

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS
ESCOLA DE ECONOMIA DE SÃO PAULO

MARCIO AURÉLIO SOARES SANTOS

**O QUE FAZER COM O BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR? UMA ABORDAGEM
DA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS APLICADA A USINAS DE PROCESSAMENTO
DE ETANOL E AÇÚCAR DA REGIÃO DE PIRACICABA**

SÃO PAULO
2015

MÁRCIO AURÉLIO SOARES SANTOS

**O QUE FAZER COM O BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR? UMA ABORDAGEM
DA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS APLICADA A USINAS DE PROCESSAMENTO
DE ETANOL E AÇÚCAR DA REGIÃO DE PIRACICABA**

Dissertação apresentada à Escola de Economia
de São Paulo, da Fundação Getúlio Vargas –
EESP – FGV, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Agronegócio.

Campo de conhecimento: Agroenergia

Orientador Prof. Dr. Ricardo Ratner Rochman

SÃO PAULO

2015

Santos, Marcio Aurélio Soares.

O que fazer com o bagaço da cana de açúcar? Uma abordagem da teoria das opções reais aplicada a usinas de processamento de etanol e açúcar da região de Piracicaba / Marcio Aurelio Soares Santos – 2015

51 f

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ratner Rochman

Dissertação (mestrado) – Escola de Economia de São Paulo – Fundação Getúlio Vargas – EESP/FGV.

1. Opções Reais (Finanças). 2. Investimentos – Análise. 3. Agroenergia. 4. Usinas de Cana-de-Açúcar. I. Rochman, Ricardo Ratner. II. Dissertação Mestrado (MPAGRO) – Escola de Economia de São Paulo. III. Título.

CDU 620.9

MARCIO AURÉLIO SOARES SANTOS

**O QUE FAZER COM O BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR? UMA ABORDAGEM
DA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS APLICADA A USINAS DE PROCESSAMENTO
DE ETANOL E AÇUCAR DA REGIÃO DE PIRACICABA**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Escola de Economia da Escola de
Economia de São Paulo da Fundação
Getúlio Vargas – EESP/FGV, como
requisito para a obtenção de título de
Mestre em Agronegócio.

Data de Aprovação:

__/__/____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Ratner Rochman
(Orientador)
FGV-SP

Prof. Dr. Angelo C. Gurgel
(FGV-SP)

Prof. Dr. Zilmar José de Souza
(UNICA)

Para as meninas

AGRADECIMENTOS

Obrigado

Ao Deus Eterno criador dos céus e da terra e de tudo que neles há.

As meninas (Mika, Yuri e Hanna) que sempre me incentivaram a buscar novos desafios e também a fazer o melhor uso do tempo.

A minha mãe, meus irmãos e irmã que sempre incentivaram ao estudo como forma de crescimento pessoal.

Aos colegas de classe e agora amigos (Cris, Felipe, Fernando, Marcelo, Nelson, Toni e Vini) que com muita descontração contribuiriam grandemente para no meu aprendizado.

Ao Angelo e ao Alexandre que foram além de suas atribuições para nos suportar, seja com uma palavra ou com um “puxão de orelhas”.

Aos Professores que com grandeza conduziram as discussões e a cada novo encontro nos desafiaram de forma objetiva a aprofundarmos no conhecimento, isto em um ambiente extremamente amigável e construtivo.

A Lindsay, que suportou e também incentivou o trabalho, em especial ao Dave que desde o início acreditou no projeto.

Aos amigos Samir, Marcos e Ricardo que me recomendaram e incentivam ao processo.

A Usina São Manoel e ao CTC que abriram as portas para discussões e forneceram os dados utilizados neste trabalho. Ao Godoy em especial pelo carinho e presteza a cada demanda.

Ao Prof. Ricardo Rochman que desde o início me desafiou, incentivou e orientou no trabalho com maestria.

RESUMO

O uso de resíduos da indústria canavieira, em particular o bagaço, é tema que ganha relevância desde a retomada do mercado de biocombustíveis, quando a produção ampliou significativamente o volume daquela biomassa. Existem trabalhos que tratam de apresentar subprodutos e tecnologias alternativas para o uso deste material e um conjunto outro de trabalhos apresenta análise de cenários de viabilidade econômica destas tecnologias. O objetivo deste trabalho é avaliar pela perspectiva econômico-financeira o melhor uso do bagaço da cana em um caso real. Para isto foi utilizada a Teoria das Opções Reais, como forma de analisar a melhor destinação do bagaço no horizonte de tempo de cinco anos, em uma dada região, em um estudo de caso de uma usina sucroenergética com possibilidade de produção de etanol de segunda geração e/ou venda do bagaço *in natura*. Desta forma concluiu-se no caso apresentado que a produção de etanol de segunda geração em escala industrial não atrai investimentos e, sob esta ótica, deve ser postergada pois requer significativa aumento de produtividade por tonelada de matéria seca, além de substancial redução no custo das enzimas de fermentação. Ainda, foi possível também identificar a necessidade de políticas de incentivo para atração de investimentos.

Palavras Chaves: Opções Reais, Modelo binomial, Etanol de segunda geração, Bagaço de cana-de açúcar, Biocombustíveis, Setor sucroenergético

ABSTRACT

The use of waste from the sugar cane industry, in particular bagasse, is a subject that becomes relevant since the resumption of the biofuels. There are works that address alternative technologies to the use of this material and a collection of other works which address the feasibilities. Therefore, this study is to evaluate the economic and financial perspective of sugarcane bagasse in an actual case. An application of the Theory of Real Options as a way to analyze the best allocation of bagasse within five years horizon, in a given region where the plant is located. The productivity and competitiveness of second-generation ethanol in contrast with the possibility of selling the bagasse. Thus it was concluded in the case presented that second-generation ethanol on an industrial scale production should be postponed since requires significant increase in productivity (litter per ton of dry bagasse) and significant reduction in the fermentation enzymes costs. Still, it was also possible to identify the need of public policy's to develop this industry.

Keywords: Real Options, Second-generation Ethanol, Sugar cane waste, biofuel, clean energy.

Lista de tabelas

Tabela 1: Quadro de plantas produtoras de E2G no Brasil

Tabela 2: Disponibilidade e potencial de conversão

Tabela 3: Resumo de valores de produção e produtividade de uma planta de cana-de-açúcar

Tabela 4: Retorno Sobre Investimento

Tabela 5: Modelo de Fluxo de Caixa

Tabela 6: Resumo de dados do preço do etanol hidratado

Tabela 7: Fluxo de caixa para venda do bagaço in natura (cenário base) nos cinco primeiros anos

Tabela 8: Fluxo de caixa para venda E2G (cenário base) nos cinco primeiros anos

Tabela 9: Resumo dos resultados de preços nominais do etanol hidratado

Tabela 10: Estatística descritiva dos resultados de preço do Etanol hidratado

Tabela 11: Valor das Opções Reais

Lista de figuras

Figura 1: Gráfico de investimentos do PAISS

Figura 2: Gráfico da evolução da geração da bioeletricidade da cana

Figura 3: Mapa de localização das Usinas de cana-de açúcar

Figura 4: Setor elétrico

Figura 5: Agentes do setor sucroenergético

Figura 6: Energia da cana-de-açúcar

Figura 7: Ambiente de tomada de decisão

Figura 8: Contexto de competição

Figura 9: Fontes de risco e incertezas

Figura 10: Árvore de decisão

Figura 11: Cenários propostos por BNDES Setorial (2015)

Figura 12: Gráfico Evolução dos custos de produção do Etanol de segunda Geração

Figura 13: Volatilidade de preços do etanol hidratado

Figura 14: Gráfico da distribuição de preços futuros calculados

Figura 15: Árvore de decisão E2G e Bagaço

Figura 16: Recorte da árvore de decisão

Figura 17: Evolução da tecnologia

Figura 18: Gráfico de evolução dos custos

SUMÁRIO

1 - ARCABOUÇO INSTITUCIONAL DO SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO	17
1.1. O Setor Sucroenergético	17
1.1.1. As Usinas	17
1.1.2. Cogeração.....	19
1.1.3. Tecnologia E2G.....	19
1.1.4. Energia elétrica.....	20
1.1.5. Combustíveis	21
1.1.6. Biomassa de cana-de-açúcar	22
2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	23
3 - METODOLOGIA	36
3.1. Opções Reais.....	36
3.1.1. Fundamentos da teoria e principais trabalhos	36
3.1.2. Fluxo de caixa da Usina.	38
3.1.3. Método de cálculo.....	40
3.2. Premissas.....	41
3.2.1. Parâmetros de produtividade do E2G.....	41
4 - ESTUDO DE CASO	43
4.1. Cálculo do VPL e FCFF.....	43
4.2. Preços do Etanol Hidratado.....	44
4.2.1. Resultados dos cálculos.....	44
4.3. Variação de preços e Volatilidade	46
4.4. Preços de venda do bagaço posto na usina.....	47
4.5. Quadro resumo dos resultados	47
4.6. Arvore binomial.....	47
4.7. Análise de sensibilidade	50
5 - CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético desde 2014, com a crise do petróleo e na Petrobras, encontra-se diante de um novo período de transformações e potencial de crescimento sustentável. Pelo lado da demanda, a partir de 2003, com a introdução dos veículos bicomcombustível que representam 70% da frota nacional (EPE, 2013), e, também, o mandato brasileiro que impõe atualmente 27%, podendo ir até 27,5%, de etanol misturado à gasolina que é utilizada no abastecimento dos veículos (Lei nº 13.033, de setembro de 2014). Entretanto, estas foram medidas contingenciais pois houve o desincentivo ao setor com o controle de preços da gasolina abaixo dos preços do mercado mundial a partir de 2011, quando dos altos preços do Petróleo e o potencial de ganhos com a exploração do Petróleo do pré-sal passaram a ser prioridade para o Governo. Um segundo motor de demanda é a sustentabilidade, ao se considerar as ações e regulamentações que visam redução dos gases de efeito estufa com a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, entre outros aspectos relacionados, o setor se apresenta como alternativa viável e compatível com esta demanda conforme Relatório de Sustentabilidade 2011 (Unica, 2015), e também em CGEE, (2012) e Washington, (2010).

Pelo lado da oferta, das 389 usinas existentes, em 177 está presente a cogeração com exportação de excedentes de energia elétrica para a rede e existem 3 plantas para produção de Etanol de Segunda Geração (E2G), sendo apenas duas em atividade com escala industrial. O setor busca a retomada da rentabilidade, como destacou Elizabeth Farina Presidente da Única (Unica, 2015), e parte do problema pode ser explicado pelas políticas de controle de preços citada acima que por sua vez também que afetou o preço do etanol no mercado. Desde 2008, 67 unidades de processamento de cana (Usinas) já fecharam as portas, outras estão em recuperação judicial e dez poderão encerrar suas atividades na safra 2015/2016 (Unica, 2015). Com a possibilidade de produção de energia elétrica através da geração de energia elétrica e também de etanol de segunda geração (E2G), ambos a partir da biomassa, entre outros produtos que tem os subprodutos da cana como bloco construtor, é possível ampliar o ganho potencial do setor.

O problema não tem solução única, a melhor decisão de investimento pode variar, pois os preços relativos do produto variam em função de localização da produção e das condições logísticas (Guimarães, 2011). Em seu trabalho o mesmo autor identificou regiões com maior propensão ao consumo de etanol e regiões onde predomina o consumo de gasolina. O Estado de São Paulo apresentou paridade de preço de até 70% em relação a gasolina. Um outro aspecto relevante foi investigado por Orellano et al (2013), que em seu estudo sobre elasticidade-preço da demanda do etanol no Brasil, observaram variação relevante nas diferentes regiões do país. Concluíram que a elasticidade da demanda por etanol aumentou com a consolidação da tecnologia bicomcombustível embarcada em 70% da frota nacional de veículos. Os mesmos autores também observaram os diferenciais logísticos das regiões e seus efeitos sobre os preços relativos entre gasolina e etanol, bem como do nível da renda per capita. Tal fato afeta diretamente a estratégia de cada usina em função da região onde está localizada.

Um outro aspecto que deve ser observado é o porte das unidades, alternativas de investimento variam conforme a capacidade de processamento em toneladas Taton (2012). Em seu estudo cujo objetivo foi identificar o melhor momento para investir em cogeração com vista a mitigar riscos para o investidor, utilizou a ferramenta de análise conhecida como Teoria de Opções Reais (TOR), e, concluiu que os retornos possíveis variam em função da volatilidade de preços futuro da energia no mercado e porte da usina. Com base em três cenários analisados, produção de 2 Milhões (MM), 4MM e 6MM de toneladas de cana-de-açúcar processadas por safra, identificou que a opção de adiar o investimento em geração de energia elétrica cresce com o aumento da volatilidade dos preços no mercado de energia, entretanto permanece com a opção de investir em usinas de grande porte em ambientes de alta volatilidade quando existe apetite ao risco, pois, os ganhos serão exponencialmente maiores no caso da viabilização.

