

## 5

### ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo serão apresentadas as características do projeto XTL que está sendo avaliado pelo Departamento de Engenharia de Produção da PUC-Rio para a Petrobras. Posteriormente, será exposto um caso particular com diversas restrições que servirá de base da análise dessa dissertação para estudar a viabilidade econômica de um projeto XTL com flexibilidade de *input* e *output*.

#### 5.1.

##### Características do Projeto

Serão modelados os custos e as receitas do projeto, a fim de montar uma função lucro que posteriormente será maximizada. Essa função de exercício ótimo da opção selecionará a cada instante de decisão a combinação ótima de insumos e produtos que maximiza o valor da empresa detentora do projeto, considerando cada cenário possível.

##### 5.1.1.

##### Custos da Planta GTL

Um dos maiores desafios aos avanços dos projetos de GTL nos últimos anos é a sua intensidade em capital. Do ponto de vista econômico, três parâmetros são importantes à lucratividade de uma planta de GTL: investimentos de capital, custo do GN e o preço dos produtos, o que é vinculado ao preço do petróleo.

O custo de produção de combustíveis sintéticos vem se reduzindo significativamente com os desenvolvimentos do processo nos últimos anos. Várias empresas têm anunciado custos de produção em torno de 20-25 dólares por barril. No geral, os custos totais produzidos por uma planta GTL se distribuem tipicamente da seguinte forma:

- Custo de investimento na planta de produção do GS: 33%;
- Custo de investimento na fase de conversão de GS: 18%;

- Custo de operação e manutenção: 23%;
- Aquisição da matéria-prima (GN): 21%.

Esta divisão de custos pode variar em função de aspectos tecnológicos (escala e tipo de tecnologia de conversão adotada) ou de localização da planta.

A eficiência de uma planta pode ser medida através da seguinte fórmula:

Eficiência = valor calorífico do produto / (valor calorífico do insumo + combustível).

Para maximizar essa função existem três possibilidades: aumentar a quantidade de produto, reduzir consumo de combustível ou reduzir o consumo de GN. Assim, uma planta que gere sua própria energia alcançaria maiores valores para essa função, na medida em que reduziria os gastos com combustíveis.

Para reduzir os custos de combustível, o melhor é gerar localmente a energia necessária. Segundo o estudo da Foster Wheeler Energy, uma planta GTL “auto-integrada”, que produz toda energia necessária para seu próprio consumo permite uma redução significativa dos custos. Além disso, dependendo da capacidade da planta ainda há possibilidade de vender a energia excedente (PETRÓLEO & GÁS BRASIL, Fev. 2001).

Uma planta GTL consome energia das seguintes formas: combustível para produção do GS, força motriz para o separador de ar e geração de energia para o funcionamento da planta como um todo. As três principais formas de geração de energia em uma planta são: a utilização dos combustíveis produzidos, o vapor de alta pressão resultante da produção do GS; e o vapor de média pressão resultante da síntese do processo FT. Uma planta GTL bem sucedida seria, portanto, aquela que permitisse o equilíbrio no balanço de geração e consumo de energia. Segundo estudos da Petrobras, numa planta GTL com capacidade acima de 30.000 bpd, a energia produzida é suficiente para o próprio consumo e ainda há sobra para vender.

Além dos fatores relativos ao custo da planta, é necessário considerar a disponibilidade de infra-estrutura para o aproveitamento do gás. No caso de haver

uma infra-estrutura madura, ou seja, a planta GTL seria apenas mais uma opção para o aproveitamento das reservas, a economicidade do projeto é muito maior. Desta forma, a análise da viabilidade econômica de projetos GTL requer um estudo individual que respeite as individualidades e características de cada região. O que não acontecerá nessa dissertação.

O nível e a instabilidade dos preços dos derivados do petróleo também afetam o desenvolvimento da tecnologia GTL, conduzindo à exploração das economias de escala. Sem isso, os produtos poderiam ter um custo muito elevado e não competitivo com os produtos derivados do petróleo. Mesmo sendo incerto o valor dos custos será considerado determinístico (exceto custo com matéria-prima). Seus valores serão conhecidos a priori. Já os custos com GN irão variar com o tempo e com isso o GN será considerado uma variável estocástica nesse trabalho.

