

---

# ANÁLISE DE PROJETOS DE INVESTIMENTO NO SETOR PETROQUÍMICO ATRAVÉS DA TEORIA DE OPÇÕES REAIS

LETICIA DE ALMEIDA COSTA  
e CARLOS PATRÍCIO SAMANEZ

---

## RESUMO

Investimentos na indústria petroquímica são de médio/longo prazo, com diversas possibilidades de flexibilidades gerenciais e operacionais (opções reais), com alto grau de irreversibilidade e sujeitos a condições de incerteza técnica e econômica. O presente trabalho usa opções reais na análise econômica, modelando a incerteza econômica como um processo estocástico e usando técnicas de simulação estocástica que consideram os graus de liberdade gerencial de um projeto. O trabalho tem como objetivo analisar um projeto na indústria de petróleo com tecnologia XTL (Feed-to-liquid) usando a Teoria das Opções Reais (TOR). A tecnologia, designada XTL, está dividida em duas etapas: um processo de gaseificação seguido de um processo GTL (Gas-to-liquid). A gaseificação permite trans-

formar sólidos, biomassas, líquidos e gases em gás de síntese, que será usado como input do GTL. O GTL possibilita transformar o gás de síntese em líquidos de alta qualidade, tais como nafta, diesel, parafinas e lubrificantes. Neste estudo, a TOR é ajustada para avaliar a capacidade de o projeto mudar seus inputs e/ou outputs, selecionando a alternativa que maximize o retorno, de acordo com cada cenário. O investimento ocorre em um ambiente de incerteza, onde os preços (fatores de incerteza) são considerados estocásticos e seguem um movimento de reversão à média ou um movimento de reversão à média com saltos, e a análise é estimada por simulação de Monte Carlo.



método de fluxos de caixa descontados (FCD) é tradicionalmente usado para a tomada de decisões de investimento. Porém, no mundo real, a maioria das decisões apresenta algumas características tais como a irreversibilidade, incerteza sobre os ganhos futuros e o momento de investir. Ou seja, um investimento não pode ser totalmente desfeito sem que haja algum custo perdido. Além disso, como não se pode prever o futuro, há incertezas envolvendo ganhos ou perdas. Por último, existe sempre alguma liberdade de ação no tempo, formando-se assim possibilidades de flexibilidade dentro de um projeto que precisam ser avaliadas. Esses fatores e flexibilidades não são capturados pelos métodos de fluxos de caixa descontados.

Uma opção pode ser definida como o direito, mas não a obrigação, que se tem de fazer uma operação em certas condições pré-definidas. Como esse direito pode trazer vantagens econômicas ao seu possuidor, então existe um valor para tal opção. Um projeto de investimento pode ser visto como um conjunto de opções reais, tais como, opções de adiar o investimento, cancelar novas etapas do investimento, alterar a escala de produção (expandir, contrair, fechar temporariamente, reiniciar), abandonar o projeto pelo valor residual, alterar usos (entradas e saídas) e opções de crescimento (Samanez, 2006). Ao avaliar um projeto pela teoria clássica e tradicional deixa-se de quantificar todo o valor gera-

do por essas opções quando grande parte das informações para a tomada de decisão ainda está por ser revelada.

Segundo Samanez (2006), o acréscimo trazido ao valor de um projeto pelas flexibilidades e opções embutidas é refletido no chamado VPL expandido, que é composto pelo VPL tradicional mais o valor das opções operacionais e estratégicas do projeto. A ideia é adicionar o valor das opções, caso contrário o projeto estará sendo subavaliado. É por isso que se diz que o FCD subestima o valor dos projetos de investimento. De acordo com esse autor, as flexibilidades gerenciais podem ser vistas como um conjunto de opções reais que agregam valor ao projeto. Como a regra tradicional do VPL não considera essas características, nes-

---

**PALAVRAS CHAVE / Análise de Projetos de Investimento / Processos Estocásticos / Setor de Energia / Teoria das Opções Reais /**

Recebido: 26/03/2013. Modificado: 03/02/2014. Aceito: 04/02/2014.

**Leticia de Almeida Costa.** Bacharelado em Ciências Econômicas, M.Sc. e D.Sc. em Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Brasil. Pesquisadora, PUC-Rio, Brasil. Endereço: Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio. Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. e-mail: leciaalmeidacosta@gmail.com

**Carlos Patrício Samanez.** Bacharelado em Engenharia Industrial, Universidad Mayor de San Marcos. Peru. M.Sc. em Engenharia de Produção, PUC-Rio, Brasil. D.Sc. em Administração e Economia Financeira, Fundação Getulio Vargas, Brasil. Professor, PUC-Rio, Brasil. e-mail: cps@puc-rio.br

---

te trabalho será usada a metodologia da Teoria de Opções Reais (TOR) para análise e decisão de investimento sob incertezas com uma aplicação no setor petroquímico, uma vez que essa metodologia considera as flexibilidades operacionais desse tipo de projeto.

O modelo desenvolvido é aplicado na análise e avaliação de um projeto industrial de transformação petroquímica. O projeto usa a tecnologia XTL (*Feed-to-liquid*), que é um processo que possibilita a transformação de gás-natural, carvão mineral, óleos pesados ou biomassa em combustíveis sintéticos com altíssimo grau de pureza e quase sem elementos poluentes. O projeto que será analisado tem flexibilidades de *inputs* (matérias-primas) usados no processo (podem variar) e no *output*, podendo variar o percentual dos produtos finais produzidos (diesel, parafinas, gasolina, lubrificantes etc.).