Para permitir maior coordenação das ações de fomento em projetos que contemplem o desenvolvimento, a produção e a comercialização de novas tecnologias industriais destinadas ao processamento da biomassa de cana de açúcar, em 2011, o BNDES em conjunto com a FAPESP lançaram o PAISS (Programa de Apoio à Inovação tecnológica industrial dos setores Sucroenergético e

Sucroquímico). Desde então o desenvolvimento do E2G ganhou força com uma linha de crédito exclusiva (BNDES, 2015), como apresentado no gráfico de investimentos do PAISS, Figura 1. A crise hídrica que coloca em risco o fornecimento de energia elétrica também traz oportunidades ao setor, de possibilidade de fornecer energia ao sistema e mitigar os efeitos do desabastecimento. Diante deste desafio, o Governo do Estado de São Paulo desonerou os investimentos em cogeração com redução do ICMS para este fim (Governo do Estado de São Paulo, 2012).

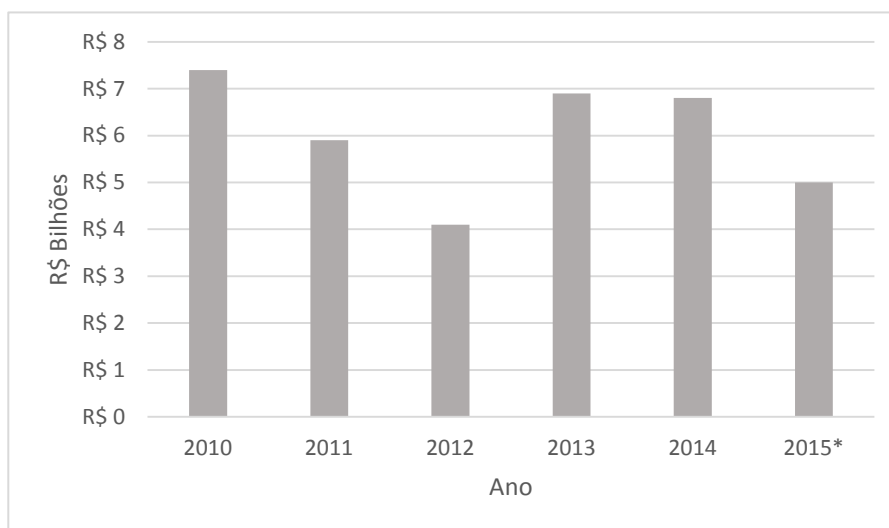


Figura 1: Gráfico de investimentos do PAISS

Elaboração própria

Fonte: (BNDES, 2015)

() estimativa – fonte: Unica (2015)*

Portanto, como alternativas à indústria sucroenergética tem-se a possibilidade de produzir E2G ou a geração de energia elétrica, ambos obtidos do bagaço. Em recente estudo, Maluf (2014) investigou a competição entre o etanol 2G e a cogeração através de um modelo computável de equilíbrio geral e concluiu que haverá uma forte competição pela utilização do bagaço, em especial com o incremento da competitividade do E2G em detrimento da cogeração; O mesmo estudo também conclui que haverá a liberação de terras de cultivo como consequência do aprimoramento tecnológico do E2G e também do aumento da produtividade, do E1G; Posteriormente, com o aumento da produtividade e volume do E1G, um possível aumento do volume de biomassa deverá ser dedicado à

cogeração em detrimento do E2G. Dias (2011), da mesma forma, levanta o questionamento sobre a competição ao avaliar o estágio de maturidade das tecnologias de produção de eletricidade e E2G; A autora apresenta resultados de cenários simulados com crescente nível tecnológico para ambas tecnologias, e observa melhoria dos indicadores econômicos com a adoção de novas tecnologias e que a produção de E2G somente se torna rentável quando os rendimentos de hidrólise e fermentação de pentoses estiverem disponíveis. Em um trabalho mais recente, também Dias *et al.* (2013), apresentam simulações de diferentes cenários e arranjos produtivos combinados entre as tecnologias em seus diferentes estágios de maturidade e conclui que a combinação de cogeração é vantajosa na maioria dos cenários estudados em que existe o arranjo produtivo combinado (E1G e E2G), mesmo com caldeiras de baixa pressão como 22 kgf/cm². Além de menor impacto ambiental pela maior eficiência na produção de energia por tonelada de matéria prima, há redução das emissões. Na prática pode-se observar que o as usinas já se deram conta da necessidade de ampliar a oferta de produtos, como podemos observar no gráfico de evolução de geração de bioeletricidade da cana da Figura 2:

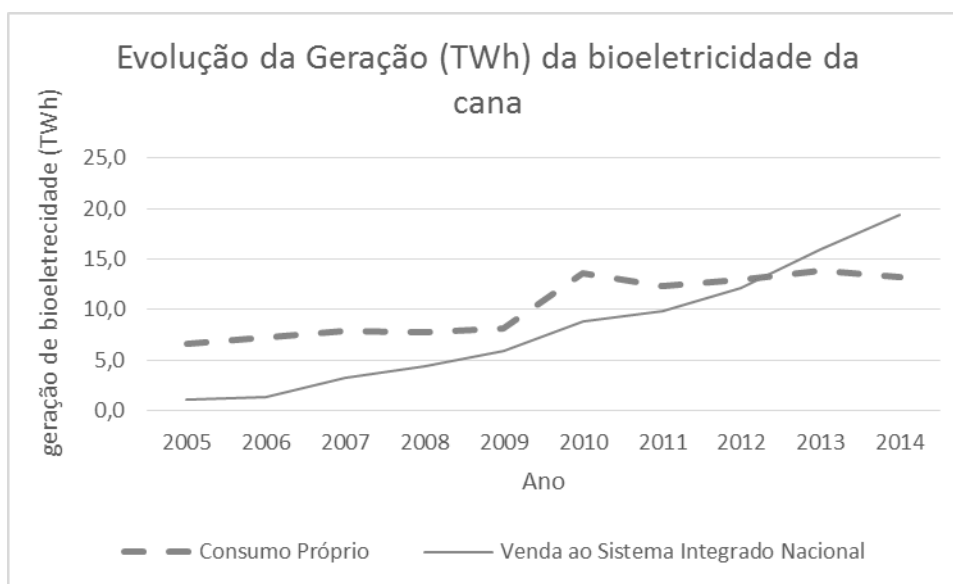


Figura 2: Gráfico da evolução da geração da bioeletricidade da cana

Elaboração própria

Fonte: Adaptado de (Unica Data, 2015)

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar qual a melhor tomada de decisão de uma unidade produtiva de açúcar e álcool em um contexto onde é

possível produzir E2G em escala comercial ou vender o bagaço para uma outra unidade fabril da região com capacidade ociosa de processamento deste para produção de energia elétrica. O trabalho será desenvolvido na forma de um estudo de caso de uma usina específica que apresenta condições necessárias para escolha entre as opções estudadas. Para isto será apresentado um modelo aplicado da Teoria de opções Reais, onde serão observados os retornos potenciais de cada opção. Com este espera-se descobrir se a opção de postergar investimentos em tecnologia pode trazer valor para o investidor, dado os diferentes estágios de desenvolvimento tecnológico disponíveis no mercado e na região específica onde pode existir forte competição pelo uso da matéria-prima.

Para isto, os próximos capítulos objetivam apresentar: no capítulo 2 o setor sucroenergético, a cogeração, a tecnologia de produção do E2G, o modelo do setor elétrico e o modelo do setor de combustíveis; no capítulo 3 a revisão bibliográfica, onde serão apresentados diferentes trabalhos que tratam do uso dos resíduos da cana; no capítulo 4 a metodologia de análise de projetos utilizada baseada na Teoria de Opções Reais; no capítulo 5 a modelagem desenvolvida com seus resultados e no capítulo 6 a conclusão com as considerações finais.

1 - ARCABOUÇO INSTITUCIONAL DO SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO

1.1. O Setor Sucroenergético

Neste capítulo serão apresentados dados do setor sucroenergético e uma breve descrição das tecnologias de cogeração e de produção do E2G. E ainda como parte da apresentação do setor, informações sobre os agentes de mercados de cogeração e do etanol.

1.1.1. As Usinas

Conforme dados (Unica, 2015), a produção de cana de açúcar no Brasil é responsável por aproximadamente 60 bilhões de Reais em receitas, e 7 milhões de hectares em todo país, aproximadamente 4,5 milhões de empregos. A estimativa é colher 590 milhões de toneladas na safra 2014/2015 e esta produção deve gerar aproximadamente de 32 milhões de toneladas de açúcar, 70% destinados à exportação. Além do açúcar, deverão ser produzidos 27,28 bilhões de litros de etanol, sendo 10,95 bilhões de litros de etanol anidro e o restante de etanol hidratado, ainda deste total produzido, 2,6 bilhões de litros destinados à exportação. Além destes, a partir do bagaço e da cana, em 2014, o setor ofertou ao Sistema Interligado Nacional (SIN) um total de 19,5 GWh, 4% do consumo total do país (Unica, 2015). Desde o início do ano de 2015 o setor colhe benefícios decorrente de iniciativas como a reintrodução da Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico, a CIDE, e elevação nas alíquotas de ICMS sobre a gasolina em vários estados, elevação do percentual de etanol anidro adicionado à gasolina (27%), além da redução das alíquotas incidente sobre o etanol hidratado em Minas Gerais. No início desta safra a opção foi ampliar a produção de etanol frente ao açúcar, isto pela maior liquidez do produto frente a uma frota de veículos bicombustível que já supera 60% da frota total (Unica Data, 2015) e em um contexto onde parte das unidades produtoras tem problemas de caixa. No período entre 2004 e 2014, os ganhos vieram da expansão de área cultivada, prioritariamente. A produtividade média foi de $66,7 \text{ t ha}^{-1}$, com desvio padrão de $3,8. \text{ t ha}^{-1}$, com picos de produtividade entre os anos de 2008 e 2010.

A produção está concentrada no centro sul do país como pode ser observado na Figura 3, onde é apresentada a localização das usinas em funcionamento no país

Figura 3: Mapa de localização das Usinas de cana-de açúcar



Elaborado pelo autor
Fonte: IBGE

Como forma de aumentar a receita e rentabilidade do setor, tendo em vista o volume de bagaço (biomassa) gerado na produção, a cogeração e o E2G se tornam alternativas viáveis à medida que ganham escala de produção e as tecnologias se consolidam em termos de eficiência produtiva. A biomassa da cana é aproximadamente 12,5% de fibras (Godoy, 2015), portanto, na safra 2013/2014 deve gerar mais de 37 milhões de toneladas de matéria seca. Assim, no caso da bioeletricidade que o setor ofertou para o SIN um total de 19,4 mil GWh em 2014, com o aproveitamento tanto do bagaço como da palha e com pleno uso energético desta biomassa, o potencial técnico poderia elevar o montante ofertado para 177 mil GWh em 2023 (Unica, 2015, p. 17). No caso do E2G, esperasse alcançar um elevação dos atuais 180 litros por tonelada de biomassa para 310 litros por tonelada de biomassa de cana em u horizonte de 10 anos (BNDES Setorial, 2015).

1.1.2. Cogeração

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cogeração pode ser definida 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. ”. No caso particular das usinas, de forma geral, o calor é gerado pela queima do bagaço, o vapor gerado nas caldeiras é expandido e convertido em energia elétrica em turbo geradores, o chamado ciclo de Rankine (Hassuani, 2005). Conforme Palacio (2010), caldeiras para produção de vapor a 120 kgf/cm² e 530°C estão disponíveis e permitem produção de grandes excedentes de energia elétrica. Dado que caldeiras têm vida útil superior a 25 anos, a produção de excedentes está limitada a caldeiras para produção de vapor de baixa pressão e

“...a decisão de investir ou não em sistemas de cogeração avançados para produção de energia elétrica deve ser baseada nos preços da energia elétrica e no mercado na região onde se localiza a usina, dentre outros fatores” (Dias, 2011).

Quando o objetivo é a produção de E2G limita-se a quantidade de vapor à demanda térmica do processo (Palacio, 2010).

1.1.3. Tecnologia E2G

O E2G, ou etanol celulósico, pode ser obtido a do bagaço e/ou palha da cana-de-açúcar, sorgo, milho, beterraba (Araújo, Epa e Mourão, 2014). Dias (2011), em seu trabalho de pesquisa, explorou as tecnologias e processos de produção aplicados na produção de etanol e eletricidade e possui conteúdo extenso no tema e respectivas referências. No caso do E2G apresentou um amplo conteúdo técnico a fim de descrever a tecnologia de processamento e processos. Em resumo os processos são aplicados com vistas a expor as cadeias de carbono contidas nas fibras (celulose e hemicelulose) que serão convertidas em etanol à medida que é submetida a uma sequência de processos específicos. Dentre os processos podemos destacar: pré-tratamento de limpeza e purificação do material; processos

térmicos e hidrotérmicos que atuam no material lignocelulósico contido nas fibras e possibilitam a hidrólise (além dos processos químicos que têm o mesmo fim); a hidrólise propriamente dita, ácida ou enzimática, onde a celulose é convertida à glicose $\{(C_6H_{10}O_5)+nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6\}$; a fermentação do licor de glicose (C_6) gerado na hidrólise onde o processo é idêntico ao utilizado na produção do E1G. O desafio tecnológico, além do aumento da eficiência dos processos citados, é o desenvolvimento da capacidade de também fermentar as chamadas pentoses (C_5) também geradas a partir da hemicelulose e que são uma elevada fração dos açúcares disponíveis e fator crítico de sucesso na adoção da tecnologia (Rabelo, 2010).

Várias iniciativas no sentido de desenvolver a tecnologia ocorreram nos últimos anos, como é possível observar no site (Demoplants, 2015), cujo objetivo é monitorar e divulgar as várias plantas existentes no mundo, as tecnologias e estágio de implantação. No caso brasileiro quatro plantas estão listadas na tabela 1.

