIAS, 2011).

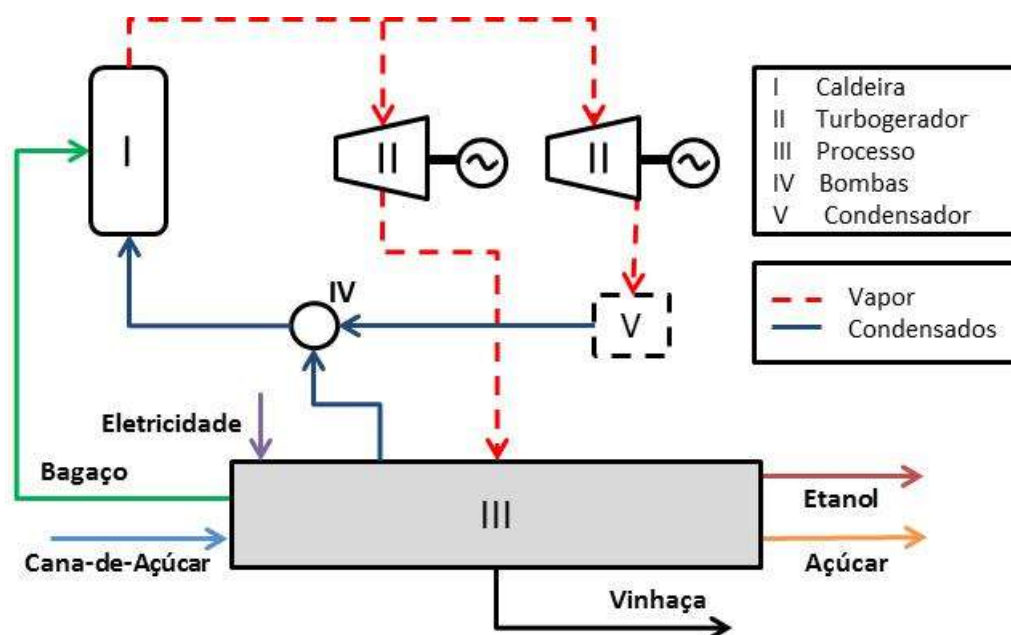


Figura 3: Sistema de cogeração baseado no ciclo Rankine, turbinas de condensação

Fonte: Adaptado de Dias, 2011.

O processo pode ser resumido da seguinte forma: a queima do bagaço nas caldeiras produz vapor de alta pressão, que ao passar pelas turbinas é expandido e gera energia elétrica, sendo depois condensado e bombeado de volta para a caldeira. Para atender as demandas térmica e mecânica do processo produtivo, utiliza-se o vapor extraído em ponto intermediário da expansão na turbina e o vapor de contrapressão das turbinas de acionamento mecânico (DANTAS, 2013).

Em suma, nos últimos anos, os grupos sucroalcooleiros têm buscado diversificar seu negócio (açúcar e etanol) através da geração de excedentes elétricos para comercialização. Com isso, apesar de parte das unidades do setor ainda possuírem sistemas de caldeiras e turbinas de contrapressão operando a 22 bar de pressão e 320°C, tem aumentado o número sistemas de cogeração¹⁶ que trabalham com pressão entre 60 bar e 65 bar e 480°C de temperatura. Assim como se têm implantado sistemas mais modernos, com caldeiras que trabalham com pressão acima de 90 bar e temperatura de

¹⁶ Segundo os fabricantes, a maior parte das vendas é referente a caldeiras com capacidade de geração de vapor entre 150 e 250 t/h e eficiência acima de 85% (base PCI). Existem alguns sistemas que contam com caldeiras de 300 a 450 t/h de vapor gerado.

520°C, com turbinas de condensação e extração controlada e contrapressão e, em alguns casos, com a queima da palha misturada ao bagaço, acima de 5% (CGEE, 2009 e EPE, 2016b).

II.4.3. Rendimentos e Custos de cogeração

II.4.3.1. Rendimento

Segundo Lopes (2013), a geração de excedentes de eletricidade tem relação direta com a tecnologia de conversão, com o consumo de vapor nos processos de produção de etanol e açúcar e com a disponibilidade de biomassa.

Conforme descrito no item II.4.2, existem várias configurações possíveis de geração elétrica em unidades sucroalcooleiras, que utilizam equipamentos mais antigos e de baixa capacidade e/ou eficiência, com sistemas térmicos de baixa pressão e temperatura e turbogeradores menos flexíveis como o de contrapressão. Assim como equipamentos mais modernos de alta capacidade, com sistemas térmicos de alta pressão e temperatura e turbinas mais flexíveis (condensação com extração).

Cada tipo de configuração fornece uma quantidade energia, que pode ser utilizada somente para o processo ou pode gerar excedentes para a comercialização, com a mesma quantidade de biomassa. Além disso, a redução do consumo de vapor no processo industrial, através da eletrificação de equipamentos, também pode elevar a disponibilidade de energia excedente, sem combustível adicional.

Adicionalmente, existem iniciativas para elevar a geração elétrica, a partir do aumento da disponibilidade de combustível (biomassa), como, por exemplo, maior percentual de palha levada para a unidade industrial. Isso pode se dar através do enfardamento da palha ou pelo carregamento da mesma junto à cana, apenas reduzindo a rotação dos ventiladores de limpeza das colhedoras¹⁷ (CGEE, 2009). Outras iniciativas consideram o

¹⁷ O carregamento de maior quantidade de palhas e pontas, junto com a cana, traz penalidades para a indústria como: aumento do custo de transporte, por redução da densidade de carga; aumento do consumo

uso de variedades de cana com maior percentual de fibras por tonelada, como é o caso da cana-energia¹⁸, o que também possibilitaria a geração durante todo o ano e não apenas na safra (VIGNIS, 2017).

A Tabela 1 mostra como as variações de tecnologia de conversão e de consumo de vapor nos processos de produção podem afetar a geração de excedentes de energia (produção total menos autoconsumo).

Tabela 1 - Parâmetros e rendimentos de sistemas de cogeração

Tipo*	Parâmetros do sistema de cogeração	Consumo de vapor	Período de geração**	Usa palha	Potência		Energia elétrica excedente	
					Safra	Entressafra	kWh/tc	kWh/t bag.
1	21 bar, 300° C	500 kg/tc	safra	não	12 MW	0 MW	10,4	41,6
2	42 bar, 400° C	500 kg/tc	safra	não	20 MW	0 MW	25,4	101,6
3	42 bar, 450° C	500 kg/tc	safra	não	22 MW	0 MW	28,3	113,2
4	65 bar, 480° C	500 kg/tc	safra	não	36 MW	0 MW	57,6	230,4
5	65 bar, 480° C	350 kg/tc	safra	não	43 MW	0 MW	71,6	286,4
6	65 bar, 480° C	500 kg/tc	ano todo	50%	45 MW	39 MW	139,7	558,8
7	65 bar, 480° C	350 kg/tc	ano todo	50%	49 MW	43 MW	153,0	612,0
8	90 bar, 520° C	385 kg/tc	ano todo	não	n/e	n/e	87,8	351,2
9	90 bar, 520° C	444 kg/tc	ano todo	25%	n/e	n/e	121,3	485,2
10	90 bar, 520° C	455 kg/tc	ano todo	50%	n/e	n/e	160,2	640,8
11	105 bar, 525° C	280 kg/tc	ano todo	50%	n/e	n/e	158,0	632,0

* Usina com moagem de cana de 12.000 t / dia.

** Geração no período de safra usando turbinas de contrapressão e no ano todo usando turbinas de extração-condensação.

n/e: Não encontrado.

Fonte: Elaboração própria a partir de BNDES (2008), CGEE (2009) e LOPES (2013)

Como se pode observar através da Tabela 1, somente a elevação da pressão das caldeiras já eleva consideravelmente os excedentes de energia elétrica. Analisando o consumo de vapor de processo e o uso da palha, tomando-se como exemplo os sistemas dos tipos 4, 5 e 7, verifica-se que, com a redução do consumo do vapor de processo de 500 kg para 350 kg de vapor por tonelada de cana processada (kg/tc), tem-se um

de energia no preparo; perda de extração de açúcares da cana; dificuldades para o tratamento do caldo e redução do rendimento da fermentação (FINGUERUT, J., 2014).

¹⁸ As canas "convencionais" têm em média 12,5% de fibras, em média, enquanto que uma variedade de cana-energia pode chegar a ter 26%, ou seja, mais que o dobro (VIGNIS, 2017).

aumento de 24% nos excedentes de energia elétrica, e com utilização parcial da palha, os excedentes se ampliam em 141%.

II.4.3.2. Custo Operacional de geração bioeletricidade

Os custos operacionais representam o custo de todos os recursos de produção que exigem desembolso da empresa para sua recomposição. Ou seja, o custo operacional é composto de todos os itens de custo considerados variáveis (combustível, pessoal, material, serviços e outras despesas, necessários ao funcionamento de equipamentos e instalações do sistema de produção), adicionados a uma parcela dos custos fixos (CPFL, 2015).

Segundo Reis (2011) apud CPFL (2015), como o consumo de combustível pode representar até 60% do custo de geração (ou mais, dependendo do combustível) o custo operacional é influenciado diretamente por este item. Conseqüentemente, este custo depende, em grande parte, do preço do combustível e do nível de produção da usina.

No caso da cogeração a partir da biomassa de cana, o bagaço é resíduo do processo industrial, portanto, poderia ser considerado como custo de combustível nulo. No entanto, existem movimentos por parte dos fornecedores de cana para precificar este combustível, visto que a usina auferir receita a partir da venda de eletricidade a partir de sua queima.

Dado que existem diversos tipos de configurações do sistema de geração elétrica, o custo operacional de geração elétrica também varia. De acordo com Dias (2012), o custo da produção de bioeletricidade varia entre US\$ 51,83 e US\$ 55,69 por MWh, o que daria um máximo de R\$ 113,40 por MWh, quando utilizada a taxa de câmbio média do ano de 2012 (1,00 US\$ = R\$ 2,04). A ANEEL (2008), em seu atlas, indica que o custo de geração a partir da biomassa da cana era de R\$ 101,75 por MWh em 2008. Já Grisi (2012) indica uma variação bem maior, de US\$ 52 a US\$ 99 por MWh, o que daria R\$ 106 a R\$ 202 por MWh. Por fim, utilizando-se do relatório de custos do PECEGE (2016), pode-se verificar que o custo operacional médio das unidades participantes ficou em torno de R\$ 125,70 por MWh, média das safras 2013/14 a 2015/16. Ressalta-se que a média das melhores unidades (3º quartil) tem custo de R\$ 101,00 por MWh.

II.5. Etanol Lignocelulósico

As preocupações acerca das emissões dos gases de efeito estufa (GEE), poluição local, segurança energética e balança comercial impulsionaram o desenvolvimento dos biocombustíveis, como substitutos dos seus semelhantes de origem fóssil, como a gasolina e o diesel (DIAS *et al.*, 2013). O etanol é o biocombustível que possui maior potencial de substituição à gasolina. No entanto, existem críticas com relação a sua produção, no que tange à pressão sobre os preços dos alimentos e às mudanças do uso do solo. Ainda que essas críticas não se apliquem integralmente ao etanol de cana brasileiro, que possui menor custo de produção e maior mitigação de GEE, quando comparado com a gasolina, é possível aumentar ainda mais sua sustentabilidade com a produção do etanol lignocelulósico (COSTA, 2016).

Esse etanol de 2ª geração (E2G) é obtido a partir de material celulósico, oriundo do processamento de qualquer biomassa de origem vegetal como, por exemplo, resíduos de milho, casca de arroz, bagaço e palha da cana, dentre outros (COSTA, 2016). Suas vantagens sobre o etanol convencional (E1G) são: a não competição com a produção de alimentos, a abundância e o baixo custo da matéria-prima (DIAS *et al.*, 2013). No Brasil, a pesquisa para obtenção do etanol 2G se concentra predominantemente nos resíduos da produção sucroalcooleira (bagaço, palha e ponta), que se encontram armazenadas ao lado ou a poucos quilômetros das fábricas e em grande quantidade (COSTA, 2016).

Além disso, é natural a alternativa de integração do processo de produção de E2G com a produção de E1G, visto o menor investimento aplicado, quando comparado às unidades autônomas de E2G, devido ao uso compartilhado de equipamentos. No entanto, em um processo integrado de E1G e E2G, o bagaço tem dois usos possíveis: combustível para a caldeira e insumo para a produção de etanol lignocelulósico (COSTA, 2016).

Embora a lignina, a celulose não hidrolisada e a palha da cana-de-açúcar possam ser pensadas como combustíveis complementares de caldeiras, a demanda crescente de vapor pelo processo integrado certamente representa um desafio para a viabilidade do processo. Além disso, a produção de E2G afeta definitivamente a geração de energia, o

que poderia representar uma diminuição no lucro da indústria, caso não alocados corretamente (COSTA, 2016).

II.5.1. Rotas de conversão

Para a conversão da biomassa em etanol lignocelulósico, podem ser utilizados dois grupos de tecnologias químicas: processos termoquímicos, que empregam matérias-primas com baixa umidade e temperaturas elevadas; e processos bioquímicos, desenvolvidos em meios com elevado teor de água e temperaturas próximas à condição ambiente (SEABRA *et al.*, 2010).

Seabra *et al.* (2010) compararam o processamento das frações lignocelulósicas da cana-de-açúcar por meio das rotas bioquímica e termoquímica em plantas adjacentes a unidades de processamento de cana-de-açúcar no Brasil, do ponto de vista técnico-econômico. Embora existam muitas incertezas sobre estimativas de custo para tecnologias avançadas, o estudo verificou que, ambos os sistemas possibilitam preços mínimos de venda para o etanol, muito semelhantes entre si e próximos ao do mercado de anidro no Brasil. Ressalta-se que podem ser obtidas importantes reduções de custos para a conversão bioquímica, através da integração de processos com a usina convencional, evitando despesas de capital e aumentando a utilização da capacidade instalada existente. No entanto, para a conversão termoquímica, a integração do processo é mais difícil, sendo uma opção quando se consideram sistemas de gaseificação.

Nesta dissertação será analisada somente a rota bioquímica, devido às características de integração com as unidades produtoras de etanol convencionais.

II.5.2. Processo produtivo

A produção de etanol de segunda geração consiste no pré-tratamento da biomassa, hidrólise dos seus polissacarídeos em açúcares fermentescíveis e sua posterior fermentação. Para executar essa tarefa, a hidrólise utiliza tecnologias complexas, com base no uso de rotas ácidas e/ou enzimáticas para a separação dos açúcares e remoção

da lignina (Dias *et al.*, 2012). A Figura 4 apresenta uma configuração simplificada do processo de produção de etanol lignocelulósico por meio da hidrólise da biomassa.

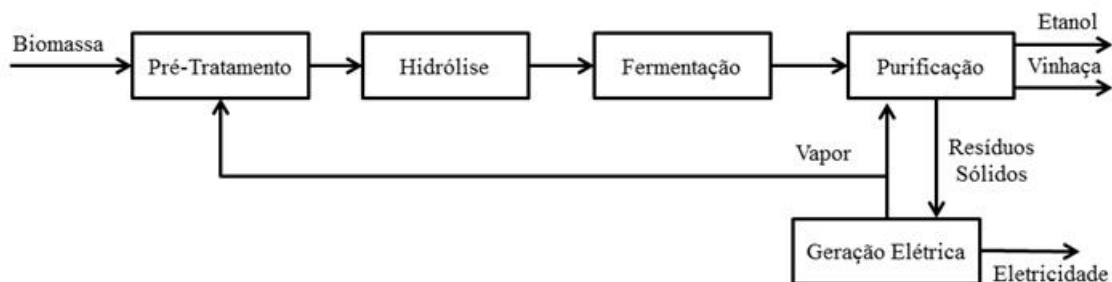


Figura 4: Fluxograma do processo de produção de etanol lignocelulósico

Fonte: Elaboração Própria a partir de HAMELINK *et al.* (2005)

II.5.2.1. /Pré-Tratamento

A primeira etapa do processo (Preparo) consiste no tratamento mecânico da matéria-prima, visando a limpeza e a quebra do material, a fim de causar a destruição da sua estrutura celular e torná-la mais acessível aos tratamentos químicos ou biológicos posteriores. Na etapa seguinte, ocorre a remoção da lignina, e a hidrólise da celulose e da hemicelulose. Para isso, existem diversos tipos de processos, com diferentes rendimentos e efeitos distintos sobre a biomassa e consequente impacto nas etapas subsequentes (BNDES, 2008 e SEABRA, 2008). Na Tabela 2, são apresentados os métodos mais utilizados para pré-tratamento da biomassa para hidrólise.