Um dos aspectos mais importantes na avaliação da TOR é determinar de que forma serão tratadas as incertezas. No presente estudo, os preços são considerados estocásticos seguindo um movimento de reversão à média (MRM) ou movimento de reversão à média com saltos (MRMS), pois se espera que os preços das *commodities* tenham relação no longo prazo, o que faz com que eles retornem para um nível médio. É usada a técnica de simulação de Monte Carlo (SMC) dos processos estocásticos para analisar a viabilidade da planta.

Kulatilaka e Marcus (1992) usaram um exemplo (ainda que de uma forma introdutória) na indústria termoeletrônica, para produzir eletricidade, tanto podendo utilizar gás natural como carvão, ou seja, analisaram um projeto com flexibilidades no *input*. Este problema foi novamente estudado por Kulatilaka (1993, 1995), através de um modelo de programação dinâmica que permite avaliar uma unidade industrial com flexibilidade nos *inputs* energéticos. Na mesma linha, Brekke e Schieldrop (2000) estudaram uma solução analítica, ao contrário da solução numérica de Kulatilaka (1993), para avaliar este tipo de opção. Estes autores adotaram comportamentos estocásticos para os preços de ambos os *inputs*, assumindo que um dos *inputs* tinha preço constante. Kulatilaka e Trigeorgis (1994) mostraram que se não houver custo de troca, o valor de um projeto com flexibilidade no *input* pode ser considerado como o valor do projeto sem flexibilidade mais a soma do valor das opções de escolha em períodos futuros.

Recentemente, Gonçalves e Ferreira (2008) analisaram o valor da opção de possibilidade da substituição de combustível de um equipamento com motor

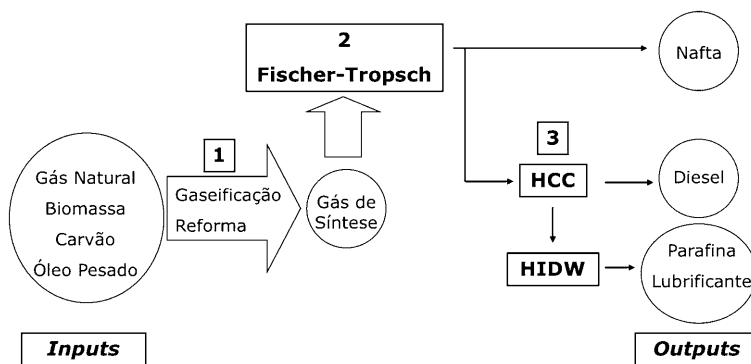


Figura 1. Etapas do processo XTL (*Feed-to-liquid*).

a diesel, sendo possível alternar entre o diesel mineral e o biodiesel. Na mesma linha, Bastian-Pinto *et al.* (2010) valoraram a vantagem do *flex-fuel* com flexibilidade na escolha do combustível (*input*) em relação ao automóvel movido apenas à gasolina, considerando que os preços estocásticos podendo seguir um MRM ou um movimento geométrico browniano. E Brandão *et al.* (2011) mensuraram o valor da flexibilidade existente para o produtor de biodiesel da escolha de *input*, assumindo que os preços dos insumos seguem um MRM.

Já com relação à flexibilidade no *output*, Fine e Freund (1990) desenvolveram um modelo para avaliar uma indústria com flexibilidade no nível produtivo. Esta flexibilidade permite que a empresa responda, no futuro, às alterações no nível da demanda. Triantis e Hodder (1990) construíram um modelo que possuía flexibilidade no nível do produto, ou seja, capacidade de produzir diferentes produtos. Os autores argumentam que, com pequenas alterações, esse modelo poderá ser adaptado para avaliar a flexibilidade ao nível dos *inputs*. Kamrad e Ernst (1995) analisaram a flexibilidade de uma unidade produtiva do tipo multi-produto. Bastian-Pinto *et al.* (2009) avaliaram a opção de uma usina de cana de açúcar alternar a produção entre açúcar e etanol, usando uma modelagem de MRM.

Uma das contribuições do presente estudo é que considera possibilidades de flexibilidade tanto nos *inputs* quanto nos *outputs* da planta industrial com tecnologia XTL, analisando a viabilidade econômica da alternativa que melhor conjugue essas flexibilidades. Além disso, todos os preços das *commodities* (*inputs/outputs*) são considerados estocásticos.

### A Tecnologia XTL (*Feed-to-liquid*)

A tecnologia XTL possibilita a transformação de gás-natural, carvão mineral, óleos pesados ou biomassa, em combustíveis sintéticos com altíssimo grau de pureza e quase sem elementos poluentes. Essa tecnologia é dividida em três etapas:

uma primeira etapa, chamada gaseificação, que é um processo de oxidação parcial controlada de um combustível sólido em que as matérias primas são gaseificadas, sendo obtido o chamado gás-sintético (GS); uma segunda etapa, chamada processo GTL de Fischer-Tropsch (FT), que é a etapa mais importante do processo, onde o GS, que é usado como insumo e convertido em hidrocarbonetos líquidos. A terceira etapa, chamada hidroprocessamento, onde são produzidos derivados tais como nafta, diesel e parafinas.

