

## **Análise da Viabilidade Econômica de uma Planta para Captura de CO<sub>2</sub> na Indústria Alcooleira**

### **Analysis of the Economic Viability of a Plant to Capture Co2 in the Alcohol Industry**

David Ferreira Lopes Santos  
Doutor em Administração de Empresas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Professor Assistente da UNESP, Jaboticabal, São Paulo  
david.lopez@fcav.unesp.br

Marcelo Giroto Rebelato  
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo  
Professor assistente da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, São Paulo  
mgiroto@fcav.unesp.br

Andréia Marize Rodrigues  
Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo  
Professora do Departamento de Economia Rural da UNESP, Jaboticabal, São Paulo  
andreiamarize@fcav.unesp.br

Editora Científica: Vera L. Caçado  
Organização: Comitê Científico  
*Double Blind Review* pelo SEER/OJS  
Recebido em 29.05.2012  
Aprovado em 24.10.2012



Este trabalho foi licenciado com uma Licença Creative Commons - Atribuição – Não Comercial 3.0 Brasil

## Resumo

Este artigo investigou a viabilidade econômica da instalação de uma planta de captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no processo de produção do etanol em usinas do setor alcooleiro, tendo como base o estado de São Paulo. A abordagem econômica utilizada foi o método do Fluxo de Caixa Descontado e a Teoria de Opções Reais, por meio de uma adaptação do modelo binominal recombinante de Cox, Ross e Rubinstein (1979). A principal incerteza mapeada foi o preço do CO<sub>2</sub>, que ainda não possui um mercado desenvolvido, de forma que foi utilizada como *proxy* a volatilidade do *Certified Emission Reduction*. Os dados que sustentaram a abordagem foram levantados por meio de análise exploratória junto a diferentes fontes, cujos resultados confirmaram a viabilidade da planta de recuperação do CO<sub>2</sub> e ainda permitiram sinalizar um preço limítrofe para a continuidade do projeto.

**Palavras-chave:** Recuperação de CO<sub>2</sub>; Análise de Projetos; Fluxo de Caixa Descontado; Teoria de Opções Reais.

## Abstract

This paper investigated the economic viability of installing a plant for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture in the process of ethanol production in the alcohol plants sector, based on the state of São Paulo. The research permeates a promising research field because while covering an array of important industry in the country, it includes a product capable of adding value to the sector and contributes to reducing the greenhouse effect. We used the economic approach of the Discounted Cash Flow and Real Options Theory method, by means of an adaptation of Cox, Ross and Rubinstein (1979) binomial recombinant model. The main uncertainty was the price of CO<sub>2</sub>, which does not have a developed market, so it was used as a proxy of the volatility of Certified Emission Reduction. The data that supported the approach were collected through an exploratory analysis from different sources. The results confirmed the viability of the CO<sub>2</sub> recovery plant and still allowed signaling a borderline price for continuing the project.

**Key words:** CO<sub>2</sub> Recovery; Project Analysis; Discounted Cash Flow; Real Options Theory.



## 1 INTRODUÇÃO

Nas usinas alcooleiras o etanol é obtido por meio do processo da fermentação do mosto, que é uma suspensão de substrato açucarado proveniente da cana. No processo fermentativo do mosto, cujo principal agente é a levedura, tem-se como produto o álcool etílico, sendo o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) um importante subproduto do processo. O processo fermentativo do mosto é realizado nas chamadas dornas de fermentação, as quais podem atingir uma capacidade de milhares de litros. Algumas empresas utilizam dornas abertas, mas na maioria delas as dornas são fechadas. As dornas abertas são responsáveis pela perda de etanol de 1 a 2% pelo arraste do  $\text{CO}_2$  liberado na atmosfera. Por outro lado, as dornas fechadas são dotadas de um sistema coletor de  $\text{CO}_2$  que encaminha o gás carbônico e o etanol para uma torre de recuperação. Nessa torre realiza-se a lavagem do  $\text{CO}_2$  em contracorrente com água visando à recuperação do etanol (Magalhães, 2012). Independentemente do tipo de dorna utilizada, esse  $\text{CO}_2$  é perdido pelas usinas alcooleiras ao ser liberado para o ambiente.

Nos dias atuais, entretanto, existe a possibilidade de captura do  $\text{CO}_2$  gerado no processo de fermentação do mosto por meio da implantação de uma planta industrial, de modo que o  $\text{CO}_2$ , que antes era perdido para a atmosfera, agora possa ser comercializado pela usina alcooleira. Uma usina alcooleira de médio porte, por exemplo, pode recuperar e comercializar cerca de três mil kg/h de  $\text{CO}_2$  (Jornal da Cana, 2008). Esse gás carbônico capturado nas dornas de fermentação pode ser utilizado em inúmeras aplicações industriais, tais como: no estado gasoso para carbonatação em cervejas, refrigerantes ou água; no estado líquido para enchimento de cilindros (por exemplo, extintores de incêndios ou cilindros de propulsão nas armas de *paintball*); no estado sólido para produção de *pellets* de gelo seco ou como congelante para alimentos; no processo de jateamento de peças metálicas em substituição ao jato de areia; no tratamento de efluentes líquidos; para rebarbação de artefatos de borracha; para a expansão do poliuretano na indústria de refrigeradores; na produção de fertilizantes; na fabricação de extintores contra incêndio com produção de espuma; na produção de bicarbonato de sódio; na pigmentação de peças plásticas; e na produção de algas.

Os gases de combustão provenientes de usinas de energia não são uma boa fonte de CO<sub>2</sub>, pois, neste caso, há muitas impurezas e muito baixo volume de CO<sub>2</sub> junto ao gás de combustão. Gases de combustão de plantas de gás natural e de plantas a carvão contêm apenas 3-6% e 10-12% de CO<sub>2</sub>, em volume, respectivamente. Deste modo, a produção de CO<sub>2</sub> a partir dessas fontes não é economicamente viável. O CO<sub>2</sub> de alta pureza (99%) emitido pelas usinas de produção de etanol tornou-se uma opção atraente para a indústria de CO<sub>2</sub>. Nos EUA isso é demonstrado pelo rápido incremento do mercado, que saltou de menos de 20% para 33% entre 1990 e 2007. Espera-se contínuo incremento desse mercado na medida em que novos projetos de CO<sub>2</sub> provenientes do etanol estão em curso (Xu, Isom & Hanna, 2010).

No Brasil, não existem dados disponíveis, porque a captura de CO<sub>2</sub> a partir do processo de fermentação do mosto pelas usinas produtoras de etanol não é uma prática desenvolvida no país. Pairam dúvidas sobre a viabilidade econômica de projetos desse tipo no Brasil, tanto para o setor industrial quanto para a comunidade acadêmica. Há certo grau de incerteza quanto ao preço do CO<sub>2</sub>, pois os custos de transporte são muito difíceis de serem contabilizados *a priori*, uma vez que não se pode precisar a localização da planta fornecedora de CO<sub>2</sub>, tampouco o local dos seus possíveis clientes.

Dessa forma, sem a preocupação de esgotar a complexidade que envolve essa temática, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade econômica de uma planta de captura de CO<sub>2</sub> proveniente do processo de fermentação do mosto na indústria alcooleira, sendo preciso considerar a incerteza relativa ao preço do CO<sub>2</sub> no mercado.