Há também os custos com impostos diretos (imposto de renda e contribuição social) que são calculados depois de todas as receitas e custos já estarem embutidos. Já os outros tributos indiretos, tais como IPI, ICMS não recuperável, ISS, CPMF, estarão embutidos nos diversos custos operacionais.

#### **5.1.1.1.**

#### **Investimento - CAPEX**

A Figura 11 mostra claramente que o investimento representa a maior faixa possível dos gastos com a produção de derivados de GTL. Apesar da maior amplitude dos gastos com matéria prima, a possibilidade de localização dos projetos de GTL em regiões ricas em reservas gasíferas de baixo custo torna o investimento, de fato, o principal componente.

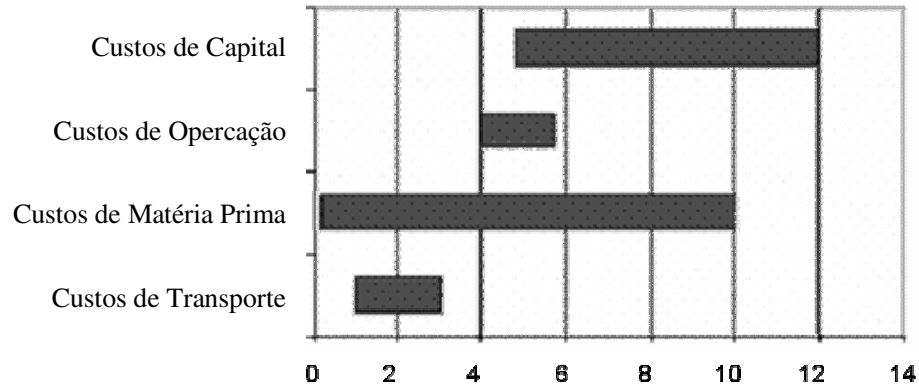


Figura 11 – Custos do GTL (US\$/bbbl)

Fonte: IAEE

O CAPEX é dividido nas três fases do processo GTL de forma dinâmica como apresenta a Figura 12. Há uma grande assimetria, onde mais de 50% do capital é usado para elaborar a primeira fase (Reforma), ou seja, a maior parte do investimento é usada para transformar GN em GS.

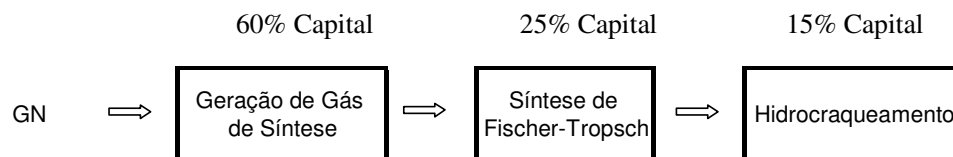


Figura 12 – Divisão do CAPEX

Fonte: Sítio da Internet - [www.int.gov.br/questao/pdf/Ricardo\\_Audi28112005.pdf](http://www.int.gov.br/questao/pdf/Ricardo_Audi28112005.pdf).

O tempo de construção da planta pode afetar o fluxo de caixa do projeto, esse tempo para uma planta GTL varia entre 30 a 48 meses, dependendo da escala da planta. Assim, tendo em vista que a fase de construção da planta leva em média 3 anos, os custos financeiros associados à imobilização do capital nestes anos são expressivos.

O investimento das plantas GTL construídas no início dos anos 1990 (Shell e Moss gas) situavam-se em patamares muito superiores à média dos custos

anunciados para os projetos atuais. Enquanto as plantas da Shell e Mossas tiveram um custo por barril de capacidade diária da ordem de US\$ 40 a 50 mil dólares, empresas proprietárias de tecnologias GTL têm anunciado atualmente custos entre 20 e 30 mil dólares por barril/dia.