A terceira fase é responsável pelo *upgrade* dos hidrocarbonetos líquidos que são transformados em derivados de altíssima qualidade (Sousa-Aguiar *et al.*, 2005, 2011) A Figura 1 mostra as etapas do processo XTL:

A tecnologia XTL permite a produção de combustíveis mais limpos e ambientalmente mais seguros. Por exemplo, o diesel XTL (superdiesel) é mais caro do que o diesel obtido a partir do refino de petróleo cru, e tem uma qualidade que o diesel do refino não alcança, mesmo com uma série de processos adicionais, pois é menos poluente. O processo propicia a produção de hidrocarbonetos sintéticos de alta qualidade que podem ser usados diretamente como combustíveis, ou misturados com derivados de petróleo de baixa qualidade trazendo melhorias de acordo com as exigências ambientais e as especificações de desempenho.

### Análise das Séries Históricas de Preços das *Commodities*

A natureza do processo estocástico de evolução dos preços é o ponto central para a derivação dos modelos de apreçamento das opções. No presente estudo, os preços são considerados estocásticos, podendo seguir um movimento de reversão à média (MRM) ou um movimento de reversão à média com saltos (MRMS), pois se espera que os preços das *commodities* tenham relação no longo prazo, o que faz com que eles retornem para um nível médio. Em se tratando de *commodities* como gás natural e diesel, os seus preços no longo prazo tenderão a estar relacionado com o custo marginal de produção. No curto prazo esses preços podem variar aleatoriamente, num prazo mais longo eles tendem a retornar para o nível próximo ao seu custo marginal, este processo é denominado MRM.

O MRM aritmético é o processo de Ornstein-Uhlenbeck, e representado pela Eq. 1 (Dixit e Pindyck, 1994):

$$dx = \eta(\bar{x} - x)dt + \sigma dz \quad (1)$$

onde  $\eta$  velocidade da reversão à média da

variável estocástica,  $\bar{x}$ : nível de equilíbrio ou média de longo prazo da variável estocástica,  $\sigma$ : volatilidade da variável estocástica,  $dz$ : processo padrão de Wiener com distribuição normal:  $dz = \varepsilon\sqrt{dt}$ , sendo  $\varepsilon \sim N(0,1)$  e  $dt$  o incremento de tempo do processo.

O processo de Ornstein-Uhlenbeck (Dixit e Pindyck, 1994) definido na Eq. 1, tem o valor esperado e a variância conhecidos e dados pelas Eqs. 2 e 3, respectivamente:

$$E[x_t] = \bar{x} + (x_0 - \bar{x})e^{-\eta t} \quad (2)$$

$$\text{Var}[x_t - \bar{x}] = \frac{\sigma^2}{2\eta} (1 - e^{-2\eta t}) \quad (3)$$

Segundo Dixit e Pindyck (1994), para determinar os valores dos parâmetros para o MRM, escreve-se o processo da Eq. 2 em termos do intervalo de tempo discreto  $\Delta t$ :

$$\begin{aligned} x_t &= \bar{x} + (x_{t-1} - \bar{x})e^{-\eta\Delta t} \\ x_t &= \bar{x}(1 - e^{-\eta\Delta t}) + e^{-\eta\Delta t}x_{t-1} \\ x_t - x_{t-1} &= \underbrace{\bar{x}(1 - e^{-\eta\Delta t})}_a + \underbrace{(e^{-\eta\Delta t} - 1)}_{(b-1)}x_{t-1} \end{aligned}$$

Considerando o erro da série,

$$x_t - x_{t-1} = a + (b-1)x_{t-1} + \varepsilon_t$$

Considerando como  $P_t$  o preço da commodity no instante  $t$  e  $x_t = \ln(P_t)$  pode-se calcular os logaritmos das séries de preços na Eq. 4:

$$\ln(P_t) - \ln(P_{t-1}) = a + (b-1)\ln(P_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (4)$$

onde  $\varepsilon_t$  segue uma distribuição normal padrão com média zero e variância  $\sigma^2/N$ .

Obtendo-se o valor estimado dos coeficientes  $a$  e  $b$  a partir da Eq. 4 e usando a volatilidade calculada através da série histórica de preços das commodities, as Eqs. 5, 6 e 7 são utilizadas para calcular os parâmetros  $\eta$ ,  $\sigma$  e  $\bar{P}$  do MRM (Dixit e Pindyck, 1994; Dias, 2011):

$$\eta = -\ln(b)/N \quad (5)$$

$$\sigma = \sigma_e \sqrt{N} \sqrt{\frac{2\ln(b)}{b^2 - 1}} \quad (6)$$

$$\bar{P} = \exp\left[\frac{(a + 0,5\sigma^2/N)}{(1-b)}\right] \quad (7)$$

onde o  $N$  usado foi de dias úteis no ano, 252 dias.

Aplicando essas equações no programa computacional MATLAB® e, com base nas séries históricas dos preços dos *inputs* e *outputs* a nível de preços do mercado internacional, calcularam-se os parâmetros do MRM necessários para a estimação dos preços futuros, apresentados na Tabela I.