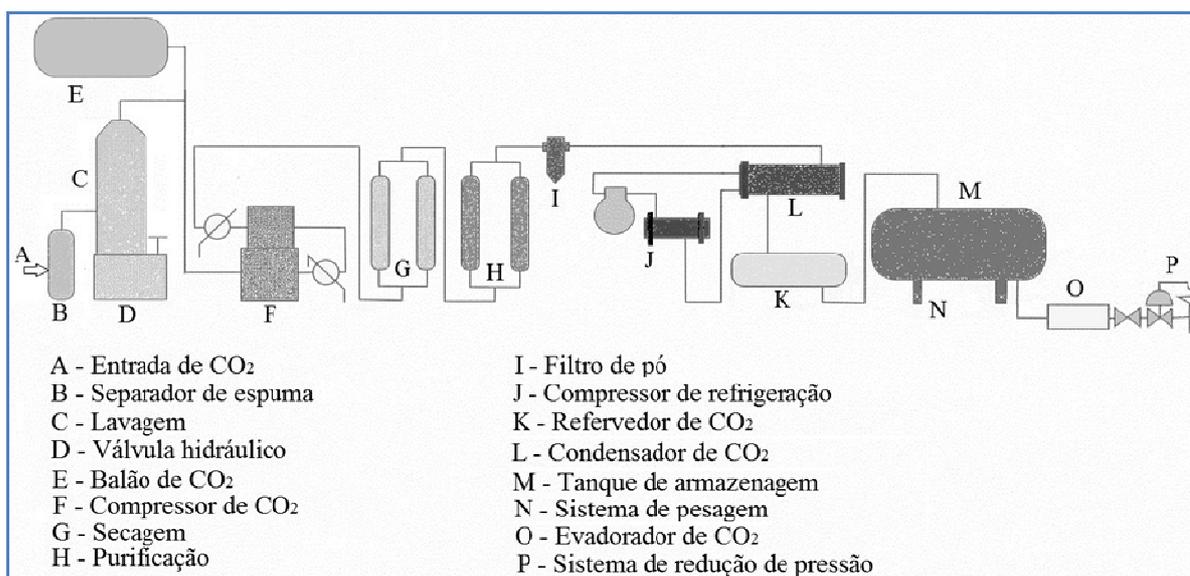
Delineia-se aqui uma pesquisa de cunho exploratório na indústria alcooleira, uma das mais tradicionais e importantes da economia brasileira. Trata-se de um setor industrial em forte expansão no Brasil e com inúmeras possibilidades em inovações tecnológicas e novas oportunidades de ganhos financeiros. A captura do CO<sub>2</sub> vislumbrada abre caminhos não somente na vertente da análise econômica aqui conduzida de venda direta do CO<sub>2</sub> para aplicações industriais, mas também para a destinação do gás carbônico capturado alternativamente para sumidouros geológicos de modo a colaborar na redução de emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, contribuindo na mitigação do chamado efeito estufa.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a próxima seção apresenta uma revisão do processo de captura do CO<sub>2</sub> na indústria alcooleira e os fundamentos da análise de investimento, com foco na teoria de opções reais. A terceira seção apresenta os procedimentos metodológicos que subsidiaram a análise econômica que é demonstrada na quarta parte. Finalmente, as considerações finais discorrem quanto aos resultados do trabalho e perspectivas futuras; e são apresentadas as referências.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 A captura do CO<sub>2</sub>

Um diagrama esquemático de uma planta de tratamento do CO<sub>2</sub> pode ser visto na Figura 1. O CO<sub>2</sub> na forma de gás é alimentado em A na unidade de tratamento proveniente da fermentação do mosto. O CO<sub>2</sub> produzido entra na unidade de purificação de baixa pressão, consistindo em: separador de espuma, lavador de gás e válvula hidráulica. No lavador de gás, o CO<sub>2</sub> é lavado para a eliminação de álcoois e outras impurezas. A eficiência da unidade de lavagem deve assegurar baixo consumo de água e também perda de carga desprezível. O arraste de gotas do líquido é removido no demixer antes da sucção do compressor, onde o gás armazenado no balão é sustentado para amortecer as flutuações de fluxo e reduzir as paradas e partidas do compressor. O CO<sub>2</sub> é então comprimido no compressor (o qual deve ser isento de óleo), atravessa o leito da peneira molecular, na secagem automática, para remover completamente a umidade. Então, passa pelo leito de carvão e vai até dentro dos purificadores automáticos e pelo filtro fino de pó para remoção de odores das impurezas e dos sólidos em suspensão. Em seguida, o gás segue para o refervedor, onde é pré-resfriado antes de entrar no condensador, quando o CO<sub>2</sub> é liquefeito pela ação da refrigeração por amônia. Na sequência, o CO<sub>2</sub> desce por uma coluna de *stripper* e retorna para o refervedor, porém, no lado do casco, onde sofre fervura. Esse procedimento promove o desprendimento dos gases incondensáveis, elevando a pureza do CO<sub>2</sub> líquido, que é então enviada ao tanque de armazenagem (Tecno Project Latina, 2012).



**FIGURA 1.** Esquema de tratamento do CO<sub>2</sub> capturado.

Fonte: adaptado de Tecno Project Latina. *Recuperação do CO<sub>2</sub>* (2012). Recuperado de <<http://www.tecnoproject.com.br/recuperacao.htm>>.

O processo físico-químico descrito de forma sucinta é capaz de sequestrar o CO<sub>2</sub> e torná-lo um subproduto do sistema de produção de açúcar e álcool passivo de comercialização. A questão que descerra essa pesquisa é verificar se esse subproduto é capaz de agregar valor econômico à usina, tendo em vista que essa nova planta incorre em investimentos e custos incrementais ao negócio existente.

## 2.1 Análise de investimentos

A literatura financeira é uníssona em assegurar que o propósito de todo investimento é agregar valor ao detentor do capital (Santos & Zotes, 2011). Esse truísmo tem assento no princípio econômico da separação, em que se aceitam investimentos quando, e somente se, o retorno marginal da última unidade monetária for no mínimo igual ao custo de oportunidade da empresa (Copeland & Antikarov, 2001).

A principal dificuldade na avaliação de projetos está na compreensão da tradicional relação risco *versus* retorno, inerentes aos investimentos de capital, pois todos estão sujeitos às incertezas quanto às projeções futuras (Damodaran, 2001).

Damodaran (2001) e Kuronuma (2006) destacam três abordagens utilizadas no âmbito acadêmico e empresarial na avaliação de investimentos, a saber: a) abordagem relativa; b) abordagem fundamentalista; c) abordagem contingencial.

A primeira vertente trilha pelo uso de múltiplos que são largamente utilizados nos investimentos em mercados de crédito e capitais, como o *price/earning* (P/E). Todavia, existem dezenas de indicadores que procuram avaliar de forma comparativa diferentes investimentos sob diversos enfoques (rentabilidade, liquidez, eficiência operacional, entre outros) (Kuronuma, 2006).