O investimento em uma planta com grande capacidade ainda está muito alto, sendo estimado em US\$1,5 bilhões, para uma planta de 75.000 bpd. Há uma esperança da diminuição dos custos de investimento, combinando a experiência operacional das poucas unidades existentes no mundo que com uma melhoria dos catalisadores e otimização de processos.

Pode-se observar a partir dos valores ilustrativos da Tabela 6, calculados para diversas capacidades, que, cada vez que a capacidade dobra, o investimento cresce cerca de 50%.

Capacidade (barril/dia)	Investimento (milhões US\$)	Custo por barril (mil US\$)
5.000	266	53,17
7.500	342	45,61
10.000	409	40,91
20.000	630	31,48
25.000	723	28,94
30.000	810	27,01
50.000	1.113	22,27
75.000	1.433	19,10
100.000	1.713	17,13

Tabela 6 – Estimativa de Custos de Investimento por Perfil de Escala

Fonte: Revista CIER

### 5.1.1.2.

#### **Custos Operacionais**

Os custos operacionais, sem considerar os impostos podem ser considerados como um percentual do valor do investimento, ou seja, que em média o custo operacional anual é de 2% do CAPEX.

### 5.1.1.3.

#### Custos do Gás Natural

O consumo de GN para uma dada capacidade de produção dependerá da eficiência energética da planta. Quanto maior esta eficiência, menor será o consumo de GN, para se produzir uma dada quantidade de combustível sintético. Atualmente, a eficiência média das tecnologias disponíveis é da ordem de 60%.

Em geral, as análises econômicas das plantas de GTL atribuem ao GN um custo entre \$ 0,50 e \$2,00 por milhão de Btu. Esta é a faixa de preços mínima para viabilizar o aproveitamento das reservas de gás. É importante ressaltar que a cada aumento de \$ 0,50 por milhão de Btu no custo do GN, o custo total dos combustíveis produzidos pode elevar-se de \$ 4 a \$ 5 dólares por barril. O preço do GN será considerado uma variável estocástica que segue um MRM, assim será estimado o preço futuro do GN.

### 5.1.2.

#### Custos das Plantas BTL, OTL e RTL

Os custos das plantas de BTL, e OTL e RTL diferenciam-se dos custos do GTL devido ao uso de diferentes matérias primas e diferentes tecnologias utilizadas na primeira fase de Gaseificação em vez de Reforma.

Analisando essa segunda diferença, o investimento das plantas se torna significativamente maior. Com gaseificador fica 15% mais caro, só na primeira fase, assim o esquema de divisão do investimento pelos estágios do processo está apresentado na Figura 13.

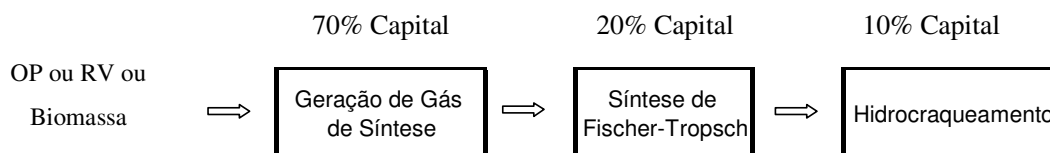


Figura 13 – Divisão do CAPEX para plantas de BTL, OTL e RTL

Com relação ao custo operacional anual, pode-se considerar igual ao GTL, onde seria 2% do investimento e os custos com matéria-prima irão variar para cada planta de acordo com o seu insumo que será estimado com base no processo estocástico. Espera-se que o custo com matéria-prima para essas plantas seja bem menor do que o gasto com GN para compensar o maior custo com CAPEX.

### 5.1.3.

#### Receitas das Plantas XTL

Uma planta XTL pode produzir, dependendo da tecnologia adotada, todo tipo de hidrocarboneto líquido sintético. Atualmente, as plantas de XTL em operação produzem basicamente dois tipos de produto: diesel sintético e especialidades (lubrificantes, ceras especiais, solventes, fluidos para perfuração de petróleo, produtos para usos alimentares) e nafta petroquímica.