Empresa	Tipo	Tecnologia	Localização	Início
<i>Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)</i>	Comercial	Conversão bioquímica; Produção de Etanol	Piracicaba, SP, Brazil	2012
<i>GranBio plants</i>	Comercial	Conversão bioquímica; Produção de Etanol	São Miguel, Alagoas, Brazil	
<i>Raízen Energia</i>	Comercial	Conversão bioquímica; Produção de Etanol	Costa Pinto, Piracicaba, Brazil	2015
<i>Petrobras Bioetanol</i>	Planta piloto	Conversão bioquímica; Produção de Etanol	Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil	

Fonte: Demoplants, 2015

Elaboração própria

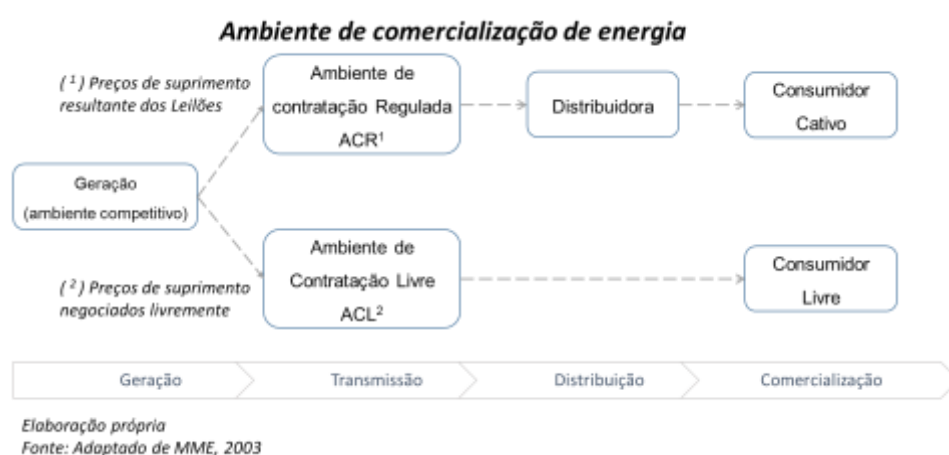
Tabela 1: Quadro de plantas produtoras de E2G no Brasil

Os dados dessa fonte, entretanto, não refletem a realidade do mercado na época da realização deste estudo. Apenas a planta do CTC e Raízen, apesar do atraso, podem ser consideradas como ativas, e a planta do CTC é o estudo de caso deste trabalho.

1.1.4. Energia elétrica

O mercado de energia elétrica, como definido pelo Ministério de Minas e Energia (MME), é composto por quatro segmentos com grau diferenciado de regulação, conforme cada necessidade, sendo: Geração, Transmissão, Distribuição e Comercialização. O segmento de geração é classificado como “Ambiente de Competição Controlada”, ou seja, novos atores precisam de uma autorização para atuar neste mercado. Com efeito neste estudo, onde será tratada a venda do bagaço para Cogeração, a venda no ambiente de contratação livre pode elevar a demanda pelo bagaço e, conseqüentemente, provocar a elevação de preço regional. A estratégia regional pode ser afetada por um único ator com alta eficiência e excesso de capacidade de processamento. Na Figura 4 pode-se observar de forma simplificada a estrutura do mercado.

Figura 4: Setor elétrico



1.1.5. Combustíveis

Conforme trabalho apresentado por Lima (2011), que estudou a formação de preços do Etanol Combustível, as negociações ocorrem por meio de diferentes participantes do setor, conforme Figura 5. As negociações são caracterizadas basicamente por: a) mercado à vista, conhecido também por mercado *spot*; b) contratos com quantidade e preços fixos, corrigidos por indexadores pré-definidos no contrato.

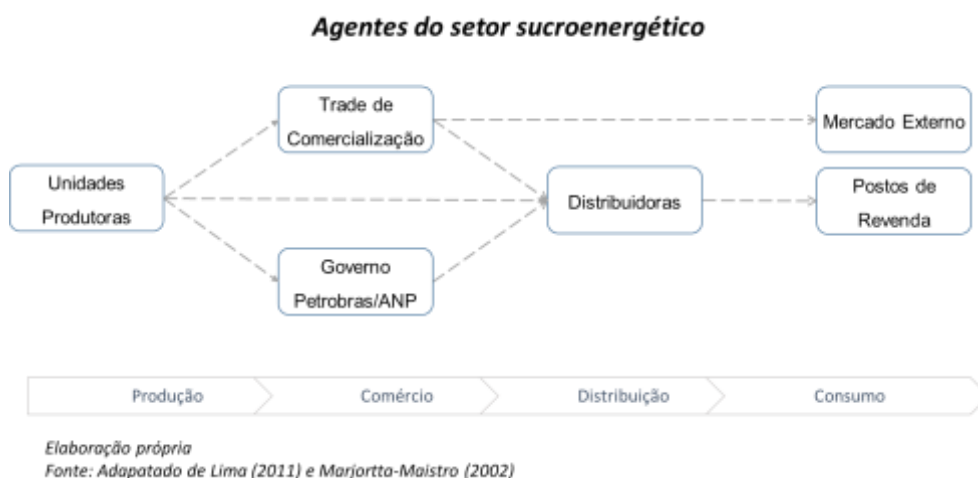


Figura 5: Agentes do setor sucroenergético

1.1.6. Biomassa de cana-de-açúcar

Com o aumento da produção para os níveis atuais de 590 milhões de toneladas de cana (Unica Data, 2015), as usinas de cana-de-açúcar passaram a ter na biomassa remanescente da extração do caldo da cana-de-açúcar uma nova fonte de receita potencial, seja pela cogeração como pela produção de E2G. Esta ampliação de possibilidades, por sua vez, pode levar a uma concorrência (Maluf, 2014) pelo bagaço, que passa a figurar como insumo, e com a evolução de cada uma das tecnologias de processamento, e passamos também a observar uma concorrência por investimentos e portanto uma demanda por modelos de decisão que contribuam para esta análise. No interior de São Paulo, região de Piracicaba, o bagaço ganhou mercado e seu preço oscila entre R\$30 e R\$120 por tonelada, com média de R\$77 durante a safra 2015/2016.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

O propósito deste capítulo será apresentar uma breve revisão bibliográfica das principais questões teóricas utilizadas neste trabalho. Assim serão apresentados trabalhos que tratam da questão histórica, da produção e produtividade, das tecnologias e análises econômico-financeiras da cada uma delas. Ao final um resumo do ambiente setorial.

A matéria seca gerada nos canaviais na safra 2014/2015 será de aproximadamente 37 milhões de toneladas (calculado conforme relatório parcial de produção divulgado pela Unica em julho de 2015, base na proporção de Matéria Seca por tonelada de cana colhida ($MS.t^{-1}$) 12,5%), conforme dados publicados no Etanol Summit 2015 (Unica, 2015). O aprimoramento tecnológico ocorrido nos últimos anos possibilita expandir a produtividade atual até 8 vezes na produção de energia elétrica (Lopes, 2013) e em 2,5 vezes na produção de E2G (Seabra e Macedo, 2011). Para que estes níveis de produtividade sejam atingidos pela indústria atual (base instalada) é necessário investir no aumento da pressão da caldeira e no aumento da eficiência da hidrólise para produção de energia e E2G, respectivamente. Desta forma o resíduo da cana ganha valor à medida que novas tecnologias são incorporadas aos processos nas plantas existentes. Um outro aspecto relevante a ser observado é sua importância como fonte alternativa à medida que crescem as preocupações com o meio ambiente e são implementadas políticas que visam reduzir emissões de CO_2 , como também indicado por Sousa e Macedo (2010).

O setor passou por grandes reestruturações e ainda carece de uma visão de longo prazo (Macedo, 2011), portanto, dentre as possibilidades reais disponíveis as que mais se destacam são aquelas que tratam do uso nobre dos resíduos e, assim, seu uso na geração de energia elétrica, a cogeração, como estudado por Dias *et al.* (2012), Lopes (2013), Sousa e Macedo (2010), ou na produção do E2G como estudos de Rabelo (2010) Guarda *et al.* (2013) e Gouveia *et al.* (2015). Já os trabalhos de Seabra e Macedo (2011), Furlan *et al.* (2013), Maluf (2014) e Dias *et al.* (2011), trataram de discutir o tema da competição pelo uso do bagaço. Nardelli e Macedo (2011) e Tatoni (2012) usam a TOR (Teoria de opções Reais) para avaliar

projetos agroindustriais e cogeração. Finalmente, Dantas (2013) analisa as alternativas de investimento. Durante a reestruturação ocorrida entre 1999 e 2011, nos dois ciclos de fusões e aquisições e que continuavam em curso quando da publicação do seu estudo, com a consolidação dos grandes grupos e o crescimento da participação de capital estrangeiro, o autor observou que tal fato traria consequências positivas. Primeiramente pela profissionalização, mas também pela ampliação da capacidade de produção e processamento que teriam impacto positivo no desenvolvimento do país. O mesmo autor ressalva que estes benefícios poderiam não se concretizar caso não ocorresse transparência do governo brasileiro na regulamentação que suportasse aportes de recursos de longo prazo na expansão do setor.

Motivada pelas mudanças climáticas e emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa), Dias *et al.* (2012) estudou o uso do bagaço na produção de etanol como biocombustível e alternativa na redução de emissões, além dos ganhos econômicos. Sustentou seus argumentos com base na abundância da matéria prima bagaço e pela limitada competição com a produção de alimentos pelo uso da terra, atendendo assim aos requisitos de base de segurança energética e, portanto, aplicáveis à produção de biocombustíveis, ou seja, acesso garantido ao bem energético, disponibilidade. Assim, uma vez que as plantas produtoras de etanol 1G já se encontram disponíveis e como existe o compartilhamento de infraestrutura no processo produtivo, plantas produtoras devem integrar a produção de E2G e assim podem melhorar resultados econômicos e contribuir com a redução de emissões de GEE. Trabalhou com 5 cenários como base para suas simulações no software *Aspen Plus* e, desta forma, fez combinações de tecnologias de forma a refletir diferentes produtividades e níveis de investimento, além de comparar o processo isolado (E2G) e combinado (E1G e E2G). O Volume de Matéria Seca (MS) utilizado em suas simulações inclui 50% das folhas. Na avaliação financeira comparou a TIR entre os projetos. Concluiu que o processo de produção combinado apresenta muitas vantagens quando comparado ao processo isolado, observando nível de produtividade da hidrólise em 335 Litros de Etanol por tonelada de Matéria Seca (L.ton^{-1} MS) ou 35 Litros por Tonelada de Cana (L.ton^{-1} Cana). Concluiu também que os resultados melhoram com o aumento do volume de produção, capacidade

produtiva, e ainda que é possível fazer recuperação dos solventes e assim melhorar os resultados e econômicos e ambientais.

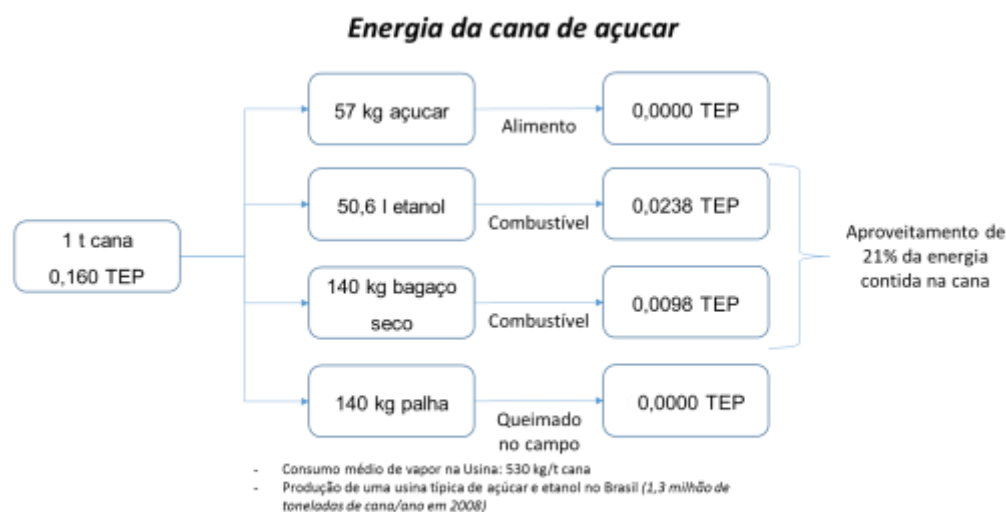
Lopes (2013) estudou a importância da bioeletricidade na matriz energética, realizou uma avaliação qualitativa dos processos, calculou sua viabilidade e descreveu os desafios. Em seu trabalho ele apresenta as modalidades de contratação ACR e ACL, Ambiente de Contratação Regulada e Ambiente de Contratação Livre, respectivamente. Aponta o ACR como alternativa principal com vista no longo prazo e que deve viabilizar o financiamento dos projetos de *retrofit* (do inglês: Processo de melhoria e expansão de capacidade e maximização da eficiência termelétrica da usina.), e, o ACL como oportunidades a serem exploradas a medida da disponibilidade de energia por serem muitas vezes mais vantajosos financeiramente do que os ACR. Enfatiza a necessidade de melhoria nas instalações com vista ao aumento da eficiência dos processos do ponto de vista energético e seus componentes (caldeiras, turbinas e geradores). Outra importante contribuição foi apontar o ganho de eficiência potencial com cada uma das tecnologias disponíveis que podem elevar a produtividade dos atuais 10,4 kWh por tonelada de cana (kWh/tc) exportado pelo SIN por tonelada de cana para 71,6kWh/tc, sem fazer uso da palha.