O enfoque fundamentalista é o mais tradicional e amplamente utilizado nas análises de investimentos, pois se baseia no fluxo de caixa descontado (FCD) dos projetos (Damodaran, 2001). Esse conceito é descrito pela fórmula (1).

$$FCD_j = \sum_{j=1}^n \frac{FCL_j}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Sendo:

FCL = fluxo de caixa livre do projeto

i = taxa de desconto

n = tempo do projeto

Essa abordagem garante, ao mesmo tempo: a) considerar o valor do dinheiro no tempo; b) dimensionar o valor da riqueza agregada; c) verificar o retorno do investimento em percentual (Damodaran, 2001).

Para tanto, utilizam-se as técnicas: valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e o índice de lucratividade (IL). Algumas derivações são possíveis, por meio do FCD, como, por exemplo, o *payback* descontado.

A abordagem contingencial tem se firmado nas avaliações de projetos empresariais, em razão de mudança de paradigma nos investimentos em ativos reais, pois estes deixaram de ser considerados obrigação e tornaram-se direitos (Brandão & Dyer, 2009; Santos & Pamplona, 2005). Essa nova perspectiva tem como base a teoria de opções oriunda do mercado financeiro e formalizada nos trabalhos de Black e Sholes (Damodaran, 2001; Dias, 1996; Myers, 1987; Pindyck, 1993).

O desenvolvimento da teoria das opções reais (TOR) ocorre, fundamentalmente, em razão das limitações do FCD (Postali, 2009). Segundo Dixit e

Pindyk (1994, p. 31) “[...] o FCD não está somente errado, ele está muito errado”. A essência do “erro” do FCD é a sua natureza de irreversibilidade, isto é, ou se aceita ou não se aceita o projeto num momento em que nem todas as informações estão disponíveis (Santos & Pamplona, 2005).

As opções tradicionais de compra ou venda no mercado financeiro foram extrapoladas nos ativos reais para opções de parada de produção, permuta de insumos, opções de abandono, opção de investimento, substituição de produtos, entre outros, e com aplicações nos mais diversos setores e funções empresariais (Postali, 2009).

Formou-se então a TOR, cuja aplicação tem ganhado escala em projetos de investimentos com altos níveis de incertezas, existindo oportunidades para os gestores dos projetos alterarem o curso do investimento no decorrer destes, ou seja, existem opções ou alternativas a serem assumidas durante os projetos capazes de maximizar seus ganhos ou limitar suas perdas (Trigeorgis, 1993).

O valor da TOR consiste justamente na valoração da flexibilidade gerencial, não captada pela abordagem fundamentalista tradicional, pois as variáveis da fórmula (01) não se alteram no curso do tempo.

Entre as diferentes metodologias de cálculo, Santos (2004) relaciona três modelos para se precificar as opções: o modelo de Black-Sholes, a Simulação Monte Carlo e o modelo binominal de Cox, Ross e Rubinstein (1979).

Para a valoração do projeto objeto deste trabalho será utilizado o modelo de distribuição binominal, que pressupõe a possibilidade do exercício da opção antes do prazo de final do projeto e ainda conta com a não aferição do risco diversificável. Essa condição não ocorre no modelo de Black-Sholes.

O uso desse modelo tem como restrição que os valores do ativo em análise (subjacente) apresentem, apenas, dois valores (ascendente e descendente) e que não exista oportunidade de ganhos de arbitragem (Cox *et al.*, 1979).

Portanto, em todo período de tempo  $\Delta t$ , o ativo subjacente assumirá dois valores; um ascendente caracterizado por  $u(u > 1)$  e um descendente caracterizado por  $d$  ( $d < 1$ ). Destarte, se  $S_0$  for o valor atual do ativo subjacente, o preço do mesmo para  $t=1$  seria alcançado por  $S_1 = S_0 \cdot u$  ou por  $S_1 = d \cdot S_0$ . Nas duas situações o preço da opção seria  $F_u$  e  $F_d$ , respectivamente.

Tomando como base o modelo de Cox *et al.* (1979), os movimentos ascendentes “*u*” e descendentes “*d*”, admitindo que os valores seguem o movimento geométrico browniano em tempo discreto, podem ser calculados pelas fórmulas (2) e (3):

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

$$d = e^{-\sigma \cdot \sqrt{\Delta t}} \text{ ou } d = 1/u \quad (3)$$

Sendo:

*e* - exponencial elevada a constante 2,71828...

*σ* - desvio-padrão do ativo subjacente

Os movimentos ascendentes e descendentes seguem processos multiplicativos na árvore binomial, de forma que o valor inicial é positivo e o extremo inferior tende a zero e o superior ao infinito.

Ressalta-se que, para o cálculo da opção, deve-se valorar o preço de exercício do ativo subjacente e num processo de trás para frente, de forma a alcançar o momento zero com a flexibilidade dimensionada.

A metodologia normalmente utilizada é a abordagem probabilística neutra em relação ao risco, a partir de um portfólio de *hedge* composto de uma ação do ativo subjacente sujeito ao risco e uma posição vendida de “*m*” ações da opção que está sendo apreçada (Copeland & Antikarov, 2001).

A abordagem probabilística neutra ao risco parte de um coeficiente de *hedge* “*m*” escolhido de tal forma que o portfólio esteja livre de risco no curto período próximo. O portfólio de *hedge* não está sujeito a risco, pois se o valor do ativo subjacente ao risco cai, o mesmo ocorre com a opção de compra (venda) feita sobre ele, mas como estamos vendidos na opção de compra, nossa riqueza aumenta. Se o coeficiente de *hedge* for exato, a perda com o ativo subjacente será anulada pelo ganho na posição vendida da opção de compra, e o resultado será livre de risco (Copeland & Antikarov, 2001).

Segundo Copeland e Antikarov (2001), o método para encontrar o valor presente segundo a probabilidade neutra em relação ao risco é:

$$C_0 = \left[ \frac{\rho \cdot C_u + (1 - \rho) \cdot C_d}{(1 + R_f)} \right] \quad (4)$$

Ainda, para encontrar o valor de  $\rho$  e  $q$ , utiliza-se:

$$\rho = \frac{(1 + R_f) - d}{(u - d)} \quad (5)$$

$$q = 1 - \rho \quad (6)$$

Essas probabilidades não devem ser confundidas com aquelas que levaram o ativo a ir assumindo os valores na ascendente ou descendente; constituem-se puramente em recursos matemáticos utilizados para ajustar o resultado do fluxo de caixa, de modo que possam ser descontados a uma taxa livre de risco.

Dessa forma, os resultados financeiros desta pesquisa estão apoiados na abordagem fundamentalista e principalmente na contingencial, a fim de aumentar a robustez da análise em face das incertezas inerentes ao preço do CO<sub>2</sub>.

Importa destacar antecipadamente que neste estudo adotou-se o cálculo das opções de forma diferenciada dos trabalhos tradicionais com o modelo binomial, baseados nos “passos” propostos por Copeland e Antikarov (2001), tendo em vista que a prática utiliza o VPL sem flexibilidade como ativo subjacente. Neste trabalho, utilizou-se o preço do CO<sub>2</sub> como ativo subjacente e, a partir das possibilidades destes, os fluxos de caixa livres de cada período foram determinados e, então, pela abordagem probabilística, foram calculados o valor presente.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em função do modelo de viabilidade econômica adotado nesta pesquisa, tem-se como ponto de partida a construção do fluxo de caixa do projeto, cujos dados foram atingidos por meio de pesquisa exploratória em diferentes fontes e tabulados em planilha eletrônica também utilizada para realizar os cálculos de viabilidade econômica.