O diesel XTL é mais caro do que o diesel obtido a partir do refino de petróleo. No entanto, tem uma qualidade que o diesel do refino não alcança, mesmo com uma série de processos adicionais, que é menos poluente, porém o mercado internacional ainda não valoriza esse tipo de diesel. A tendência no mundo inteiro é colocar limites cada vez mais restritivos às emissões de enxofre e aromáticos no diesel. Como isso ainda não acontece, não será usado nenhum spread para o preço do Diesel XTL frente ao Diesel convencional.

Serão considerados com produtos da planta XTL, diesel, nafta, lubrificante e parafina cujos preços serão variáveis estocásticas que seguem um MRM. Seus parâmetros serão calculados posteriormente com base na série histórica dos preços de mercado.

Na planta XTL há restrições quanto à produção que devem ser consideradas e são baseadas na Equação 42 de distribuição de Anderson-Schulz-Flory (ASF).

$$W_n = n(1 - \alpha)^2 \alpha^{(n-1)} \quad (42)$$

Onde,  $W_n$  = fração mássica de um produto com  $n$  átomos de carbono;

$\alpha$  = fator de probabilidade de crescimento da cadeia;

$n$  = número de carbonos.

A Figura 14, com base em dados fornecidos pelo CENPES e pela bibliografia específica, mostra a relação entre a fração dos percentuais de produção que pode ser destinado a cada um dos produtos finais do processo para um determinado valor do alfa ( $\alpha$ ).

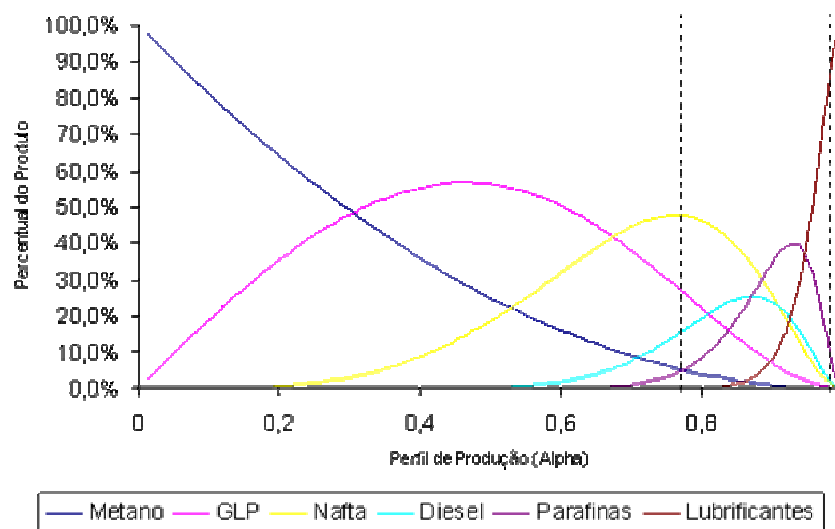


Figura 14 – Distribuição de Anderson-Schulz-Flory

Observa-se que além da produção da Nafta, Diesel, Parafinas e Lubrificantes, o XTL também irá produzir Metano e GLP. O CH<sub>4</sub> (metano) pode ser reciclado para a unidade de reforma, já o GLP pode ser vendido. Porém, essas últimas informações não serão consideradas nesse estudo.

Além da receita com a produção, há também uma receita excedente com a venda de energia, no caso da planta ser maior do que de 30.000 Bpd. A energia elétrica produzida pelo processo é maior do que a consumida, então, além de não



gastar com energia ainda há um extra que pode ser vendida. Na média, esse “spread extra” tem um valor de 0,1 dólar / MMBtu de energia vendida<sup>19</sup>.

#### 5.1.4.

##### **Rendimento dos *inputs***

Estima-se um consumo médio de 280 m<sup>3</sup> de GN por barril dia de combustível produzido. Já o rendimento para a produção de GS, que seria a primeira fase, estaria numa faixa de 3.450 m<sup>3</sup> GS/Ton de GN. E 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.