Tabela 2 - Processos para pré-tratamento da biomassa para hidrólise

Processo	Descrição	Tempo de reação	Rendimento de xilose	Custo*
Físicos				
Explosão de vapor	A biomassa triturada é tratada com vapor (saturado, 160° -260°C) seguido de uma rápida descompressão	1-10 min	45%-65%	>
Termo-hidrólise	Utiliza água quente a alta pressão (pressões acima do ponto de saturação) para hidrolisar a hemicelulose	30 min	88%-98%	>
Químicos				
Hidrólise ácida	Por meio do uso de ácidos sulfúrico, clorídrico, ou nítrico, concentrados ou diluídos	2-10 min	75%-90%	<
Hidrólise alcalina	Pelo uso de bases, como hidróxidos de sódio ou cálcio	2 min	60%-75%	<<
Organosolv	Uma mistura de um solvente orgânico (metanol, bioetanol e acetona, por exemplo) com um catalisador ácido (H ₂ SO ₄ , HCl) é usada para quebrar as ligações internas da lignina e da hemicelulose	40-60 min	70%-80%	
Biológicos	Utilização de fungos para solubilizar a lignina. Geralmente, é utilizado em combinação com outros processos			
Combinados				
Explosão a vapor catalisada	Adição de H ₂ SO ₄ (ou SO ₄) ou CO ₂ na explosão de vapor pode aumentar a eficiência da hidrólise enzimática, diminuir a produção de compostos inibidores e promover uma remoção mais completa da hemicelulose	1-4 min	88%	>
Afex (ammonia fiber explosion)	Exposição à amônia líquida a alta temperatura e pressão por um certo período de tempo, seguida de uma rápida descompressão		50%-90%	
Explosão de CO ₂	Similar à explosão de vapor		75%	

* O sinal < indica menor custo.

Fonte: Elaborado com base em BNDES (2008), SEABRA (2008) e HAMELINCK *et al.* (2005).

A efetividade do pré-tratamento considera diversos critérios: evita a necessidade de redução de tamanho das partículas da biomassa; preserva a fração das pentoses; limita a formação de produtos de degradação que inibam o crescimento dos microrganismos da fermentação; minimiza a demanda de energia e limita os custos (SEABRA, 2008).

II.5.2.2. Hidrólise

Após o pré-tratamento são obtidas duas frações, uma enriquecida com açúcares de hemicelulose (fração líquida) e outra enriquecida com celulose e lignina (fração sólida). Na etapa de hidrólise, a celulose é convertida em glicose, que pode ser catalisada por ácido diluído, ácido concentrado ou enzimas (celulase) (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Na hidrólise ácida (concentrada e diluída), a conversão da celulose em glicose ocorre em dois estágios, de forma a aproveitar as diferenças entre a hemicelulose e a celulose. O primeiro envolve a hidrólise da hemicelulose e no segundo estágio, busca-se otimizar a hidrólise da fração celulósica com o uso de temperaturas mais altas. Neste tipo de hidrólise, o custo de processo é elevado, além de gerar produtos degradantes, como fragmentos de furfural e lignina e compostos como ácido acético, difenóis, derivados de fenilpropano e cetonas que são inibidores da fermentação microbiana (NUNES, R. M. *et al.*, 2013).

Na hidrólise enzimática, o licor hidrolisado produzido nesta etapa, rico em glucose, é separado dos sólidos que não reagiram (celulignina residual), os quais são utilizadas como combustíveis no sistema de cogeração. No processo de usina integrada E1G e E2G, o licor hidrolisado é misturado com caldo da cana-de-açúcar. Assim, as operações de concentração, fermentação, destilação e desidratação são compartilhadas entre ambos os processos. (DIAS *et al.*, 2012). Algumas vantagens desse tipo de hidrólise é o alto rendimento de açúcares fermentescíveis e a não há formação de subprodutos, devido ao processo ser realizado por enzimas que atacam especificamente seu objeto. A desvantagem é que possui baixa concentração de nutrientes e necessita complementação nutricional, para que a fermentação ocorra de forma adequada (NUNES, R. M. *et al.*, 2013). A Tabela 3 apresenta uma comparação entre os diferentes processos de hidrólise.

Tabela 3 - Opções para a hidrólise da celulose

Processo	Insumo	Temperatura	Tempo	Sacarificação
Ácido diluído	< 1% H ₂ SO ₄	215° C	3 min	50%-70%
Ácido concentrado	30%-70% H ₂ SO ₄	40° C	2-6 h	90%
Enzimático	Celulase	70° C	1,5 dia	75%-95%

Fonte: Elaborado com base em BNDES (2008) e HAMELINCK *et al.* (2005).

Comparando-se esses três tipos de hidrólise da celulose, verifica-se que hidrólise com ácido diluído está em um estágio mais avançado do que as demais, mas possui baixos limites de rendimento (50%-70%). A hidrólise com ácido concentrado, apesar de apresentar rendimentos maiores e menores problemas com a produção de inibidores, quando comparado ao processo com ácido diluído, necessita de recuperação do ácido e de equipamentos resistentes à corrosão, o que compromete o desempenho econômico do processo. Por sua vez, a hidrólise enzimática apresenta altos rendimentos (75%-85%), podendo evoluir ainda mais (85%- 95%). Como não utiliza ácidos, pode obter grandes vantagens econômicas (equipamentos com materiais mais baratos e menor custo operacional) e ambientais (não há produção de resíduos) (BNDES, 2008 e HAMELINCK *et al.*, 2005). Seu ponto negativo é o tempo de reação da hidrólise.

II.5.2.3. Fermentação

A fermentação dos açúcares resultantes do processo de hidrólise segue os mesmos processos observados para a produção de bioetanol com base em amido ou açúcares, ou seja, fermentação por leveduras. No entanto, no caso da hidrólise, boa parte do hidrolisado é composta por açúcares de cinco carbonos, os quais não podem ser fermentados pela *Saccharomyces Cerevisiae* (DIAS, 2013, HAMELINCK, 2005 e BNDES, 2008).

Em alguns processos, a fermentação é realizada em duas etapas, o que pode comprometer a viabilidade econômica do projeto. Nesse caso, a fração de hemicelulose convertida em açúcares fermentescíveis (principalmente xilose - C5) é enviada ao processo de fermentação de pentoses (catalisada pela levedura *Pichia Stipitis*). O vinho produzido por este processo de fermentação é então devolvido à linha de etanol convencional para ser misturado com o vinho produzido pela fermentação com *S. Cerevisiae* (Oliveira *et al.*, 2016).

Nunes, R. M. *et al.* (2013) apresenta dois sistemas de fermentação das pentoses e das hexoses em um mesmo reator. Na Sacarificação e Co-fermentação Simultâneas (SSCF), a hidrólise enzimática e a fermentação do hidrolisado celulósico são conduzidas simultaneamente. Os açúcares provenientes das hexoses e das pentoses são co-fermentados em um mesmo reator, por um único microrganismo geneticamente

modificado. No Bioprocesso Consolidado (CPB), também citado por DIAS (2013), todas as operações de caráter biológico, inclusive a produção de enzimas, são realizadas em um único reator, utilizando microrganismos geneticamente modificados. Essa dinâmica proporciona a redução do custo de produção, visto que não vincula custos de operação ou investimento de capital, para a compra de enzimas ou sua produção. No entanto, uma barreira a este processo seria a impossibilidade de compartilhar equipamentos de concentração e de fermentação das unidades existente de etanol convencional.

II.5.2.4. Integração E1G e E2G

As biorrefinarias brasileiras de cana-de-açúcar frequentemente apresentam algum grau de integração energética, que varia de acordo com o projeto de cada planta industrial. Comumente se encontra integração energética entre os fluxos de vinho e vinhaça, bem como, entre o fluxo do caldo que sai das moendas de cana-de-açúcar e o fluxo de caldo concentrado que sai do evaporador (Oliveira *et al.*, 2016).

As técnicas de integração proporcionam importantes vantagens para os processos industriais em termos de: aumento da produtividade; gestão e conservação dos recursos energéticos; prevenção da poluição; e redução dos custos de capital e operacionais das fábricas de produtos químicos. A integração energética proporciona um menor consumo de vapor na planta e, conseqüentemente, menor necessidade de queima de bagaço no sistema de cogeração, disponibilizando esse insumo para a produção de E2G (Oliveira *et al.*, 2016).

II.5.3. Rendimentos e Custos de Produção

É importante notar que, independentemente da rota tecnológica, a biomassa tem peso considerável sobre o custo final do etanol de segunda geração. Segundo Yu (2016), para a maioria das plantas existentes no hemisfério norte, o custo da biomassa representa cerca de 65% do custo do bioetanol, enquanto que para as plantas brasileiras da Granbio e da Raízen, o custo da biomassa representa cerca de 45% do custo total. Ressalta-se que para as plantas brasileiras o preço da biomassa poderia ser considerado como zero, pois a mesma é resíduo do processamento da cana para a produção de etanol e açúcar. O

valor considerado é o custo de oportunidade para a venda de eletricidade para o SIN. Caso a análise seja comparar os custos de produção de etanol lignocelulósico e de geração de eletricidade para exportação, pode se considerar, então, que o custo da biomassa seja zero. Situação esta que será estudada nessa dissertação.

Seabra (2008) realizou levantamento sobre rendimentos e custos de produção de etanol lignocelulósico, de acordo com o processo produtivo, assim como seus respectivos horizontes de disponibilidade.

Tabela 4 - Estimativas de rendimentos e custos de produção de bioetanol

Referência	Processo ¹⁹	Rendimento (litro/t)	Custo do etanol	Disponibilidade
Hamelinck <i>et al.</i> (2005)	SSF com pré-tratamento com ácido diluído	~300	1,23 US\$/litro	Curto prazo
	SSCF com pré-tratamento com explosão de vapor	~340	0,73 US\$/litro	Médio prazo
	CBP com termoidrólise	~400	0,49 US\$/litro	Longo prazo
Aden <i>et al.</i> (2002)	SSCF com pré-tratamento com ácido diluído	374	0,28 US\$/litro	Curto prazo
Wooley <i>et al.</i> (1999)	SSCF com pré-tratamento com ácido diluído	283	0,38 US\$/litro	Curto prazo
	Idem	413	0,20 US\$/litro	Longo prazo

Fonte: Adaptado de Seabra (2008) apud BNDES (2008).

Dias *et al.* (2012) realizaram simulações para avaliar a produção de etanol de segunda geração e bioeletricidade a partir do bagaço e da palha. Foram criados três cenários tecnológicos, considerando diferentes rendimentos, carga de sólidos por hidrólise e destino de pentoses (biodigestão do biogás utilizado no sistema de cogeração ou fermentação ao etanol). Foram considerados dois níveis de hidrólise: tecnologia atual (baixo rendimento, baixa carga de sólidos) e um segundo nível, potencialmente disponível em 2015 (maiores rendimentos e carga de sólidos, menor investimento e menor custo de enzima). Nos dois níveis de hidrólise, a explosão de vapor é o método de pré-tratamento, mas no cenário tecnológico de 2015 é seguido por um passo de deslignificação alcalina, o que leva a maiores rendimentos no passo de hidrólise

¹⁹ SSF - Sacarificação e Fermentação Simultâneas; SSCF - Sacarificação e Co-fermentação Simultâneas e CPB - Bioprocesso Consolidado.

enzimática subsequente devido à remoção de lignina. A Tabela 5 apresenta a combinação dos cenários elaborados por Dias *et al.* (2012).

Tabela 5 - Cenários para a produção de etanol

Parâmetros	Cenário					
	1	1a	2	3	4	5*
Produção de etanol de primeira geração	X	X	X	X	X	
Produção de etanol de segunda geração			X	X	X	X
Venda de eletricidade excedente	X	X	X	X	X	X
Venda de excedente de bagaço		X				
Tecnologia atual para 2ª geração			X			
Tecnologia 2015 para 2ª geração				X	X	X
Biodigestão de Pentoses			X	X		
Fermentação de Pentoses					X	X

a - planta de primeira geração que produz a matéria-prima para a planta autônoma

* Planta autônoma de segunda geração

Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (2012)

Verifica-se, através da Tabela 6, que a quantidade de etanol e eletricidade produzida somando a produção dos cenários 1a e 5 (planta autônoma) é aproximadamente a mesma que a produzida no cenário 4 (Processo com hidrólise avançada e fermentação de pentoses), mas o investimento necessário é cerca de 30% maior. A taxa interna de retorno da planta de segunda geração autônoma é significativamente menor, quando comparada com a produção integrada (Dias *et al.*, 2012). Além disso, o custo de produção de etanol no cenário 4 é o menor entre os cenários avaliados. A integração de massa e energia, entre a produção de etanol de primeira e segunda geração e a redução do consumo de vapor, tem um papel significativo na viabilidade da produção de etanol de segunda geração a partir da cana. Assim, a integração da produção do etanol de primeira e de segunda geração apresenta diversas vantagens sobre a produção autônoma de etanol de segunda geração (Dias *et al.*, 2012).

Tabela 6 - Consumo de etanol e de eletricidade, consumo de vapor e material lignocelulósico (ML) e análise econômica

Parâmetros	Cenário					
	1	1 ^a	2	3	4	5 ^a
Produção de etanol anidro (l / tc)	82	82	102	107	116	35
Eletricidade excedente (kWh / tc)	173	34	86	77	81	42
Consumo de vapor do processo (kg de vapor / tc)	902 ^b	373	682	642	649	270
Material lignocelulósico hidrolisado (kg / tc, base seca)	–	–	123	133	102	104
Produção de etanol de segunda geração (l / t seca ML)	–	–	158	181	335	338
Produção de etanol de segunda geração (l / tc)	–	–	19	24	34	35
Investimento (milhões de US\$)	263	218	367	346	316	200
TIR (% por ano)	14,9	14,9	11,6	13,4	16,8	10
Custos de produção de etanol (US\$ / l)	0,37	0,39	0,39	0,36	0,33	0,35
Custos de produção de eletricidade (US\$ / MWh)	52,63	55,69	55,53	51,83	46,48	49,25

a Nenhuma cana-de-açúcar é processada no cenário 5 (os resultados são fornecidos em uma base de cana-de-açúcar apenas para fins de comparação).

b Todo o material lignocelulósico é queimado para produzir vapor; Vapor requerido no processo de produção é igual a 373 kg de vapor / tc; O resto é processado em turbinas de condensação.

Fonte: Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (2012)

Em março de 2015, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) apresentou resultados do estudo realizado em conjunto com o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE). Seu objetivo era realizar uma avaliação técnica e econômica da produção atual de E2G comparada à de etanol de primeira geração, bem como verificar o potencial de melhoria de eficiência e redução de custos do E2G no Brasil. Foram definidos 14 cenários para essa avaliação, sendo que na fase agrícola, considerou-se a utilização da cana-energia (CE) para complementar, ou, até mesmo, substituir a cana convencional (CC), em virtude de seu grande potencial produtivo. Na fase industrial, foram definidos cenários de plantas de etanol de 1^a geração, de 2^a geração integrada a de 1^a geração, e 2^a geração independente. Nos cenários de etanol lignocelulósico, foram introduzidas duas rotas tecnológicas referentes ao processo de produção com fermentação separada de pentoses (Rota A) e à co-fermentação das pentoses e das hexoses (Rota B). Os cenários são apresentados na Figura 5.

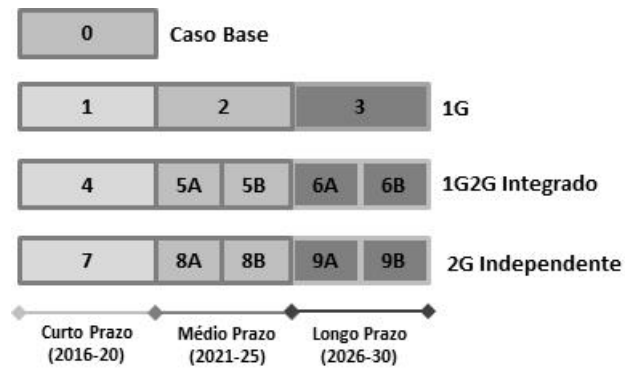


Figura 5: Cenários de produção de E2G

Fonte: Elaboração própria a partir BNDES (2015)

Na Tabela 7, é possível observar alguns resultados desse estudo, onde se apresentam três patamares de produção de E2G (em litros /t biomassa seca) segundo os horizontes temporais definidos. Esses valores refletem os avanços tecnológicos considerados para o processo produtivo do E2G, tais como aumento de rendimentos nas etapas de conversão e maior recuperação dos produtos nas etapas de separação sólido-líquido. No curto prazo, os custos do E2G ainda são superiores aos custos do E1G²⁰. A partir do médio prazo, os custos se reduzem, invertendo essa situação.