Na sequência são apresentados os elementos componentes do fluxo de caixa que possibilitaram a realização da análise, cujo interesse se assenta na confiabilidade da pesquisa e na possibilidade de permitir uma reanálise por outras abordagens.

#### a) Investimento

As características da planta, objeto deste estudo, foram delineadas em contato com diferentes fornecedores de bens de capital da indústria alcooleira, bem como em pesquisa de campo numa usina típica onde o supervisor de produção demonstrou como captar o CO<sub>2</sub> a partir do processo de fermentação do mosto, uma das etapas na fabricação do etanol.

O valor total do investimento foi orçado com base no levantamento dos custos de confecção e montagem da planta, das facilidades a serem instaladas bem como treinamento e comissionamento para pré-parada. Todos os valores foram estimados em reais (R\$), tendo como base o preço do aço em dezembro/2011, para uma planta com capacidade de recuperação de CO<sub>2</sub> em 2.000 kg/h com tanque de armazenagem de 300 m<sup>3</sup>.

#### b) Receita e deduções da receita

A projeção de receita foi realizada por meio de simulações no preço futuro do CO<sub>2</sub> em quilograma (kg) com a quantidade nominal de recuperação da planta estimada em 2.000 kg/h. Todavia, em razão das projeções anuais do fluxo de caixa e da sazonalidade da produção de cana-de-açúcar, estipulou-se uma média conservadora de oito horas diárias de recuperação de CO<sub>2</sub>.

Um fator importante na precificação do CO<sub>2</sub> para comercialização é o custo do transporte, em face das especificidades do equipamento e da variação de distância entre a usina e o cliente. Sendo assim, adotou-se o modelo *Incoterm EXW* (*Ex-works*) como parâmetro, isto é, o preço na “porta” da usina, o que elimina, por necessidade, as infinitas variações possíveis ou a utilização de médias que poderiam enviesar a análise.

Diante disso, partiu-se para uma pesquisa no mercado quanto a um possível preço (EXW), assumindo-se que se trata de um mercado em desenvolvimento cujos preços praticados variam substancialmente. Assim, com base em consultas realizadas em 11 empresas consumidoras do produto, verificou-se que os preços do quilograma de CO<sub>2</sub> variam de um limite inferior de R\$ 0,75 a um limite superior de R\$ 5,00, já com o frete incluso. Para este trabalho, assumiu-se, então, um resultado mais conservador, de R\$ 0,60/kg.

Na ausência de um mercado consolidado de CO<sub>2</sub> em que fosse possível acompanhar a evolução histórica do preço desse produto, assumiu-se como *proxy* o *Certified Emission Reductions* (CER) negociado na *European Energy Exchange*, em Leipzig, Alemanha. A escolha desse título deve-se ao seu ativo subjacente (CO<sub>2</sub>) captado em mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL).

Para o cálculo da volatilidade (variância) do título, foram coletados os preços diários desses certificados, desde 04/01/2010 a 31/12/2011, cujas variações foram definidas pela fórmula (7).

$$\Delta = \ln\left(\frac{P_{t+1}}{P_t}\right) \quad (7)$$

Sendo:

$\Delta$  - variação diária

$P_{t+1}$  - Preço final

$P_t$  - Preço inicial

As deduções da receita referem-se aos tributos incidentes sobre o faturamento: Imposto de Circulação de Mercadoria e Serviços (ICMS); Programa de Integração Social (PIS); e Contribuição ao Financiamento da Seguridade Social (COFINS), que totalizam 27,25% sobre a receita bruta, considerando o estado de São Paulo, tendo em vista o ICMS ser um tributo de competência do governo estadual (Brasil, 2002; São Paulo, 1989).

### c) Custos e despesas incrementais

Os custos relacionados à planta de recuperação de CO<sub>2</sub> são: energia elétrica, água, manutenção operacional e manutenção preventiva.

O consumo de energia elétrica para o objeto deste estudo foi orçado em 400 kWh, de forma que o custo de energia no país, após a desregulamentação, tornou-se variável e sabe-se que grandes consumidores, como as usinas, negociam custos mais baixos. Todavia, foi assumida como parâmetro a média ponderada dos custos para tempo úmido e seco bem como para os períodos de ponta e fora de ponta aplicados no interior do estado de São Paulo na principal região produtora de cana-de-açúcar. A Tabela 1 apresenta os resultados consolidados.

TABELA 1

**Custo de energia elétrica para indústria no interior de São Paulo**

<b>Custo da Energia</b>			
<b>Período Seco (7 meses)</b>		<b>Período Úmido (5 meses)</b>	
Ponta	Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta
12,5%	87,5%	12,5%	87,5%
279,51	175,44	253,08	160,11
Média R\$ mwh	188,44875	Média R\$ mwh	171,73125
<b>Média anual R\$ mhw</b>		<b>181,4274</b>	
Custo kWh		0,1814274	
Impostos		0,062138885	
PIS		0,002993552	
COFINS		0,013788482	
ICMS		0,04535685	
Valor Final		0,243566285	

Fonte: elaborado pelos autores.

O valor final de R\$ 0,24/kWh foi utilizado como parâmetro; no entanto, é possível reduzir o custo de energia quando da aplicação prática se houver programação de trabalho nos horários fora de ponta. De toda forma, para o estudo realizado, trabalhou-se com média ponderada dos meses que englobam o período seco e o tempo destinado aos horários fora de ponta (21 horas/dia) e na ponta (3 horas/dia).

O consumo de água para o processo de recuperação de CO<sub>2</sub> foi estimado em 4 m<sup>3</sup>/h, de forma que o custo desse insumo foi determinado pelo valor padrão de R\$ 15,62/m<sup>3</sup> cobrado da indústria pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) em 2012.

A manutenção operacional da planta que representa os custos associados à sua operação, exceção para energia e água, foi estimada em 5% do valor da planta ao ano. Em adição, projetaram-se os custos de manutenção preventiva em 2,5% do valor da receita, em razão da necessidade de manutenção sistemática nos compressores de CO<sub>2</sub> (4.000 horas) e amônia (NH<sub>3</sub> - 20.000 horas) e na troca do material adsorvente do secador e do desodorizador. Essas manutenções demandam, em média, sete dias de parada da planta.

Ressalta-se que essas projeções foram tomadas junto a um fabricante específico de plantas para captura de CO<sub>2</sub> estabelecido no estado de São Paulo, porém, por questões de sigilo, a sua razão social é ocultada. Ocorreram duas reuniões específicas sobre o processo de captura do CO<sub>2</sub> com esse fabricante no

segundo semestre de 2011 e no curso da análise do projeto o engenheiro responsável respondeu a outros dois questionários.

As despesas incrementais decorrentes do projeto referem-se à comercialização de um novo produto, novos empregados e aumento na carga de trabalho de atividades de apoio (logística, contabilidade, financeiro, comercial, entre outros). Além disso, há incremento no prêmio do seguro da planta diante de novas atividades que envolvem sistemas pressurizados e fontes de calor. Assim sendo, o incremento nas despesas foi estimado em 10% do valor da receita e o seguro em 2% do valor da planta. Destaca-se que essas estimativas foram avaliadas com viés de alta, a fim de aumentar o aspecto conservador do fluxo de caixa.