O rendimento dos demais insumos frente ao GS segue na Tabela .

<b>Óleo Pesado (bbl)</b>	2.600	m <sup>3</sup> GS / Ton MP
<b>Biomassa</b>		
Torta de Mamona (t)	1.570	m <sup>3</sup> GS / Ton MP
Bagaço de Cana (t)	540	m <sup>3</sup> GS / Ton MP
Madeira (t)	570	m <sup>3</sup> GS / Ton MP
<b>Resíduo de Vácuo (m3)</b>	2.590	m <sup>3</sup> GS / Ton MP

Tabela 7 – Rendimentos Estimados para diferentes matérias-primas

Fonte: CENPES

#### 5.1.5.

##### **Outras Premissas do Projeto**

É considerado um horizonte de tempo limitado a 23 anos. Onde o tempo da construção juntamente com o investimento será definido como 3 anos e a operação do projeto será de 20 anos. A depreciação será considerada para um período de 20 anos linearmente. Os valores das vendas dos equipamentos (valor de sucata) não serão considerados.

<sup>19</sup> Valor informado pelos pesquisadores do CENPES.

As taxas de impostos, bem como taxa de câmbio são relevantes e estão apresentadas na Tabela 8.

TRIBUTOS INDIRETOS (Compras)			
ICMS	18%	Taxas Aduaneiras	1%
PIS/PASEP	1,65%	IRRF	15%
COFINS	7,6%	Imposto Sobre Serviço (ISS)	5%
Imposto de Produtos Industrializados (IPI)	12%	CIDE	10%
Imposto de Importação (II)	10%	IOF	0%
TRIBUTOS DIRETOS (Vendas e Outras Receitas)			
Imposto de Renda	25%	Contribuição Social	9%
OUTROS TRIBUTOS/PREMISSAS			
Alíquota de CPMF	0,038%	Inflação Brasileira (a.a.)	4,5%
		Taxa de Câmbio (\$R/US\$)	2,5

Tabela 8 – Alíquotas de Impostos e Taxas relevantes

A incerteza de mercado será representada por processos estocásticos, que poderá ser escolhido entre MGB, MRM e Poisson, para cada um dos preços dos *inputs* e *outputs*.

## 5.2.

### Projeto XTL: Caso Particular de uma Planta de 35.000 Bpd

O projeto analisado será bastante restrito, visando principalmente calcular os valores das opções frente ao VPL estático. Para isso, a planta em estudo terá as seguintes características:

1. Uma produção de 35.000 bpd (barril por dia);
2. *Inputs*: GN e óleo pesado (OP);
3. *Outputs*: Nafta, Diesel, Parafina e Lubrificantes;
4. Horizonte no tempo: 3 anos para investimento e 20 anos de produção;

5. Investimento dissolvido de forma uniforme dentro dos 3 primeiros anos;
6. Fluxos de caixa trimestrais;
7. Processo estocástico para todos os preços: MRM;
8. Limites das proporções do *output* estão sendo respeitados baseados na distribuição de ASF: para plantas flexíveis o alfa pode variar de 0,78 a 0,96 e a planta fixa terá um alfa de 0,96;
9. Rendimentos dos *inputs* estão sendo respeitados;
10. Os custos adicionais para a flexibilidade de troca do *input* e *output* em cada período serão analisados para diferentes percentuais (inicialmente não serão considerados);
11. Imposto é fixo em 34% sobre o lucro;
12. Taxa de desconto livre de risco:  $r = 5\%$  aa;
13. Taxa Ajustada ao risco:  $\mu = 10\%$ aa<sup>20</sup>;
14. Fator Operacional de 96%;
15. Depreciação e valor residual da planta não estão sendo considerados.