²⁰ O preço assumido para o etanol de cana convencional (E1G) foi de R\$ 1,159 / litro para o curto prazo, R\$ 0,845 / litro para o médio prazo e R\$ 0,756 / litro para o médio prazo.

Tabela 7 - Estimativa dos rendimentos e dos custos de produção do E2G e da bioeletricidade

Horizonte Temporal	Cenários	Rendimento E2G	Rendimento Eletricidade	Custo E2G
		(l/t biomassa seca ^a)	(kWh/t cana)	(R\$/l)
Base	0 ^b	180,4	11,5	-
Curto prazo	1	235,8	174,3	-
	4	301,2	68,6	1,528
	7	216,9	36,8 ^c	1,475
Médio prazo	2	209,4	201,5	-
	5A	318,8	70,4	0,769
	5B	333,4	66,6	0,742
	8A	284,9	69,6	0,727
	8B	304,1	61,1	0,675
Longo prazo	3	190	216,7	-
	6A	334,7	68	0,55
	6B	344,3	69,6	0,521
	9A	300,2	70,3	0,524
	9B	310,6	65,1	0,521

a Biomassa seca inclui os sólidos totais da CC, da palha e da CE.

b No Cenário 0, não foi considerada a exportação, devido à baixa produção de eletricidade.

c Considerou-se a quantidade de cana processada no cenário que disponibiliza biomassa para o Cenário 7.

Fonte: Elaboração própria a partir BNDES (2015)

II.5.4. E2G no Brasil e no mundo

II.5.4.1. Incentivos e Mandatos

O Governo Brasileiro lançou, em 2011, o Plano Conjunto BNDES-Finep de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico - PAISS. Um de seus objetivos é fomentar iniciativas privadas em P&D relacionadas à conversão da biomassa da cana em etanol de segunda geração, mediante oferta de financiamento a baixo custo e de recursos não reembolsáveis. Outra iniciativa é o Programa de Pesquisa em Bioenergia (BIOEN) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), cujo objetivo é estimular e articular atividades de P&D para promover o avanço do conhecimento e sua aplicação em áreas relacionadas à produção de bioenergia no Brasil (EPE, 2016b). No país não há mandato de mistura ou uso integral de E2G.

Atualmente existem duas plantas comerciais em funcionamento, a da Raízen, em Piracicaba (SP), com a capacidade produtiva de 82 milhões de litros / ano e da GranBio, em São Miguel dos Campos (AL), com 42 milhões de litros / ano (RAIZEN, 2016, GRANBIO, 2016). Ainda existe o projeto piloto do Centro de Tecnologia Canavieira - CTC, em São Manoel (SP), com capacidade de 3 milhões de litros / ano (QD, 2016). O investimento agregado é da ordem de R\$ 580 milhões.

Os Estados Unidos criaram o *Renewable Fuel Standard* (RFS), que é parte da lei “*Energy Independence and Security Act* (EISA)” de 2007, a qual define volumes crescentes de biocombustíveis²¹ a serem misturados aos combustíveis convencionais, até o ano de 2022. O consumo de etanol está relacionado ao da gasolina, pela mistura mandatória E10²² (10% de etanol) (EPE, 2016b, EUA, 2007, EIA 2015).

O governo americano reconhece a dificuldade no cumprimento das metas do RFS, que têm sido alteradas em relação ao determinado em 2007²³, sob a alegação do lento desenvolvimento de biocombustíveis não derivados do milho. Para garantir o cumprimento das metas indicadas dentro do RFS foi criado o RIN (*Renewable Identification Number*²⁴), créditos usados para rastrear o uso de etanol dentro das metas estabelecidas pelo governo. O RIN só pode ser gerados se puder ser estabelecido que a matéria-prima a partir da qual o combustível foi feito atende às definições da EISA de biomassa renovável (incluindo restrições de uso da terra) e se o combustível atende aos limites de emissão de gases de efeito estufa da EISA (EPA, 2016). As refinarias, distribuidores e importadores de combustível têm a obrigação de apresentar à Agência

²¹ Em função da redução de Gases de Efeito Estufa no ciclo de vida dos biocombustíveis, esse programa estabeleceu a seguinte classificação: renováveis (etanol e biobutanol de milho), avançado (etanol de cana-de-açúcar), diesel de biomassa (biodiesel) e celulósico (etanol e biodiesel celulósico) (EUA, 2007).

²² As misturas E15 (15% de etanol) e E85 (85% de etanol) também são permitidas.

²³ As metas originais para os biocombustíveis avançados e para o etanol celulósico eram de 20,8 e 11,4 bilhões de litros, respectivamente (EUA, 2007).

²⁴ As misturas de biocombustíveis acima do mandatório geram RINs excedentes, os quais podem ser comercializados. Assim, os agentes de mercado que não conseguirem cumprir suas metas físicas podem adquirir esses certificados e apresentá-los à EPA. O RIN indica, dentre outras informações, a data de fabricação, a empresa, a usina e o tipo de biocombustível a ele assinalado.

de Proteção Ambiental dos EUA (*Environment Protection Agency – EPA*) o número RIN, correspondente ao combustível fóssil que comercializarem, satisfazendo o mandatório definido pelo RFS (EPA, 2017a).

Existem, ainda, outras iniciativas estaduais, dentre as quais se destaca o Padrão de Combustível de Baixo Carbono (*Low Carbon Fuel Standard– LCFS*) do Estado da Califórnia, que entrou em vigor em janeiro de 2011. A diretiva LCFS tem como objetivo a redução das emissões de GEE em, pelo menos, 10% na intensidade de carbono (*Carbon Intensity - CI*) dos combustíveis de transporte do Estado até 2020 (ARB, 2016b). O programa fornece créditos baseados na intensidade de carbono gerada por cada combustível, tendo como referência as emissões da gasolina. Os combustíveis que tiverem intensidade de carbono abaixo do padrão estabelecido recebem créditos, sendo que o valor será tão maior, quanto menor for sua intensidade de carbono.

Atualmente existem duas plantas comerciais de etanol lignocelulósico em funcionamento nos Estados Unidos, a da DuPont com capacidade produtiva de 114 milhões de litros / ano e a da Poet com 94 milhões de litros / ano (YU, 2016).

Na União Europeia o principal instrumento de promoção à utilização de fontes renováveis é a Diretiva 2009/28/CE, com as metas indicativas de participação do consumo final automotivo e da matriz energética total, de 10% e 20%, respectivamente, para 2020 (UE, 2009). Existem, ainda, metas de mitigação de 20% de Gases de Efeito Estufa (com relação aos níveis de 1990), assim como, de aumento da eficiência energética. Este conjunto de medidas é chamado de “Triplo 20” ou *Climate and Energy Package* (UE, 2008). Em 2015, foram acrescentadas às metas um novo plano de mitigação de GEE de 40% (com relação a 1990) e de participação de renováveis em 27% no consumo final de energia até 2030. Neste contexto, foi aprovado um teto de 7% de participação dos biocombustíveis de primeira geração no consumo final automotivo, em 2020, com redução posterior para 3,8% em 2030, em virtude de fortes questionamentos com relação à competição destes biocombustíveis por recursos agrícolas escassos e o desmatamento de florestas para plantio de suas culturas relacionadas (EURACTIV, 2015).

Na UE não há mandato volumétrico ou de percentual de mistura obrigatória de biocombustíveis lignocelulósicos. Apesar disto, a produção de biocombustíveis de segunda geração é defendida pela redução nas emissões mínimas. Atualmente existe apenas uma planta comercial de etanol lignocelulósico em funcionamento, localizada na cidade de Crecentino, na Itália, a Beta Renewable, com capacidade produtiva de 75 milhões de litros por ano (YU, 2016).

II.5.4.2. Questões a solucionar

No Brasil, assim como no mundo, alguns problemas no processo produtivo ainda necessitam ser solucionados para a definitiva expansão do etanol lignocelulósico.

Na etapa de pré-tratamento, os equipamentos requerem manutenção e/ou reposição de peças em curto espaço de tempo, pois o bagaço e a palha da cana apresentam elevados teores de sílica e alumina, o que causa efeitos abrasivos em equipamentos do processo, tais como, tubulações, válvulas e acessórios. Efeitos que são acentuados, devido à alta temperatura e pressão do processo de tratamento do bagaço por explosão a vapor (CTC, 2016). A Raízen está na vanguarda para a resolução desse problema, através de uma pré-lavagem da biomassa. Outro problema que se coloca é na etapa de filtração, com o entupimento dos filtros.

Especialistas do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) identificaram problemas relacionados ao tempo de fermentação (5 a 10 vezes maior do que o de E1G) e no rendimento da hidrólise (25% a 38% menores que os valores estabelecidos na literatura, para extração de glicose). Esses indicadores, associados ao alto custo das enzimas inibem o desenvolvimento do etanol celulósico. Cabe ressaltar, que apesar da dificuldade na fermentação das pentoses, as empresas nacionais também estão próximas de realizar fermentação conjunta com as hexoses, permitindo um maior aproveitamento da matéria celulósica (CTBE, 2016).

II.5.5. Comercialização do Etanol Anidro

Neste item será descrita a forma de comercialização do etanol anidro para o mercado externo, com ênfase para o mercado dos EUA (um dos focos deste trabalho), visto que

para o mercado interno, o preço de referência será o preço ao produtor do biocombustível no estado de São Paulo.

Em resumo, o "caminho" para a exportação do anidro para os Estados Unidos considera o preço do etanol do produtor brasileiro, os custos logísticos nacionais, que incluem o transporte interno até o terminal exportador, o custo de utilização deste terminal, os custos logísticos internacionais, assim como as taxas e tributos relacionadas à exportação e imposto de importação no mercado dos EUA (quando houver) (SILVA *et al.*, 2009).

Para o presente estudo somente foram consideradas o custo de frete nacional e internacional, custo de despacho e tarifa ad valorem²⁵, visto que as demais tributações e tarifas estão zeradas atualmente.

Por fim, o etanol de cana brasileiro é valorado no mercado dos EUA, de acordo a legislação vigente do RFS, através do RIN e no mercado da Califórnia, de acordo com a legislação do *Air Resource Board* - ARB, através do LFCS.

²⁵ É o valor agregado ao valor total do frete de uma mercadoria

Capítulo III – Metodologia

No presente capítulo será apresentada uma breve revisão da Teoria da Carteira Eficiente de Harry Markowitz (1952), metodologia utilizada na presente dissertação.

III.1. Carteira Eficiente (Harry Markowitz)

III.1.1. Teoria do risco-retorno

Ao realizar algum tipo de investimento ou até mesmo alguma ação, pessoas racionais assumem algum tipo de risco, portanto, algumas questões devem ser colocadas. Qual o nível de risco relativo associado a cada decisão? Qual o bônus ao se optar por uma alternativa de maior risco? Para responder a essas questões é necessário que os indivíduos identifiquem, analisem e valorem o nível de risco, decidindo qual será o retorno necessário para que determinada aplicação ou investimento, seja compensatório.

O trabalho na área financeira de Markowitz (1952) definiu risco como sendo a variância ou o desvio em relação a uma média. Damodaran (1996) dividiu o risco em dois tipos básicos: o risco diversificável ou não sistêmico, que é minimizado pela diversificação de ativos, e o risco não diversificável ou sistêmico, como sendo aquele que se refere a acontecimentos que afetam o mercado como um todo. O nível de risco diversificável de uma carteira é uma função não linear dos níveis de risco diversificáveis dos títulos componentes. Geralmente, o nível de risco diversificável será menor quanto mais diversificada for a carteira.

III.1.2. Teoria da carteira de investimentos

Segundo Monteiro (2012), a Teoria Moderna do Portfólio ou Teoria da Carteira, introduzida por Harry Markowitz em 1952 e complementada por Merton Miller e William Sharpe 38 anos depois, tornou-se uma teoria geral para a seleção de carteiras.

Antes da teoria de Markowitz, os investidores avaliavam os riscos e retornos dos títulos individualmente na construção das suas carteiras. Ele propôs que os investidores se concentrassem na seleção de portfólios com base nas suas características globais risco-retorno, em vez de simplesmente construir carteiras a partir de títulos que possuíssem,

individualmente, características de risco-retorno mais atraentes. Em suma, os investidores devem selecionar carteiras e não títulos individuais.

Segundo Arce (2014), Harry Markowitz apresentou uma teoria para auxiliar na seleção do portfólio mais eficiente, analisando várias carteiras possíveis. A teoria para seleção de portfólios é baseada no método da média-variância, o qual permite a obtenção de carteiras de variância mínima para cada nível de retorno esperado. Assim, os portfólios eficientes minimizam o risco, medido pela variância ou desvio padrão dos retornos passados. Markowitz mostra que para obter um portfólio com risco menor e um mesmo nível de retorno, é necessário aplicar o princípio da diversificação dos investimentos no portfólio.

O retorno esperado de cada investimento que compõe o portfólio pode ser representado pela média dos retornos obtidos ao longo do tempo, sendo, portanto igual ao valor esperado da série histórica disponível. Desta forma, o retorno esperado do portfólio é representado pela soma das contribuições individuais de cada investimento.

$$E_{RP} = x_1R_1 + x_2R_2 + \dots + x_NR_N \quad (3.1)$$

Onde R_i = valor esperado dos retornos do ativo i

x_i = participação de cada ativo na carteira

N = número total de ativos

De acordo com o trabalho de Markowitz, a avaliação do risco do portfólio leva em conta a variância (σ_i^2) de cada investimento e a covariância entre todos os pares de investimentos desse portfólio (cov_{ij}). Conforme dito anteriormente, quanto maior for a variância da série histórica dos retornos de cada investimento, maior será o seu risco. Por outro lado, investimentos com alto grau de correlação tendem a ser afetados de maneira semelhante de acordo com as oscilações de mercado, sendo a covariância (cov_{ij}) a ferramenta usada para medir a relação entre dois investimentos. A

diversificação dos investimentos do portfólio é uma forma de minimizar esse efeito de oscilação conjunta na mesma “direção”.

Desta forma, investir em vários títulos não é suficiente para reduzir a variância. Deve-se evitar investir em títulos com altas covariâncias entre si. É necessário diversificar o investimento entre segmentos porque empresas de diferentes indústrias, especialmente com características econômicas diferentes, têm covariâncias menores do que empresas do mesmo ramo.

A partir dos dados da série histórica, define-se a variância e a covariância dos investimentos. A matriz variância-covariância entre investimentos é dada por:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \text{COV}_{12} & \text{COV}_{13} & \dots & \text{COV}_{1N} \\ \text{COV}_{12} & \sigma_2^2 & \text{COV}_{23} & \dots & \text{COV}_{2N} \\ \text{COV}_{13} & \text{COV}_{23} & \sigma_3^2 & \dots & \text{COV}_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ \text{COV}_{1N} & \text{COV}_{2N} & \text{COV}_{3N} & \dots & \sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A variância do portfólio pode ser expressa pela equação abaixo:

$$\sigma_p^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} x_i x_j \quad (3.3)$$

Onde:

N é o número de ativos no portfólio;

i, j são os índices dos ativos e $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$;

x_{ij} é a participação percentual de cada ativo na carteira

σ_{ij} é a covariância do ativo i com o ativo j;

Os componentes de risco do portfólio incluem a contribuição das variâncias de cada ativo no portfólio e a covariância entre dois ativos. A teoria do portfólio de Markowitz tem como objetivo determinar a relação de equilíbrio risco-retorno para a composição de uma carteira, através da aquisição de ativos que se situem na fronteira eficiente. Esta

é obtida através da minimização do risco (σ_p^2) para o máximo nível de retorno desejado ou, alternativamente, pela maximização do retorno (E_{RP}), dado um mínimo nível risco. Nesse caso, as equações (3.1) e (3.3) seriam as funções quadráticas bi-objetivo.

$$\text{Minimizar } \sum \sum x_i \cdot x_j \cdot \sigma_{ij}$$

$$\text{Maximização } \sum x_i \cdot R_i$$

As restrições seriam:

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1;$$

$$x_i \geq 0 ; i = 1, 2, \dots, N$$

Segundo Monteiro (2012), a fronteira eficiente de Markowitz é o conjunto de todos os portfólios que darão o maior retorno esperado para cada nível de risco, ou o conjunto de todos os portfólios que darão o menor risco para cada nível de retorno. Por exemplo, um portfólio que se encontre abaixo da fronteira eficiente apresenta um mesmo risco com um retorno menor ou um mesmo retorno com um risco maior, conforme a Figura 6.