Por outro lado, de acordo com Dixit e Pindyck (1994), o modo de se modelar os

TABELA I  
VALORES DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O MRM

	Velocidade de reversão à média	Volatilidade	Média de longo prazo
Gás natural	32,97%	40,75%	4,77 US\$/MMBtu
Óleo pesado	21,63%	38,17%	26,47 US\$/bbl
Nafta	51,36%	36,85%	82,51 US\$/gal
Diesel	20,21%	25,18%	470,57 US\$/ton
Parafina	94,48%	43,80%	1,00 US\$/L
Lubrificante	47,05%	25,00%	1,68 US\$/L

preços dessas *commodities* atribuindo, em seu processo de estimação, saltos discretos, deve ser mais realista. As possíveis causas de um salto aleatório podem ser, por exemplo, a entrada de um novo competidor no mercado de poucas empresas, fazendo com que os preços caiam repentinamente ou conflito armado entre nações detentoras de importantes reservas de petróleo. Pode-se dizer que informações de mercado consideradas 'normais' causam um processo de reversão à média contínuo nos preços. Por outro lado, informações consideradas 'anormais' provocam saltos (discretos) de tamanho aleatório.

Para modelar o processo de reversão à média com saltos (MRMS), utiliza-se o modelo de Ornstein-Uhlenbeck apresentado anteriormente. A partir da Eq. 1, adiciona-se o termo dos saltos aleatórios, obtendo-se a Eq. 8 (Dixit e Pindyck, 1994; Dias, 2011):

$$dx = \eta(\bar{x} - x)dt + \sigma dz + dq \quad (8)$$

O termo  $dq$  adicionado é modelado como um processo de Poisson, de tamanho aleatório e independente do incremento  $dz$ .

Essa Eq. 8 mostra que há uma força de reversão  $\eta$  sobre a variável  $x$ , que é  $\ln(P)$ , trazendo-a ao equilíbrio de longo prazo do preço e os saltos são, na maioria do tempo, iguais a zero. Quando ocorrem saltos de tamanho aleatório  $\phi$  e taxa de ocorrência  $\lambda$ , ou seja, a frequência com que um evento pode ocorrer durante um intervalo de tempo infinitesimal  $dt$ . A probabilidade de ocorrer um evento é dada por  $\lambda dt$  e a probabilidade deste evento não ocorrer será  $(1 - \lambda dt)$ . Assim, a distribuição de probabilidade do termo  $dq$  é:

$dq = 0$ , com probabilidade  $(1 - \lambda dt)$  e  $dq = \phi$ , com probabilidade  $\lambda dt$

Para facilitar o entendimento e manipulação matemática, é permiti-

da a ocorrência de um salto positivo ou negativo. Dado que um salto ocorreu, a probabilidade de ocorrência é 50% de chance de ser para cima ou para baixo. Considera-se que a distribuição dos saltos são duas normais truncadas em zero, com valores esperados de  $\ln 2 = 0,693$  e  $\ln 0,5 = -0,693$ , significando que se ocorrer um salto positivo, o valor irá aumentar 100% e em caso de salto negativo, irá reduzir em 50%.

Os parâmetros velocidade de reversão à média, volatilidade e média de longo prazo são os mesmos das Eqs. 5, 6 e 7, respectivamente, apresentados na Tabela I. Segundo Dias (2011), nos processos estocásticos ligados ao setor petroquímico, os saltos tendem a ser grandes e raros, por isso supõe-se que a frequência dos saltos seja  $\lambda = 0,25$  por ano. Isso equivale a  $\lambda = 0,0625$  por trimestre.

### Simulações dos Processos dos Preços das Commodities

A simulação de Monte Carlo (SMC) foi feita em um contexto de neutralidade ao risco. Essa é a metodologia mais utilizada para valorar opções e derivativos, enquanto que a simulação real é mais útil para casos de planejamento e para análise de risco. A simulação dos preços das commodities foi efetuada com base na Eq. 9 (Dixit e Pindyck, 1994; Dias, 2011):

$$\begin{aligned} P(t) = \exp \left\{ [\ln[P(t-1)] \exp[-\eta\Delta t]] + \left[ \ln(\bar{P}) - \frac{\mu - r}{\eta} \right] (1 - \exp[-\eta\Delta t]) \right\} \\ - \left\{ (1 - \exp[-2\eta T]) \frac{\sigma^2}{4\eta} + \sigma \sqrt{\frac{1 - \exp[-2\eta\Delta t]}{2\eta}} N(0,1) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

onde  $\eta$ : velocidade da reversão à média,  $\sigma$ : volatilidade dos preços,  $\bar{P}$ : média de longo prazo dos preços (valor de equilíbrio),  $\Delta t$ : intervalo de tempo,  $\mu$ : *drift* ou a tendência instantânea do processo, e  $N(0,1)$ : distribuição normal padrão (0,1).

Já as simulações dos preços para o MRMS foram feitas baseadas na Eq. 10, que apresenta algumas poucas mudanças com relação à Eq. 9 (Dixit e Pindyck, 1994; Dias, 2011):

$$\begin{aligned} P(t) = \exp \left\{ [\ln[P(t-1)] \exp[-\eta\Delta t]] + \left[ \ln(\bar{P}) - \frac{\mu - r}{\eta} \right] (1 - \exp[-\eta\Delta t]) \right\} + \text{saltos} \\ - \left\{ (1 - \exp[-2\eta T]) \frac{(\sigma^2 + \lambda E[\phi^2])}{4\eta} + \sigma \sqrt{\frac{1 - \exp[-2\eta\Delta t]}{2\eta}} N(0,1) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

A equação para efetuar a simulação real é muito parecida com a Eq. 10, bastaria suprimir o termo  $\left(\frac{\mu-r}{\eta}\right)$ , onde  $r$  representa a taxa livre de risco. Esse termo é um prêmio de risco normalizado que penaliza  $\ln(\bar{P})$ .