Em sua publicação “Etanol e Bioeletricidade”, (Sousa e Macedo, 2010) coordenaram um amplo trabalho que trata do futuro da cana-de-açúcar na matriz energética. Em particular sobre a bioeletricidade concluem:

“A inserção da bioeletricidade em uma escala compatível com seu potencial por si só já contribuiria para o aumento da segurança do suprimento de energia elétrica devido ao “efeito diversificação da matriz”. No entanto, a característica mais favorável da bioeletricidade sucroenergética para a segurança do sistema elétrico brasileiro é a sua complementaridade em relação ao regime de chuvas do subsistema Sudeste/Centro-Oeste, onde se concentra 70% da capacidade dos reservatórios brasileiros. A safra sucroenergética ocorre entre os meses de abril e novembro, coincidindo com o período seco nas regiões Sudeste e Centro-Oeste.

A bioeletricidade sucroenergética, por ter a geração concentrada na estação seca, se constitui em fonte de energia de grande relevância para complementar o parque gerador hídrico. Trata-se de uma “energia de inverno”. De acordo com o ONS, cada 1.000 MWmed de bioeletricidade inseridos no sistema interligado durante o período seco significa a poupança de 4% dos reservatórios do subsistema Sudeste/Centro-Oeste.” (Sousa e Macedo, 2010, p. 147).

O tema etanol de segunda geração, entretanto, não é tratado em profundidade pois a tecnologia não estava disponível comercialmente (Unica, 2010, p. 197). Neste trabalho os autores tratam da cana de açúcar como um todo com visão energética e exploram todo seu potencial, como podemos observar no quadro a seguir:



Elaboração própria - Adaptado de: Sousa e Macedo, 2010

Fontes: Centro de Tecnologia Canavieira CTC e Simtec 2008 (simpósio internacional e Mostra de Tecnologia da Agroindústria Sucroenergética) – p. 234

Figura 6: Energia da cana-de-açúcar

A produção de E2G é objeto de investigação por acadêmicos e também pela iniciativa privada. Guarda *et al.* (2013), explorou o potencial de produção de etanol de segunda geração como forma de aproveitamento de resíduos agroindustriais ao comparar a disponibilidade e eficiência de cada um dos resíduos.

Pesquisou diferentes trabalhos para avaliar o potencial de cada um dos resíduos bem como a disponibilidade de cada matéria prima, conforme tabela 2: Disponibilidade e potencial de conversão, a seguir. Concluiu que no Brasil existem várias fontes para produção do E2G, dentre elas a palha e o bagaço da cana-de-açúcar, principalmente em função da abundância e de seu caráter renovável.

Resíduo	Celulose	Conversão de celulose em etanol (%)	Produção residual anual (t)	Preodução bioetanol (L)
Palha de cana	39	85	208 milhões	87,38 bilhões
Palha de trigo	35	89	6 milhões	2,37 bilhões
Palha de arroz	38	80	3 milhões	1,15 bilhões
Bagaço de cana	43	89	208 milhões	100,88 bilhões
Pseudocaule da bananeira	46	61	50 milhões	17,78 bilhões

Tabela 2: Disponibilidade e potencial de conversão

Elaborado pelo autor – Adaptado de Guarda et al (2013)

Em recente evento organizado pelo BNDES (BNDES - Setorial, 2015) com objetivo de avaliar o potencial competitivo do E2G, Gouveia et al (2015) apresentaram trabalho de pesquisa em que avaliaram o tema do etanol celulósico e com base neste fizeram sugestões de política pública para acelerar o desenvolvimento da tecnologia. Portanto estudaram a capacidade competitiva do E2G em relação aos combustíveis fósseis tendo o caso base e três cenários com perspectiva temporal de curto médio e longo prazo. Concluíram que este pode ser mais competitivo que o etanol convencional e próximo do patamar de preço de barril de petróleo a US\$44, no longo prazo. Isto com base nas premissas assumidas, portanto: avanços nas etapas de conversão de biomassa e redução no custo das enzimas. Neste cenário o nível de competitividade seria suficiente para reverter o quadro de importações de combustíveis fósseis para exportação de combustíveis renováveis. Pelo lado da oferta observa que não ocorrerá de forma espontânea e demandará da ampliação dos investimentos em novas usinas de E2G.

Seabra e Macedo (2011) simularam um comparativo técnico-econômico e ambiental de performance dos sistemas de cogeração e produção de E2G. Criaram cenários para uma planta média capaz de processar 4MM de toneladas de cana por ano e assim simularam investimentos e receitas potenciais que, por sua vez possibilitaram calcular o Retorno Sobre Investimento (RSI), a partir de cada uma das tecnologias. Suas projeções levaram a concluir que a produção de E2G geraria maior quantidade de energia quando comparada a cogeração, conforme Tabela 3. Entretanto, ao comparar o RSI de cada projeto, a produção de energia, cogeração, tem maior retorno que a produção de E2G devido aos maiores custos operacionais e de produção, Tabela 4.

Em um outro trabalho, (Seabra e Macedo, 2011) compararam técnica e economicamente, através de simulações, a performance entre a produção de energia elétrica e etanol de segunda geração, ambas a partir da biomassa residual da cana de açúcar, com vistas a ter o menor impacto ambiental com mitigação no volume de emissões. Concluíram que plantas combinadas teriam maior competitividade pela redução de custos nos processos combinados, ou seja, o maior aproveitamento da base instalada tornaria viável o investimento adicional com o incremento de produtividade. Tendo em perspectiva a redução de emissões, apontam preferência pela produção de etanol de segunda geração pois promove maior redução nas emissões quando comparado a produção de eletricidade, que segundo estudo possui maior Retorno Sobre Investimento (ROI). A Tabela 3 mostra um resumo de produção e produtividade simulados em cada uma das rotas e nos cenários estudados.

Tabela 3: Resumo de valores de produção e produtividade de uma planta de cana-de-açúcar

	Produto	Unidade ^a		Eletricidade	Etanol
Usina	Etanol	10 ³ m ³ /ano	(L/t cana)	364 (91)	364 (91)
	Eletricidade	GWh/ano	(kWh/t cana)	126 (32)	126 (32)
Planta	Etanol	10 ³ m ³ /ano	(L/t cana)		234 (33)
	Eletricidade	GWh/ano	kWh/t cana	392 (98)	75 (19)
Biorrefinaria ^b	Etanol	10 ³ m ³ /ano	(L/t cana)	364 (91)	498 (124)
	Eletricidade	GWh/ano	kWh/t cana	519 (130)	201 (50)

^a Baseado em resíduos de uma produção de 4 milhões de tonelada ano mais 224.000 toneladas de palha seca;

^b Biorrefinaria = usina + Planta de bioetanol anexa

Parâmetro	Eletricidade	Etanol
FCI ^{b, c}	50,7	151,4
Working Capital ^d	2,5	7,6
Custo anual ^e	15,1	33,5
Custo operacional ^f	6,7	15,0
Biomassa ^g	3,4	3,4
Depreciação ^h	5,1	15,1
Vendas Ano ^{e, j}	27,5	58,7
ROI ^j	23,2%	15,9%

Tabela 4: Retorno Sobre Investimento

^a Valores em dólar Americano de 2007, taxa de câmbio de R\$2,00/US\$;

^b FCI (Fixed Capital Investment) total investido em capital fixo. Baseados em cotações feitas por especialistas. Para o investimento em cogeração, o custo da rede de distribuição está incluído US\$ 5 Milhões;

^c O preço do etanol foi baseado em Seabra et al. (2010)

^d Assumido com 5% do FCI (Aden et al. 2002)

^e M US\$/ano

^f Incluídos no cálculo: consumíveis inclusos: mão de obra, indiretos, manutenção, seguros e tributos. Para cogeração utilizados valores retirados de EPE (2008) e para etanol valores oriundos de Seabra et al. (2010);

^g Bagaço sem custo e palha seca ao custo de US\$ 15 / ton;

^h 10% do FCI;

ⁱ Volumes adicional de vendas de eletricidade e etanol. Preço da eletricidade US\$ 70 /MWh e preço do etanol US\$ 400 m³ Valores retirados de CEPEA (2009);

^J
 ROI (Retorno Sobre Investimento) calculado como lucro anual antes do imposto de renda (exemplo: a diferença entre receita de vendas e custo total, incluindo a depreciação) dividido pelo total do investimento (exemplo: FCI mais capital de giro).

Elaborado pelo autor – Adaptado de Seabra e Macedo (2010)

Furlan *et al.*(2013) fizeram a seguinte pergunta: etanol ou bioeletricidade, vale a pena ser flexível? Ao estudar o assunto e observar que o processo de produção do E2G não está consolidado e que existe grande volatilidade de preços do etanol e da energia elétrica, questiona a possibilidade e vantagens de manter uma planta flexível que incorpore e combine as três tecnologias e assim possa melhor absorver as flutuações relativas de preço. Simulou três possibilidades com software EMSO: E1G+Cogeração, E1G+E2G e E1G+E2G+Cogeração. O volume de MS utilizados em suas simulações inclui 50% das folhas. Com seus resultados observou que com 74% do total do bagaço utilizado na produção de E2G haveria um incremento de 25,8% na produtividade ao atingir 115 L*ton⁻¹Cana (E1G + E2G), porém a refinaria com máxima flexibilidade (E1G+E2G+Cogeração) apresentou a menor TIR dentre as configurações estudadas. Concluiu que com os preços de 2012, nem mesmo as plantas produtoras de E1G eram economicamente viáveis e que um incremento de 21,1% nos preços do etanol tornaria a planta com máxima flexibilidade economicamente viável. Também observou que a combinação E1G+E2G seria mais sensível ao preço de etanol e que um incremento de 11,5% seria suficiente para torna-la viável economicamente.

Maluf (2014), investigou a competição pelo uso do bagaço e como esta competição teria alternância dentre os subprodutos a medida que ocorre aprimoramento das tecnologias e processos de produção, bem como quando existe ganho de produtividade na produção da cana pelo manejo (aprimoramento do processo produtivo atual), evolução das variedades e também aprimoramento tecnológico na produção do E1G. Suas conclusões foram obtidas através de simulações em um modelo computável de equilíbrio geral, conhecido como EPPA (*Emissions Prediction and Policy Analysis*), onde inseriu cenários econômicos e dados de produção, consumo e comércio de diferentes setores econômicos, em particular agropecuário e energético. Concluiu pela existência da competição pelo insumo básico, o bagaço, com predomínio de uso na produção do E2G, isto a

medida que existe aumento na eficiência no processo de produção, podendo inclusive haver falta de matéria prima para cogeração. Um outro desdobramento seria a liberação de terras decorrente do aumento da produtividade dessa tecnologia somada ao aumento de produtividade do E1G. Ainda, o aumento da produtividade do E1G poderá dar maior competitividade à cogeração na competitividade relativa com E2G.

Já Dias *et al.*(2011), avalia diferentes arranjos produtivos e as respectivas produtividades, cenários em que compara diferentes tecnologias para cada um dos processos, mostra seus resultados com base na evolução crescente do nível tecnológico e a TIR de cada projeto. Utilizou simulador SuperPro Designer e planilhas eletrônicas para construção de seus cenários e mostra que existe ganho econômico com aumento do uso do bagaço, o que chamou de uso da cana integral, o que inclui uma fração da palha além do bagaço. Concluiu que o processamento deve ser aprimorado de forma ao melhor uso da matéria prima (aumento da eficiência dos processos) seja para produção de bioeletricidade ou etanol de segunda geração. Ainda, tendo em vista condições observadas e inseridas no modelo, onde a tecnologia disponível já possui elevada produtividade como é o caso da cogeração, conclui que a cogeração teria prioridade, entretanto observa que a produção de E1G e E2G combinadas reduz custos operacionais.

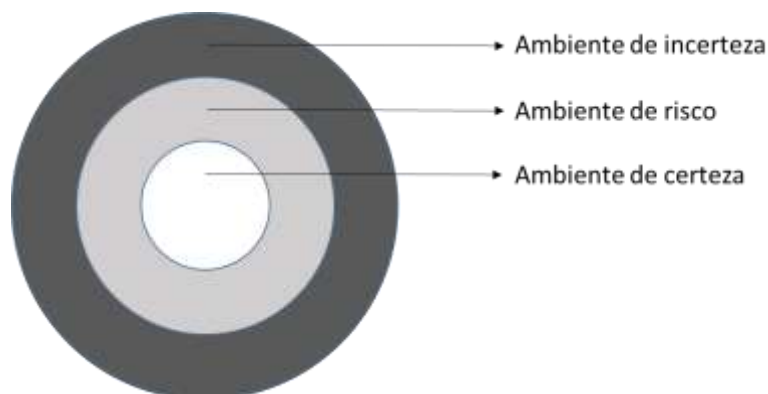
Diante de um ambiente de incertezas, portanto, Nardelli e Macedo (2011) estudaram a viabilidade econômico financeira de um projeto agroindustrial em busca de um modelo de decisão que incorporasse as incertezas do setor e trouxesse maior valor ao acionista. Em seu trabalho incorporaram a análise sobre as oportunidades efetivadas no presente e seu efeito nas oportunidades disponíveis no futuro e, assim, procuram as opções reais que existem nas decisões de investimento. Na metodologia aplicada procuraram criar maior valor para a empresa ao avaliar quais opções de crescimento serão criadas sucessivamente por cada investimento. O uso da TOR deu o arcabouço necessário ao estudo de caso que considerou fluxo de caixa descontado para alternativa de investimento. Desta forma consideraram o valor do dinheiro no tempo: VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno) e PPD (Período de *Payback* Descontado). Concluíram no caso agroindustrial estudado, onde aplicaram a TOR e onde as incertezas eram

relevantes, que é possível quantificar as flexibilidades gerenciais existentes em função da possibilidade de decisões de adiar a implementação de um projeto. No caso incorporaram volatilidade de preços de insumos e de venda dos produtos ao fluxo de caixa e assim apresentaram de forma estruturada subsídios à tomada de decisão no presente, no caso a decisão de adiar que poderá inclusive levar o investido a abandonar o projeto.

