

## **Flexibilidade na utilização de Diesel ou Biodiesel: uma abordagem via Opções Reais**

**Edson Daniel Lopes Gonçalves** <sup>†</sup>  
*FGV – RJ*

**Leonardo Leandro Ferreira** <sup>‡</sup>  
*PETROBRAS*

**RESUMO:** Este trabalho abordará o desenvolvimento do Biodiesel como combustível de fontes renováveis na matriz energética brasileira. Em especial será abordada a flexibilidade de utilização entre o Diesel tradicional de origem petrolífera e o Biodiesel de origem vegetal. Assim, nosso objetivo é avaliar a flexibilidade existente entre o Diesel mineral e o Biodiesel. Para tanto, utilizaremos uma abordagem via opções reais, no qual a escolha do combustível para abastecimento é modelada como uma sequência de opções européias. Estas “Switch Input Real Options” geram valor ao projeto e minimizam riscos associados a falta de oferta de energia, outro problema recorrente em nossa realidade. Por fim, será comentado o potencial de ganho no agregado para um país como o Brasil, com um modal de transportes predominantemente rodoviário e dependente do Diesel.

**Palavras-chave:** investimento sob incerteza, opções reais, flexibilidade, fontes renováveis de energia.

---

Recebido em 12/11/2008; revisado em 28/11/2008; aceito em 02/12/2008.

**Correspondência com autores\*:**

<sup>†</sup> Gerente de pesquisas da RiskControl Serviços e professor dos cursos de graduação em Economia e Direito da FGV - RJ  
Endereço: Praça Pio X, 98, 2º andar, Centro, Rio de Janeiro – RJ – Brasil - CEP 20091 -040.  
e-mail: [edson@fgvmail.br](mailto:edson@fgvmail.br); [edson@riskcontrol.com.br](mailto:edson@riskcontrol.com.br)  
Telefone: (21) 3512 – 2835

<sup>‡</sup> Operador da Mesa de Derivativos de Energia - PETROBRAS  
Endereço: Av. República do Chile, nº 65, 19º andar, sala 1902, centro, Rio de Janeiro – RJ – Brasil.  
CEP 20031-912  
.e-mail: [leonardo.ferreira@petrobras.com.br](mailto:leonardo.ferreira@petrobras.com.br)  
Telefone: (21) 3224-6240

**Nota do Editor:** Este artigo foi aceito por Aleksandro Broedel Lopes.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

A busca por fontes alternativas de energia é uma questão cada vez mais em evidência, haja visto o esgotamento progressivo das reservas de energia primária de fonte mineral, como carvão e petróleo, e o crescente aumento da temperatura global. Neste contexto, o desenvolvimento do Biodiesel como fonte de energia renovável assume papel de destaque, principalmente em relação a matriz energética brasileira, onde o peso do Diesel mineral é consideravelmente elevado quando comparado a outros países.

A esse mercado potencial, aliam-se as inovações tecnológicas associadas ao Biodiesel, capazes de aumentar a eficiência dos setores consumidores de Diesel mineral, em especial o de transportes. Esta maior eficiência técnica se traduz em termos econômicos através de uma opcionalidade; o agente econômico demandante de Diesel pode escolher o combustível que lhe represente menor custo, impactando positivamente o fluxo de caixa esperado de seus projetos e, conseqüentemente, o Valor Presente Líquido dos mesmos.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo a avaliação desta flexibilidade existente entre o Diesel mineral e o Biodiesel. Para tanto, utilizaremos uma abordagem via opções reais, no qual a escolha do combustível para abastecimento é modelada como uma sequência de opções européias. Estas “Switch Input Real Options” geram valor ao projeto e minimizam riscos associados a falta de oferta de energia, outro problema recorrente em nossa realidade.

### 1.2 Diesel Mineral x Biodiesel

A possibilidade de troca entre os combustíveis é suportada tecnicamente, uma vez que ambos apresentam características físico-químicas muito semelhantes, como densidade e poder calorífico. O poder calorífico nos dá a idéia da energia contida no combustível que é liberada no processo de combustão do motor. Demais características de composição química diferem ligeiramente, como o número de cetano, especialmente importante para motores ciclo diesel, onde a combustão é acionada por compressão (ao contrário do motor ciclo Otto, onde existe uma centelha para ignição). Sendo assim, quanto maior o índice de cetano do combustível, maior sua resistência à detonação, o que explica o porquê da melhora da qualidade do diesel convencional quando se adiciona uma proporção de biodiesel. Como o biodiesel possui um número de cetano superior, a mistura eleva o número de cetano do diesel mineral.

As diferenças entre os combustíveis só se acentuam de forma relevante quando incluímos na comparação elementos poluentes. Como podemos observar na tabela abaixo, a emissão de CO<sub>2</sub> (principal gás associado ao efeito estufa) é sempre positiva na utilização do diesel mineral enquanto o biodiesel mantém um balanço equilibrado, dada sua característica de renovabilidade. Quando analisamos o teor de enxofre, que é um elemento altamente poluente e corrosivo, o biodiesel também apresenta grande vantagem em relação ao diesel mineral.

**Tabela I**  
**Comparação entre Diesel e Biodiesel**

	Diesel Mineral	Biodiesel
<b>Composição</b>	Hidrocarbonetos C8 a C22	Ésteres C12 a C18
<b>Fonte</b>	Não-Renovável	Renovável
<b>Matéria Prima</b>	Petróleo	Óleo Vegetal
<b>Viscosidade</b>	3 a 6 cSt	3 a 12 cSt
<b>Destilação</b>	160 a 360° C	240 a 330° C
<b>Aplicação</b>	Motor ciclo diesel	Motor ciclo diesel
<b>Nº Cetano</b>	40 a 50	50 a 70
<b>Poder Calorífico</b>	45 MJ/Kg	39,4 a 41,8 MJ/Kg
<b>Enxofre</b>	0 a 0,2%	0 a 0,0024%
<b>Balanco CO<sub>2</sub></b>	Emissão	Emissão e Seqüestro