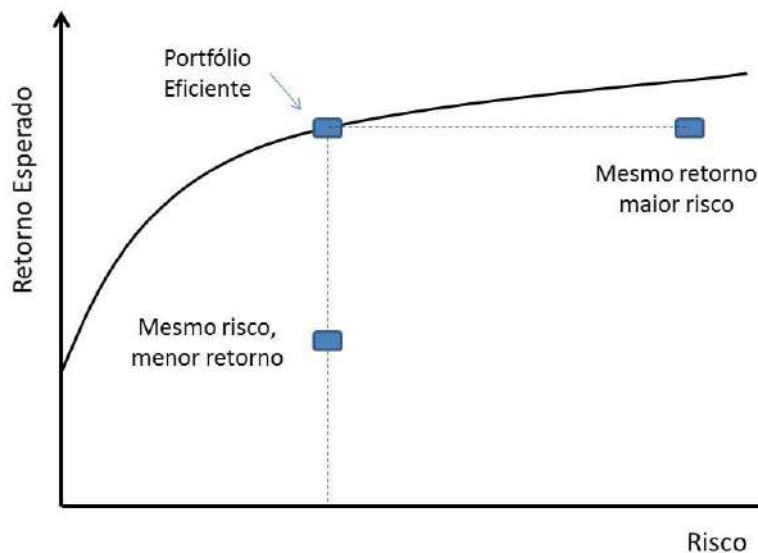


Figura 6: Portfólio eficiente para dado nível de risco

Fonte: Elaboração própria

Capítulo IV – Fronteira eficiente para o aproveitamento do bagaço residual do setor sucroenergético

No presente capítulo serão apresentadas as simulações realizadas, a partir da aplicação de um modelo análogo ao modelo proposto por Markowitz para uma carteira composta por ativos derivados da biomassa da cana. O objetivo é analisar a melhor alocação desse insumo no processo produtivo, maximizando o retorno médio e minimizando o risco de perdas. Considerou-se a competição pelo bagaço para dois produtos, em dois submercados: eletricidade comercializada no ACR e no ACL e etanol lignocelulósico anidro, comercializado no mercado interno (São Paulo) e no mercado americano (Califórnia).

Serão analisados quatro cenários que consideram a adoção de tecnologias atuais e a evolução tecnológica dos processos produtivos, representadas através da redução dos custos de produção e aumento do rendimento. Adicionalmente, é apresentado outro cenário que, além de considerar um pacote tecnológico evoluído, conta com um incentivo governamental para a venda do etanol avançado em território nacional.

IV.1. Modelo de alocação eficiente do bagaço

Nesta seção será descrita a aplicação da teoria de carteira eficiente de Markowitz para o aproveitamento energético do bagaço, considerando a produção do etanol lignocelulósico e a exportação de bioeletricidade.

Anteriormente dedicado exclusivamente à queima para geração elétrica, seja no mercado regulado (ACR), seja no mercado livre (ACL), será aberto um novo leque de opções para o uso energético do bagaço, com o desenvolvimento e a disseminação da tecnologia de produção do etanol lignocelulósico. A Figura 7 apresenta a árvore de produtos derivados da biomassa da cana e seus mercados.

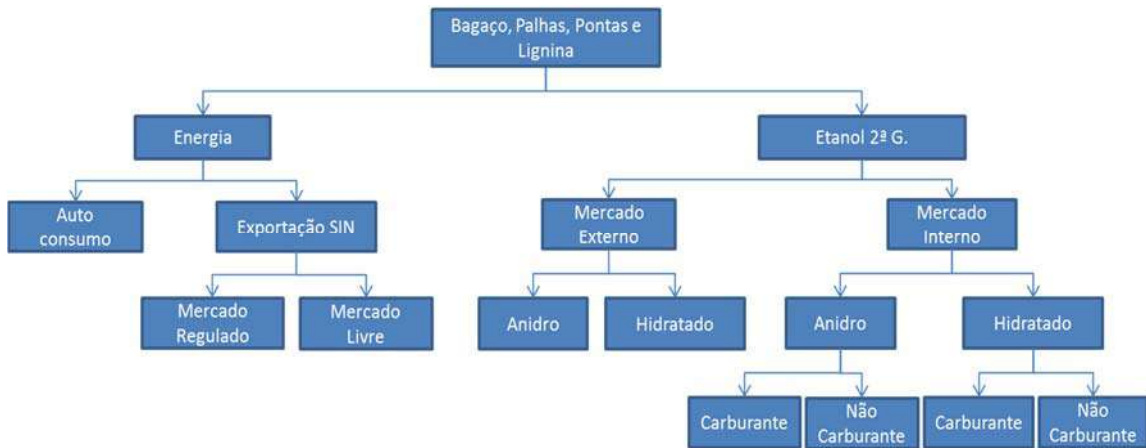


Figura 7: Produtos derivados da biomassa da cana e seus mercados

Fonte: Elaboração própria

Apesar de as palhas e as pontas também poderem ser usadas como insumos, o presente estudo focará na competição pelo bagaço para a geração elétrica exportada ao SIN (ACR e ACL) e para o etanol lignocelulósico anidro exportado e para o mercado carburante interno. Estes seriam os quatro ativos a se investir em diferentes percentuais, buscando-se a minimização dos riscos associados a cada um dos produtos, considerando retornos determinados.

Seja x_i ($i = 1, 2, 3, 4$) as variáveis de decisão que determinam o percentual de bagaço atribuído para cada um dos ativos descritos anteriormente. Inicialmente, devem satisfazer a seguinte igualdade:

$$\sum_{i=1}^4 x_i = 1 \quad (4.1)$$

O retorno médio da carteira será calculado de acordo com a seguinte equação:

$$E(R) = \sum_{i=1}^4 x_i \cdot R_i \quad (4.2)$$

A variância do retorno da carteira será calculada de acordo com a seguinte equação:

$$V(R) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sigma_{ij} x_i x_j \quad (4.3)$$

Onde:

R: é a variável aleatória, que representa o retorno da carteira por tonelada de bagaço de cana com 50% de umidade (R\$ / tonelada de bagaço úmido).

R_i: é o retorno por tonelada de bagaço (50% de umidade) para o ativo i (i = 1, 2, 3, 4).

x_i: proporção de bagaço alocado ao ativo i (i = 1, 2, 3, 4).

σ_{ij} é a covariância dos retornos dos ativos i e j (i = 1, 2, 3, 4 e j = 1, 2, 3, 4);

Considerando as equações (4.1), (4.2) e (4.3), o modelo proposto seria formulado pelo modelo de otimização quadrática bi-objetivo, conforme item III.1.2. No entanto, usando o método de ε-restrição (CARPIO, 2017), apenas uma função objetivo é mantida, sendo a outra transformada em uma nova restrição. Neste trabalho, a função objetivo correspondente à variância será mantida, portanto o modelo resultante é:

$$Min_V(R) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sigma_{ij} x_i x_j \quad (4.4)$$

$$\sum_1^4 x_i \cdot R_i \geq \rho$$

$$\sum_{i=1}^4 x_i = 1;$$

$$x_i \geq 0; i = 1, 2, 3, 4$$

Todas as combinações possíveis de ativos são avaliadas e os pontos de menor variância, (risco) para vários níveis de retorno, ρ, determinam a "fronteira eficiente".

IV.1.1. Retorno (Margem)

Os retornos para cada carteira de ativos desse estudo serão definidos por tonelada de bagaço com 50% de umidade:

O retorno da venda de bioenergia por tonelada de bagaço no mercado regulado é:

$$R1 = (PR - CPE) \times RE$$

O retorno da venda de bioenergia por tonelada de bagaço no mercado livre (spot) é:

$$R2 = (PL - CPE) \times RE$$

O retorno da venda de etanol anidro lignocelulósico por tonelada de bagaço seco no mercado nacional é:

$$R3 = 0,5 \times (PEAN - CP2G) \times R2G$$

O retorno da venda de etanol anidro lignocelulósico por tonelada de bagaço seco no mercado externo é:

$$R4 = 0,5 \times (PEAI - CP2G) \times R2G$$

Onde:

PR = preço da energia elétrica no mercado regulado (R\$ / MWh).

PL = preço da eletricidade no mercado livre (R\$ / MWh).

PEAN = preço do etanol anidro (R\$ / litro) no mercado nacional.

PEAI = preço do etanol anidro (R\$ / litro) no mercado internacional.

CPE = variável de custo de produção da bioeletricidade (R\$ / MWh).

CP2G = variável de custo de produção de etanol de segunda geração (R\$ / litro).

RE = Rendimento da bioeletricidade (MWh / tonelada de bagaço úmido).

R2G = Rendimento de etanol de segunda geração (litro / tonelada de bagaço).

IV.2. Premissas

Para realizar as simulações foram considerados quatro cenários tecnológicos com diferentes custos e rendimentos para a produção da bioeletricidade e do etanol lignocelulósico, assim como um quinto cenário que se diferencia pela introdução de um prêmio para o E2G no estado de São Paulo. A **Tabela 8** resume os cenários analisados na presente dissertação.

Tabela 8 – Cenários para a bioeletricidade e o E2G

Cenário	Estágio Tecnológico		Prêmio para E2G
	Bioeletricidade	Etanol 2G	
1	Baixa Eficiência	Atual	EUA
2	Eficientizado	Atual	EUA
3	Baixa Eficiência	Desenvolvido	EUA
4	Eficientizado	Desenvolvido	EUA
5	Eficientizado	Desenvolvido	EUA / SP

Fonte: Elaboração própria

A unidade produtora de referência (Cenário 1) possui integração entre os processos de produção de etanol de primeira geração e o de segunda geração. A termelétrica possui turbina de condensação com extração controlada, operando somente no período de colheita, sem o uso adicional da palha e está equipada com uma caldeira, cuja pressão de operação é de 65 bar, com temperatura de 480°C. Para a unidade de produção de etanol lignocelulósico foram consideradas como referência as unidades utilizadas nos estudos de DIAS *et al.* (2012) e do estudo do BNDES (2015), que adotam o pré-tratamento baseado em explosão a vapor. Neste cenário, os gargalos existentes na produção desse biocombustível ainda não foram solucionados.

Este cenário de referência é representado por uma unidade com pacote tecnológico de geração elétrica de médio porte e não efficientizado, o que leva a custos de produção maiores e rendimentos moderados. Para isso, foi utilizada uma termelétrica, semelhante a do tipo 5 da Tabela 1, com rendimento disponível de 71,6 kWh/tc (286,4 kWh / t bagaço) e custo de produção, baseado em informações de DIAS *et al.* (2012), de 113,4 R\$ / MWh²⁶. Nesse cenário, a produção de etanol lignocelulósico ainda possui custos de

²⁶ câmbio: 1 US\$ = R\$ 2,04 (valores do ano 2012)

produção superiores ao do etanol convencional, baseados no preço do Cenário 4, do estudo do BNDES (2015), de 1,53 R\$ / litro, conforme Tabela 7. O rendimento com efficientização intermediária é de 300 litros de etanol por tonelada de bagaço seco, conforme Tabela 7 (BNDES, 2015).

A Tabela 9 apresenta as características da unidade produtora de referência adotada nesse estudo, assim como os fatores de produção considerados.

Tabela 9 - Características da unidade produtora de referência

Características da Unidade Produtora	Valores	Unidade
Capacidade de Moagem	3.500.000	t / ano
Período da Safra	240	dias
Aproveitamento da Safra	90	%
Horas de produção Efetiva	5.184	horas
Moagem média Anual	3.150.000	t / ano
Bagaço / t cana (50% umidade)	25	%
Bagaço Total Produzido	805.000	t / ano
Bagaço reservado para partida da caldeira (5%)	40.250	t / ano
Bagaço consumido no processo (22,86%)	184.023	t / ano
Bagaço Disponível para aproveitamento energético	580.727	t / ano
Poder Calorífico do bagaço (50% umidade)	7.536	kJ / kg
Potência Instalada	65	MW
Potência para Consumo	15	MW
Potência para Exportação	50	MW
Eficiência na Conversão	85	%
Energia Produzida	241.719	MWh /ano
Energia para Consumo no processo (sem E2G)	55.257	MWh /ano
Energia para Exportação	186.462	MWh /ano
Energia Elétrica disponível	71,6	kWh / t cana
Energia Elétrica para Hidrólise	17	kWh / t cana
Energia Elétrica para comercialização (cana)	54,6	kWh / t cana
Energia Elétrica para comercialização (bagaço seco)	218,4	kWh / t bag.
Capacidade de Produção E2G	56	mil m ³
Fator de Conversão (pentoses e hexoses)	300	l / t bag. seco

Fonte: Elaboração própria

Os demais cenários são variantes do primeiro, nos quais são inseridos pacotes tecnológicos mais avançados, com maior eficiência. Para o sistema de cogeração foi considerado o uso de uma caldeira de 90 bar (cenários 2, 4 e 5) e para o sistema de produção do etanol de segunda geração, considerou-se que os problemas que afetam sua

produção e que proporcionam custos de produção superiores aos do etanol de primeira geração foram solucionados, trazendo o E2G para um estágio tecnológico desenvolvido (cenários 3, 4 e 5).

Tais situações foram representadas através da redução dos custos de produção e aumento do rendimento para a geração de bioeletricidade e para a produção do etanol lignocelulósico. Para isso, foi utilizada uma termelétrica, semelhante a do tipo 8 da Tabela 1, com rendimento disponível de 87,8 kWh/tc (351,2 kWh / t bagaço) e custo de produção, baseado em informações de DIAS *et al.* (2012), cenário 4 da Tabela 6, de 94,90 R\$ MWh. O rendimento do etanol de segunda geração, já efficientizado, foi baseado nos cenários 5B e 6A do estudo do BNDES, assim como do cenário 4 da Tabela 6 de DIAS *et al.* (2012), que é da ordem 335 litros por tonelada de biomassa seca. Da mesma forma, a estimativa do seu custo de produção foi de 0,67 R\$ / litro. O último cenário adiciona um incentivo governamental para a venda do E2G em território nacional de R\$ 0,20 / litro, de forma a valorar as externalidades positivas desse biocombustível e proporcionar um aumento da descarbonização da matriz nacional.

Para se chegar aos rendimentos efetivos para a produção de bioeletricidade, realizou-se o abatimento da parcela relativa ao consumo para a hidrólise da celulose e da hemicelulose de 17 kWh/tc, vide Tabela 9. Portanto, os rendimentos para a bioeletricidade considerados na análise foram de 54,6 kWh/tc (218,4 kWh/t bagaço), nos cenários de baixa eficiência do sistema elétrico, e de 70,8 kWh/tc (283,2 kWh/t bagaço) nos cenários com efficientização do sistema elétrico. A Tabela 10 apresenta os custos de produção e rendimentos do etanol de segunda geração e da bioeletricidade, de acordo com os estágios tecnológicos adotados nessa dissertação.

Tabela 10 – Custos de produção e rendimentos por estágio tecnológico e produto

Produto	Estágio Tecnológico	Custos de produção	Rendimentos*
Etanol 2G	Atual	R\$ 1,53 / litro	300 litros /t bagaço
	Desenvolvido	R\$ 0,67 / litro	335 litros /t bagaço
Bioeletricidade	Baixa Eficiência	R\$ 113,40 / MWh	218,4 kWh/t bagaço
	Efficientizado	R\$ 94,90 / MWh	283,2 kWh/t bagaço

* Bagaço seco para o E2G e com 50% de umidade para a bioeletricidade.

Fonte: Elaboração própria com base em DIAS et al. (2012), BNDES (2015)

IV.2.1.Preços de comercialização

Na presente dissertação, em todos os cenários, foram utilizadas séries históricas dos preços médios mensais do submercado SE/CO da bioeletricidade e do etanol anidro.