Essas estimativas foram assumidas com base na experiência dos autores na avaliação de outros projetos, inclusive na precificação de apólices de seguros industriais. Destaca-se que o percentual de 10% de incremento nas despesas administrativas é equivalente à média da usina alcooleira. Observa-se, ainda, que o projeto em questão é conceitual, de forma que contatos com gestores de usinas foram feitos, porém essas informações não foram repassadas, exigindo dos pesquisadores o uso de estimativas.

#### d) Depreciação e imposto de renda

O valor da depreciação anual foi calculado pelo método linear, tomando como valor residual o percentual de 15% do valor da planta para um período de 10 anos, tempo do fluxo de caixa. Os fabricantes de bens de capital admitem a possibilidade de continuidade da planta por período de até 20 anos ou mesmo mais, contudo, em razão do crescimento da inovação tecnológica e dinâmica do mercado em questão, tomou-se por razoável o horizonte temporal limitado pela depreciação contábil.

O imposto de renda (25%) e a contribuição social para o lucro líquido (9%) foram determinados em 34% do lucro tributável, conforme legislação vigente (Brasil, 1996).

#### e) Taxa mínima de atratividade

A taxa de desconto estimada para determinar a relação risco *versus* retorno desse projeto tomou como base o modelo *Capital Asset Pricing Mode (CAPM)*, que apesar de suas tradicionais limitações ainda se constitui na ferramenta mais robusta

para tal fim (Assaf, 2005; Damadoran, 2001; Ross, Westerfield & Jaffe, 2002). Segue a tradicional fórmula do CAPM:

$$CAPM = R_f + \beta(R_m - R_f) \quad (8)$$

Sendo:

- $R_f$  – 11% a.a. (taxa de remuneração dos títulos públicos brasileiros em dezembro/2011).
- $\beta$  - o beta foi estimado em 0,332. Essa estimativa tomou como base a covariância entre as variações nos preços da CER com o índice da bolsa de valores do estado de São Paulo (IBOVESPA) no período entre janeiro/2010 e dezembro/2011 dividido pela variância do IBOVESPA no mesmo intervalo temporal.
- $(R_m - R_f)$  - o prêmio pelo risco no mercado brasileiro foi determinado em 7%, conforme Assaf (2005).

Destarte, a taxa apropriada para desconto desse projeto, segundo o modelo CAPM, foi orçada em 13,66% ao ano.

Os procedimentos relacionados sustentam o fluxo de caixa descontado, que será apresentado na próxima seção, e suportam os resultados projetados com a teoria das opções reais.

#### 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise da viabilidade econômica do projeto teve como ponto de partida a construção do fluxo de caixa incremental desse investimento, a partir dos procedimentos metodológicos discutidos. Sabe-se que a realidade individual das firmas é diferente da média do setor, em razão da idiosincrasia dos tomadores de decisão e do período em que estas são tomadas. Contudo, a utilização de modelos genéricos não se propõe à exatidão da evidência empírica, mas e, sobretudo, ao direcionamento da tomada de decisão.

Nesse sentido, a Tabela 2 traz o fluxo de caixa projetado para o investimento em destaque no período de 10 anos.

TABELA 2

**Fluxo de caixa da planta de recuperação do CO<sub>2</sub>**

FLUXO DE CAIXA DO INVESTIMENTO											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Receita		3.504.000,00	3.504.000,00	3.504.000,00	3.504.000,00	3.504.000,00	3.504.000,00	3.504.000,00	3.504.000,00	3.504.000,00	3.504.000,00
Imposto		954.840,00	954.840,00	954.840,00	954.840,00	954.840,00	954.840,00	954.840,00	954.840,00	954.840,00	954.840,00
Receita Líquida		2.549.160,00	2.549.160,00	2.549.160,00	2.549.160,00	2.549.160,00	2.549.160,00	2.549.160,00	2.549.160,00	2.549.160,00	2.549.160,00
Custos totais		1.188.827,82	838.427,82	838.427,82	838.427,82	838.427,82	838.427,82	838.427,82	838.427,82	838.427,82	838.427,82
Energia		284.485,42	284.485,42	284.485,42	284.485,42	284.485,42	284.485,42	284.485,42	284.485,42	284.485,42	284.485,42
Água		179.942,40	179.942,40	179.942,40	179.942,40	179.942,40	179.942,40	179.942,40	179.942,40	179.942,40	179.942,40
Manutenção geral		200.000,00	200.000,00	200.000,00	200.000,00	200.000,00	200.000,00	200.000,00	200.000,00	200.000,00	200.000,00
Parada Manutenção		87.600,00	87.600,00	87.600,00	87.600,00	87.600,00	87.600,00	87.600,00	87.600,00	87.600,00	87.600,00
Seguro		86.400,00	86.400,00	86.400,00	86.400,00	86.400,00	86.400,00	86.400,00	86.400,00	86.400,00	86.400,00
Despesas incrementais		350.400,00	350.400,00	350.400,00	350.400,00	350.400,00	350.400,00	350.400,00	350.400,00	350.400,00	350.400,00
EBTIDA		1.360.332,18	1.360.332,18	1.360.332,18	1.360.332,18	1.360.332,18	1.360.332,18	1.360.332,18	1.360.332,18	1.360.332,18	1.360.332,18
Depreciação		340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00
LAIR		1.020.332,18	1.020.332,18	1.020.332,18	1.020.332,18	1.020.332,18	1.020.332,18	1.020.332,18	1.020.332,18	1.020.332,18	1.020.332,18
IR + CSLL		346.912,94	346.912,94	346.912,94	346.912,94	346.912,94	346.912,94	346.912,94	346.912,94	346.912,94	346.912,94
Lucro Líquido		673.419,24	673.419,24	673.419,24	673.419,24	673.419,24	673.419,24	673.419,24	673.419,24	673.419,24	673.419,24
Depreciação (+)		340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00	340.000,00
Investimento	-R\$ 4.320.000,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	432.000,00
FCL	-R\$ 4.320.000,00	1.013.419,24	1.013.419,24	1.013.419,24	1.013.419,24	1.013.419,24	1.013.419,24	1.013.419,24	1.013.419,24	1.013.419,24	1.445.419,24
FCD	-R\$ 4.320.000,00	891.625,94	784.469,82	690.191,79	607.244,15	534.265,20	470.056,90	413.565,19	363.862,69	320.133,47	401.725,42

Fonte: elaborado pelos autores.

O fluxo de caixa inicial foi projetado, considerando-se duas premissas fundamentais: o preço (EXW) estimado em R\$ 0,60/kg de CO<sub>2</sub> e uma rotina de trabalho média de oito horas/dia, além das observações já destacadas anteriormente.

A última linha (FCD) da Tabela 1 traz o fluxo de caixa livre (FCL) descontado em valor presente. Deve-se ressaltar que, para a simplificação de cálculo, os valores foram considerados sempre para o final do período, além de admitir que todos os investimentos são realizados antes do início das atividades, por isso não há necessidade de investimento em capital de giro, pois logo no primeiro ano o fluxo de caixa livre é positivo.