As simulações procuram reproduzir um cenário real de tomada de decisões através de um modelo matemático que busca capturar as características funcionais mais importantes do projeto, à medida que os eventos aleatórios ocorrem. Considerando como se as opções (de *input* e *output*) apresentadas pelo projeto em cada etapa de sua vida útil fossem iguais a uma sequência de opções europeias e, usando-se a SMC, escolhe-se a sequência que tenha o maior *payoff*. As simulações tanto dos preços dos *inputs* quanto dos *outputs* com base no processo neutro ao risco foram elaboradas no software @Risk® com 10000 iterações.

A SMC aplicada neste trabalho segue os seguintes passos: a) modelagem do projeto através de uma série de equações matemáticas e identidades para todas as variáveis de entrada/saída relevantes; b) especificação das distribuições de probabilidade neutras ao risco para cada uma das variáveis estocásticas, com base em um histórico de dados (distribuição de probabilidade normal padrão acumulativa com média e variância específico para cada variável); c) uma amostra aleatória é então obtida (usando um gerador de números aleatórios) a partir da distribuição de probabilidades dos dados de entrada; e d) o processo é repetido diversas vezes, obtendo-se cada vez um determinado *payoff*. Ao final, calcula-se a média dos *payoffs* para se obter uma estimativa para o contexto neutro ao risco, e desconta-se essa média à taxa livre de risco para se obter o VPL do projeto.

## Avaliação de um Projeto XTL

### Alocação do investimento - CAPEX

Com base em Al-Saadoon (2007), o investimento inicial (*capital expenditures* - CAPEX) para uma planta GTL com capacidade de produção de 35000 barris por dia (bpd) que tenha o GN (gás-natural) como *input* é de US\$25000/bbl. Para plantas com a mesma capacidade, mas com *inputs* sólidos ou líquidos (óleo pesado, carvão mineral ou biomassa) o CAPEX é de US\$29000/bpd.

### Custos operacionais - OPEX

Mesmo tendo uma parte aleatória, no presente estudo os custos operacionais (OPEX - *operating expenditures*) são considerados determinísticos (exceto custo com matéria-prima) e iguais a um percentual fixo (2%) do CAPEX.

Além dos custos operacionais há também os custos variáveis com matéria-prima que dependem dos preços das *commodities* e dos rendimentos do processo da planta. Nesse estudo de caso são considerados como *inputs* o GN (gás-natural) e o petróleo pesado (OP), sendo que os preços dessas *commodities* foram considerados estocásticos e estimados com base MRM ou MRMS.

### Receitas da planta XTL

Uma planta XTL pode produzir, dependendo da tecnologia adotada, todo tipo de hidrocarbonetos líquidos sintéticos, tais como: diesel sintético (chamado superdiesel), as chamadas especialidades (ceras especiais, solventes, fluidos para perfuração de petróleo e produtos para usos alimentares) e a nafta petroquímica. São considerados como produtos (*outputs*) o diesel sintético, a nafta, os lubrificantes e as parafinas, cujos preços serão considerados variáveis estocásticas que seguem um MRM ou MRMS.

### Rotas possíveis de produção de produtos finais

Nos processos, há restrições técnicas que devem ser consideradas, de acordo com as frações mássicas de um produto final, aos átomos de carbono e aos fatores de probabilidade de crescimento das cadeias de hidrocarbonetos, não se pode concentrar 100% da produção em um único tipo de *output*. As restrições são dadas pela relação petroquímica conhecida como equação de Anderson-Schulz-Flory, que determina a relação entre a fração dos percentuais de produção que podem ser destinados a cada um dos produtos finais do processo, para um determinado valor dos fatores de probabilidade de crescimento das cadeias ( $\alpha$ ). A fórmula é mostrada na Eq. 11 (Sousa-Aguiar *et al.*, 2005, 2011).

$$W_n = n(1-\alpha)^2\alpha^{(n-1)} \quad (11)$$

onde  $W_n$ : fração mássica de um produto com  $n$  átomos de carbono,  $\alpha$ : fator de probabilidade de crescimento da cadeia, e  $n$ : número de carbonos.

Neste estudo, que pretende mostrar unicamente metodologias de avaliação econômica de plantas XTL, por simplicidade de análise foram determinadas rotas teóricas possíveis (rotas A, B, C e D). Cada rota define as frações dos produtos finais que podem ser produzidos. Essas rotas são mostradas na Tabela II, e foram consideradas no estudo de caso.

Por exemplo, se for adotado a rota A, os *outputs* da produção seriam 9% de GLP, 23% de nafta, 68% de diesel. Ressalta-se que o GLP não está sen-

TABELA II  
ROTAS DE PRODUÇÃO COM AS  
FRAÇÕES DE OUTPUTS

Rotas	GLP	Nafta	Diesel	Parafinas
A	9%	23%	68%	0%
B	9%	23%	63%	5%
C	4%	13%	83%	0%
D	4%	13%	77%	6%

do considerado um *output* que gere receita ao projeto.

### Rendimentos dos inputs

Com base em informações de especialistas da área de petróleo, o rendimento para a produção de GS (gás sintético), que seria a primeira fase do processo, utilizando como *input* o GN (gás natural), é de ~3450m<sup>3</sup> GS/ton. de GN. Caso o *input* seja o óleo pesado (OP), o rendimento é de ~2600m<sup>3</sup> GS/ton. de OP.