Fontes: Petrobrás e Tecpar<sup>1</sup>

Portanto, as características do diesel e do biodiesel são bem semelhantes. Isto confere uma possibilidade real de substituição do diesel pelo biodiesel por parte de detentores de equipamentos que utilizem motor a ciclo diesel. O diesel pode ser utilizado como combustível para a geração de energia elétrica ou para o setor de transportes, com caminhões, automóveis, tratores, trens, etc. Esta possibilidade real de substituição é descrita da seguinte forma pela European Biodiesel Board:

*“In the transport sector, it may be effectively used both when blended with fossil diesel fuel and in pure form. Tests undertaken by motor manufacturers in the European Union on blends with diesel oil up to 5-10%, or at 25-30% and 100% pure have resulted in guarantees for each type of use...”*

Da mesma forma, Silva et alli (2006) descreve experimentos semelhantes realizados no Brasil com um motor ciclo diesel de um trator. Sem alterações no motor, foram realizados ensaios nas seguintes condições: 100% com biodiesel, 100% com diesel e 50% de biodiesel e diesel. O que se observou neste artigo foi que o motor funciona normalmente com diesel ou biodiesel e que existe uma pequena perda de rendimento do motor quando este é alimentado com biodiesel. Em média, a potência do motor ensaiado com biodiesel puro foi 94% da potência do mesmo motor ensaiado com diesel mineral. A título de comparação, a substituição de gasolina por álcool faz o rendimento dos motores flex-fuel a ciclo Otto caírem a 70% , em média, quando se utiliza o álcool como combustível.

Recentemente, fabricantes de motores como a Scania, Massey Ferguson e Valtra autorizaram a utilização do biodiesel tipo B100 em seus motores. A garantia para a utilização do B100 é dada apenas para os padrões de biodiesel EN14214 (europeu) e ASTM D6751 (Americano)

Tal resultado é de extrema importância, pois consideraremos a hipótese de que não há custo de transformação de equipamentos para permitir a flexibilidade na escolha do combustível a ser utilizado. Da mesma forma, será assumida uma perda de rendimento de 94% quando da utilização de um ou outro combustível.

<sup>1</sup> Instituto de Tecnologia do Paraná

### 1.3 Antecedentes na Teoria de Opções Reais

A literatura relacionada a avaliação de projetos via opções nasce do trabalho seminal de Tourinho (1979), em sua tese de doutoramento na Universidade da Califórnia. Ao utilizar pela primeira vez a técnica de apreçamento de opções<sup>2</sup> em um problema real de orçamento de capital (avaliação de reservas de recursos naturais), a tese em questão deu origem a uma ampla variedade de aplicações ao longo dos últimos vinte anos. Essa abordagem foi denominada “Teoria de Opções Reais” e constitui, sob um ponto de vista prático, um dos maiores avanços ocorridos no campo de Finanças Corporativas.

A avaliação de recursos naturais é recuperada por Brennan & Schwartz (1985), que aplicam a modelagem de Opções Reais a reservas florestais.

Dentre as diversas aplicações e classificações de opções reais, a que nos interessa especificamente neste trabalho é a opção real de input (*Switch input Real Options*). Análises sobre este tipo de opção real apareceram cedo na literatura, com destaque para Kulatilaka (1986, 1988), Triantis & Hodder (1990), Fine & Freund (1990) e He & Pindyck (1992). A idéia é que a flexibilidade de escolha entre diferentes tecnologias ou insumos gera valor ao ativo real em questão (seja uma fábrica, uma máquina ou um veículo). Trigeorgis & Kuantilaka (1994) mostram que, na ausência de um custo de troca, o valor de um projeto flexível em insumos pode ser visto como o valor de um projeto rígido mais a soma do valor das opções de escolha em períodos futuros.

## 2. MODELAGEM DO PROBLEMA

### 2.1 Escolha do processo estocástico apropriado

O método utilizado para a valoração da opção real de substituição entre diesel e biodiesel será a avaliação por fluxos de caixa dinâmicos. Estes fluxos de caixa dinâmicos são gerados a partir de Simulações de Monte Carlo. Sendo assim, nesta seção será caracterizado o arcabouço matemático referente ao entendimento de processos estocásticos e o Movimento Browniano Geométrico.

A incerteza é um fator determinante para a existência de flexibilidades e, conseqüentemente, de opções reais. Esta incerteza pode ser modelada através de processos estocásticos. Segundo Dixit & Pindyck (1994) um processo estocástico é definido como uma lei de probabilidade para a evolução de  $x_t$  (uma variável  $x$  no período  $t$ ). Os processos estocásticos podem ser contínuos ou discretos e podem ser estacionários ou não-estacionários.

Um processo estocástico é contínuo quando o período  $t$  em questão é uma variável contínua.

Já a caracterização de um processo estocástico estacionário envolve a noção de que as propriedades estatísticas (características da distribuição de probabilidades) da variável são constantes ao longo do tempo, ao contrário do processo não-estacionário.

O Movimento Browniano<sup>3</sup> é um processo estocástico com as seguintes características: (i) a distribuição de probabilidade para os valores futuros do processo dependem apenas do valor corrente da variável<sup>4</sup>; (ii) incrementos independentes, isto é, a distribuição de probabilidades para a variação do processo ao longo do tempo é independente de qualquer outro intervalo de tempo; (iii) variações do processo em qualquer intervalo de tempo seguem uma distribuição normal, com variância linearmente crescente em relação ao intervalo de tempo.

<sup>2</sup> As técnicas de apreçamento de opções foram disseminadas alguns anos antes com os trabalhos pioneiros de Black & Scholes (1973) e Merton (1973) e também por Cox & Ross (1976).

<sup>3</sup> Também conhecido como Processo de Wiener

<sup>4</sup> Definição de um processo de Markov.

Um processo estocástico que se enquadra nas características acima é o Movimento Browniano Geométrico (MBG). O MBG de uma variável  $x$  pode ser descrito segundo a seguinte equação diferencial:

$$dx = \mu \cdot x \cdot dt + \sigma \cdot x \cdot dz \quad (\text{equação 2.1.1})$$

Onde,

$dx$  = variação no preço da variável aleatória  $x$

$\mu$  = parâmetro de drift (uma constante)

$x$  = valor da variável aleatória

$dt$  = variação no tempo

$\sigma$  = volatilidade

$dz$  = incremento do Processo de Wiener<sup>5</sup>

Pelas características do processo de Wiener observa-se que variações percentuais da variável  $x$  seguem uma distribuição normal. Como as variações percentuais podem ser compreendidas como mudanças no logaritmo natural de  $x$ , tem-se que variações absolutas da variável  $x$  seguem uma distribuição log-normal.