### 5.3.

#### Cálculo dos Parâmetros das Séries de Preços

As Figuras 15, 16, 17, 18, 19 e 20 mostram a evolução dos preços dos *inputs* e *outputs* com base nas medidas encontradas no mercado (séries de preços

---

<sup>20</sup> É uma taxa muito usada no setor, pois é a taxa que tem de ser usada pelas empresas de petróleo na valoração de reservas pelo critério da SEC (órgão americano de regulação das empresas com ações na bolsa de valores). Será considerada igual para todos os *inputs* e *outputs* como forma de simplificação, uma vez que cada uma deveria ter a sua taxa ajustada ao seu risco.

originais). Para a elaboração da análise foram feitas conversões nas séries originais cujas tabelas estão em anexo no apêndice.

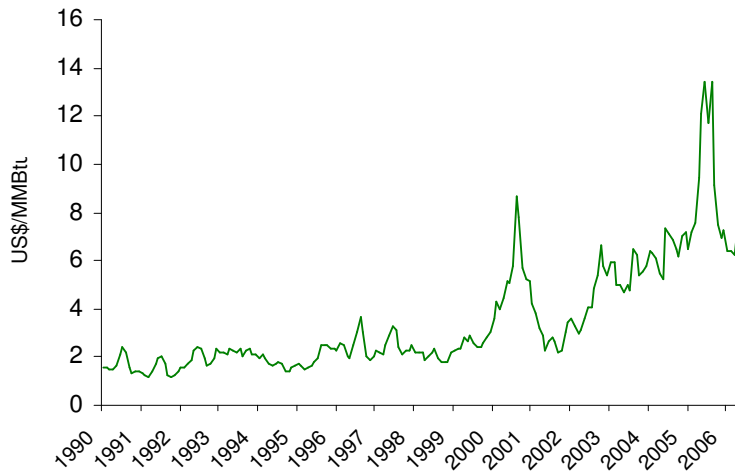


Figura 15 – Preço do Gás Natural

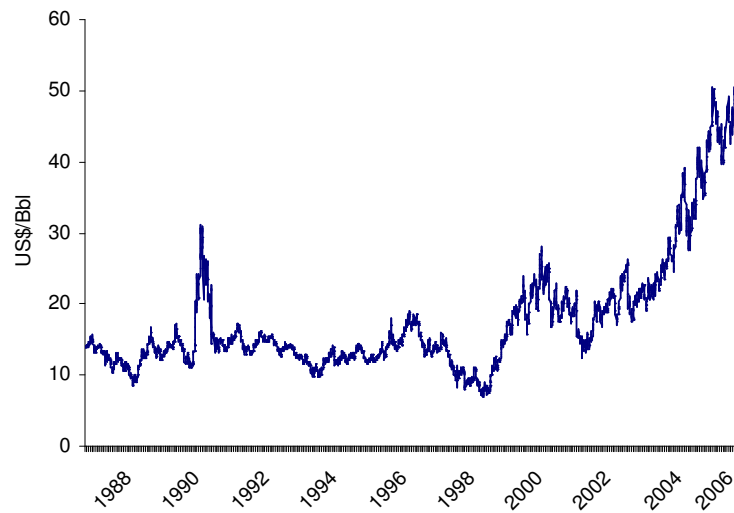


Figura 16 – Preço do Óleo Pesado

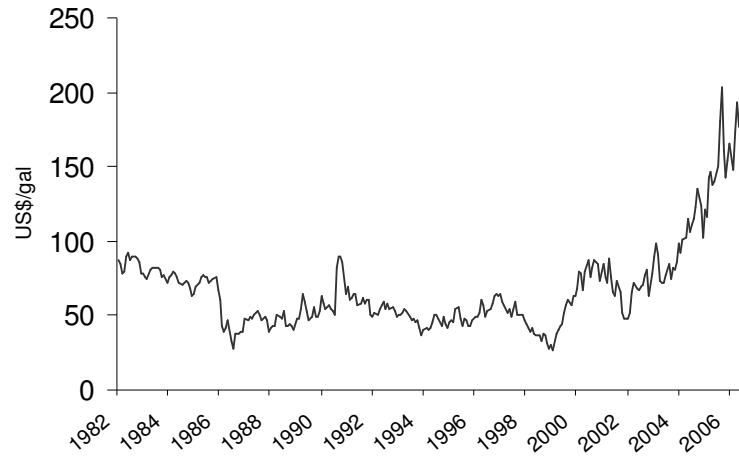


Figura 17 – Preço da Nafta

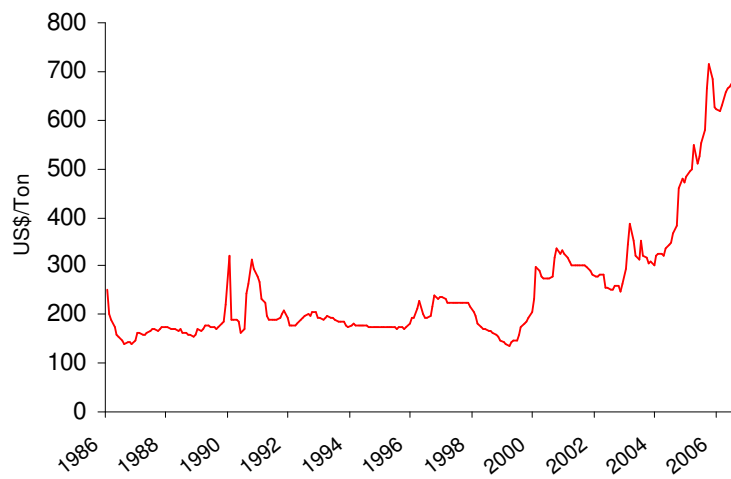


Figura 18 – Preço do Diesel

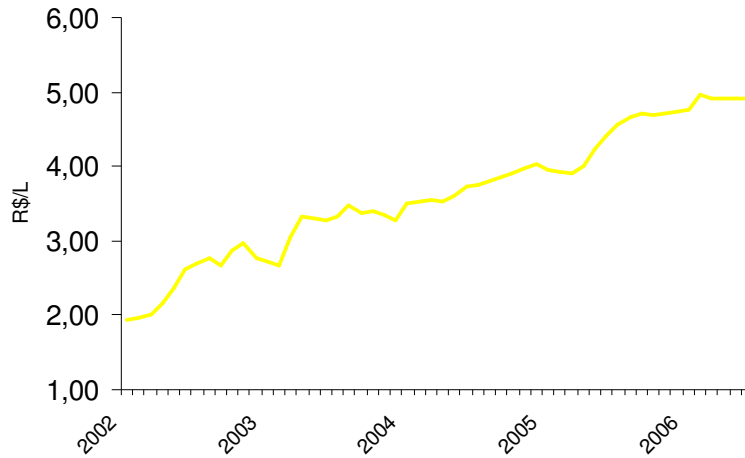


Figura 19 – Preço de Lubrificante



Figura 20 – Preço da Parafina

Um dos pontos chaves do método de ativos contingentes (método aplicado) é a pequena quantidade de parâmetros a serem usados no modelo. No MRM serão calculados três parâmetros para cada série:  $\eta$  (velocidade de reversão à média);  $\sigma$  (volatilidade) e média de longo prazo.