Pontua-se, ainda, que o valor no último ano de R\$ 432.000,00 na linha de investimento refere-se a 15% do valor da planta no momento atual, menos custos orçados para alienação, desmobilização e impostos, isto é, um valor que entra como (des)investimento.

Pode-se verificar, já pela abordagem do FCD, quanto à viabilidade econômica do projeto, tendo como 13,66% a.a. a taxa de desconto. O valor presente dos fluxos de caixa totaliza o montante de R\$ 5.477.140,55. Com efeito, tem-se um VPL de R\$

1.157.140,55 e índice de lucratividade de 26,79%. A TIR foi estimada em 19,99%, superior à taxa de atratividade.

Lembra-se que as premissas assumidas para a construção do fluxo de caixa tiveram orientação conservadora, em que aquelas que influenciavam a receita foram dimensionadas com viés de baixa e o contrário com os custos, procedimentos que tornam os resultados robustos.

Todavia, foi destacada a preocupação quanto ao preço do CO<sub>2</sub> no longo prazo, ademais, o *payback* descontado entrega um período de liquidez do investimento no sétimo ano muito próximo da vida útil do projeto. Sendo assim, uma redução no preço futuro do CO<sub>2</sub> poderia comprometer a viabilidade do investimento.

Nesse sentido, lançou-se mão da abordagem de avaliação por opções, a fim de projetarem-se preços futuros do CO<sub>2</sub> e incorporar o valor da opção de abandonar o projeto pelo preço residual da planta. Para tanto, utilizou-se a volatilidade no preço do CER entre janeiro/10 e dezembro/11, diagnosticando-se uma volatilidade anualizada de 39,93% (consideraram-se 252 dias úteis/ano para um desvio-padrão diário nos preços de 0,025154).

Diante disso, calcularam-se pelas fórmulas (2) e (3) os movimentos ascendentes ( $u$ ) e descendentes ( $d$ ) dos preços:

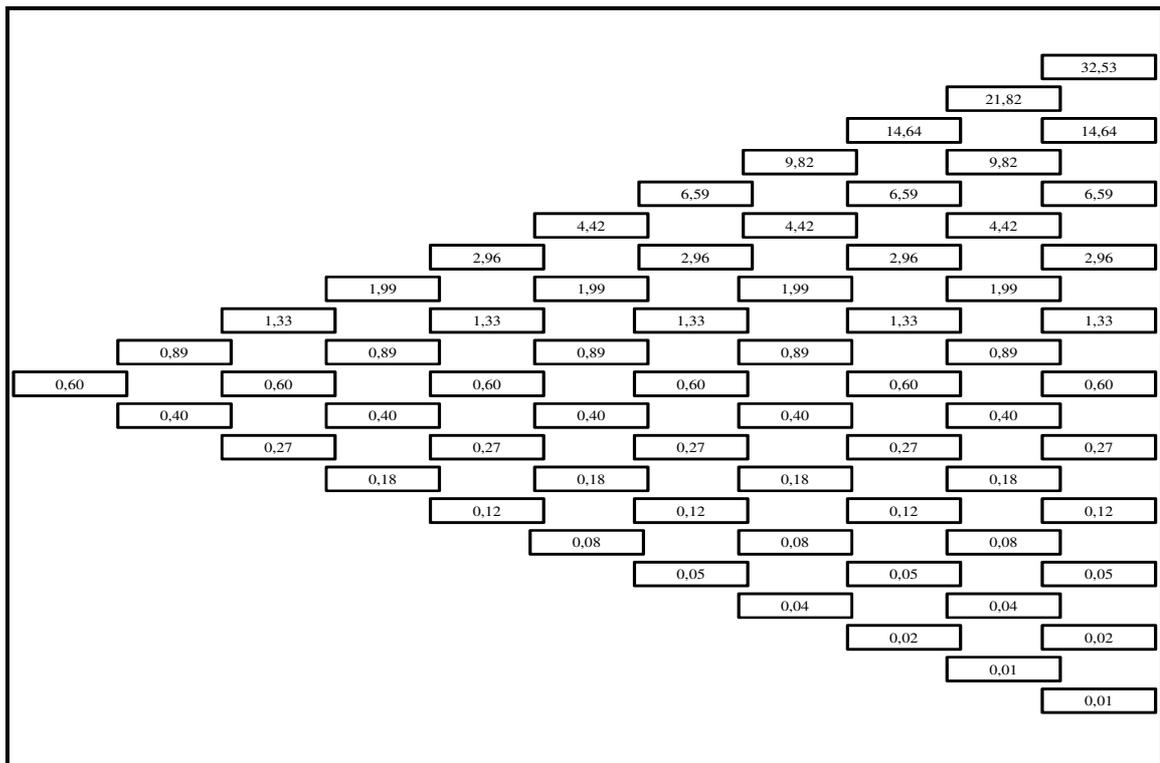
$$u = e^{0,3993\sqrt{1}}$$

$$u = 1,490762$$

$$d = \frac{1}{u}$$

$$d = 0,670797$$

Os reflexos desses movimentos no modelo binominal recombinante, tendo como ponto de partida o preço R\$ 0,60, podem ser observados na Figura 2.



**FIGURA 2.** Evolução do preço do CO<sub>2</sub>.

Fonte: elaborado pelos autores.

Para o cálculo da probabilidade de ocorrência dos movimentos ascendentes e descendentes consideraram-se as fórmulas (5) e (6). Diante disso, tem-se:

$$p = \frac{[(1+0,11) - 0,670797]}{(1,490762 - 0,670797)}$$

$$p = 0,5356$$

$$q = 1 - p$$

$$q = 0,4644$$

Diante dos possíveis preços estimados, projetaram-se os fluxos de caixa livres correspondentes, que são apresentados na Tabela 3.