Esta característica é importante, haja visto que as fontes de incerteza da avaliação que se segue são os preços do diesel e do biodiesel. Preços só podem assumir valores não negativos, o que é uma característica da distribuição log-normal. A caracterização destas distribuições serve para a modelagem e a geração de valores por simulação, de forma a construir os fluxos de caixa para a análise de opções reais.

Uma metodologia de simulação muito difundida é a Simulação de Monte Carlo, onde são gerados números aleatórios de uma determinada distribuição de probabilidade e utilizados como parâmetros para a extração de valores de uma distribuição acumulada para uma dada variável aleatória  $x$ .

Além do MBG existem outros processos estocásticos que podem ser utilizados para a modelagem de preços, como os processos de Reversão à Média (MRM) ou processos com saltos. Testes econométricos podem ser utilizados para escolher o processo estocástico que melhor se aplica a uma dada variável aleatória.

Utilizando o teste da raiz unitária de *Dickey-Fuller*, Pindyck & Rubinfeld (1991) não rejeitam a hipótese de MBG para preços nominais de petróleo em uma série de dados de 34 anos. Outras tentativas usando preços reais ou séries mais curtas também não conseguem rejeitar a hipótese do MBG. Dixit & Pindyck (1994) realizaram testes para uma série de preços de petróleo de 117 anos e o MBG foi rejeitado em favor do MRM. Entretanto, Maddala & Kim (1998) questionam se o uso de séries temporais muito longas seria adequado, uma vez que mudanças estruturais podem ter ocorrido no mercado..

Desta forma, ao longo do trabalho os preços do diesel e do biodiesel serão modelados a partir de processos estocásticos como o MBG e será utilizada a metodologia de Simulação de Monte Carlo para gerar séries de preços futuras das duas variáveis de incerteza. Isto possibilitará o cálculo da opção real de substituição entre diesel e biodiesel.

## 2.2 Construção do estudo de caso

Em nosso estudo, as fontes de incerteza são o preço do diesel mineral e o preço do biodiesel. O preço do diesel mineral normalmente flutua de acordo com as flutuações de preço de sua matéria-prima, que é o petróleo. Como derivado de petróleo de grande consumo, o diesel mineral é comercializado em todo o mundo e existem dados de mercado disponíveis.

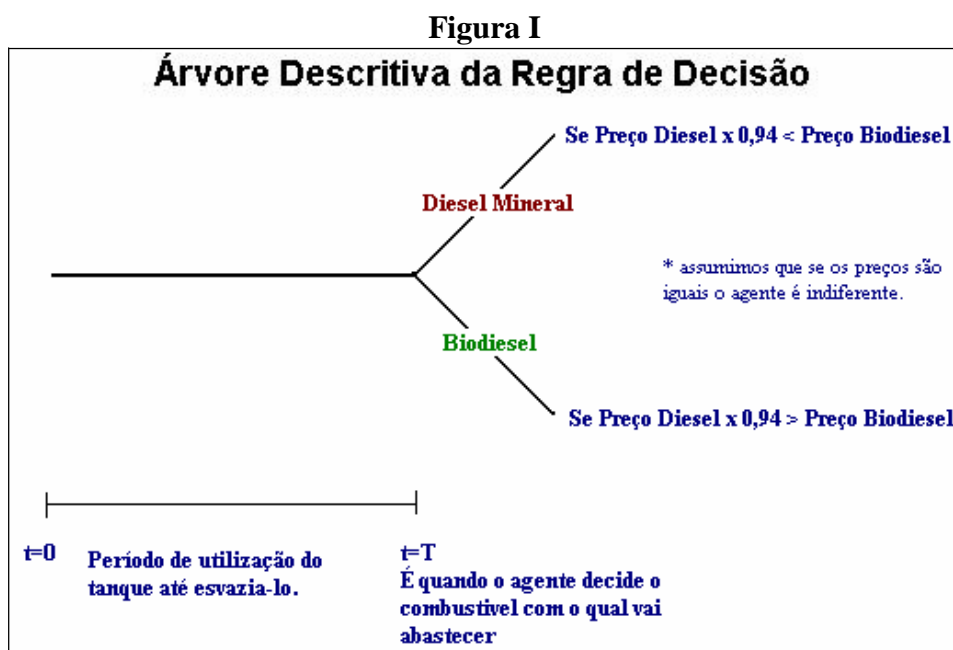
<sup>5</sup> O processo de Wiener ou Movimento Browniano é referente a uma variável aleatória  $z$  que respeita as três características definidas na seção.

A outra fonte de incerteza do problema é o preço do biodiesel. O biodiesel, como mencionado anteriormente, é um combustível que só tem se tornado economicamente viável nos últimos anos por conta da forte alta dos preços do barril de petróleo e motivações ambientais. Em alguns países, como a Alemanha, o biodiesel já é comercializado em postos de abastecimento; entretanto, ainda não existe um histórico de preços como no caso do diesel, a partir do qual se possa mapear a volatilidade.

Para resolver este problema usaremos o histórico de preços da soja<sup>6</sup> como uma proxy<sup>7</sup> para efeito de cálculo de volatilidades e correlação.

Uma vez mapeadas as fontes de incerteza, observamos que a flexibilidade do agente detentor de um equipamento com motor ciclo diesel é a de escolha entre os dois combustíveis. Apresentamos inicialmente o resultado obtido em um teste realizado por Silva et alli (2006) que mostra existir uma pequena diferença de rendimento do motor se alimentado a diesel mineral ou a biodiesel puro (B100). Logo, partiremos do pressuposto de que, em termos de rendimento, o agente considera sob o diferencial de preços dos combustíveis um fator que representa a perda de 94% quando abastecido com B100 em relação à utilização do diesel mineral.

Assim, pode-se caracterizar a regra de decisão com a qual o agente se depara. Em cada abastecimento do tanque de combustível do equipamento, ele deve observar o preço dos dois combustíveis e escolher abastecer com aquele que tiver o menor preço. Abaixo temos a árvore de decisão para cada período no qual o agente tem de abastecer o tanque.