IV.2.1.1. Preços da Bioeletricidade e do Etanol

O Gráfico 3 apresenta o histórico mensal de preços da energia elétrica, de janeiro de 2003 a 2016, deflacionado com base no mês de dezembro de 2016. Este preço decorre do PLD²⁷, que representa o preço da energia no mercado “spot”. Ressalta-se que a Resolução Homologatória da ANEEL de número 2.190, de dezembro de 2016 estipulou o preço teto em R\$ 533,82 / MWh e piso em R\$ 33,68 / MWh para o PLD.

A figura também apresenta o histórico dos preços da energia elétrica obtido pelas empresas do setor sucroenergético, que venceram os leilões de energia, entre 2003 e 2016, deflacionados com base no mês de dezembro de 2016.

²⁷ O cálculo do preço baseia-se no despacho “*ex-ante*”, ou seja, é apurado com base em informações previstas, anteriores à operação real do sistema, considerando-se os valores de disponibilidades declaradas de geração e o consumo previsto de cada submercado. “O processo completo de cálculo do PLD - Preço de Liquidação das Diferenças consiste na utilização dos modelos computacionais NEWAVE e DECOMP, os quais produzem como resultado o Custo Marginal de Operação de cada submercado, respectivamente em base mensal e semanal” (CCEE, 2017a).

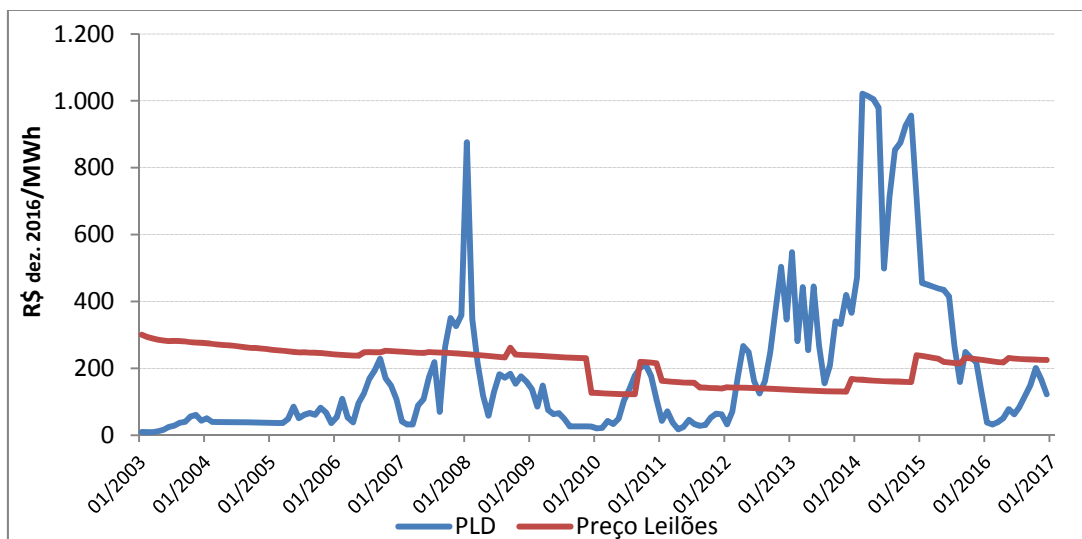


Gráfico 3: Preço de Liquidação das Diferenças (sub-mercado SE/CO) e Preço médio dos leilões de energia (Termelétricas a biomassa de cana)

Fonte: Elaboração própria a partir de CCEE (2017a e 2017b) e IPEA (2017)

IV.2.1.2. Preços do Etanol Anidro

O preço do etanol anidro no mercado interno será o preço na saída da unidade produtora desse biocombustível. Conforme descrito no item II.5.5, para a análise do preço do etanol anidro destinado à exportação, deve-se trazê-lo para o mesmo ponto de referência de venda desse combustível no mercado interno. Nesse estudo, o local definido foi a cidade de Ribeirão Preto, no Estado de São Paulo. Portanto, foi levantado o preço do etanol anidro no mercado spot americano (USDA, 2017) e somados os créditos RIN e LCFS, conforme Tabela 11, que o etanol de cana brasileiro teria direito.

Tabela 11 - Incentivos ao etanol celulósico brasileiro no mercado dos EUA

Incentivo (\$/galão ²⁸)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Credito RIN (EUA)	1,56	1,13	0,78	0,42	0,49	0,64	1,33
Prêmio LCFS (Califórnia)*	0	0	0	0,55	0,55	0,55	0,55

* Baseado em um preço médio de 70 dólares / t carbono (2015-2016) com pontuação intensidade de carbono de 10g CO₂ equivalente / MJ

Fonte: Elaborado com base em EPA (2017b) e (ARB, 2016a).

²⁸ 1 Galão = 3,7854 litros

Por fim, foram descontados os impostos e as taxas de internação, como: frete internacional, tarifa ad valorem (2,5% sobre o preço CIF), custo de despacho, os quais somam US\$ 63,27/m³ (SILVA, 2009), assim como, o valor do frete interno até a cidade de Ribeirão Preto, estimado em US\$ 45,00 /m³²⁹ (CGEE, 2007).

O Gráfico 4 apresenta o histórico mensal de preços do etanol anidro na usina em São Paulo, de janeiro de 2003 a dezembro de 2016, deflacionado com base nessa última data (IPEA, 2017). Além disso, também apresenta a estimativa do preço pago pelo etanol lignocelulósico brasileiro vendido na Califórnia (EUA), considerando os incentivos pagos aos produtores de etanol nos EUA, o RIN, os créditos LCFS, e abatendo-se os custos de internação, tomando-se como referência a cidade de Ribeirão Preto (SP). Os preços internacionais, em dólares americanos, foram convertidos para reais pelas médias mensais históricas da taxa de câmbio (IPEA, 2017).

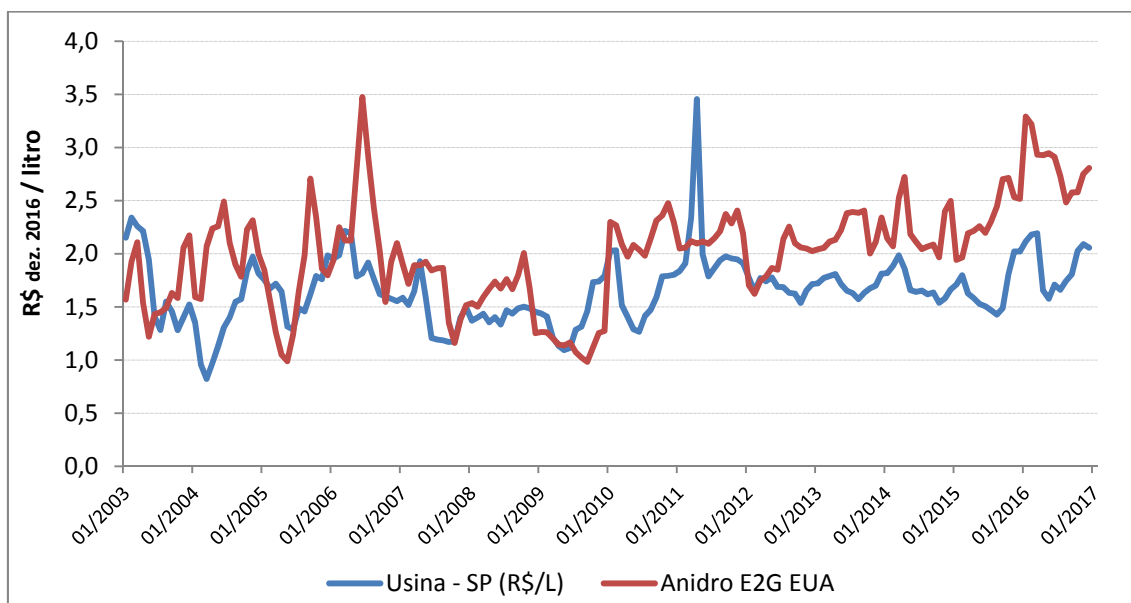


Gráfico 4: Preço do etanol anidro na Usina (SP) e da Califórnia (EUA) internalizado no Brasil

Fonte: Elaboração própria a partir de: CEPEA (2017), EPA (2017b), ARB (2016), USDA (2017), SILVA (2009a), CGEE (2007) e IPEA (2017)

²⁹ US\$ 15 a US\$ 17 por m³: custos de armazenagem no terminal de Santos; US\$ 2 por m³: supervisão das certificadoras mais as taxas do porto e US\$ 26 a US\$ 28 por m³: transporte rodoviário da área de Ribeirão Preto a Santos (CGEE, 2007).

IV.3. Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações dos cinco cenários para a melhor alocação do bagaço para a produção da bioeletricidade e do etanol lignocelulósico, considerando a minimização dos riscos para um nível de retorno. As variâncias e covariâncias foram calculadas utilizando-se séries de preços mensais, no intervalo entre janeiro de 2003 e dezembro de 2016.

No Cenário 1, a unidade produtora de referência, com caldeira de 65 bar e estágio atual de produção de etanol lignocelulósico. Conforme Tabela 10, possui custos de produção da bioeletricidade de R\$113,40 / MWh e custo de produção do etanol lignocelulósico de R\$ 1,53/ litro. Seus rendimentos são de 218,4 kWh/t bagaço e de 300 litros /t de bagaço seco.

Tabela 12 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 1)

Pontos da Fronteira Eficiente	Retorno (R\$/t bagaço)	Variância (Risco)	ACR	ACL	E2G_BR	E2G_EUA
Ponto de Mínimo Risco	23,1	0,56	74,3%	15,0%	5,8%	4,9%
A	30,0	0,76	67,6%	10,7%	3,9%	17,8%
B	35,0	1,16	62,8%	7,6%	2,4%	27,2%
C	40,0	1,78	57,9%	4,5%	1,0%	36,6%
D	50,0	3,65	44,3%	0,0%	0,0%	55,7%
E	60,0	6,42	24,9%	0,0%	0,0%	75,1%
F	67,0	8,90	11,3%	0,0%	0,0%	88,7%
Ponto de Máximo Retorno	72,8	11,30	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%

Fonte: Elaboração própria.

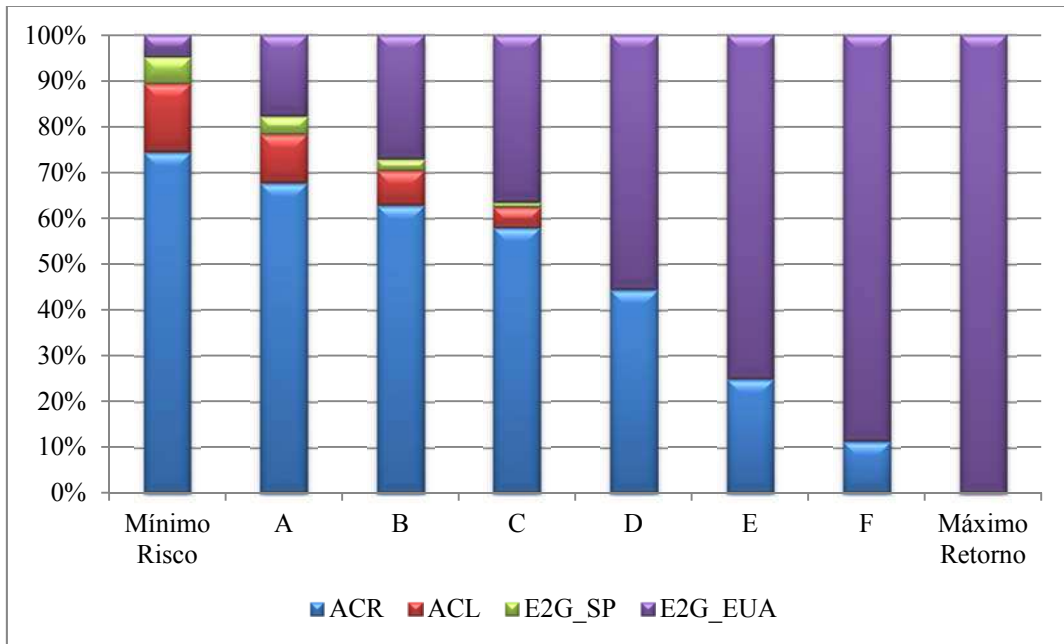


Gráfico 5: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 1)

Fonte: Elaboração própria.

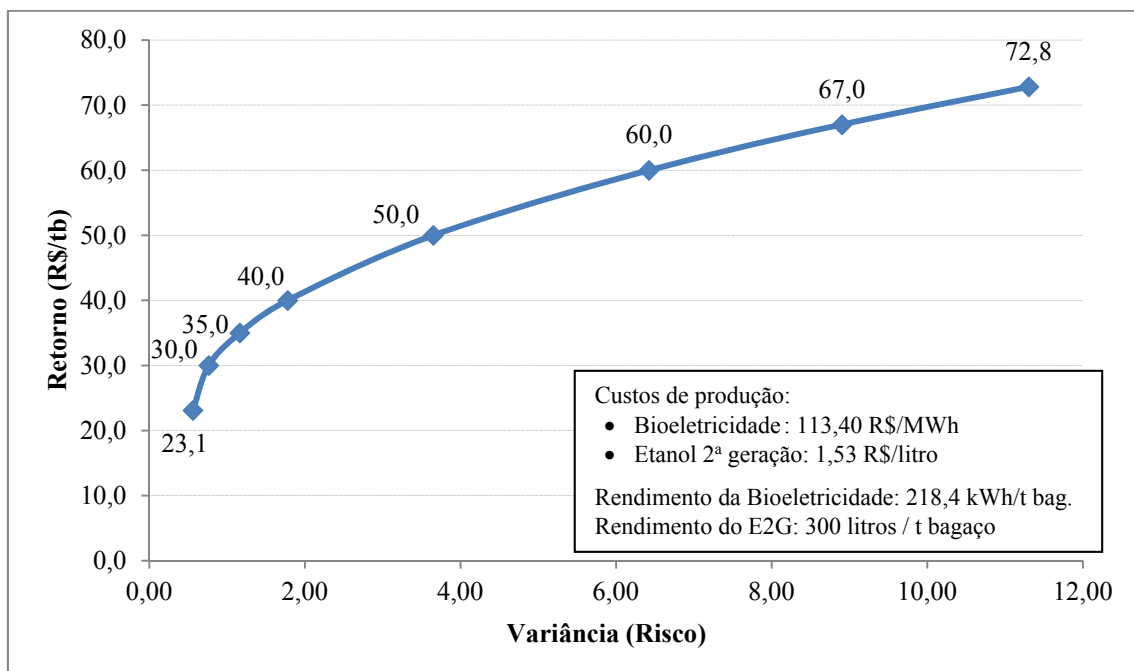


Gráfico 6: Fronteira Eficiente do Cenário 1

Fonte: Elaboração própria.

No cenário 1, a melhor decisão, quando se busca o mínimo risco, seria alocar 89% do bagaço para a produção de bioeletricidade, sendo 74% para o ACR, e os 11% restantes para o etanol 2G, sendo 5% para a Califórnia e 6% para o mercado paulista. O retorno seria de R\$ 23,1 por tonelada de bagaço e uma variância de 0,56. Neste cenário, caso o tomador de decisão opte por retornos maiores, o risco aumenta rapidamente, principalmente, a partir de R\$ 30 por tonelada de bagaço, como mostrado no Gráfico 6, quando a alocação do bagaço ultrapassa 22% para o E2G.

No Cenário 2, a unidade produtora, possui caldeira de 90 bar e estágio atual de produção de etanol lignocelulósico. Conforme Tabela 10, os custos de produção da bioeletricidade são estimados em R\$ 94,90 / MWh e o custo de produção do etanol lignocelulósico em R\$ 1,53 / litro. O rendimento da produção da bioeletricidade passa a 283,2 kWh/t bagaço e 300 litros /t seca ML.