Já o rendimento do GS por barril produzido é de 700m<sup>3</sup>/bbl. Considera-se que o rendimento de GS seja igual para qualquer barril de produto final.

### Impostos e taxas

Os impostos e taxas incidentes, necessárias à análise de viabilidade econômica do empreendimento tratado neste trabalho, seguem a legislação vigente no país. Foi adotada uma alíquota de imposto de renda e contribuição social sobre o lucro de 34%.

### O fluxo de caixa e a simulação das alternativas

A metodologia desenvolvida foi aplicada a um estudo de caso que tem as seguintes características: a) uma produção de 35000bpd; b) *inputs*: GN e OP; c) *outputs*: nafta, diesel, parafina e lubrificantes; d) horizonte no tempo: três anos de investimento e 20 anos de produção; e) investimento dissolvido de forma uniforme dentro dos três primeiros anos; f) fluxos de caixa com periodicidade trimestral; g) processo estocástico para todos os preços dos *inputs/outputs*: MRM ou MRMS; h) limites das proporções do *output* estão sendo respeitados baseados na distribuição de ASF; i) rendimentos dos inputs estão sendo respeitados; j) alíquota de imposto de renda e contribuição social sobre o lucro: IR= 34% e demais impostos vigentes; k) taxa de desconto livre de risco:  $r= 5\%$  aa; l) taxa ajustada ao risco:  $\mu= 10\%$ aa; m) fator operacional de 96%; e n) depreciação linear e uniforme.

A partir dos dados de custos, receitas e demais informações apresentadas, elaborou-se um fluxo de caixa do projeto considerando-se a Eq. 12 para cada trimestre:

$$FC_t = [Receita_t - (Cof_t + Cv_t + Dep_t)](1-IR) + Dep_t \quad (12)$$

onde  $FC_t$ : fluxo de caixa no trimestre  $t$ ;  $Dep_t$ : depreciação no trimestre  $t$ ;  $IR$ : alíquota de imposto de renda;  $Cv_t$ : custo variável no trimestre  $t$ =

$$\sum_{j=1}^2 \text{preço}_j \left[ \frac{90 \text{ dias} \left( \frac{\text{bpd}_{\text{número}}}{\text{rendimento}_{\text{GS}}} \right) \text{rendimento}_{\text{GS}}}{\text{rendimento}_j} \right]$$

para  $j$ = GN e OP; e  $Receita_t$ : receita no trimestre  $t$ =

$$\sum_{i=1}^4 (\text{preço}_i) (\% \text{produção}_i) (\text{produção}_{\text{total}})$$

para  $i$ = nafta, diesel, parafinas e lubrificantes.

Os fluxos de caixa, dessa forma calculados, serviram de base para a elaboração de uma análise econômica de uma planta XTL, levando-se em consideração vários detalhes, tais como, receitas, custos variáveis, preços estocásticos e a possibilidade de se ter dois *inputs* (GN e OP). A modelagem também considera a possibilidade de poder se variar as proporções dos *outputs* (diversas rotas de produção) de acordo com os fatores técnicos e de mercado.

Efetuada a simulação estocástica dos preços dos *inputs* e dos *outputs* com base no MRM e no MRMS neutro ao risco, foram efetuadas 10000 iterações (simulações). Calcularam-se diversos VPLs para cada uma das possibilidades e, em cada trimestre durante a vida útil do projeto, foi utilizado o *mix (input-output)* que maximiza o retorno do projeto. Ou seja, analisaram-se vários cenários futuros possíveis e, com base na TOR, adicionou-se flexibilidade dentro do plano estratégico a fim de maximizar o *payoff* a cada trimestre.

O valor médio dos VPLs para cada uma das alternativas consideradas se encontra na Tabela III. As alternativas mostradas na tabela seguem as quatro rotas consideradas (A, B, C e D), com GN como *input* (*input* GN) e com *input* flexível (*input* FLEX). A Tabela III apresenta, também, os valores dos VPLs para os casos em que a rota é flexível e o *input* é unicamente o GN (rota FLEX com *input* GN) e quando a rota é flexível e o *input* é também flexível (rota FLEX com *input* FLEX). Todas essas alternativas foram calculadas para os dois processos estocásticos, MRM e MRMS.

#### Análise dos resultados

Analisando a Tabela III pode-se observar que tanto para o MRM como para o MRMS, em todas as rotas possíveis (A, B, C e D) as alternativas de planta que não têm flexibilidade no *input* (usam somente GN como *input* fixo) têm VPLs negativos e por

isso não são alternativas viáveis economicamente. A rota D com GN como *input* é a que apresenta melhor VPL, por isso, essa será a planta usada como base para comparação com as plantas com flexibilidade.

No caso das plantas com flexibilidade de *input* (com *input* FLEX), onde se pode-se utilizar GN ou OP como matéria-prima do processo, os VPLs são positivos, exceto para a planta que segue a rota A que tem VPL negativo para ambos os processos estocásticos. A alternativa que apresenta o maior VPL é a que segue a rota D. Nesse caso, a opção de se ter flexibilidade no *input* (GN ou OP) tem valor.

A planta com flexibilidade de *output* que temo GN como *input* fixo (rota FLEX com *input* GN), é uma alternativa ruim, pois apresenta VPL negativo. Não há valor adicional na possibilidade de mudança nos percentuais dos diversos *outputs* a cada trimestre, quando o *input* é fixo (GN). Neste caso, a opção de troca de *output* não tem valor.