Tatoni (2012), utilizou a Teoria da Opções Reais na avaliação de investimentos em cogeração utilizando bagaço de cana-de-açúcar em usinas, e em seu trabalho buscou conhecer o melhor momento para investir em unidades de cogeração. Estruturou seu trabalho de forma a analisar três cenários de porte de usinas (2, 4 E 6 MM toneladas de cana*ano⁻¹) em três condições de volatilidade e, assim, ter uma representação amostral das biorrefinarias e do ambiente de mercado, respectivamente. Desta forma acrescentou um refinamento a análise de VPL tradicional com a identificação do melhor momento para investir, portanto trouxe a opção de adiar. Concluiu que em um ambiente de baixa volatilidade a melhor opção é adiar o investimento para os três portes do cenário e que, assim, a decisão de investimento somente é recomendada para ambientes de maior volatilidade como oportunidade para usinas de maior porte.

O mesmo autor representou o ambiente de tomada de decisão como na Figura 7. Sua caracterização mostra o contexto em que os gestores atuam: o ambiente de certeza, o ambiente de risco e o ambiente de incerteza:

Figura 7: Ambiente de tomada de decisão



Adaptado de (Tatoni, 2012)

Finalmente, Dantas (2013) estudou as alternativas de investimento do setor sucroenergético para aproveitamento de bagaço e de palha. Daí analisou o estágio de maturidade de cada uma das tecnologias (Cogeração e E2G), além de investimento, produtividade e custos operacionais, e calculou o VPL de cada projeto com vistas a identificar a atratividade econômica de cada uma das rotas tecnológicas. Fez análise financeira e concluiu que o VPL potencial para investir na produção de bioeletricidade é R\$ 76.281.258,97 quando o preço da energia for R\$ 128, 90MWh e o VPL potencial da produção de E2G é de R\$355.560.098,05 quando o preço do combustível for de R\$0,95 por litro. Concluiu ainda que a alternativa mais atrativa economicamente é a geração de bioeletricidade pois já se encontra disponível comercialmente, a produção de E2G requer redução no custo da tecnologia, aumento de produtividade e incentivos ligados com objetivo de mitigar alterações climáticas.

Com base na bibliografia consultada, dados de produtividade de cada tecnologia em contraste com a produtividade potencial e a volatilidade de preços dos subprodutos do bagaço da cana para produção de energia elétrica e/ou E2G, apresenta-se na Figura 8 uma análise de sensibilidade que contempla esta volatilidade de preços e os diferentes estágios de maturidade de cada tecnologia analisados. Desta forma tem-se uma representação quantitativa do ambiente de decisão e assim pode-se observar quando existe certeza e identificar as fronteiras onde existe risco e também onde existe incerteza, portanto concorrência. Assim, é

possível visualizar o ambiente onde existe uma potencial competição pelo recurso de investimento em direção a um projeto ou outro, como é o caso das usinas na região de Piracicaba. Observo ainda que, de acordo com a literatura consultada, para produção de energia elétrica existe tecnologia disponível e viável economicamente, portanto está limitada a capacidade de investimento das empresas, entretanto, para produção de E2G existe a necessidade de investimento na tecnologia de produção com vistas a aumentar produtividade.

Competição		Etanol de Segunda Geração (E2G)								
		Produtividade		100 L/ton					360 L/ton	
Bioeletrecidade (Cogeração)	7,5 (kWh/ton)	Eficiência	Volatilidade	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
				-30,0%	-20,0%	-10,0%	0,0%	10,0%	20,0%	30,0%
		20%	-80,0%	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.
		30%	-60,0%	<i>Incerto</i>	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.
		40%	-40,0%	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.
		50%	-20,0%	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.
		60%	0,0%	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	Etanol A.	Etanol A.	Etanol A.
		70%	20,0%	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	Etanol A.	Etanol A.
		80%	40,0%	Energia	Energia	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	Etanol A.
		90%	60,0%	Energia	Energia	Energia	Energia	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>
	60 (kWh/ton)	100%	80,0%	Energia	Energia	Energia	Energia	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>	<i>Incerto</i>

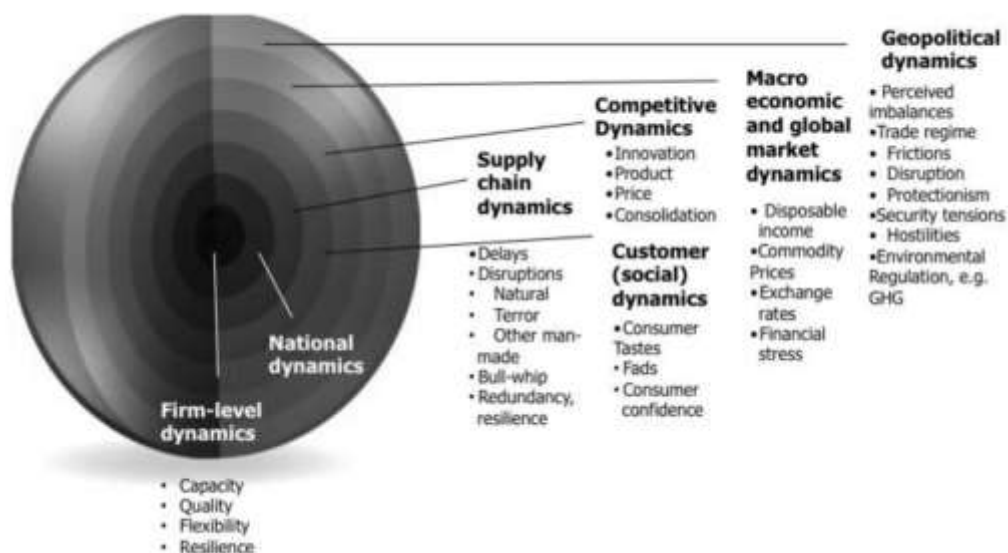
Figura 8: Contexto de competição

Elaborado pelo autor

Fontes: (Dias, Junqueira, Jesus, *et al.*, 2012); (Dias, 2011); (Seabra *et al.*, 2010); (Palomino, 2009); (BNDES - Setorial, 2015); (Seabra *et al.*, 2010); (Seabra e Macedo, 2011)

Lessard (2013) estudou incertezas associadas à interdependência das organizações ao longo das cadeias de suprimento e também os riscos decorrentes desta relação. Em seu artigo detalha as fontes de risco e consequências para as organizações como um todo. Também apresenta como é possível gerir estes riscos, seja pela mitigação ou mesmo pelo uso como um componente incorporado na estratégia, de forma que havendo conhecimento sobre a origem dos riscos é possível: a) tirar proveito por conhecê-lo melhor que demais atores cadeia de suprimentos, b) ser mais hábil em mitigar, ou mesmo extinguir, seus efeitos e c) distribuir seus efeitos residuais ao longo da cadeia pela diversificação ou mesmo pela resiliência de cada ente. Na ilustração a seguir, Figura 9, podemos identificar o

conjunto da obra analisada, o contexto das organizações e sua identidade com o ambiente das usinas de etanol e açúcar.



Título original: Sources of Risk and Their Supply Chain Impacts

Fonte: (Lessard, 2013, p.12)

Figura 9: Fontes de risco e incertezas

Desta forma podemos observar que o contexto amplo requer que a análise seja feita com abrangência do ambiente onde a empresa está inserida, de forma que os riscos e incertezas sejam contemplados e, dentro do possível, administrados. Assim sendo, análises como VPL e TIR que levam em consideração basicamente o Valor presente dos custos fixos comparados ao Valor presente dos fluxos de caixa operacionais tem baixa aderência quando comparada à Análise de Opções Reais que além destes incorpora Tempo de expiração, Incerteza nos fluxos de caixa, Taxa de juros sem risco e Valor perdido durante a posse da opção.

3 - METODOLOGIA

No presente capítulo será apresentada uma breve revisão da Teoria das opções Reais (TOR), metodologia utilizada no estudo de caso.

3.1. Opções Reais

3.1.1. *Fundamentos da teoria e principais trabalhos*

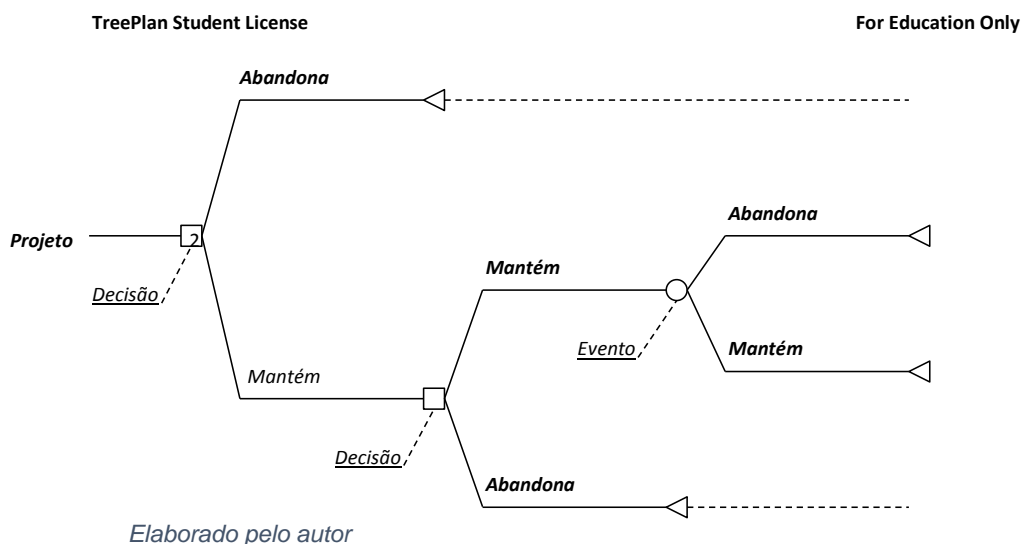
Uma opção real é definida como um direito, mas não uma obrigação, de tomada de decisão a um determinado valor e momento, dentro do período de validade da opção, (Copeland & Antikarov, 2003). Basicamente cinco variáveis são consideradas:

- 1) Valor do ativo sujeito a risco – em uma tomada de decisão, diferentemente dos detentores de opções financeiras, o detentor de uma opção real pode aumentar seu valor;
- 2) Preço de exercício – é o valor investido ou recebido ao exercer opção de compra ou venda;
- 3) Prazo de vencimento da opção – O valor da opção aumenta à medida que se estende o prazo
- 4) O Desvio padrão do valor do ativo sujeito a risco – O valor da opção aumenta com o aumento da volatilidade de preços que, por sua vez, expressam o aumento do risco;
- 5) A taxa de juros livre de risco ao longo da validade da opção – o valor da opção aumenta com o aumento da taxa.

Como é composto por um arcabouço mais amplo, através da Teoria de Opções Reais, o projeto passa a ser analisado não somente através do VPL dos fluxos de caixa descontados, mas incorpora também as opções de postergação e abandono, além de reinvestimento. Considera mudanças nos fluxos de caixa, mudanças nos cenários econômicos, novas opções de investimento, entre outras. Ainda, conforme o mesmo autor, o valor de uma opção pode ser também afetado em função de dividendos que podem ser pagos em função dos ativos, portanto uma sexta variável.

Como o objetivo é analisar alternativas ao longo do tempo, é também usual na metodologia a estruturação de árvores de decisão, como na Figura 10. Desta forma é possível ter uma visão ampla do projeto em função dos caminhos no modelo binomial, alternativa e momento de decisão, seja manter ou mudar. Com a ferramenta escolhida para construção da árvore de decisão (TreePlan ®), tem-se que o momento de decisão é representado nos nós da árvore de decisão, sendo pelo quadrado (□) com decisão e sem decisão nas circunferências (○). A potencial tomada de decisão é a escolha do melhor momento de passar a produzir o E2G com bagaço disponível ao invés de vendê-lo *in natura* (o estudo de caso não gera energia elétrica, a opção é vender ou não o bagaço, mas isto emula a situação EE ou E2G). Conforme (Guthrie, 2009), a análise de opções reais é a única técnica que tem como objetivo incorporar decisões gerenciais ao processo de decisão, tendo em vista que o detentor de uma opção real tem ação no ativo, diferentemente de detentores de opções financeiras.