Tabela 13 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 2)

Pontos da Fronteira Eficiente	Retorno (R\$/t bagaço)	Variância (Risco)	ACR	ACL	E2G_SP	E2G_EUA
Ponto de Mínimo Risco	33,1	0,095	97,6%	1,1%	0,5%	0,8%
A	40,0	0,421	82,3%	0,0%	0,0%	17,7%
B	45,0	1,083	69,8%	0,0%	0,0%	30,2%
C	50,0	2,103	57,2%	0,0%	0,0%	42,8%
D	55,0	3,481	44,7%	0,0%	0,0%	55,3%
E	60,0	5,217	32,1%	0,0%	0,0%	67,9%
F	65,0	7,31	19,6%	0,0%	0,0%	80,4%
Ponto de Máximo Retorno	72,8	11,30	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%

Fonte: Elaboração própria.

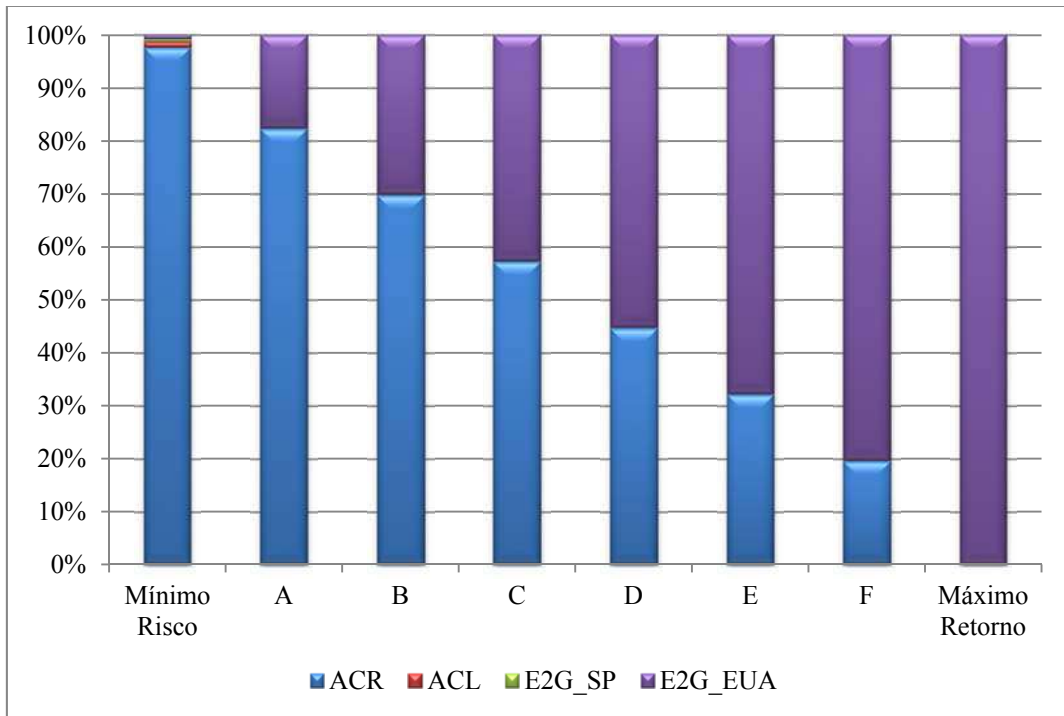


Gráfico 7: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 2)

Fonte: Elaboração própria.

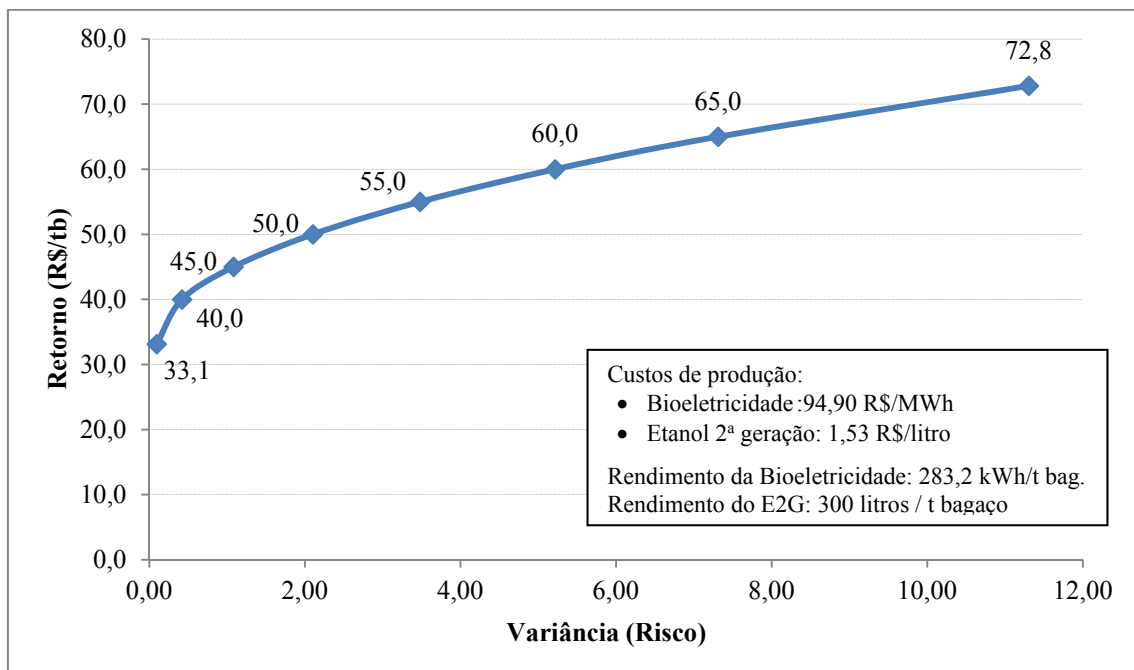


Gráfico 8: Fronteira Eficiente do Cenário 2

Fonte: Elaboração própria.

No cenário 2, a melhor decisão, quando se busca o mínimo risco, seria alocar aproximadamente 99% do bagaço para a produção de bioeletricidade, sendo 98% para o ACR, e os 1% restantes para o etanol 2G. O retorno seria de R\$ 33,1 por tonelada de bagaço e uma variância de 0,095. Este cenário é o que apresenta maior alocação do bagaço para o ACR em praticamente todas as carteiras, como mostrado no Gráfico 8, dada a redução de custos de produção da bioeletricidade.

No Cenário 3, a unidade produtora de referência, com caldeira de 65 bar, com efficientização da produção de etanol lignocelulósico. Com isso, a bioeletricidade mantém-se no patamar de R\$ 113,40 / MWh produzido e com rendimento de 218,4 kWh/t bagaço, conforme Tabela 10. No entanto, o custo de produção do etanol lignocelulósico passa a R\$ 0,67 / litro e seu rendimento para 335 litros /t seca ML.

Tabela 14 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 3)

Pontos da Fronteira Eficiente	Retorno (R\$/t bagaço)	Variância (Risco)	ACR	ACL	E2G_SP	E2G_EUA
Ponto de Mínimo Risco	179,4	0,026	2,1%	1,7%	62,0%	34,2%
A	185,0	0,026	0,8%	1,4%	58,2%	39,6%
B	190,0	0,027	0,0%	1,1%	53,4%	45,5%
C	195,0	0,029	0,0%	0,7%	46,5%	52,8%
D	200,0	0,032	0,0%	0,3%	39,5%	60,2%
E	210,0	0,040	0,0%	0,0%	23,6%	76,4%
F	218,0	0,051	0,0%	0,0%	10,2%	89,8%
Ponto de Máximo Retorno	224,0	0,061	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%

Fonte: Elaboração própria.

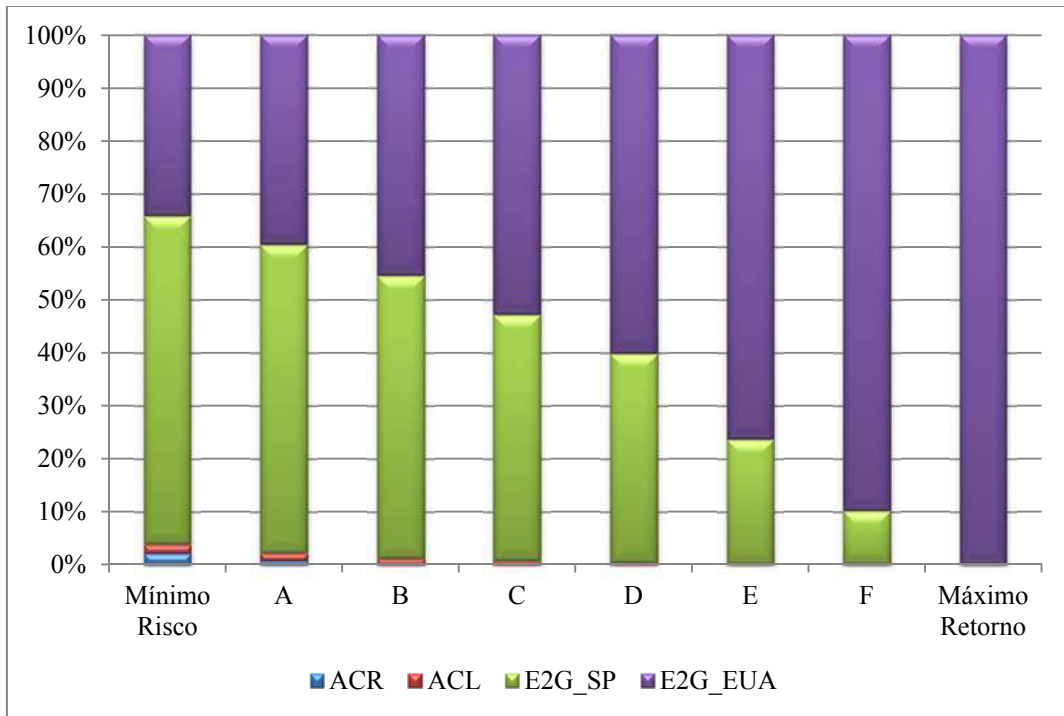


Gráfico 9: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 3)

Fonte: Elaboração própria.

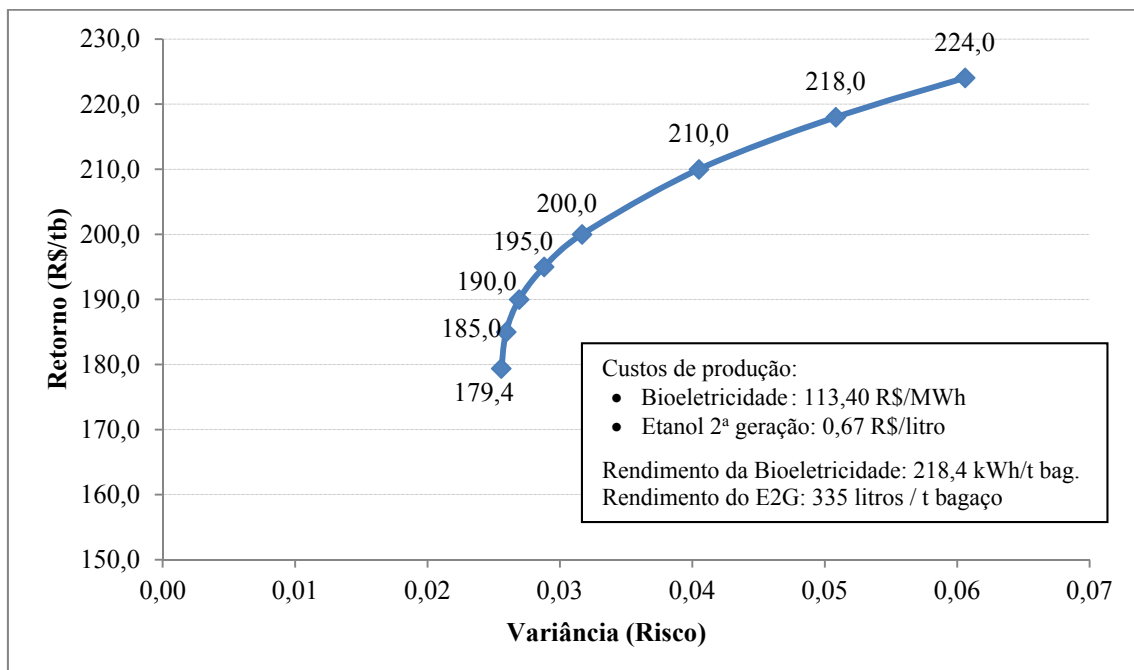


Gráfico 10: Fronteira Eficiente do Cenário 3

Fonte: Elaboração própria.

No cenário 3, a melhor decisão, quando se busca o mínimo risco, seria alocar aproximadamente 96% do bagaço para a produção do etanol lignocelulósico, sendo 62% para o mercado paulista e 34% para a Califórnia, e os 4% restantes para a produção de bioeletricidade, divididos igualmente no ACR e no ACL. O retorno seria de R\$ 179,4 por tonelada de bagaço e uma variância de 0,026, como mostrado no Gráfico 6.

No Cenário 4, a unidade produtora, possui caldeira de 90 bar e efficientização da produção de etanol lignocelulósico, representada através da redução de custos de produção. Com isso, a bioeletricidade reduz seus custos para R\$ 94,90 / MWh e aumenta seus rendimentos para 283,2 kWh/t bagaço. O etanol lignocelulósico tem custos de produção reduzidos para R\$ 0,67 / litro, e seu rendimento passa para 335 litros /t seca ML, vide Tabela 10.

Tabela 15 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 4)

Pontos da Fronteira Eficiente	Retorno (R\$/t bagaço)	Variância (Risco)	ACR	ACL	E2G_SP	E2G_EUA
Ponto de Mínimo Risco	154,9	0,022	19,7%	0,5%	51,4%	28,4%
A	165,0	0,023	14,3%	0,4%	51,9%	33,4%
B	175,0	0,024	9,0%	0,4%	52,3%	38,3%
C	185,0	0,026	3,7%	0,3%	52,8%	43,2%
D	195,0	0,029	0,0%	0,1%	48,4%	51,5%
E	205,0	0,036	0,0%	0,0%	32,0%	68,0%
F	215,0	0,047	0,0%	0,0%	15,2%	84,8%
Ponto de Máximo Retorno	224,0	0,061	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%

Fonte: Elaboração própria.

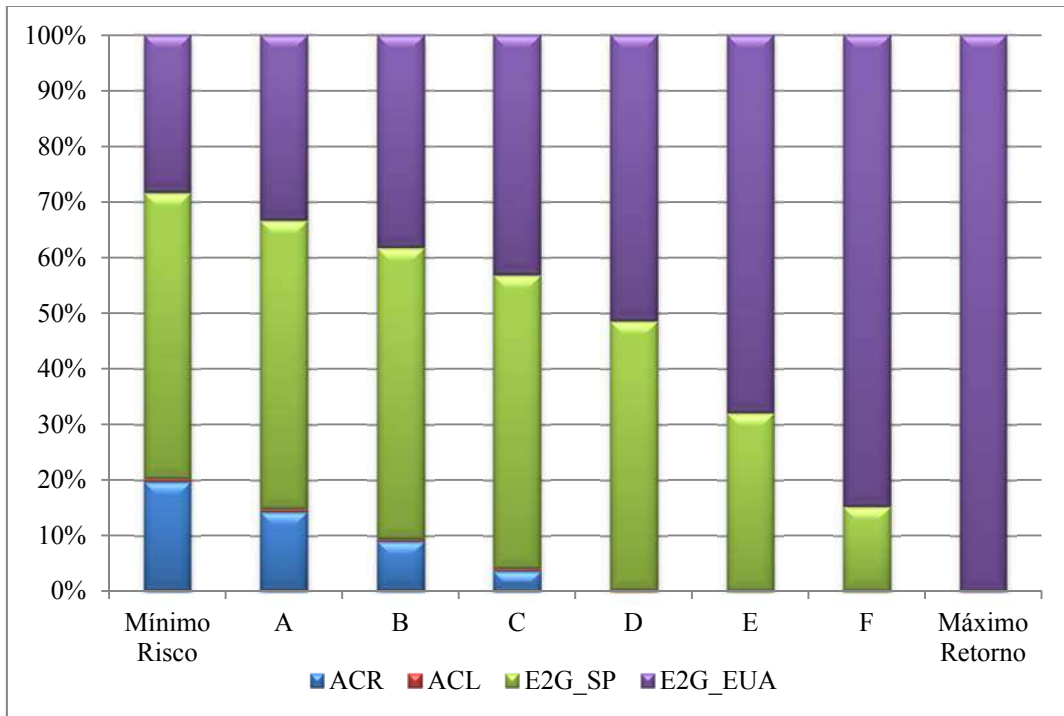


Gráfico 11: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 4)

Fonte: Elaboração própria.