Logo, em cada período o agente se depara com a seguinte regra de decisão para a escolha do combustível:

$$\text{Min}(0,94 \cdot \text{Preço Diesel}_t; \text{Preço Biodiesel}_t)$$

<sup>6</sup> A escolha da soja no problema se deu basicamente por dois motivos. O primeiro é que a soja é uma commodity negociada com bastante liquidez no mercado internacional, o que nos permite de forma mais fácil o acesso a dados como o histórico de preços. Segundo, porque a soja ocupa papel de destaque na agricultura brasileira sendo, pelo menos no curto prazo, uma das principais fontes de óleo vegetal para produção do biodiesel.

<sup>7</sup> Aqui ressaltamos estudo da ABIOVE que demonstrou que 80% dos custos para obtenção do biodiesel se referem ao custo de matéria-prima.

Pela regra de decisão definida acima temos que o agente se depara com uma seqüência de regras de decisão para cada mês em que o preço muda. Logo, o valor gasto para o abastecimento do tanque com flexibilidade de escolha será de:

$$G = \sum_{t=1}^T \text{Min}(0,94 \cdot Pd_t; Pb_t) \cdot n \cdot q \quad (\text{equação 2.2.1})$$

Onde,

$G$  = Gasto com abastecimento

$Pd_t$  = Preço do diesel por litro no período  $t$

$Pb_t$  = Preço do biodiesel por litro no período  $t$

$n$  = número de vezes em que o tanque é abastecido por mês

$q$  = capacidade do tanque em litros

$T$  = tempo de utilização do equipamento com motor ciclo diesel

Para o exercício que segue, o tempo de vida do equipamento será estipulado em 15 anos<sup>8</sup>. As simulações realizadas serão discretizadas em períodos mensais; ou seja, dentro de um determinado mês não haverá variação dos preços, de modo que a decisão que o agente tomar para o primeiro abastecimento no mês vai ser a mesma para o último, até que o preço se altere novamente e uma nova avaliação seja feita. No caso analisado o motor é abastecido 5 vezes por mês e a capacidade do tanque de combustível é de 350 litros<sup>9</sup>.

Portanto, o problema em questão é um caso clássico de opções reais de *input*. A flexibilidade de escolha do combustível a cada mês em que os preços dos combustíveis variam pode ser interpretada como uma seqüência de opções européias. No caso exposto, temos um total de 180 meses, resultando um total de 180 opções de troca entre combustíveis. O valor da opção real de troca entre os combustíveis é dado pela diferença entre o valor do fluxo de caixa rígido (utilizando apenas óleo diesel) e o valor do fluxo de caixa flexível (possibilidade de escolha entre diesel e biodiesel).

### 2.3 Levantamento dos dados

O preço inicial do diesel a ser utilizado no problema será o preço de R\$ 1,87 por litro. Para tal, foi utilizado o preço ao produtor do diesel segundo levantamento feito pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) para a primeira semana de março de 2007, que apresentou valor de R\$ 1,36315, ao qual foi adicionado uma margem hipotética de 10% para as distribuidoras de forma que  $1,36315 \times 1,10 = 1,50$ . A carga de tributos sobre o diesel (CIDE e ICMS)<sup>10</sup> varia em torno de 25%. Sendo assim, temos que o preço na bomba utilizado no trabalho será de R\$ 1,87 por litro.

O preço inicial do biodiesel a ser utilizado no problema será o preço de R\$ 2,41 por litro. Para tal, utilizamos o preço médio observado no 4º leilão de biodiesel realizado pela ANP que saiu ao preço médio de R\$ 1.746,66 por metro cúbico. Isto nos confere um preço de aproximadamente R\$ 1,75 por litro<sup>11</sup> que se adicionada à mesma margem de distribuição de 10% mais 25% de tributos, obtém-se um preço de venda de R\$ 2,41 por litro.

<sup>8</sup> Dados da ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres mostram que a idade média dos veículos de cargas no Brasil é de 16,3 anos.

<sup>9</sup> Capacidade padrão do tanque de combustível de um caminhão Scania. Dados retirados do site: [www.scania.com.br](http://www.scania.com.br)

<sup>10</sup> CIDE: Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico  
ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

<sup>11</sup> Conversão de metros cúbicos para litro:  $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ litros}$ .

O prazo de vencimento da opção real é o prazo de 15 anos estipulado anteriormente, com base na idade média da frota de veículos de carga movidos a ciclo diesel no Brasil.

A taxa de juros livre de risco utilizada no trabalho deve ser uma taxa de juros real com maturidade semelhante à do prazo estipulado para o vencimento da opção real. No caso, será utilizada uma taxa de juros real para o prazo de 15 anos e uma alternativa para obtenção desta taxa é a utilização dos cupons a mercado de títulos públicos indexados à inflação como as NTN-B (indexados ao IPCA). Como referência utilizamos a taxa de juros real obtida na cotação a mercado da NTN-B com vencimento em 15/03/2023 (maturidade de 16 anos como *proxy* da maturidade de 15 anos da opção real). Em 16/03/2007 esta taxa de juros real seria de 7,45% a.a.<sup>12</sup>.

Como a variação dos preços no problema é mensal foi feita a conversão desta taxa de juros anual para uma taxa de juros mensal através do seguinte cálculo:  $(1 + 0,0745)^{1/12} - 1$ . O que nos dá uma taxa de juros real de 0,60% a.m.

A taxa de conveniência (*convenience yield*) para opções reais é análoga à taxa de dividendos observada na valoração de opções financeiras. Combustíveis são bens estocáveis e a taxa de conveniência pode ser interpretada como o conjunto de benefícios (descontados os custos de estocagem) que as unidades estocadas geram. No caso de combustíveis, estes benefícios podem compreender a suavização da produção, prevenção de falta do produto, facilidade de planejar produção e vendas etc

A estimação da taxa de conveniência pode ser feita através dos indicativos existentes em mercados futuros. Partindo da hipótese de ausência de arbitragem, temos que:

$$F_t = P \times e^{(r-\delta)t} \quad (\text{equação 2.3.1})$$

Onde,

$F_t$  = Preço futuro

$P$  = Preço a vista

$r$  = taxa de juros livre de risco

$\delta$  = taxa de conveniência

$t$  = prazo de maturidade do contrato futuro

Logo, na existência de mercados futuros podemos extrair dos mercados os valores das taxas de conveniência. Ao contrário do mercado de petróleo, o mercado de diesel não possui mercado futuro desenvolvido, o que impossibilita o cálculo exato da taxa de conveniência para o combustível. O biodiesel também não possui mercado futuro e utilizar a taxa de conveniência do mercado de soja, por exemplo, não é recomendável metodologicamente. Isto porque pela própria definição de taxa de conveniência não é razoável supor que os custos e benefícios de estocagem do biodiesel e da soja (que é um produto destinado prioritariamente a alimentação) sejam semelhantes, dado que o biodiesel é um combustível, tem características físicas distintas e atende outro mercado. Ao mesmo tempo, é intuitivo que o biodiesel tenha uma taxa de conveniência semelhante a do diesel por atender ao mesmo mercado e por ter custos de armazenamento semelhantes.