Figura 10: Árvore de decisão



Como apresentado por Nardelli e Macedo (2011), adaptado de (Cox, Ross, & Rubinstein, 1979) o modelo binomial também assume que o preço segue um processo binomial em períodos discretos, assumindo somente dois valores

distintos no tempo. Tais movimentos são ascendentes ou descendentes, representando um valor maior e outro menor que o valor encontrado no nó anterior. Valendo-se da abordagem probabilística neutra em relação ao risco (p), conforme (Mun, 2006), para o processo de avaliação das opções, sabe-se que estes valores são dependentes da volatilidade de preços dos subprodutos do bagaço. Desta forma a probabilidade neutra ao risco pode ser obtida através da fórmula apresentada pela Equação 1:

Equação 1: cálculo da probabilidade neutra ao risco

$$p = \frac{(1 - r_f) - d}{u - d}$$

Onde r_f é a taxa livre de risco e o valor adotado de 7%. Os fatores u e d que correspondem ao movimento de subida e descida dos preços destes ativos, respectivamente, podem ser calculados pelas equações 2 e 3, abaixo:

Equações 2 e 3: equações de obtenção dos fatores u e d :

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (2)$$

$$d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (3)$$

Assim, $\sigma\sqrt{\Delta t}$ corresponde à volatilidade dos retornos do ativo objeto (σ) em um determinado tempo (Δt).

3.1.2. Fluxo de caixa da Usina.

Tendo em vista que a análise será feita com objetivo de maximizar o retorno do acionista, foi utilizada a estrutura presente na Tabela 5 como forma de cálculo do valor presente dos fluxos de caixa de cada alternativa, venda do bagaço e produção de E2G. Como o objetivo do trabalho é comparar o ganho adicional potencial de cada alternativa, estas passam a ser os cenários de base:

Tabela 5: Modelo de Fluxo de Caixa

Fluxo de caixa
(+) Receita Bruta
(-) Impostos sobre receita
(-) PIS ¹
(-) COFINS ²
(-) ICMS ³
(+) Receita Líquida
(-) Custos e despesas
Mão de Obra
Materiais
Manutenção
Despesas Industriais
Despesas Gerais de Administração
() LAJIDA ⁴
Margem EBITDA
(-) Depreciação
() LAJIR ⁵
(-) IR ⁶ + CSLL ⁷
() Lucro Líquido
(+) Depreciação
(-) Capital de Giro
(-) Custo de Capital (CAPEX) ⁸
() Fluxo de Caixa da Empresa

Onde: (1) PIS: Programa Integração Social – alíquota de 1,65%; (2) – COFINS: Contribuição para Financiamento da Seguridade Social – alíquota de 7,6% ; (3) – ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias – alíquota de 18%; (4) –LAJIDA: Lucro antes dos juros, Impostos, Depreciação e Amortização; (5) – LAJIR: Lucro Antes dos Juros e Imposto de Renda; (6) – IR: Imposto de Renda ; (7) – CSLL: Contribuição Sobre Lucro Líquido ; (8) – CAPEX: do inglês Capital Expenditure (Despesas de Capital);

3.1.3. Método de cálculo

Como parte do processo de modelagem das incertezas que afetam o valor do ativo, preços do etanol hidratado, construiu-se resumo conforme a tabela 6, com dados históricos dos preços que foram então deflacionados pelo IGP-M.

Tabela 6: Resumo de dados do preço do etanol hidratado

Preços de Etanol Hidratado	Ano I	Ano II	...	Ano X
Média				
Desvio Padrão				
Máximo				
Mínimo				
Contagem				

Para cálculo da Volatilidade foi utilizado o método proposto por (Copeland & Antikarov, 2003), em que esta é dada pela Equação 4. Assim foi calculada a volatilidade anual com base na média de preços semanais, onde: $\sigma_{Volat. Etanol Hidratado}$ é a volatilidade anual calculada, P_n o preço do etanol no ano de referência e P_{n-1} o preço do etanol no ano anterior .

Equação 4: Cálculo da volatilidade de preços do etanol hidratado

$$\sigma_{Volat. Etanol Hidratado} = desvpad \left[\ln \left(\frac{P_n}{P_{n-1}} \right) \right]$$

Com base nos preços deflacionados, pelo método proposto por (Copeland & Antikarov, 2003), podemos então calcular a volatilidade dos preços futuros, ano a ano, que é dada pela equação apresentada na Equação 5. Foram gerados 10.000 preços para cada ano pelo método de Monte-Carlo, onde: $\sigma_{Preço Futuro}$ será a volatilidade anual calculada, PF_{n+1} o preço do etanol no ano posterior ao ano de referência e PF_n o preço do etanol no ano de referência.

Equação 5: cálculo da volatilidade de preços futuros do etanol hidratado

$$\sigma_{Preço\ Futuro} = desvpad \left[\ln \left(P_{F_{n+1}} / P_{F_n} \right) \right]$$

3.2. Premissas

Para elaboração do estudo foram utilizados dados do relatório setorial do BNDES (BNDES - Setorial, 2015) e dados fornecido por uma usina da região de Piracicaba. O valor da depreciação do investimento foi inserido em ambos fluxos de caixa, tendo em vista que os investimentos foram realizados. O objetivo é que não existe qualquer perda futura para o acionista com a decisão de prorrogar a produção de E2G.

3.2.1. Parâmetros de produtividade do E2G

Nas simulações foram utilizados parâmetros do relatório setorial do BNDES sobre biocombustíveis (BNDES Setorial, 2015), em particular o cenário 7, conforme quadro a seguir, Figura 11.

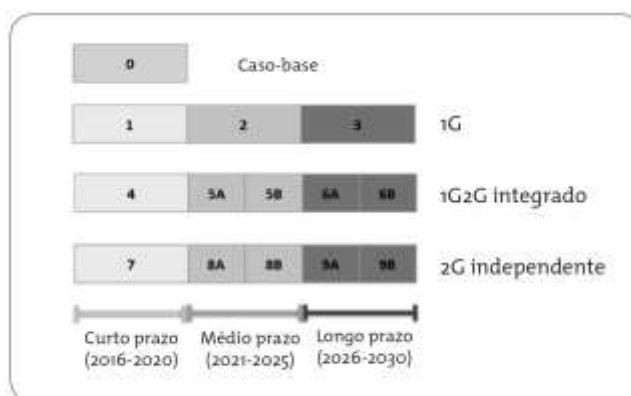


Figura 11: Cenários propostos por BNDES Setorial (2015)

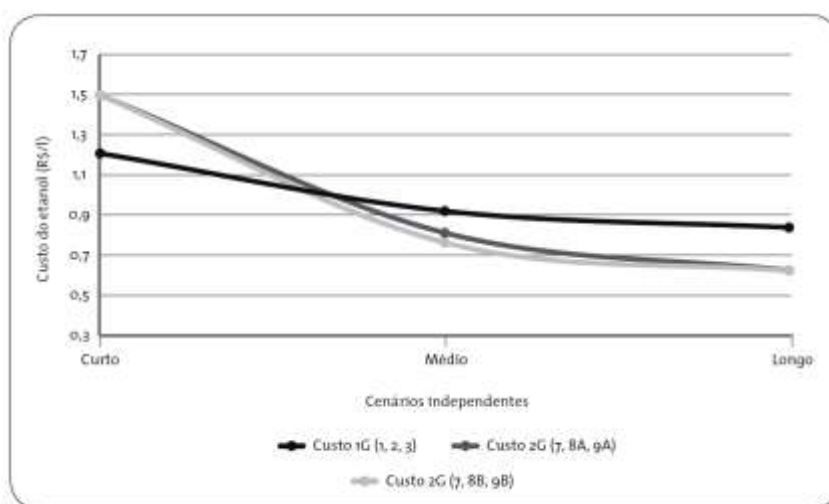
Elaborado pelo autor

Adaptado de (BNDES Setorial, 2015)

O cenário 7 foi o escolhido pois reflete a produção independente de E2G e cujo horizonte reflete este estudo. Portanto, nos cenários que tratam da evolução tecnológica, a produtividade aumentou de 240 para 300 litros de etanol por tonelada

de matéria seca ($l \cdot \text{ton}^{-1} \text{MS}$). Quanto à involução dos custos de R\$1,50 para R\$0,70 por litro, a trajetória é apresentada na Figura 12.

Figura 12: Gráfico Evolução dos custos de produção do Etanol de segunda Geração



Elaborado pelo autor

Adaptado de (BNDES Setorial, 2015)

4 - ESTUDO DE CASO

O caso estudado é de uma usina que, em 2014, moeu 3.200.000 de toneladas de cana com produtividade de $76 \text{ t}^{-1} \cdot \text{ha}$. Produziu 200.000 toneladas de açúcar e 140.000 m^3 de etanol de primeira geração. Para efeito de cálculos não foi incluída a palha da cana, esta matéria prima requer investimentos específicos necessários ao processo de colheita e transporte até a unidade de processamento enquanto o bagaço se encontra disponível na usina após a moagem. Foram adotados os dados da variedade CTC4 nos cálculos de produtividades, Tonelada de Açúcar por Hectare (TPH), valores médios para a região.

4.1. Cálculo do VPL e FCFF

Apresenta-se nessa seção os resultados do cálculo do VPL de cada projeto, produção e venda de E2G e venda do bagaço *in natura*, por meio da metodologia tradicional e obtenção do fluxo de caixa descontado. Montagem dos cenários base e também dos modelos que receberão os preços que variam de forma aleatória conforme volatilidade também calculada. Para todos os cenários a TMA (Taxa Mínima de Atratividade) utilizada foi de 10%, a média dos rendimentos para investimentos em renda fixa nos últimos 12 meses. Abaixo temos os fluxos de caixa padrão de cada alternativa, Tabelas 7 e 8, como cenário base. Os valores refletem a receita potencial adicional em cada alternativa, assim pode-se comparar cada uma das possibilidades.

Tabela 7: Fluxo de caixa para venda do bagaço *in natura* (cenário base) nos cinco

Fluxo de caixa bagaço	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
(+) Receita Bruta	R\$ 15.384.465,25	R\$ 15.384.465,25	R\$ 15.384.465,25	R\$ 15.384.465,25	R\$ 15.384.465,25
(-) Impostos sobre receita	R\$ 4.192.266,78	R\$ 4.192.266,78	R\$ 4.192.266,78	R\$ 4.192.266,78	R\$ 4.192.266,78
(-) PIS ¹	R\$ 253.843,68	R\$ 253.843,68	R\$ 253.843,68	R\$ 253.843,68	R\$ 253.843,68
(-) COFINS ²	R\$ 1.169.219,36	R\$ 1.169.219,36	R\$ 1.169.219,36	R\$ 1.169.219,36	R\$ 1.169.219,36
(-) ICMS ³	R\$ 2.769.203,75	R\$ 2.769.203,75	R\$ 2.769.203,75	R\$ 2.769.203,75	R\$ 2.769.203,75
(+) Receita Líquida	R\$ 11.192.198,47	R\$ 11.192.198,47	R\$ 11.192.198,47	R\$ 11.192.198,47	R\$ 11.192.198,47
(-) Custos e despesas	R\$ 702.000,00	R\$ 702.000,00	R\$ 702.000,00	R\$ 702.000,00	R\$ 702.000,00
Mão de Obra					
Materiais					
Manutenção					
Despesas Industriais					
Despesas Gerais de Administração	R\$ 702.000,00	R\$ 702.000,00	R\$ 702.000,00	R\$ 702.000,00	R\$ 702.000,00
() LAJIDA ⁴	R\$ 10.490.198,47	R\$ 10.490.198,47	R\$ 10.490.198,47	R\$ 10.490.198,47	R\$ 10.490.198,47
Margem EBITDA	68%	68%	68%	68%	68%
(-) Depreciação	R\$ 14.050.000,00	R\$ 14.050.000,00	R\$ 14.050.000,00	R\$ 14.050.000,00	R\$ 14.050.000,00
() LAJIR ⁵	-R\$ 3.559.801,53	-R\$ 3.559.801,53	-R\$ 3.559.801,53	-R\$ 3.559.801,53	-R\$ 3.559.801,53
(-) IR ⁶ + CSLL ⁷	-R\$ 1.210.332,52	-R\$ 1.210.332,52	-R\$ 1.210.332,52	-R\$ 1.210.332,52	-R\$ 1.210.332,52
() Lucro Líquido	-R\$ 2.349.469,01	-R\$ 2.349.469,01	-R\$ 2.349.469,01	-R\$ 2.349.469,01	-R\$ 2.349.469,01
(+) Depreciação	R\$ 11.700.530,99	R\$ 11.700.530,99	R\$ 11.700.530,99	R\$ 11.700.530,99	R\$ 11.700.530,99
(-) Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
(-) Custo de Capital (CAPEX) ⁸	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
() Fluxo de Caixa da Empresa	R\$ 11.700.530,99	R\$ 11.700.530,99	R\$ 11.700.530,99	R\$ 11.700.530,99	R\$ 11.700.530,99