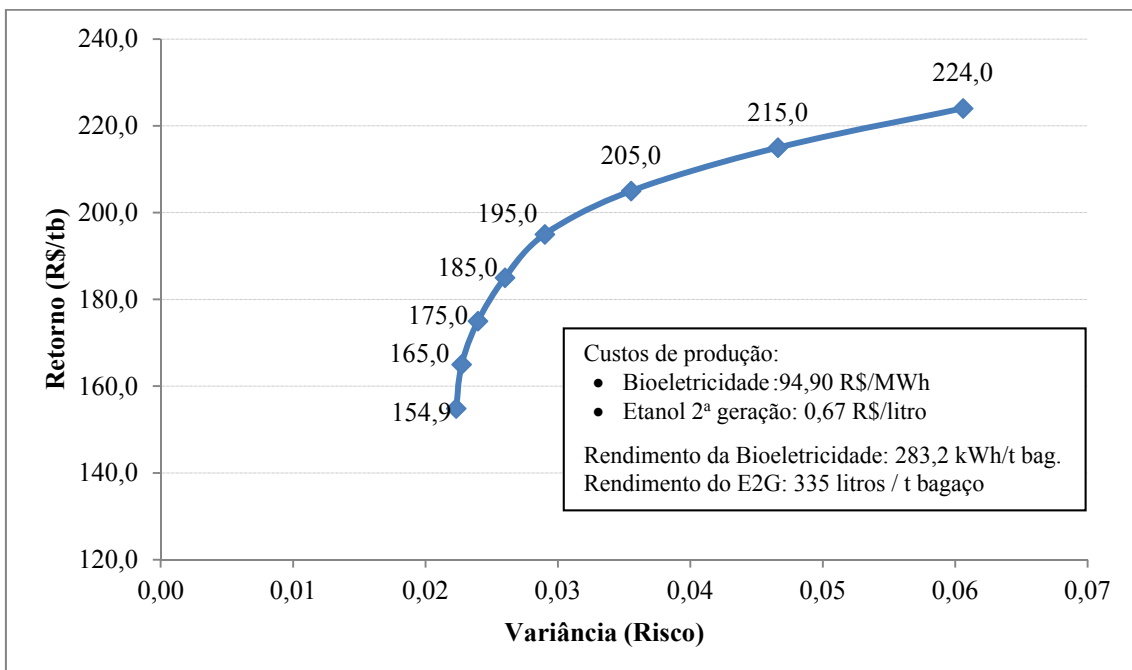


Gráfico 12: Fronteira Eficiente do Cenário 4

Fonte: Elaboração própria.

No cenário 4, a melhor decisão seria alocar aproximadamente 80% do bagaço para a produção do etanol lignocelulósico, sendo 51,4% para o mercado paulista e 28,4% para a Califórnia, e os 20% restantes para a produção de bioeletricidade, no ACR. O retorno seria de R\$ 154,9 por tonelada de bagaço e uma variância de 0,022, como mostrado no Gráfico 6.

O Cenário 5, apresenta os mesmos condicionantes do cenário 4, ou seja, unidade produtora com caldeira de 90 bar e produção de etanol lignocelulósico eficientizada, no entanto, adiciona-se um prêmio ao preço do E2G em São Paulo de R\$ 0,20/ litro. Recapitulando, a bioeletricidade possui custos de produção de R\$ 94,90 / MWh e rendimentos de 283,2 kWh/t bagaço. O etanol lignocelulósico possui custos de produção de R\$ 0,67 / litro e rendimento de 335 litros /t seca ML.

Tabela 16 - Percentual do bagaço alocado para cada ativo, retornos e riscos da fronteira eficiente (Cenário 5)

Pontos da Fronteira Eficiente	Retorno (R\$/t bagaço)	Variância (Risco)	ACR	ACL	E2G_SP	E2G_EUA
Ponto de Mínimo Risco	179,6	0,016	13,6%	0,4%	67,9%	18,1%
A	185,0	0,016	10,6%	0,4%	69,5%	19,5%
B	190,0	0,017	7,8%	0,3%	71,1%	20,8%
C	195,0	0,017	5,0%	0,3%	72,6%	22,1%
D	205,0	0,019	0,0%	0,1%	72,5%	27,4%
E	210,0	0,022	0,0%	0,0%	54,1%	45,9%
F	215,0	0,031	0,0%	0,0%	34,8%	65,2%
Ponto de Máximo Retorno	224,0	0,061	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%

Fonte: Elaboração própria.

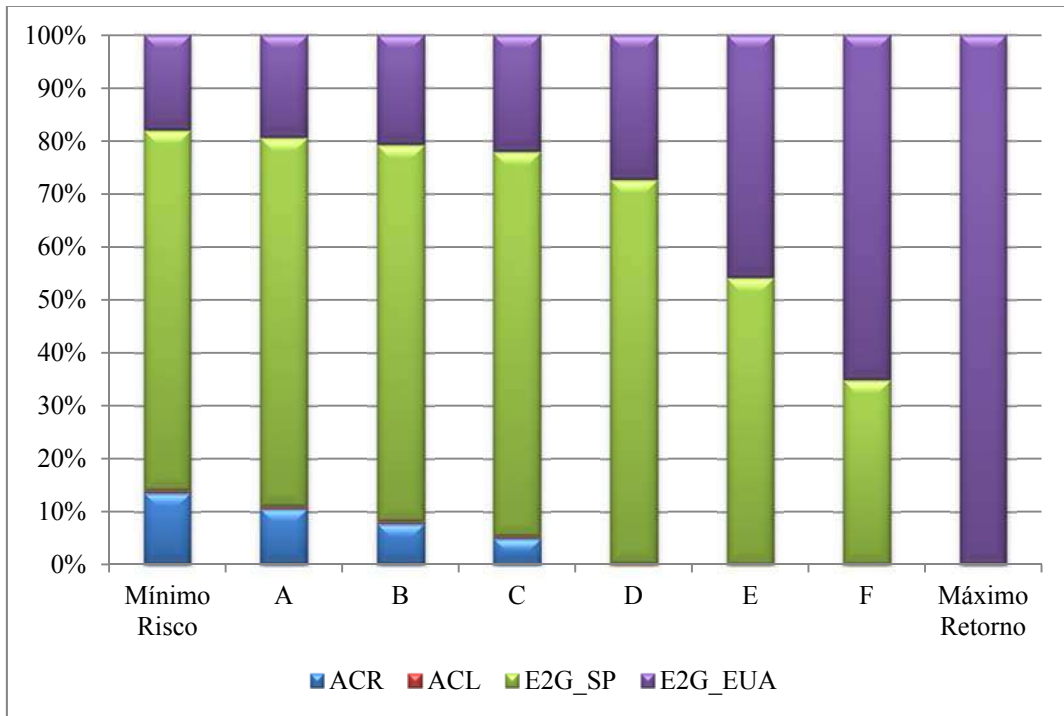


Gráfico 13: Percentual do bagaço alocado por ativo em oito carteiras (Cenário 5)

Fonte: Elaboração própria.

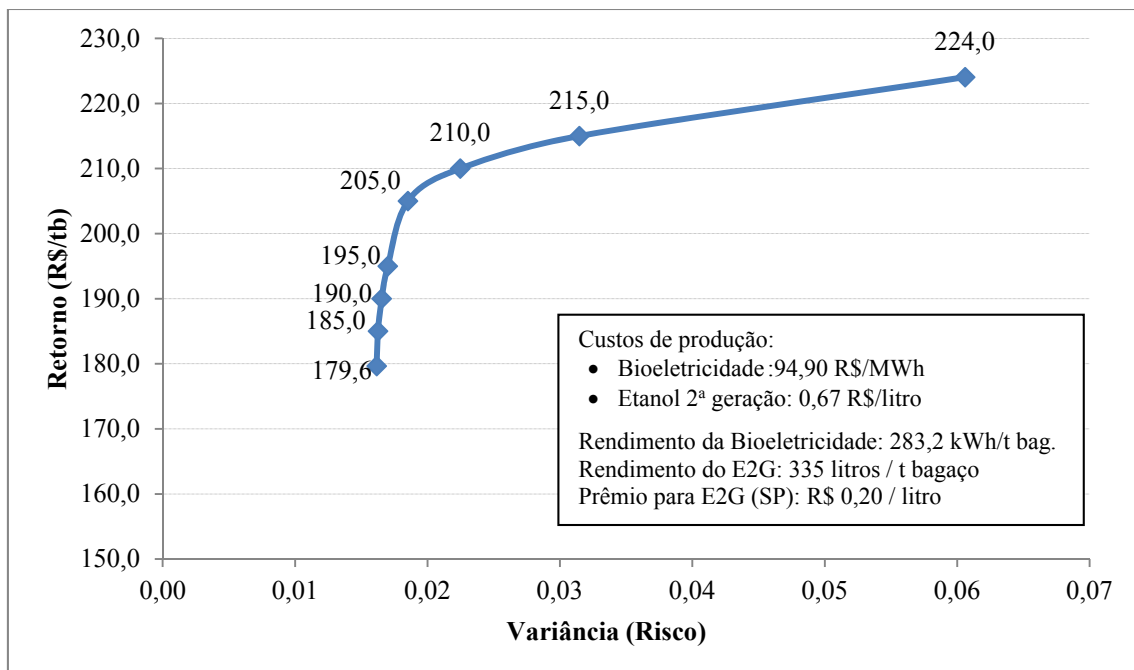


Gráfico 14: Fronteira Eficiente do Cenário 5

Fonte: Elaboração própria.

No cenário 5, a melhor decisão seria alocar 86% do bagaço para a produção do etanol lignocelulósico, sendo 68% para o mercado paulista e 18% para a Califórnia, e os 14% restantes para a produção de bioeletricidade. O retorno seria de R\$ 179,60 por tonelada de bagaço e uma variância de 0,016. Neste cenário, com a inserção do prêmio de R\$ 0,20 / litro de etanol, a alocação do bagaço para o mercado paulista é maior em quase todas as carteiras, exceto a de máximo retorno, quando comparado com o cenário 4.

Em resumo, as condições tecnológicas não eficientizadas de produção de etanol lignocelulósico com altos custos de produção, somadas à grande variabilidade de preços, fazem com que a alocação do bagaço nos portfólios de menores riscos seja maior para a bioeletricidade no mercado regulado. A inserção de um pacote tecnológico de bioeletricidade na usina de referência aumenta ainda mais a alocação do bagaço para esse mercado, nos portfólios de menores riscos, aumentando os retornos e diminuindo os riscos.

A partir do momento em que se insere o pacote tecnológico da produção do etanol de segunda geração, que proporciona uma redução de seus custos em um patamar inferior ao etanol convencional, a alocação do bagaço migra da bioeletricidade no mercado regulado para o etanol lignocelulósico. Com isso, os riscos dos portfólios diminuem consideravelmente e seus retornos também crescem em grande magnitude. A introdução de um prêmio ao preço do etanol vendido em São Paulo faz com a alocação do bagaço para esse mercado seja maior, quando comparado ao cenário 4, no qual tal incentivo não existe.

Capítulo V – Conclusão

Nos últimos anos, uma nova tecnologia de produção do etanol, a partir de material lignocelulósico como, por exemplo, bagaço, palhas e pontas, que são resíduos do processo produtivo da cana, se colocou como impulsionador do setor sucroenergético. A produção de etanol por área sairia dos atuais 7.500 litros por hectare, para cerca de 12.000 litros por hectare. Seria a introdução de um novo ativo, dada à baixa intensidade de carbono associada ao seu processo produtivo e à valoração de suas externalidades em vários países.

Apesar de ser uma tecnologia nova, esta se encontra em um estágio intermediário de desenvolvimento e ainda necessita solucionar alguns problemas, como, por exemplo, aperfeiçoar as etapas de pré-tratamento e filtragem e reduzir o custo das enzimas para sua definitiva expansão. Portanto, com o desenvolvimento e a disseminação da tecnologia de produção do etanol lignocelulósico, abre-se um novo leque de opções para o uso energético do bagaço, assim como, um novo problema de decisão sobre como alocar esse insumo.

Este trabalho procurou analisar a competição pelo bagaço para a produção de etanol lignocelulósico comercializado nos mercados paulista e californiano, assim como, para a produção de eletricidade comercializada nos ambientes de contratação livre e regulado, sob a ótica risco *versus* retorno. Para isso, adaptou-se o modelo de determinação da carteira eficiente, segundo a teoria moderna do portfólio desenvolvida por Markowitz, considerando as particularidades do setor sucroenergético. Além disso, foi analisado o impacto na relação risco / retorno, a partir da introdução de pacotes tecnológicos para a produção do etanol lignocelulósico e da bioeletricidade, assim como, a introdução de um prêmio, como forma de mitigar riscos e alavancar retornos, em cinco diferentes cenários.

Como resultado da adaptação do modelo de Markowitz, concluiu-se que no estágio atual de desenvolvimento da produção do etanol lignocelulósico, o qual possui elevados custos de produção, o portfólio de menor risco possui grande alocação do bagaço para a bioeletricidade vendida no ambiente regulado, devido à menor volatilidade de seus preços de venda. Quando a propensão ao risco aumenta, a participação do etanol

lignocelulósico também cresce fortemente para o mercado californiano, visto que os retornos são maiores.

Quando é inserido o pacote tecnológico eficientizado da produção do etanol de segunda geração, que considera a redução de seus custos em um patamar inferior ao etanol convencional, os riscos dos portfólios diminuem consideravelmente e seus retornos também crescem em grande magnitude. Nesse caso, o portfólio de menor risco passa a ser aquele que contém maior alocação do bagaço para o E2G, principalmente para o mercado paulista.

Como recomendação para trabalhos futuros, poderiam ser inseridos na análise outros aspectos como o aumento da disponibilidade de combustível (biomassa), através do maior percentual de palha e pontas levadas para a unidade industrial, ou do uso de variedades de cana com maior percentual de fibras por tonelada, introduzindo-se os custos relacionados a essas aplicações e os rendimentos associados.

Referências Bibliográficas

ANEEL, 2006. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução normativa nº 235, de 14 de novembro de 2006. Estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogeneradoras de energia*. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2016.

ANEEL, 2008. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Atlas de energia elétrica do Brasil. 3ª ed. – Brasília, 2008*. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2016.

ANEEL, 2016. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Banco de Informações de Geração - BIG. Capacidade de Geração do Brasil*. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 18 set. 2016.

ARB, 2016a. AIR RESOURCE BOARD. *Data Dashboard*. Disponível em: <https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/dashboard/dashboard.htm>. Acesso em: 20 dez. 2016.

ARB, 2016b. AIR RESOURCES BOARD. *Low Carbon Fuel Standard*. Disponível em: <https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs.htm>. Acesso em: 20 dez. 2016.

ARCE, P. E. B., 2014. *Aplicação da teoria do portfólio para otimização de carteiras de contratos de energia elétrica e gestão de risco*. Dissertação de M.S.c., Programa de Engenharia Elétrica, USP, São Pulo, SP, Brasil.

BASTOS, V. D., 2007. *Etanol, Alcoolquímica e biorrefinarias*. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 25, p. 5-38, mar. 2007.

BIOFUELSDIGEST, 2016. *Biofuels Mandates Around the World: 2016*. Disponível em <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/01/03/biofuels-mandates-around-the-world-2016/>. Acesso em 14 nov. 2016.

BITHAS, K. E KALIMERIS, P., 2016. *Revisiting the Energy-Development Link*, Springer Briefs in Economics, DOI 10.1007/978-3-319-20732-2_2

BNDES, 2007. BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Perspectivas do Investimento. Capítulo VII: Setor Sucroalcooleiro Brasileiro*

Evolução e Perspectivas. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 12 dez. 2016.

BNDES, 2008. BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Livro Bioetanol de cana-de-açúcar : Energia para o desenvolvimento sustentável*. 1ª Edição. Rio de Janeiro, 2008.

BNDES, 2015. BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar – uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública*. BNDES Setorial 41, p. 237-294, mar. 2015.

CARPIO, L. G. T., 2017. *Optimal allocation of the sugarcane bagasse to produce bioelectricity and second-generation ethanol in Brazil*. To appear in Renewable Energy.

CASTRO, N. J. de; BRANDÃO, R. e DANTAS, G. de A., 2008. *Importância e perspectivas da bioeletricidade sucroenergética na matriz elétrica brasileira*. Rio de Janeiro: GESEL (UFRJ), 2008. (Trabalho publicado em versão preliminar).