O valor do VPL da alternativa que tem flexibilidade tanto nos *inputs* como nos *outputs* (rota FLEX com *input* FLEX) é maior que os VPLs das alternativas que tenham somente opção de troca dos *inputs* em algumas rotas.

Pela análise conclui-se que a planta que segue a rota D e tem *input* flexível representa a melhor alternativa. Para essa planta, a opção de poder usar diferentes *inputs* (GN ou OP) vale US\$1,1×10<sup>9</sup> no MRM e US\$2,2×10<sup>9</sup> no MRMS. Ou seja, poderia se gastar até esses valores como CAPEX para ainda ser vantajoso montar uma planta com flexibilidade de *inputs*, comparada com plantas sem flexibilidade nos *inputs*.

Numa comparação entre os resultados do MRM com os do MRMS, ambos seguem a mesma intuição quanto a melhor planta a ser desenvolvida, porém os VPLs no MRMS são mais sensíveis. Isso

TABELA III  
VPL EXPANDIDO DAS  
ALTERNATIVAS

Plantas	VPL_MMUS\$	
	MRM	MRMS
Rota A c/ GN_input	-1565	-2381
Rota B c/ GN_input	-917	-1760
Rota C c/ GN_input	-1130	-1968
Rota D c/ GN_input	-364	-1222
Rota A c/ input_FLEX	-370	-33
Rota B c/ input_FLEX	230	534
Rota C c/ input_FLEX	31	334
Rota D c/ input_FLEX	744	1048
Rota FLEX c/ GN_input	-920	-1709
Rota FLEX c/ input_FLEX	236	528

quer dizer que nos casos em que as plantas tiveram VPLs negativos, os valores no MRMS foram piores do que no MRM. E no caso contrário, quando os valores eram positivos, no MRMS os resultados foram melhores. Sendo assim, o MRM é mais conservador e por isso melhor para ser utilizado nessa avaliação econômica do projeto.

#### Conclusões

Um dos aspectos primordiais no contexto da TOR é determinar como são tratadas as incertezas de um projeto. No presente estudo, os preços (fatores de incertezas) foram considerados estocásticos (segundo um MRM ou MRMS), pois se espera que os preços das *commodities* tenham relação no longo prazo, acarretando que eles retornem para um nível médio histórico.

Avaliando as plantas com capacidade de produção de 35000bpd que não têm flexibilidade nos *inputs* nem nos *outputs*, os resultados mostram que todas as alternativas são economicamente inviáveis (VPLs negativos), já quando se inclui flexibilidade nos *inputs* os VPLs passam a ser positivos, e a opção de troca de *input* tem valor. Por outro lado, a planta com flexibilidade nos *outputs* que tem GN como *input* não é viável economicamente e a opção de *output* não tem valor. Assim, a planta totalmente flexível, apesar de apresentar valor positivo no VPL, não é a melhor alternativa de projeto.

Observando o projeto que apresenta o maior VPL, ou seja, a planta com rota D e flexibilidade de *input*, o valor da opção é o quanto se estaria disposto a gastar para construir uma planta com flexibilidade de *input* em comparação aos custos efetivos de um projeto que utilize somente o GN. Esse projeto é a melhor escolha frente aos demais casos, tanto para o processo de MRM como para o processo de MRMS.

Os VPLs no MRMS foram mais sensíveis e no MRM mais conservadores. Para uma avaliação econômica de um projeto desse porte é melhor optar por uma análise mais conservadora, sendo o MRM a melhor opção para estimação dos preços.

O presente estudo apresenta uma síntese, resumida e didaticamente simplificada, da metodologia de avaliação econômica desenvolvida para avaliar uma planta de tecnologia XTL com flexibilidades operacionais e estratégicas. Os modelos matemáticos e os métodos numéricos usados são relativamente complexos, mas, em contrapartida, os resultados obtidos con-

seguem capturar o valor das flexibilidades embutidas nos projetos, o que não é possível com os métodos tradicionais que simplesmente descontam a taxas ajustadas ao risco e os fluxos de caixa esperados do projeto.

No atual contexto brasileiro, em que o país produz basicamente petróleo pesado e o parque de refino está estruturado para processar óleos leves, a tecnologia XTL passou a ter grande importância estratégica. Os produtos produzidos são derivados de altíssima qualidade, mais limpos e mais seguros ambientalmente.