Sendo assim, inicialmente será considerada taxa de conveniência nula (benefícios de estocagem se igualam aos custos de estocagem) para o diesel e biodiesel. Entretanto, na seção de análise de sensibilidades, serão realizadas simulações com diferentes taxas de conveniência para avaliar seu impacto sob o valor da opção real de escolha entre abastecer com diesel ou biodiesel.

<sup>12</sup> Informações obtidas referente às taxas médias negociadas no mercado do dia 16/03/2007 e publicadas pela ANDIMA no site [www.andima.com.br](http://www.andima.com.br).



Para o cálculo das volatilidades e correlação foram utilizadas séries históricas de preços mensais, deflacionadas pelo fator acumulado de inflação do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA)<sup>13</sup> até o mês de fevereiro de 2007.

Para o preço do diesel mineral obtemos as séries históricas do preço do diesel no mercado interno divulgados pela ANP.

No caso do biodiesel, como mencionado anteriormente, não existe um histórico de preços do combustível. Desta forma, será utilizada como proxy da volatilidade do biodiesel a volatilidade da soja, dada sua representatividade no mercado de oleaginosas e dadas as características de liquidez no mercado internacional. Da mesma forma a correlação estimada entre diesel e biodiesel será derivada, na verdade, da correlação dos preços do diesel mineral e da soja.

As taxas de variação dos preços mensais do diesel foram calculadas a partir da aproximação dada pela fórmula abaixo, onde o retorno em um dado período  $t$  é dado por:

$$v = \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right) \quad (\text{equação 2.3.2})$$

Para o preço do diesel mineral, através de uma média aritmética simples, foi encontrada uma taxa de variação média mensal de 1,14%. Para o biodiesel, utilizando a série de preços internacionais da soja e convertendo para reais através da taxa de câmbio referente ao fechamento do mês encontramos uma taxa de variação média mensal de 0,16%.

Para o cálculo da volatilidade, tanto da série de preços do diesel mineral como da série de preços do biodiesel<sup>14</sup> usamos a seguinte fórmula de um estimador não-viesado para o desvio padrão de uma amostra:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}{n - 1}} \quad (\text{equação 2.3.3})$$

Sendo assim, encontramos para o preço do diesel mineral uma volatilidade de 3,60% e para o biodiesel uma volatilidade de 7,99%. Para a correlação, encontramos o valor de -0,04.

É importante ressaltar que, por se tratar de um mercado incipiente, estas volatilidades podem sofrer variações significativas, uma vez que o mercado de biodiesel esteja desenvolvido e com um grande número de produtores e consumidores. O que se verifica na maioria dos casos é que esta volatilidade tende a cair quando o mercado se desenvolve. Por conta disso, numa seção posterior do trabalho é realizada uma análise de sensibilidade quanto ao valor da opção real em diferentes cenários de volatilidade.

## 2.4 Solucionando o problema

Logo, com base na equação 2.1.1, as variações nos preços do diesel e do biodiesel seguem o processo abaixo:

$$dP_d = 0,0114 \cdot P_d \cdot dt + 0,036 \cdot P_d \cdot dz \quad (\text{equação 2.4.1})$$

$$dP_b = 0,0016 \cdot P_b \cdot dt + 0,080 \cdot P_b \cdot dz \quad (\text{equação 2.4.2})$$

<sup>13</sup> A utilização do IPCA como índice para deflacionar a série de preços se deve ao fato de ser o índice oficial utilizado pelo Banco Central do Brasil como referência para a evolução dos preços no Brasil.

<sup>14</sup> Utilizando série de preços da soja como proxy.

Para as simulações sobre  $P_d$  e  $P_b$ , derivamos, através do Lema de Itô<sup>15</sup>, uma equação para o processo estocástico de  $P$  tal que:

$$P_1 = P_0 \times e^{\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)\delta t + \sigma \times \varepsilon \times \delta t} \quad (\text{equação 2.4.3})$$

É importante ressaltar que se considerarmos o valor de  $\mu$  como simplesmente o parâmetro de “drift” observado acima, teríamos, na verdade, o Movimento Browniano Geométrico Real. Entretanto, é necessária a simulação do Movimento Browniano Geométrico neutro ao risco para que os fluxos de caixa dinâmicos gerados possam ser descontados à taxa livre de risco.

A medida de probabilidade neutra ao risco é aquela que faz com que o retorno esperado do ativo básico (no caso o diesel e o biodiesel) seja a taxa livre de risco. A incerteza é incorporada nas probabilidades reais de modo que estas sejam transformadas nas novas medidas de probabilidade neutras ao risco, possibilitando, então, o desconto dos valores pela taxa livre de risco. Esta medida de probabilidade neutra ao risco é uma medida Martingale equivalente<sup>16</sup>, o que possibilita o desconto dos valores obtidos na simulação pela taxa livre de risco.

O drift neutro ao risco  $\mu$  da equação 2.4.3 pode ser calculado de duas formas, haja visto as igualdades:

$$\mu = \alpha - \pi = r - \delta \quad (\text{equação 2.4.4})$$

Onde,

$\mu$  = “drift” neutro ao risco

$\alpha$  = “drift” real

$\pi$  = prêmio de risco

$r$  = taxa de juros livre de risco

$\delta$  = taxa de conveniência (*convenience yield*)

Assim, podem ser simuladas trajetórias para os fluxos de caixa dos gastos com combustível do detentor do equipamento ciclo diesel.