primeiros anos

Tabela 8: Fluxo de caixa para venda do E2G (cenário base) nos cinco primeiros

Fluxo de caixa de produção do E2G	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
(+) Receita Bruta	R\$ 43.917.213,28	R\$ 43.917.213,28	R\$ 43.917.213,28	R\$ 43.917.213,28	R\$ 43.917.213,28
(-) Impostos sobre receita	R\$ 11.967.440,62	R\$ 11.967.440,62	R\$ 11.967.440,62	R\$ 11.967.440,62	R\$ 11.967.440,62
(-) PIS ¹	R\$ 724.634,02	R\$ 724.634,02	R\$ 724.634,02	R\$ 724.634,02	R\$ 724.634,02
(-) COFINS ²	R\$ 3.337.708,21	R\$ 3.337.708,21	R\$ 3.337.708,21	R\$ 3.337.708,21	R\$ 3.337.708,21
(-) ICMS ³	R\$ 7.905.098,39	R\$ 7.905.098,39	R\$ 7.905.098,39	R\$ 7.905.098,39	R\$ 7.905.098,39
(+) Receita Líquida	R\$ 31.949.772,66	R\$ 31.949.772,66	R\$ 31.949.772,66	R\$ 31.949.772,66	R\$ 31.949.772,66
(-) Custos e despesas	R\$ 49.522.147,62	R\$ 49.522.147,62	R\$ 49.522.147,62	R\$ 49.522.147,62	R\$ 49.522.147,62
Mão de Obra	R\$ 1.916.986,36	R\$ 1.916.986,36	R\$ 1.916.986,36	R\$ 1.916.986,36	R\$ 1.916.986,36
Materiais	R\$ 44.729.681,72	R\$ 44.729.681,72	R\$ 44.729.681,72	R\$ 44.729.681,72	R\$ 44.729.681,72
Manutenção	R\$ 1.597.488,63	R\$ 1.597.488,63	R\$ 1.597.488,63	R\$ 1.597.488,63	R\$ 1.597.488,63
Despesas Industriais	R\$ 958.493,18	R\$ 958.493,18	R\$ 958.493,18	R\$ 958.493,18	R\$ 958.493,18
Despesas Gerais de Administração	R\$ 319.497,73	R\$ 319.497,73	R\$ 319.497,73	R\$ 319.497,73	R\$ 319.497,73
() LAJIDA ⁴	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96
Margem EBITDA	-40%	-40%	-40%	-40%	-40%
(-) Depreciação	R\$ 14.050.000,00	R\$ 14.050.000,00	R\$ 14.050.000,00	R\$ 14.050.000,00	R\$ 14.050.000,00
() LAJIR ⁵	-R\$ 31.622.374,96	-R\$ 31.622.374,96	-R\$ 31.622.374,96	-R\$ 31.622.374,96	-R\$ 31.622.374,96
(-) IR ⁶ + CSLL ⁷	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
() Lucro Líquido	-R\$ 31.622.374,96	-R\$ 31.622.374,96	-R\$ 31.622.374,96	-R\$ 31.622.374,96	-R\$ 31.622.374,96
(+) Depreciação	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96
(-) Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
(-) Custo de Capital (CAPEX) ⁸	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
() Fluxo de Caixa da Empresa	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96	-R\$ 17.572.374,96

anos

4.2. Preços do Etanol Hidratado

4.2.1. Resultados dos cálculos

A seguir, Tabela 9, tem-se o resumo dos dados relativos aos preços do etanol hidratado, cálculos das estatísticas relativas aos preços do Etanol Hidratado:

Preços de Etanol Hidratado	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Média	R\$ 0,74	R\$ 0,90	R\$ 0,71	R\$ 0,72	R\$ 0,77	R\$ 0,91	R\$ 1,21	R\$ 1,11	R\$ 1,17	R\$ 1,26	R\$ 1,31
Desvio Padrão	0,11	0,15	0,13	0,03	0,14	0,15	0,13	0,06	0,06	0,08	0,06
Máximo	R\$ 1,01	R\$ 1,24	R\$ 0,96	R\$ 0,77	R\$ 1,10	R\$ 1,21	R\$ 1,63	R\$ 1,22	R\$ 1,30	R\$ 1,44	R\$ 1,42
Mínimo	R\$ 0,57	R\$ 0,75	R\$ 0,58	R\$ 0,63	R\$ 0,57	R\$ 0,70	R\$ 0,97	R\$ 1,00	R\$ 1,08	R\$ 1,13	R\$ 1,22
Contagem	52	52	52	52	53	52	52	52	52	52	15

Elaborado pelo autor – Fonte: CEPEA

Tabela 9: Resumo dos resultados de preços nominais do etanol hidratado

Com a normalização dos preços pelo IGP-M, Tabela 10, temos a seguir:

Tabela 10: Estatística descritiva dos resultados de preço do Etanol hidratado

Elaborado pelo autor – Fonte: CEPEA

Preços de Etanol Hidratado	Deflacionado
Média	R\$ 1,33
Desvio Padrão	R\$ 0,16
Máximo	R\$ 1,58
Mínimo	R\$ 1,09

Para cálculo da Volatilidade, Figura 13, foi utilizado o método proposto por (Copeland & Antikarov, 2003):

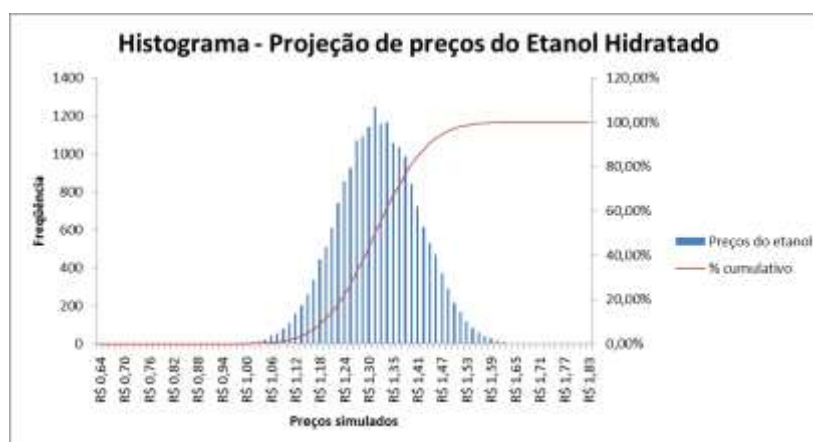


Elaborado pelo autor

Figura 13: Volatilidade de preços do etanol hidratado

4.3. Variação de preços e Volatilidade

Com base nos preços deflacionados, pelo método proposto por (Copeland & Antikarov, 2003), foram calculados os preços futuros para o produto, ano a ano, conforme proposto na metodologia, e criados os cenários de fluxo de caixa. No gráfico a seguir, Figura 14:



Elaborado pelo autor

Figura 14: Gráfico da distribuição de preços futuros calculados

4.4. Preços de venda do bagaço posto na usina

Como dado fornecido pela Usina da região de Piracicaba, o preço médio de venda do bagaço na safra 2013/14 foi de R\$ 77,00 a tonelada posta na usina (Godoy, 2015). Este foi o parâmetro básico utilizado na formação do cenário base e também nas simulações.

4.5. Quadro resumo dos resultados

Com a modelagem da árvore de decisão e incorporação das oscilações de preço e volatilidade, além das decisões onde existem, tem-se novos valores para VPL do projeto a cada nova simulação, dentro da variabilidade definida.

Desta forma foi possível obter o valor das opções reais. A diferença entre esse valor presente expandido e o valor presente tradicional será o próprio valor das opções, Tabela 11.

Valor das Opções Reais	Valor
VPL <i>Trad bagaço</i>	R\$ 44.354.218
VPL <i>Tradicional E2G</i>	-R\$ 66.613.127
VPL <i>Expandido E2G</i>	-R\$ 20.249.215
VPL <i>Expandido</i>	R\$ 47.804.448
VPL Opções Reais	R\$ 3.450.230
Valor das Opções Reais	8%

Tabela 11: Valor das opções Reais

O valor da amortização foi o mesmo em ambos cenários, venda de bagaço ou produção de E2G, pois o investimento já foi feito e o objetivo do trabalho é mostrar o valor adicionado pelas opções reais.

4.6. Arvore binomial

Nas Figura 15 e 16 apresenta-se a árvore de decisão resultante da aplicação da metodologia. Tem-se como resultado a decisão de passar a produzir o E2G no ano V (em 2020), quando a produtividade supera os $300 \text{ l} \cdot \text{ton}^{-1} \text{MS}$ e a volatilidade de preços poderá ser incorporada sem maiores perdas.

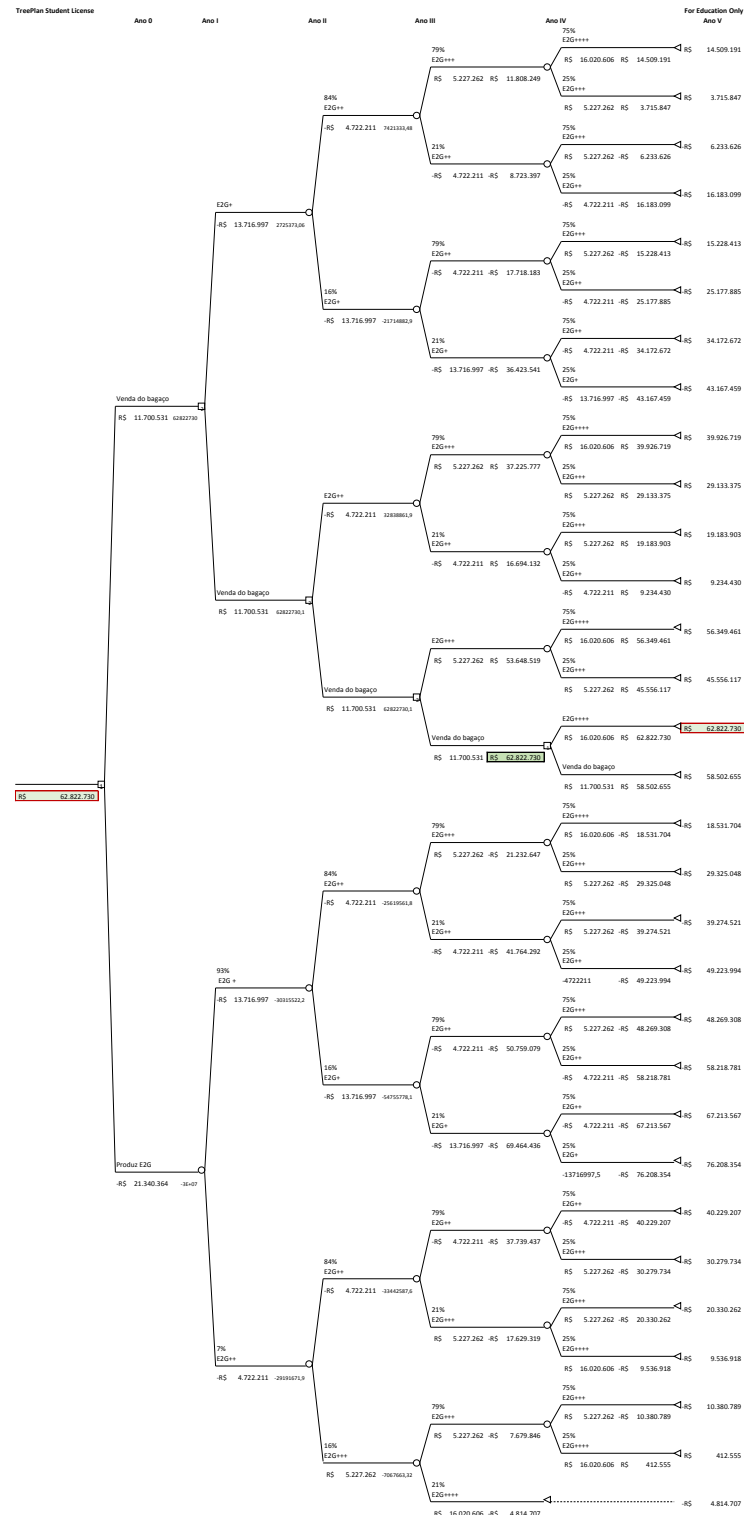
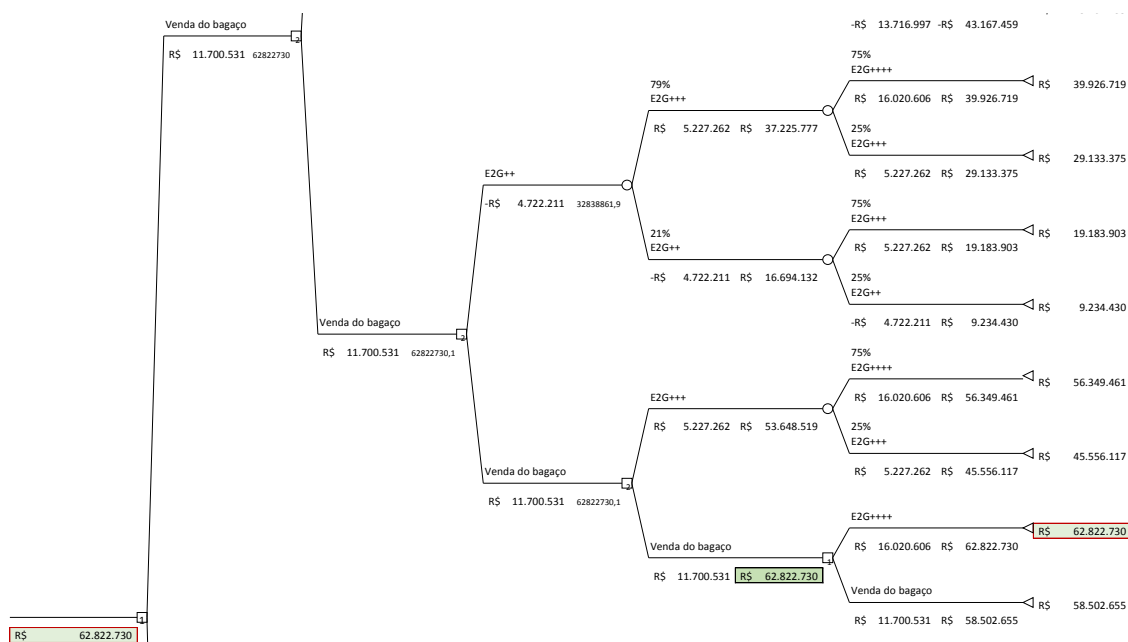


Figura 15: Árvore de decisão E2G e Bagaço

Figura 16: Recorte da árvore de decisão



4.7. Análise de sensibilidade

A partir da análise dos dados e simulações podemos concluir que a opção de produzir E2G ainda depende de significativa evolução da tecnologia, uma combinação de aumento de produtividade ($l \cdot \text{ton}^{-1} \text{MS}$) e também na redução de custos das enzimas (R\$ / litro de etanol produzido), como pode ser observado na Figura 17.