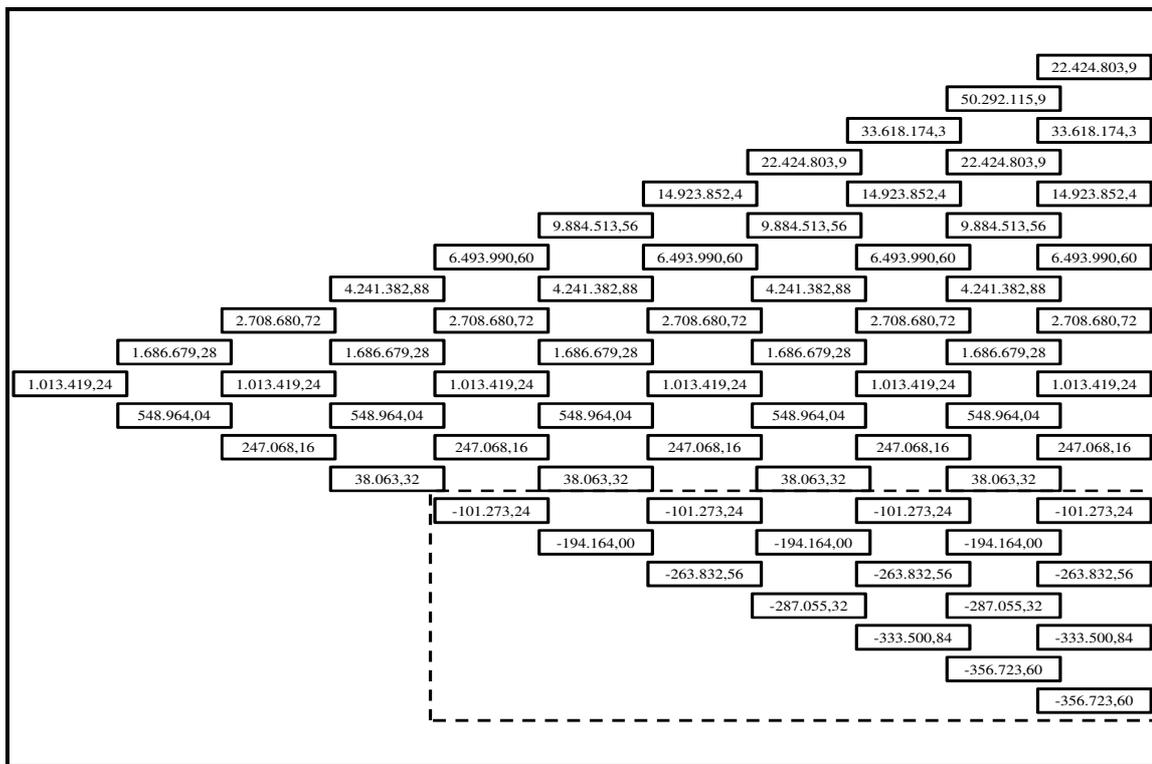
TABELA 3

**Relação preço do CO<sub>2</sub> versus fluxo de caixa livre**

Preços (R\$)	FCL (R\$)	Preços (R\$)	FCL (R\$)
0,01	- 356.723,60	0,89	1.686.679,28
0,02	- 333.500,84	1,33	2.708.680,72
0,04	- 287.055,32	1,99	4.241.382,88
0,05	- 263.832,56	2,96	6.493.990,60
0,08	- 194.164,00	4,42	9.884.513,56
0,12	- 101.273,24	6,59	14.923.852,48
0,18	38.063,32	9,82	22.424.803,96
0,27	247.068,16	14,64	33.618.174,28
0,40	548.964,04	21,82	50.292.115,96
0,60	1.013.419,24	32,53	75.163.691,82

Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 3 apresenta a sobreposição da Figura 1 com os fluxos de caixa livres, a fim de melhorar o processo de tomada de decisão.

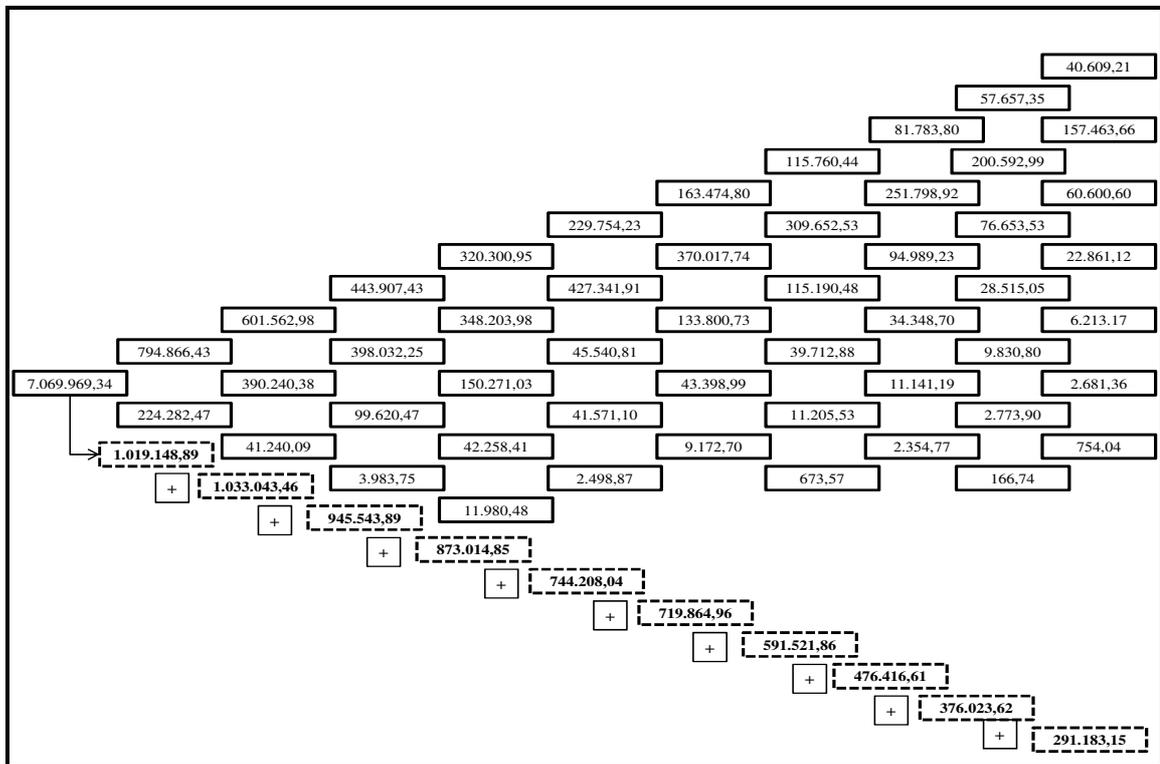


**FIGURA 3** – Estimativa do FCL em cada “nó” de decisão.

Fonte: elaborado pelos autores.

Identifica-se na área demarcada um conjunto de cenários não atraentes, pois os fluxos são negativos. Dessa forma, calculou-se o valor presente de cada célula

considerando-se a probabilidade de ocorrência daquele fluxo de caixa, exceção para as células com fluxo de caixa livre negativos, dada a opção de abandono do projeto. A Figura 4 traz os resultados.



**FIGURA 4** – Valor presente do FCL segundo a volatilidade dos preços.  
Fonte: elaborado pelos autores.

Ressalta-se que as células das Figuras 2, 3 e 4 representam os intervalos de tempo (1 ano) em que a decisão de abandono do projeto poderia ser tomada. Diante disso, o valor informado na Figura 4 é decorrente da probabilidade associada do evento calculado para o valor presente.

A primeira célula da árvore de distribuição é o somatório do valor presente de cada “nó”, cujos valores totais para cada período são apresentados nas células tracejadas.

Para exemplificar o cálculo, toma-se o ano 1, no qual são possíveis dois resultados. Na Figura 2, verifica-se que os valores dos FCLS referentes aos preços R\$ 0,89 e R\$ 0,40, são R\$ 1.686.679,28 e R\$ 548.964,04, respectivamente. Dessa forma, tem-se:

$$794.866,43 = \frac{(1.686.679,28 \cdot 0,53563543)}{(1 + 0,1366)^1}$$
$$224.282,47 = \frac{(548.964,04 \cdot 0,46436457)}{(1 + 0,1366)^1}$$
$$1.019.148,90 = 794.866,43 + 224.282,47$$

A Figura 4 traz o FCD do projeto com a flexibilidade incorporada de abandono do projeto. O montante de R\$ 7.069.969,34 é superior ao valor encontrado na técnica tradicional do FCD, conforme se demonstra na sequência.