O valor presente do fluxo de caixa abastecendo só com diesel é dado por:

$$VP_{\text{rigido}} = \sum_{t=1}^{180} \frac{rb \times E(P_d) \times 350 \times 5}{(1+r)^t} \quad (\text{equação 2.4.5})$$

Sendo que  $P_{d_t}$  segue o processo estocástico definido pela equação 2.4.1

Depois é gerado um fluxo de caixa para o gasto com combustível onde o agente detentor de equipamento ciclo diesel possui a opção de abastecer com diesel ou biodiesel, dependendo do combustível que esteja mais barato.

O valor presente do fluxo de caixa dinâmico gerado pelas simulações com a existência da flexibilidade de utilização de diesel ou biodiesel no equipamento é dado pela seguinte equação:

$$VP_{\text{flexibilidade}} = \sum_{t=1}^{180} \frac{E[\min(rb \times P_d; P_b)] \times 350 \times 5}{(1+r)^t} \quad (\text{equação 2.4.6})$$

Onde  $P_{d_t}$  e  $P_{b_t}$  seguem os processos estocásticos descritos anteriormente.

<sup>15</sup> Ver Hull (2003), página 411.

<sup>16</sup> Um processo estocástico é um martingale sob a medida de probabilidade  $P$  se o seu valor esperado é o seu valor corrente.

O valor da opção real de troca entre os dois combustíveis é dado pela diferença entre os dois fluxos de caixa:

$$V_{opção} = VP_{rígido} - VP_{flexibilidade}$$

Foram geradas 10.000 simulações dos processos correlacionados do preço do diesel e do biodiesel para o cálculo do valor presente dos gastos com combustíveis com base na esperança do preço de cada combustível em cada período de tempo t=1 até t=180.

Os resultados obtidos foram:

$$VP_{rígido} = R\$552.054,40$$

$$VP_{flexível} = R\$436.615,80$$

$$V_{opção} = R\$115.438,60$$

Logo, o valor da opção de possibilidade de substituição entre diesel e biodiesel para o agente consumidor deste combustível é de R\$ 115.438,60 se este agente possuir esta opção durante um período de 15 anos de utilização do equipamento ciclo diesel.

### 3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Diferentemente das opções financeiras, opções reais tem como ativo objeto ativos reais. A estimação de parâmetros para ativos reais é muito mais trabalhosa e menos confiável do que a estimação para ativos financeiros, até mesmo por limitações de dados como a observada no caso do biodiesel (ausência de série histórica de preços).

Dada esta limitação referente à qualidade dos parâmetros utilizados, realizaremos aqui uma análise de sensibilidade. Portanto, esta seção se dedicará a avaliar como varia o valor da opção real dada a variação em alguns parâmetros.

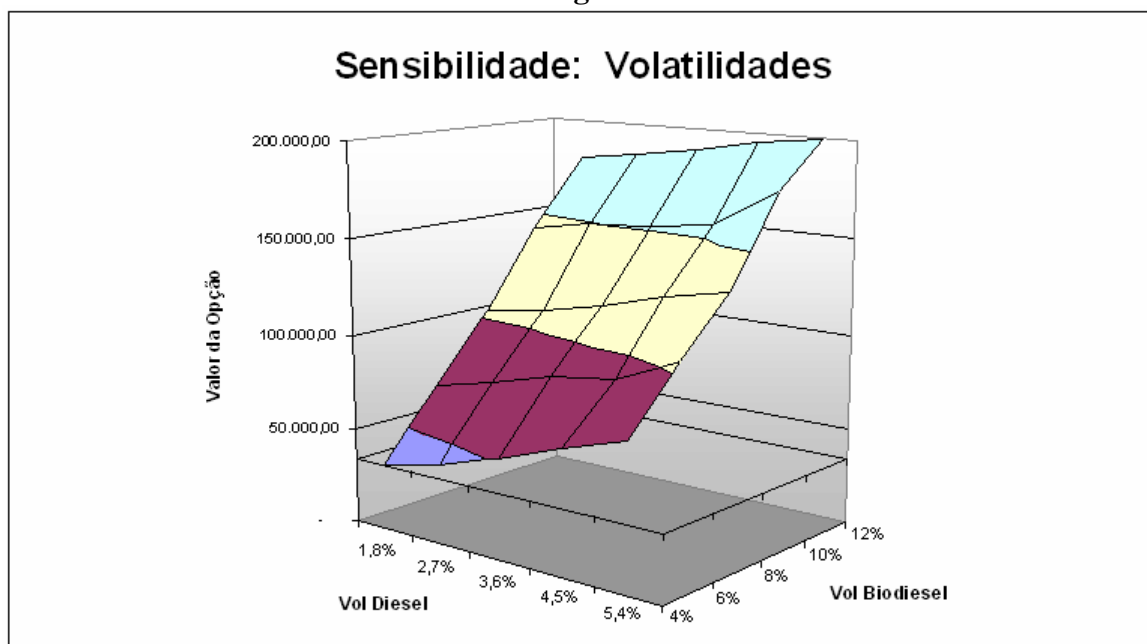
A primeira análise será feita em relação a volatilidade do diesel e do biodiesel. Intuitivamente observamos que quanto maior a volatilidade do ativo objeto, maior o valor da opção. Supondo 25 possíveis combinações de volatilidades para o diesel e o biodiesel temos os seguintes dados para o valor da opção real:

**Tabela II**  
**Sensibilidade à Volatilidade**

		4,0%	6,0%	7,99%	10,0%	12,0%
Volatilidade Diesel	1,8%	34.385,05	68.658,17	103.633,00	143.939,00	179.035,00
	2,7%	41.557,47	76.856,26	108.520,40	149.511,90	184.117,20
	3,6%	52.101,65	85.990,32	115.438,60	151.933,60	188.737,10
	4,5%	63.912,89	89.957,18	124.510,10	156.130,70	195.398,20
	5,4%	75.014,28	104.398,50	131.934,50	176.533,80	200.915,10

Observa-se que o valor da opção real é extremamente sensível à variação nas volatilidades dos dois combustíveis. No cenário de volatilidades mais baixas, o valor da Opção Real de troca entre diesel e biodiesel foi de R\$ 34.385,05 enquanto no cenário de volatilidades mais altas o valor da opção real pode atingir o valor de R\$ 200.915,10. A sensibilidade do valor da opção às alterações das volatilidades pode ser melhor observada através do gráfico abaixo:

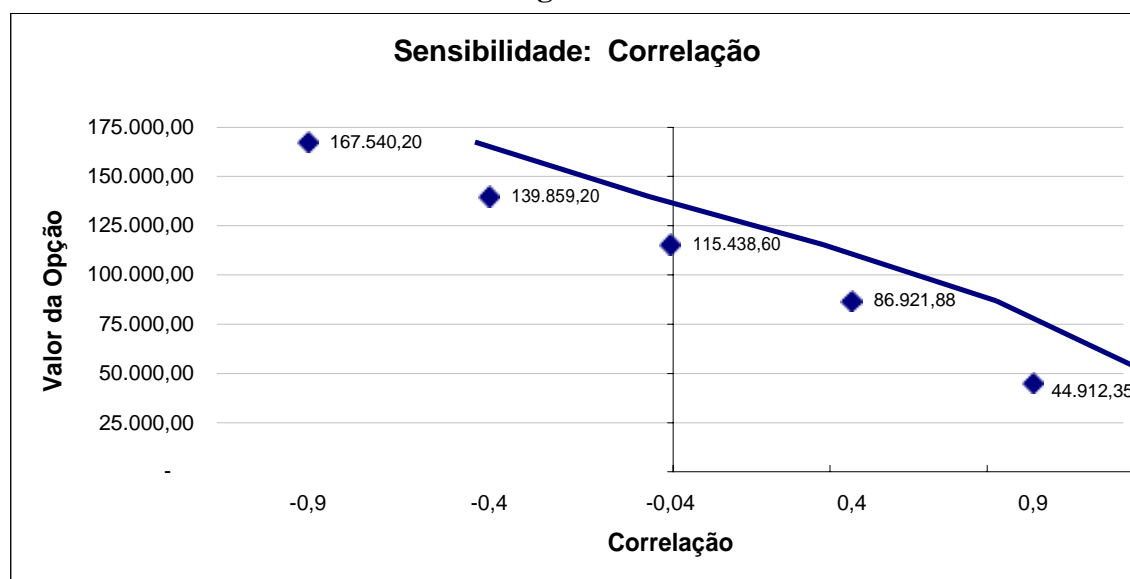
Figura II



Quanto maior a volatilidade dos combustíveis, maior a incerteza ao qual o agente está sujeito no momento do abastecimento. Ou seja, maiores variações nos preços dos combustíveis representam maior risco ao consumidor, que faz com que a flexibilidade de escolha do mais barato tenha mais valor. No limite pode-se entender que quanto mais volátil o preço dos combustíveis, por mais vezes a diferença de preços entre eles será elevada, o que confere uma economia significativa quando da possibilidade de substituição.

A correlação estimada entre o diesel mineral e o biodiesel foi de  $-0,04$ , ou seja, muito próxima de zero. Entretanto, foram efetuadas simulações com variações no valor da correlação entre os dois combustíveis a fim de determinar a sensibilidade no valor da Opção Real de troca. Os resultados estão representados no gráfico abaixo:

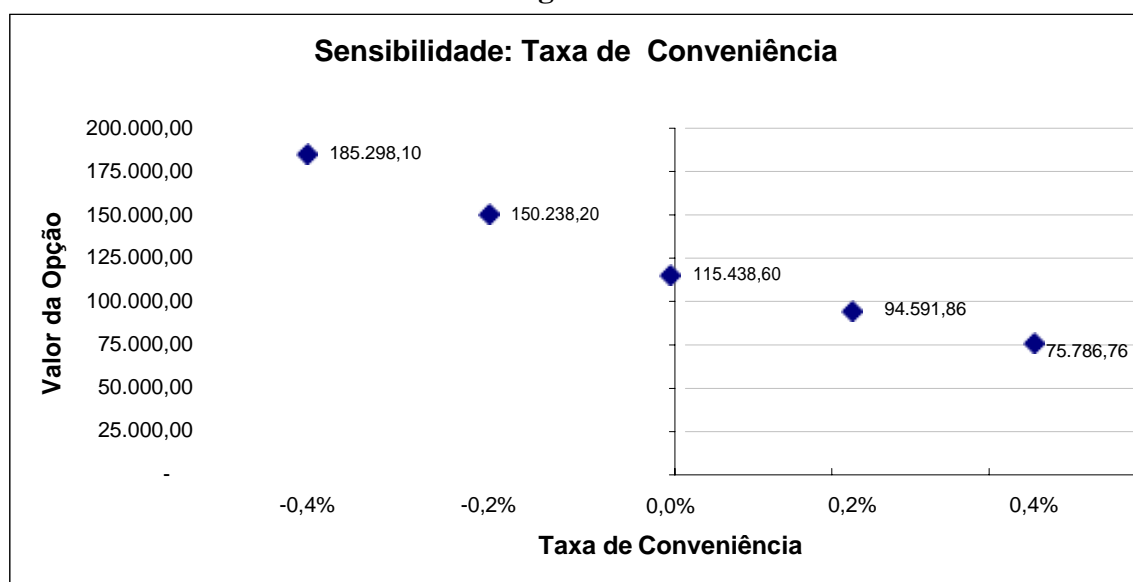
Figura III



O valor da opção analisada neste trabalho é impactada caso a correlação do diesel e do biodiesel varie. A intuição deste resultado é simples. Se os dois processos são negativamente correlacionados (ou seja, o preço do diesel sobe e o preço do biodiesel cai), o consumidor pode ter a possibilidade de trocar de combustível e economizar. Da mesma forma, caso os processos tenham correlação próxima de 1, espera-se que quando o preço do diesel suba o do biodiesel também suba. Isto faz com que a flexibilidade de escolha do combustível mais barato perca valor.