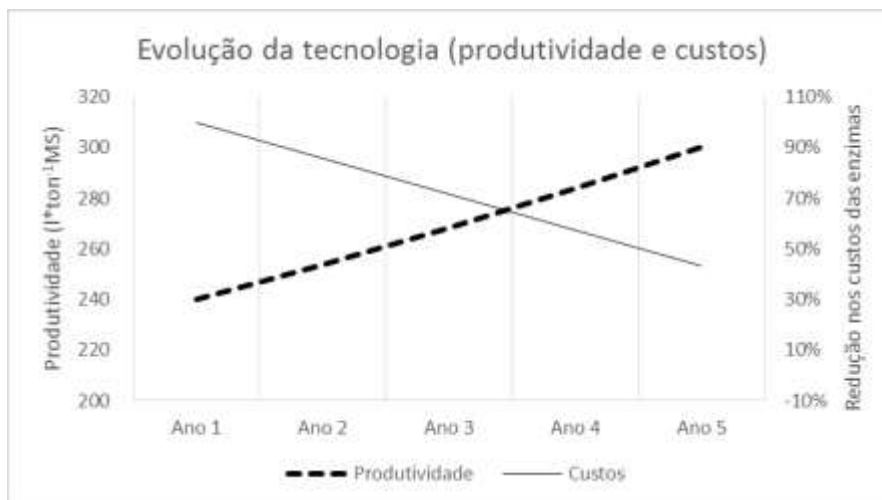


Figura 17: Evolução da tecnologia

Como a produtividade tem impacto imediato nos resultados, a seguir podemos observar seu efeito na geração de caixa e, portanto, na capacidade de tornar-se viável em escala comercial, ou seja, atrair investimentos. A Figura 18 mostra que somente no ano IV tem início a geração positiva de caixa.

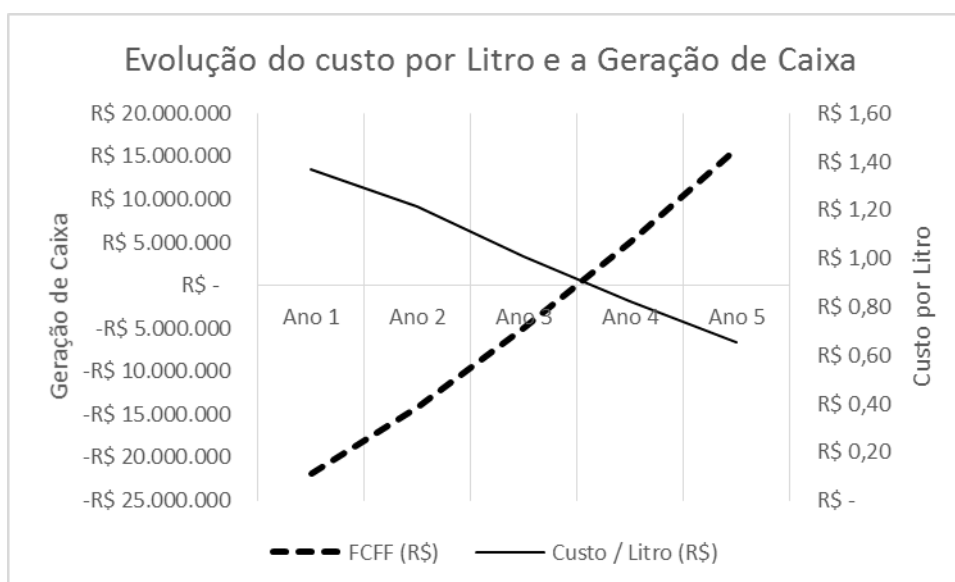


Figura 18: Gráfico de evolução dos custos

Como observado pelo BNDES em (BNDES - Setorial, 2015), houve grande evolução no processo de produção do E2G nos últimos anos. Em (Unica, 2010) o tema não foi abordado pelo fato de o E2G não estar disponível comercialmente na época de elaboração deste estudo, entretanto aparece como alternativa potencial de médio prazo. Com os dados obtidos podemos afirmar que o produto ainda necessita evoluir para atingir sua escala comercial, mas deverá ser contemplado no planejamento de médio prazo das empresas como tecnologia alternativa.

5 - CONCLUSÃO

Os resíduos da cana de açúcar são uma importante opção de biomassa para conversão em energia, tanto por seu potencial energético como pelo volume disponibilizado a cada ano. O uso na produção de energia elétrica é predominante e novos usos como a produção de E2G ganham importância à medida o processo de produção em escala industrial ganha competitividade. Assim, uma metodologia de avaliação econômico-financeira robusta se faz necessária para suportar os investimentos.

No caso da usina estudada, a análise de investimento pela teoria das opções reais, tendo em vista o comportamento dos preços do etanol e também dos ativos, a opção de postergar a produção pode trazer maior valor ao investidor.

Ao aplicar o modelo foi possível observar que a decisão de prorrogar o início da produção prevalecerá pelo menos até o quarto ano quando, se espera, os custos dos insumos tenham reduzido em aproximadamente 50% em relação aos custos atuais e a produtividade por tonelada de biomassa tenha superado os 300 l*ton⁻¹MS. Neste momento, dentro dos parâmetros de volatilidade de preço estudados, existe a possibilidade de dar início à produção. Nestas condições a produção de E2G se torna viável quando preço por litro (venda) ultrapassa a fronteira de R\$1,29/Litro.

Uma outra sugestão deste estudo é a possibilidade de o melhor momento de adicionar novas tecnologias através da utilização de abordagem quadrinomial. O modelo permite a inserção de cenários de evolução tecnológica e, no caso específico estudado, o resultado da análise da competitividade da tecnologia de produção E2G em contraste com a venda da matéria prima *in natura* como parâmetros de análise, mostrou o momento mais adequado para realização do investimento de forma a gerar maior valor para o acionista.

Foi também possível concluir que o processo de produção do E2G encontra-se ainda em fase de desenvolvimento e que necessita de maior evolução técnica para então atrair investimentos privados, entretanto deve ser considerado no planejamento de médio e longo prazos. No contexto atual espera-se uma

competição por recursos de investimento com preponderância para cogeração. Em um horizonte mais longo, é possível ainda um acirramento no cenário com maior competição caso exista maior demanda pelo bagaço com a implantação de novas unidades de cogeração. Vale considerar que o relatório do BNDES Setorial (2015) utilizou o valor de referência de R\$103,29 a tonelada do bagaço posto na usina. Com base nos dados do mesmo relatório, cujos parâmetros foram utilizados nas simulações, e observado o contexto onde se encontra a usina estudada, conclui-se que o contexto atual está mais favorável a cogeração. Tendo com premissa o preço de equilíbrio atual do bagaço, apesar de a Usina haver feito investimentos para produção de E2G, a opção de venda do bagaço para uma outra usina com capacidade de cogeração é vantajosa para ambas. Este cenário se altera quando ampliamos a volatilidade para 50%, o que pode elevar os preços do Etanol Hidratado ao produtor acima do R\$1,50 por litro e, neste contexto, a decisão seria antecipada em um ano.

Finalmente, os resultados evidenciam a necessidade de políticas públicas de incentivo para ambos produtos, energia elétrica e E2G. Existe sinergia entre os dois e sabemos que no caso da produção de energia elétrica os contratos de fornecimento dão garantia ao financiamento e estabilidade de receita. No cenário atual, sem incentivos, a produção de E2G não atrai investimentos e desestimula o pioneirismo.

Como limitações do trabalho, não foram exploradas volatilidades de preço de energia elétrica no que pudessem alterar o preço do bagaço, tampouco a volatilidade de preços do etanol anidro e da gasolina que pudessem trazer maior valor ao acionista. Também não foram considerados os ganhos potenciais com a inclusão dos resíduos da palha, entre outras biomassas. Como sugestão de estudos futuros, a comparação de diferentes arranjos produtivos na cadeia produtiva da cana-de açúcar no país como forma de explorar as possibilidades regionais. Questões regionais tem grande efeito nos resultados, seja pela elasticidade de preços e também custos logísticos, portanto, uma maior coordenação entre os agentes da cadeia pode aumentar a possibilidade de ganho compartilhado e redução de custos de contrato, enfim alterar a decisão individual de cada ator.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, F. de; Epa, M.; Mourão, U. C.: A produção do etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-de-açúcar. V. 2, 2014.
- BNDES setorial. 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 - biocombustíveis. [s.l: s.n.].
- CGEE, C. For S. S. and M. Sustainability of sugarcane bioenergy. [s.l: s.n.].
- Dantas, G.; Alternativas de investimento do setor sucroenergético brasileiro para aproveitamento de bagaço e de palha. 2013. 2013.
- Dias, M. O. de S.; Desenvolvimento e otimização de processos de produção de etanol de primeira e segunda geração e eletricidade a partir desenvolvimento e otimização de processos de produção de etanol de primeira e segunda geração e eletricidad. 2011.
- Dias, M. O. S. *et al.*; Second generation ethanol in brazil: can it compete with electricity production? Bioresource technology, v. 102, n. 19, p. 8964–8971, 2011.
- Dias, M. O. S.; Junqueira, T. L.; Cavalett, O.; *et al.*; Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. Bioresource technology, v. 103, n. 1, p. 152–161, 2012.
- Dias, M. O. S.; Junqueira, T. L.; Jesus, C. D. F.; *et al.* Improving second generation ethanol production through optimization of first generation production process from sugarcaneenergy, 2012.
- Dias, M. O. S. *et al.*; Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane. Chemical engineering research and design, v. 91, n. 8, p. 1411–1417, 2013.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Anuário estatístico de energia eletrica 2013, p. 253, 2013.
- Furlan, F. *et al.* Bioeletricity or ethanol. Biotechnology for biofuels, v. 6, n. 1, p. 142, 2013.
- Gouveia, A.; 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. N. Mdic, p. 237–294, 2015.
- Guarda, E. A. *et al.* Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil. 2013.
- Guimarães, F. L. Preços de etanol no brasil : uma análise espacial. V. 55, n. 11, p. 1–24, 2011.
- Hassuani, J. S.; Biomass power generation, sugar cane bagasse and trash. [s.l.] PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento / CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, 2005.

Lessard, D. R.; Uncertainty and risk in global supply chains. Mit Sloan research papers, n. 4991-13, 2013.

Lima, N. C.; A formação dos preços do etanol hidratado no brasil. 2011.

Lopes, O. A.; Avaliação de métodos avançados de geração de energia elétrica na indústria de açúcar e bioenergia. 2013.

Macedo, F. D. S.; A reestruturação do setor sucroenergético no brasil uma análise do período entre 2005 e 2011. P. 71, 2011.

Maluf, G.; A competição entre o etanol de segunda geração e a produção de eletricidade pelo uso do bagaço. 2014.

Nardelli, p. M.; macedo, m. A. D. S. Análise de um projeto agroindustrial utilizando a teoria de opções reais: a opção de adiamento. Revista de economia e sociologia rural, v. 49, n. 4, p. 941–966, 2011.

Orellano, V. F.; souza, a d. N.; Azevedo, P. F. Elasticidade-preço da demanda por etanol no brasil: como renda e preços relativos explicam diferenças entre estados. Revista de economia e sociologia rural, v. 51, n. 4, p. 699–718, 2013.

Palacio, J. C. E.; Análise termoeconômica integrada das plantas de cogeração e etanol em uma destilaria autônoma. P. 281, 2010.

Palomino, J. M. G.; Formação de preços de energia elétrica gerada por biomassa no ambiente de contratação livre brasileiro: uma abordagem computacional baseada em agentes. P. 118, 2009.

Rabelo, S. C.; Avaliação e otimização de pré-tratamentos e hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração. P. 447, 2010.

Seabra, J. E. A. *et al.*; A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering. Biomass and bioenergy, v. 34, n. 8, p. 1065–1078, 2010.

Seabra, J. E. A; Macedo, I. C.; Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in brazil. Energy policy, v. 39, n. 1, p. 421–428, 2011.

Sousa, E. L. Leão de; Macedo, I. De C.; Etanol e bioeletricidade: a cana de açúcar no futuro da matriz energética. [s.l: s.n.].

Tatoni, W. M.; 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. 2012.

Washington, E.; Relatório de sustentabilidade do setor sucroenergético. 2010.