VPL com a flexibilidade incorporada:

$$VPL_{flex} = 7.069.969,34 - 4.320.000,00 = 2.749.969,34$$

VPL “tradicional” calculado na Tabela 2 sem a opção de abandono.

$$VPL_{trad} = 5.477.150,55 - 4.320.000,00 = 1.157.150,55$$

A TOR permitiu avaliar um retorno marginal absoluto de R\$ 1.592.828,79, por incluir a incerteza relativa dos preços no método de análise e a decisão gerencial em abandonar o projeto, tendo em vista que o VPL com flexibilidade foi de R\$ 2.749.969,34 (7.069.969,34-4.320.000,00) contra o VPL sem flexibilidade de R\$ 1.157.140,55.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste estudo foi analisar a viabilidade econômica de um projeto de recuperação de CO<sub>2</sub> na indústria alcooleira a partir do processo de fermentação do mosto, de forma que os benefícios a essa indústria pudessem ser valorados não apenas pelo ganho ambiental, mas também pela oportunidade de criação de valor ao se incorporar à sua carteira de negócios um produto de valor comercial, mas que no momento é “desperdiçado” na atmosfera com prejuízo ambiental que se estende à sociedade.

O projeto analisado possui capacidade de recuperação de 2.000 kg/h de CO<sub>2</sub> e pode ser implantado em qualquer usina típica do setor alcooleiro. Não obstante, todas as variáveis que importam em receitas e despesas incrementais nesse projeto foram detalhadas no interesse de entregar ao mesmo tempo a proximidade com a

realidade factual, como também permitir que novos estudos tenham condições de trilhar esse caminho no interesse de aperfeiçoá-lo ou mesmo alterá-lo.

As avaliações econômicas foram pautadas nos dois principais métodos de análise de investimento de projetos reais: o FCD e a TOR. Ambos apresentaram resultados que validam a implantação do projeto sob a ótica econômica, sendo a abordagem das opções reais mais robusta por incorporar a flexibilidade gerencial no curso do tempo do projeto, frente à incerteza do preço do CO<sub>2</sub>.

O modelo de opções utilizado foi o binominal e a projeção do ativo subjacente foi o preço do CO<sub>2</sub> e não o VL sem flexibilidade, conforme propõe a análise tradicional (Copeland & Antikarov, 2001). Essa alternativa atendeu ao interesse de visualizar no curso do tempo as alterações que o preço do CO<sub>2</sub> de forma a orientar o tomador de decisão quanto ao preço de parada ou abandono do projeto, verificando-se que o preço do CO<sub>2</sub> inferior a R\$ 0,12 inviabilizaria o modelo, sugerindo sua suspensão ou mesmo abandono se o viés continuar em queda. Esse procedimento ocorreu sem prejuízo à abordagem contingencial de análise de investimento.

Não obstante, este estudo exploratório ainda carece de aperfeiçoamentos, em especial na identificação ou mesmo criação de uma série histórica que reflita o comportamento do preço do CO<sub>2</sub>, além das variáveis que o influenciam. Ademais, o projeto de recuperação de CO<sub>2</sub> proposto pode ser adaptado para outros setores industriais que geram CO<sub>2</sub> em processos contínuos e de larga escala, em que a engenharia econômica aqui utilizada possa ser replicada parcialmente.

## REFERÊNCIAS

Assaf Neto, A. (2005). *Finanças corporativas e valor*. (2. ed.). São Paulo: Atlas.

Brandão, L. E. T., & Dyer, J. E. (2009). Projetos de opções reais com incertezas correlacionadas. *BASE - Revista de Administração e Contabilidade da Unisinos*, 6(1), 19-26.

Brasil. Decreto n. 4.524 de 17 de dezembro de 2002. (2002) Regulamenta a Contribuição para o PIS/Pasep e a Cofins devidas pelas pessoas jurídicas em geral. *Diário Oficial da União*, Brasília, 18 dez. 2002, 5, Seção Executivo.

Brasil. Lei n. 9.430 de 27 de dezembro de 1996. Dispõe sobre a legislação tributária federal, as contribuições para a seguridade social, o processo administrativo de consulta e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 30 dez. 1996, 28805, Seção 1.

Copeland, T., & Antikarov, V. (2001). *Opções reais: um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos*. Rio de Janeiro: Campus.

Cox, S., Ross, S. & Rubinstein, M. (1979). Option pricing: a simplified approach. *Journal of Financial Economics*, 7(1), 229-264.

Damodaran, A. (2001). *Avaliação de investimentos: ferramentas e técnicas para a determinação do valor de qualquer ativo*. Rio de Janeiro: Qualitymark.

Dias, M. A. (1996). *Investimento sob incerteza em exploração e produção de petróleo*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Dixit, A. K. & Pindyck, R. S. (1994). *Investment under uncertainty*. New Jersey: Princeton University Press.

Jornal da Cana. (2008). Usinas podem ampliar faturamento com venda de CO<sub>2</sub>. *Jornal da Cana*, 46.

Kuronuma, A. M. (2006). *Estudo da análise de preço de negociação de empresas comparativamente à avaliação de empresas por opções reais: estudo de caso de empresas do setor de telecomunicações*. Dissertação de Mestrado em Administração, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, Brasil.

- Magalhães, A. C. M. (2012). *Álcool e açúcar – unidade VII – Fermentação Alcoólica*. Recuperado de: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAQ08AH/alcool-acucar-unidade-vii-fermentacao-alcoolica#>>.
- Myers, S. C. (1987). Finance Theory and Financial Strategy. *Midland Corporate Finance Journal*, 5(1), 6-13.
- Pindyck, R. S. (1993). Investments of Uncertain Costs. *Journal of Financial Economics*, 34(1), 53-76.
- Postali, F. A. S. (2009). Regime fiscal, investimento em petróleo e opções reais. *Economia Aplicada*, 13(2), 207-230.
- Ross, S. A., Westerfield, R. W., & Jaffe, J. F. (2002). *Administração financeira: corporate finance*. (2. ed.). São Paulo: Atlas.
- Santos, D. F. L. (2004) *A teoria das opções reais como instrumento de avaliação na análise de um processo de fusão/incorporação de empresas*. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Gestão, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil.
- Santos, D. F. L. & Zotes, L. P. (2011). Metodologias para valoração de pequenas e médias empresas. *Revista Eletrônica do Mestrado em Administração*, 3(1), 17-26.
- Santos, E. M. & Pamplona, E. O. (2005). Teoria das opções reais: uma atraente opção no processo de análise de investimento. *Revista de Administração da USP*, 40(3), 1-41.
- São Paulo (estado). Lei n. 6.374, de 01 de março de 1989. Dispõe sobre a instituição do Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação – ICMS. *Diário Oficial do Estado de São Paulo*, São Paulo, 2 mar. 1989, 99(40), 1, Seção Executivo 1.

Tecno Project Latina. *Recuperação do CO<sub>2</sub>* (2012). Recuperado em Jan, 02, 2012, de <<http://www.tecnoproject.com.br/recuperacao.htm>>.

Trigeorgis, L. (1993). Real options and interactions with financial flexibility. *Financial Management*, 22(3), 202-224.

Xu, Y., Isom, L. & Hanna, M. A. (2010). Adding value to carbon dioxide from ethanol fermentations. *Bioresource Technology*, 101(10), 3311-3319.