CCEE, 2016. CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *“Geração Verificada das Usinas Térmicas a Biomassa”*. Acordo Institucional EPE - CCEE.

CCEE, 2017a. CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Preço de Liquidação de Diferenças mercado SE/CO*. Disponível em <http://www.ccee.org.br>.

CCEE, 2017b. CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Energia Comercializada nos leilões de energia*. Disponível em <http://www.ccee.org.br>.

CEPEA, 2016. CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. *PIB de cadeias agropecuárias*. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-de-cadeias-agropecuarias.aspx>. Acesso em: 07 dez. 2016.

CEPEA, 2017. CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. *Preços Agropecuários - Etanol*. Disponível em:

<http://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol-mensal-sp.aspx>. Acesso em: 07 fev. 2017.

CGEE, 2007. CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 2, Capítulo 2*. Campinas, 2007.

CGEE, 2009. CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil*. Brasília, 2009.

CONAB, 2016. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar – Quarto Levantamento da safra 2015/16*. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em 14 abr. 2016.

CORRÊA NETO, V., RAMON, D., 2002, “Análise de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucroalcooleiro”, SETAP – Sustainable Energy Technology Assistance Program, Brasília, 116 p.

COSTA, C. B. B., POTRICH, E. e CRUZ, A.J.G, 2015. *Multiobjective optimization of a sugarcane biorefinery involving process and environmental aspects*, Renewable Energy 96 (2016) 1142–1152, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.043>.

CPFL ENERGIA, 2015. *Projeto de P&D “Panorama e análise comparativa da tarifa de energia elétrica do Brasil com tarifas praticadas em países selecionados, considerando a influência do modelo institucional vigente”*. Relatório v – formação de custos e preços de geração e transmissão de energia. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/inovacao/projetos/Documents/PB3002/formacao-de-custos-e-precos-de-geracao-e-transmissao.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2017.

CTBE, 2016. LABORATÓRIO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO BIOETANOL. *Comunicação Pessoal*.

CTC, 2016. CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. *Comunicação Pessoal*.

DAMODARAN, A., 1996, *Investment valuation: tools and techniques for determining the value of any asset*. New York: Wiley, 1996.

DANTAS, G. A., 2013. *Alternativas de Investimento do Setor Sucroenergético Brasileiro para Aproveitamento de Bagaço e de Palha*. Tese de D.S.c., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DIAS, M.O.S, 2011. *Desenvolvimento e otimização de processos de produção de etanol de primeira e segunda geração e eletricidade a partir da cana-de-açúcar*. Tese de D.S.c., Faculdade de Engenharia Química/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; CAVALETT, O. *et al.*, 2012. "Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash". *Bioresource Technology*, v. 103, (2012), pp. 152–161,

DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; CAVALETT, O. *et al.*, 2013. "Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane". *Chemical Engineering Research and Design*, v. 91, (2013), pp. 1411–1417.

EIA, 2015. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Monthly energy review: Renewable energy. Total Energy Data, 2015*. Disponível em: <http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/index.cfm>. Acesso em: 02 mai. 2016.

EPA, 2009. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE)*. Disponível em <http://www.epa.gov/mtbe/index.htm>. Acesso 6 set. 2012.

EPA, 2016. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Proposed renewable fuel standards for 2017, and the biomass - based diesel volume for 2018. Renewable Fuel Standard Program: Regulations & Volume Standards, 2016*. Disponível em: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/regulations-and-volume-standards-under-renewable-fuel-standard>. Acesso em: 01 jun. 2016.

EPA, 2017a. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Renewable Identification Numbers (RINs) under the Renewable Fuel Standard Program*. Disponível em: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-identification-numbers-rins-under-renewable-fuel-standard>. Acesso em: 15 jan. 2017.

EPA, 2017b. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. "Environmental Protection Agency. *Cellulosic Waiver Credits Purchased Annually*". Disponível em:

<https://www.epa.gov/fuels-registration-reporting-and-compliance-help/cellulosic-waiver-credits-purchased-annually>. Acesso em: 26 jan. 2017.

EPE, 2016a. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. “*Balanco Energético Nacional – 2016 , ano base 2015*”. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em: 16 out. 2016.

EPE, 2016b. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2015*. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Petroleo/Paginas/PaineldeBiocombust%C3%ADveis%E2%80%9393Boletinsdean%C3%A1lisedeconjuntura.aspx>. Acesso em: 16 out. 2016.

EPE, 2016c. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Comunicação Pessoal*.

EUA, 2007. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. *Energy independence and security act of 2007*. Washington, DC, 19 dez. 2007. Disponível em <http://www.govtrack.us/congress/billtext.xpd?bill=h110-6>. Acesso em: 13 jan. 2008.

EURACTIV, 2015. *Lawmakers agree to limit food-based biofuels*, 2015. Disponível em <http://www.euractiv.com/section/sustainable-dev/news/lawmakers-agree-to-limit-food-based-biofuels/>. Acesso em: 20 dez. 2015.

GRANBIO, 2016. *Bioflex I*. Disponível em <http://www.granbio.com.br/conteudos/biocombustiveis/>. Acesso em: 4 mar. 2016

GRISI, E.F., YUSTA, J.M. E DUFO-LÓPEZ, R., 2012. “*Opportunity costs for bioelectricity sales in Brazilian sucro-energetic industries*”, *Appl. Energy* 92 (2012) 860–867. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.045>.

HAMELINCK, C. N. *et al.*, 2005. “*Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short, middle and long-term*”. *Biomass and Bioenergy*, v. 28, (2005), pp. 384–410.

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

IEA, 2017. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *How2Guide for Bioenergy. Roadmap Development and Implementation*. Disponível em:

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/How2GuideforBioenergyRoadmapDevelopmentandImplementation.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2017.

IPEA, 2017. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. *IPEADATA*. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/>. Acesso em: 12 jan. 2017.

IRENA, 2014. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Global Bioenergy Supply and Demand Projections. A working paper for REmap 2030*. Disponível em: https://www.irena.org/remap/IRENA_REmap_2030_Biomass_paper_2014.pdf. Acesso em: 11 out. 2016.

IRENA, 2017. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Avoided Emissions Calculator*. Disponível em: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=17&subTopic=55>. Acesso em: 04 fev. 2017.

ISO, 2015. INTERNATIONAL SUGAR ORGANIZATION. *Ethanol Yearbook 2015*. Disponível em: <http://www.isosugar.org/publication/3/ethanol-yearbook-2015>. Acesso em: 03 nov. 2016.

LIKVERN, R, 2014. *The powers of fossil fuels. Fractional Flow*. Disponível em: <https://fractionalflow.com/2014/10/10/the-powers-of-fossil-fuels/#more-869>. Acesso em: 10 out. 2016.

LOPES, O. A., 2013. *Avaliação de métodos avançados de geração de energia elétrica na indústria de açúcar e bioenergia*. Dissertação para M.S.c. pela Escola de Economia de São Paulo/FGV, São Paulo, SP, Brasil.

MACEDO, F. DOS S., 2011. *A reestruturação do setor sucroenergético no Brasil: uma análise do período entre 2005 e 2011*. Dissertação de M.S.c. EESP/FGV, São Paulo, SP, Brasil.

MACEDO, I. C., 2005. *Sugar cane's energy – Twelve studies on Brazilian sugar cane agribusiness and its sustainability*. São Paulo: UNICA, 2005.

MACEDO, I. C. *et al.*, 2008. “Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 average and a prediction for 2020”. *Biomass and Bioenergy*, v. 32 (4), 2008.

MALUF, G., 2014. *A competição entre o etanol de segunda geração e a produção de eletricidade pelo uso do bagaço*. Dissertação de M.S.c. EESP/FGV, São Paulo, SP, Brasil.

MAPA, 2015. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Portaria MAPA nº 75, de 05 de março de 2015. Fixa, o percentual obrigatório de adição de etanol anidro combustível à gasolina*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 06 mar. 2015. Disponível em: www.agricultura.gov.br. Acesso em: 24 fev. 2016.

MARKOWITZ, H., 1952. *Portfolio Selection*, *The Journal of Finance* 7, páginas 77 a 91, ano 1952.

MONTEIRO, B. M. M. S., 2012. *Otimização de um Portfólio de Investimentos e a sua Modelação*. Dissertação de M.S.c.. FEP/UPORTO, Porto, Portugal.

MTE, 2016. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. *Anuário Estatístico da RAIS - 2016*. Disponível em: <http://pdet.mte.gov.br/anuario-rais>. Acesso em: 06 out. 2016.

NUNES, R. M.; GUARDA, E. A.; SERRA, J. C. V.; MARTINS, A. A., 2013. *Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil*. *Revista Liberato, Novo Hamburgo*, v.14, (2013), n. 22, p. 113-238.

OLIVEIRA, C.M., CRUZ, A.J.G. E COSTA, C.B.B., 2016. *Improving second generation bioethanol production in sugarcane biorefineries through energy integration*, *Applied Thermal Engineering* 109 (2016) 819 – 827, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.016>.

ONDREY, G., 2006. “The path to biorefineries”. *Chemical Engineering*, v. 113 (4), 2006.

ONU, 2016. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Conferência das Partes. Vigésima primeira sessão*. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acordodeparis/>. Acesso em: 12 dez. 2016.

PECEGE, 2016. PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS/ESALQ/USP. *Custos de produção agroindustrial cana, açúcar e etanol*. Piracicaba, 2016. Disponível em: <http://pecege.dyndns.org/>. Acesso em: 17 set. 2016

QD, 2016. Editora Química e Derivados. *Biocombustíveis: Etanol celulósico enfrenta crise setorial e petróleo mais barato*. Disponível em <http://www.quimica.com.br/pquimica/29629/biocombustiveis-etanol-celulosico-enfrenta-crise-setorial-e-petroleo-mais-barato/4/>. Acesso em: 2 fev. 2016.

RAIZEN, 2016. *Relatório de Sustentabilidade 2015*. Disponível em: <http://www.raizen.com/relatorio-de-sustentabilidade-2015>. Acesso em: 4 mar. 2016.

RIBAS, R. P., 2008. *Estratégias de empresas de petróleo no cenário de mudanças climáticas globais*. Dissertação de M.S.c.. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANTOS, I. F. DOS., 2010. *Simulação de arranjos cogeneradores visando análise energética e viabilidade econômica*. Dissertação de M.S.c.. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, UFSJ, São João Del Rei, MG, Brasil.

SEABRA, J. E. A., 2008. *Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações*. Tese de D.S.c., Faculdade de Engenharia Mecânica/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

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

SILVA, Marcos V. G. DA., 2009. *Previsão de preços de etanol nos mercados domésticos e internacionais*. Dissertação de M.S.c., Faculdade de Economia e finanças/IBMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA, W. V. DA; et al., 2009. *Formulação de Carteiras Hipotéticas de Ativos Financeiros Usando a Técnica Multivariada de Análise de Agrupamento*. Revista Universo Contábil - FURB, Blumenau, v. 5, n.3, p. 43-59, jul./set. 2009.

SMIL, V., 1994. *Energy in World History*. Boulder, Co, USA. Westview Press. 168-169, 300 páginas.

TATONI, W. M., 2012. *Avaliação de projetos de investimento em cogeração de energia utilizando bagaço de cana-de-açúcar em biorrefinarias a partir do uso da teoria das opções reais*. Dissertação de M.S.c. EESP/FGV, São Paulo, SP, Brasil.

TOLMASQUIM, M.T., 2016. *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2016.

UE, 2008. UNIÃO EUROPEIA. *EP seals climate change package*. Parlamento Europeu. Disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20081208BKG44004+0+DOC+XML+V0//EN>. Acesso em: 04 jul. 2010.

UE, 2009. UNIÃO EUROPEIA. *MEP's and Council Presidency Reach Deal on Renewables Directive*. Disponível em <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20081209IPR44022+0+DOC+XML+V0//EN>. Acesso em 12 abr 2010.

USDA, 2017. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *U.S. Bioenergy Statistics*. Disponível em: www.ers.usda.gov/data-products/us-bioenergy-statistics/us-bioenergy-statistics/#Prices. Acesso em: 26 jan. 2017.

VIGNIS, 2017. Comunicação Pessoal. Disponível em: <http://www.vignis.com.br/>. Acesso em: 04 fev. 2017.

YU, YUAN-SHENG, 2016. *Uncovering the Cost of Cellulosic Ethanol Production*. LUX RESEARCH, 2016. Disponível em: <https://members.luxresearchinc.com/research/report/18478>. Acesso em: 30 mar. 2016.

Anexo A

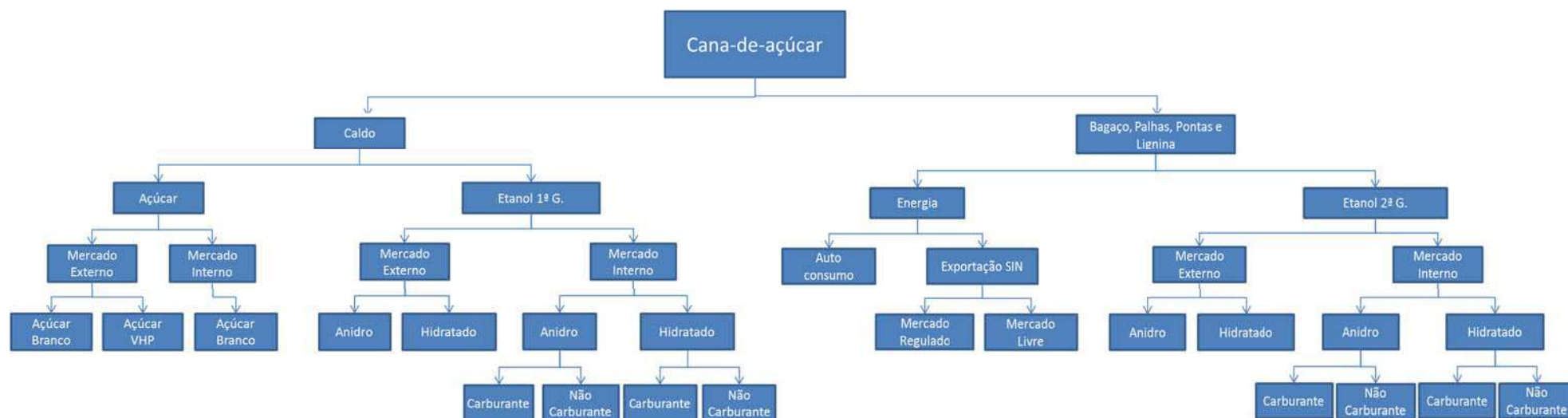


Figura 8: Produtos da cana por uso

Fonte: Elaboração própria

ANEXO B

Tabela 17 - Mandatos mundiais de etanol*

América	Mandato Atual	Previsto
Argentina	E5	-
Brasil	E27	E27,5
Canada	E5 - 5 províncias até E8,5	-
Chile	-	E5
Colômbia	E8	Discussão E10
Costa Rica	E7	-
Equador	-	E10 em 2018
Estados Unidos	E10 nacional e autorização para E15 e E85 em alguns estados..	Eliminação do E10 em alguns estados
Jamaica	E10	-
México	E2 em Guadalajara	E2 na Cidade do México e Monterrey
Panamá	E7	E10 em 2016
Paraguai	E25	E27,5
Peru	E7,8	-
Uruguai	E5 em 2015	-
Ásia	Mandato Atual	Previsto
Austrália	E7 em Nova Gales do Sul	E5 em 2017 e E10 em 2020 - país
China	Algumas províncias E10	15% para biocomb. em 2020
Fiji	E10 voluntario	-
Filipinas	E10	-
Índia	E10	20% para biocomb. em 2017
Indonésia	E3	-
Taiwan	E3	-
Vietnam	E5 em algumas cidades	-
África	Mandato Atual	Previsto
África do Sul	E2	-
Angola	E10	-
Etiópia	E5	E10
Quênia	E10 em Kisumu	-
Malawi	E10	-
Moçambique	E10	-
Nigéria	-	E10
Sudão	E5	-
Europa	Mandato Atual	Previsto
Europa	5,75% de biocombustíveis no consumo final automotivo (E5)	7% de biocomb. no consumo final automotivo em 2020

* E(x): x% de etanol na gasolina

Fonte: Adaptado de BIOFUELSDIGEST, 2016