#### REFERÊNCIAS

- Al-Saadoon FT (2007) Economics of GTL plants. *Proj. Facil. Constr.* 2: 1-5.
- Bastian-Pinto C, Brandão LET, Hahn W (2009) Flexibility as a source of value in the production of alternative fuels: The ethanol case. *Energy Econ.* 31: 411-422.
- Bastian-Pinto C, Brandão LET, Alves ML (2010). Valuing the switching flexibility of the ethanol-gas flex fuel car. *Ann. Oper. Res.* 176: 333-348.
- Brandão LET, Penedo GM, Bastian-Pinto C (2011) The value of switching inputs in a biodiesel production plant. *Eur. J. Finance* 2011: 1-15.
- Brekke KA, Schieldrop B (2000) Investment in flexible technologies under uncertainty. Em Brennan MJ, Trigeorgis L (Eds.) *Project Flexibility, Agency, and Competition: New Developments in the Theory of Real Options*. Oxford University Press. New York, EEUU. pp. 34-49.
- Dias MAG (2011) Real Option in Petroleum. [www.puc-rio.br/marco.ind/](http://www.puc-rio.br/marco.ind/)
- Dixit AK, Pindyck RS (1994) *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press. 476 pp.
- Fine CH, Freund RM (1990) Optimal investment in product-flexible manufacturing capacity. *Manag. Sci.* 36: 449-466.
- Golçalves EDL, Ferreira LL (2008) Flexibilidade na Utilização de Diesel ou Biodiesel: uma Abordagem via Opções Reais. *Brazilian Business Review* 5: 229-243.
- Kamrad B, Ernst R (1995) Multiproduct manufacturing with stochastic input prices and output yield uncertainty. Em Trigeorgis L (Ed.) *Real Options in Capital Investments: Models, Strategies, and Applications*. Praeger. Westport, CO, EEUU. pp. 281-300.
- Kulatilaka N (1993) The value of flexibility: The case of a dual-fuel industrial steam boiler. *Financ. Manag.* (Autumn): 271-280.
- Kulatilaka N (1995) The value of flexibility: A general model of real options. Em Trigeorgis L (Ed.) *Real Options in Capital Investments: Models, Strategies, and Applications*. Praeger. Westport, CO, EEUU. pp. 89-108.
- Kulatilaka N, Marcus AJ (1992) Project valuation under uncertainty: Where does DCF fail? *J. Appl. Corp. Finance* (Autumn): 92-100.
- Kulatilaka N, Trigeorgis L (1994) The general flexibility to switch: Real options revisited. *Int. J. Finance* 6: 778-798.
- Samanez CP (2006) *Gestão de Investimentos e Geração de Valor*. Pearson - Prentice Hall. Sao Paulo, Brasil. 400 pp.
- Sousa-Aguiar EF, Appel LG, Mota C (2005) Natural gas chemical transformations: The path to refining in the future. *Catal. Today* 101: 3-7.
- Sousa-Aguiar EF, Noronha FB, Faro A (2011) The main catalytic challenges in GTL (gas-to-liquid) processes. *Catal. Sci. Technol.* 2011: 698-713.
- Triantis AJ, Hodder JE (1990) Valuing flexibility as a complex option. *J. Finance* 45: 549-565.

## REAL OPTIONS ANALYSIS OF PETROCHEMICALS INDUSTRY INVESTMENT PROJECTS

Leticia de Almeida Costa and Carlos Patrício Samanez

### SUMMARY

*Investments in the petrochemical industry generally present medium/long term maturities, managerial or operational flexibilities (real options), with high level of irreversibility and subject to conditions of technical and economic uncertainty. This paper uses real options in economic analysis, modeling economic uncertainty as a stochastic process and using stochastic simulation techniques that consider the levels of managerial freedom in an oil industry project. The paper aims to analyze a project in the oil industry with XTL technology (Feed-to-liquid) using the Real Options Theory (ROT). XTL technology is divided into two steps: a gasification process followed by a process GTL (Gas-to-liquid). The Gasifica-*

*tion enables the conversion of solids, biomass, liquids and gases into synthesis gas, which is used as input of the GLT. The GLT enables the transformation of synthesis gas into high quality byproducts such as naphtha, diesel, paraffin and lubricants. In this study, ROT is adjusted to assess the capability of the project to change its inputs and/or outputs, selecting the alternative that maximizes economic return according to each scenario. The investment occurs in an uncertainty environment where prices (uncertainty factors) are regarded as stochastic and follow either a mean reversion motion or a mean reversion motion with jumps. The analysis is performed with Monte Carlo simulation.*

## ANÁLISIS DE PROYECTOS DE INVERSIONES EN EL SECTOR PETROQUÍMICO A TRAVÉS DE LA TEORÍA DE OPCIONES REALES

Leticia de Almeida Costa y Carlos Patrício Samanez

### RESUMEN

*Inversiones en la industria petroquímica son de medio/largo plazo, con diversas posibilidades de flexibilidades gerenciales y operacionales (opciones reales), con alto grado de irreversibilidad y sujetos a condiciones de incertidumbre técnica e económica. El presente trabajo usa opciones reales en la análisis económica, modelando la incertidumbre económica como un proceso estocástico y usando técnicas de simulacro estocástico que consideran los grados de libertad gerencial de un proyecto. El trabajo tiene como objetivo analizar un proyecto en la industria de petróleo con tecnología XTL (Feed-to-liquid) usando la Teoría de las Opciones Reales (TOR). A tecnología, designada XTL, está dividida en dos etapas: un proceso de gasificación seguido de un proceso GTL (Gas-to-liquid). La gasificación per-*

*mite transformar sólidos, biomasas, líquidos y gases en gas de síntesis, que será usado como input del GTL. El GTL posibilita transformar el gas de síntesis en líquidos de alta calidad, tales como nafta, diésel, parafinas y lubricantes. En este estudio, la TOR es ajustada para evaluar la capacidad del proyecto cambiar sus inputs y/o outputs, seleccionando la alternativa que maximice el retorno, de acuerdo con cada escenario. La inversión ocurre en un ambiente de incertidumbre, donde los precios (factores de incertidumbre) son considerados estocásticos y siguen un movimiento de reversión a la media o un movimiento de reversión a la media con saltos, y la análisis es estimada por simulación de Monte Carlo.*