A taxa de conveniência para o diesel e o biodiesel utilizada na solução do problema foi nula, isto é, o benefício e o custo de estocagem se igualavam. Entretanto, na prática, é comum que a taxa de conveniência de ativos reais varie de acordo com fatores de mercado. Desta forma, foram realizadas simulações adicionais que avaliam qual seria o valor da Opção Real de troca caso a taxa de conveniência mudasse. Foram simulados casos onde os custos de estocagem superam os benefícios e situações em que os benefícios de estocagem superam os custos. Os resultados das simulações podem ser observados no gráfico abaixo:

**Figura IV**



Conforme mencionado, a taxa de conveniência pode ser interpretada de forma análoga a taxa de dividendos nos modelos de precificação de opções financeiras. A intuição é que a taxa de conveniência nos dá o valor no tempo do preço do ativo subjacente; logo, para uma maior taxa de conveniência, menor o valor real dos preços dos ativos subjacentes e, conseqüentemente, menor o valor da opção real de troca que é dada pela diferença entre os preços do diesel e do biodiesel.

Portanto, observamos que mesmo sob condições em que os parâmetros são flexibilizados em um “range” de valores bem diversificados, ainda assim a opção real de troca entre diesel e biodiesel tem valor significativo. Isto mostra que com a introdução do biodiesel para comercialização o agente detentor de um equipamento ciclo diesel possui uma flexibilidade valiosa frente as fontes de incerteza com que se depara.

#### 4. CONCLUSÕES

A Teoria de Opções Reais tem se difundido cada vez mais e se torna a cada dia mais relevante nas decisões sob incerteza. Inicialmente aplicada à avaliação de projetos de investimentos, esta pode ser estendida a outras situações como a abordada neste trabalho.

Aqui, a Teoria de Opções Reais foi o arcabouço utilizado para mostrar o valor **criado a um** agente consumidor de diesel quando é introduzida a opção de trocar este insumo pelo biodiesel.

Através da solução do problema e das simulações efetuadas, observa-se que a introdução do biodiesel em grande escala no mercado gera um valor expressivo aos agentes que detêm como ativos reais equipamentos movidos a diesel. Estes equipamentos podem ser veículos automotivos, caminhões, máquinas agrícolas e usinas termoelétricas.

O valor da opção real de troca encontrado no problema pode ser interpretado como um valor gerado a partir da redução de riscos dos agentes demandantes de diesel. Isto porque, uma vez que estes tem a opção de abastecer com outro combustível, naturalmente a variância do seu gasto com abastecimento diminui, dado que ele sempre vai escolher aquele combustível que tem o menor preço.

Mesmo relaxando os parâmetros utilizados no cálculo da opção real de troca para situações nas quais a flexibilidade do agente tem menos valor (volatilidades mais baixas do diesel e biodiesel ou correlação próxima de 1), obteve-se ainda um resultado expressivo para o valor da opção real.

O resultado torna-se ainda mais relevante se considerarmos a representatividade do diesel mineral na matriz energética brasileira e do elevado estoque de ativos reais na economia que utilizam o diesel mineral como insumo. Ao introduzir a comercialização do biodiesel nas redes de distribuição, estes ativos reais na economia brasileira passarão a ter uma opção real embutida. O valor agregado na economia por conta da criação destas opções reais tende a ser elevado. Logo, como no Brasil temos um modal de transportes essencialmente movido a diesel, podemos observar que a redução dos riscos neste setor leva a uma diminuição de riscos agregada para a economia. Uma vez desenvolvido o mercado de biodiesel no Brasil, o valor gerado pela opção real de troca será benéfico para a economia.

Como sugestão para futuras pesquisas, o modelo acima proposto pode ser aplicado para estudos de caso mais específicos, em setores agrícolas para equipamentos como máquinas agrícolas ou ao setor energético com usinas termoelétricas movidas a diesel. Além disso, uma das limitações do modelo apresentado foi a falta de dados de preços históricos para o biodiesel. Em trabalhos futuros poderá ser utilizada uma série de preços de biodiesel para a estimação de parâmetros e reavaliação do modelo. Outra alternativa seria alterar a modelagem dos processos estocásticos para processos como reversão a média ou processos com saltos e avaliar o valor da opção real de troca nestes casos.

## 5. REFERÊNCIAS

- ALVES, M. **Carro Flex-Fuel: Uma Avaliação por Opções Reais**. PUC-Rio Dissertação de Mestrado, 2007
- AMRAM, M., KULATILAKA, N. **Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World**. Boston: Harvard Business School Press, 1999
- BRENNAN, M., SCHWARTZ, **Evaluating Natural Resource Investments**, Journal of Business, 58, 1985
- COPELAND, T., V. ANTIKAROV. **Real Options**. Texere LLC, New York (2001)
- DIAS, M. Notas de aula. (2007) Disponível em <http://www.puc-rio.br/marco.ind/>, acesso em 01/02/2007
- DIAS, M. **Opções Reais Híbridas com aplicações em petróleo**, PUC-Rio, Tese de Doutorado, 2005

- DIXIT, A., R.S.PINDYCK. **Investment under Uncertainty**. Princeton University, Press, Princeton, NJ, 1994
- HE, H., R. Pindyck, **Investments in Flexible Production Capacity**, Journal of Economic Dynamics and Control, 16 (1992), 575-599
- HULL, J.C. **Options, Futures and Other Derivatives**. Prentice Hall. New Jersey, 2006
- KULATILAKA, N., TRIGEORGIS, L. **The General Flexibility to Switch: Real Options Revisited**. International Journal of Finance 6, no. 2, 1994
- KULATILAKA, N. **The Value of Flexibility**, MIT-EL working paper 86-014, 1986
- MADDALA, G.S.; KIM, I-M. Unit Roots, Cointegration, and Structural Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
- PINDYCK, R.S., RUBINFELD, D.L. **Econometric Models and Economic Forecasts**. New York: McGraw-Hill, Inc., third edition, 1991
- SILVA, F et alli. **Avaliação do desempenho do motor de combustão alimentado com Diesel e Biodiesel**, UFLA., 2006
- SCHWARTZ, E., TRIGEORGIS, L. **Real Options and Investment under Uncertainty: Classical Readings and Recent Contributions**. Cambridge (EUA): MIT Press, 2001
- TOURINHO, O.A.F. **The Valuation of Reserves of Natural Resources: An Option Pricing Approach**. Berkeley, 1979.
- TRIANSTIS, A., J. Hodder, **Valuing Flexibility as a Complex Option**, Journal of Finance, 45 (1990).
- TRIGEORGIS, LENOS: **Real Options – Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation**; USA, MIT Press, 1996.