Dois métodos diferentes foram usados para calcular os parâmetros, posteriormente, escolheram-se os melhores.

### 5.3.1.

#### Cálculo Via Otimização

Com base no processo estocástico MRM, foram calculados os parâmetros de cada uma das séries de preços acima, no programa computacional MATLAB<sup>21</sup>, através do método de otimização. A Tabela mostra os valores dos parâmetros encontrados usando as séries convertidas.

	Velocidade de Reversão à		Média de Longo Prazo
	Média	Volatilidade	
Gás Natural	33,35%	46,32%	254,12 US\$/Ton
Óleo Pesado	21,63%	38,17%	216,89 US\$/Ton
Nafta	35,97%	37,09%	33,54 US\$/Bbl
Diesel	6,00%	25,18%	112,62 US\$/Bbl
Parafina	94,48%	33,48%	163,95 US\$/Bbl
Lubrificante	47,05%	23,78%	400 US\$/Bbl

Tabela 9 – Parâmetros Estimados

A natureza do processo estocástico de evolução dos preços é o ponto central para a derivação dos modelos de apreçamento. A análise do comportamento dos preços das *commodities* possui duas grandes vertentes na literatura. A primeira trata os preços como decorrência de modelos de equilíbrio entre a oferta e a demanda. A outra vertente trata da análise da evolução dos preços baseando-se na série histórica. Esta linha de pesquisa está mais presente na literatura e será usada como base para cálculo dos parâmetros das séries de preços.

As *commodities*, tipicamente são negociadas no mercado futuro. No processo de estimação dos parâmetros são necessárias as séries históricas dos

<sup>21</sup> Programa elaborado em Matlab dentro do projeto XTL da DEI-PUC-Rio/CENPES-Petrobras.

preços spot, de forma a simplificar o problema de estimação, foi assumido como preço spot os preços futuros do primeiro contrato um período a frente.

O processo de otimização usa a metodologia da verossimilhança entre as séries históricas de preços e as séries geradas a partir dos processos estocásticos com os parâmetros calculados, cuja formulação será específica para cada processo estocástico apresentado anteriormente (nesse caso será o MRM).

O Processo de estimação de parâmetros consiste em procurar a combinação de parâmetros que faça com que a verossimilhança seja o máximo. Existem vários métodos como Newton Raphson, Gradiente descendente, Quase-Newton, etc. Entretanto a convergência destes métodos tradicionais fica condicionada a qualidade da estimativa inicial.

A estimação de parâmetros foi realizada utilizando técnicas de Algoritmos Genéticos. Esse método é inspirado na Teoria Darwiniana que será explicada em detalhes.

#### **5.3.1.1.**

##### **Teoria Darwiniana**

Em 1836, após seu retorno à Inglaterra, Darwin começou a aprimorar suas idéias sobre a transmutação das espécies. Entretanto, a explicação da evolução dos organismos lhe surgiu após a leitura do livro “*Essay on the Principle of Population*”, publicado em 1798 pelo economista britânico Thomas Robert Malthus, que explicava como se mantinha o equilíbrio nas populações humanas. A tese básica de Malthus sustenta a existência de uma “desigualdade”, do tipo “menor que”, entre a taxa de crescimento da população e a taxa de crescimento dos seus meios de subsistência. Darwin aplicou esta “desigualdade” aos animais e plantas e, em 1859, publicou seu livro “*The Origin of Species*”. Em essência, sua teoria defende que os membros jovens das distintas espécies competem intensamente por sua sobrevivência devido aos recursos limitados de subsistência disponíveis no seu meio ambiente. Os que sobrevivem tendem a incorporar variações naturais favoráveis ao processo de seleção natural, e estas variações se



transmitem através da herança genética. Em consequência, cada geração tende a melhorar em termos de adaptação ao meio ambiente às gerações anteriores, e este processo gradual e contínuo é a causa da evolução das espécies.

O princípio Darwiniano, que governa a evolução dos seres vivos em ambientes orgânicos é um caso especial do “principio evolucionário” que governa a evolução das entidades que formam parte dos diversos ambientes. John Holland aplicou com sucesso o princípio evolucionário em ambientes abstratos como é o caso do problema de otimização. Seu trabalho, publicado em 1975, intitulado “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”, é considerado a semente de uma nova tecnologia de otimização denominada Algoritmos Genéticos (AGs).

### 5.3.1.2.

#### Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos são técnicas de otimização, inspirados no processo de seleção natural, defendida pela teoria Darwiniana. Sendo assim, é feita uma analogia entre uma população de indivíduos com um conjunto de soluções  $\{\theta_t^{(1)}, \theta_t^{(2)}, \dots, \theta_t^{(N)}\}$  do problema de otimização, onde cada indivíduo contém um conjunto dos parâmetros cuja solução está sendo procurada. Durante cada iteração ou *geração*  $t$  do algoritmo, cada indivíduo  $\theta_t^{(i)}$  é *avaliado* através da função de verossimilhança  $\mathbf{h}(\theta)$  (medida de aptidão). Uma nova geração de indivíduos é formada selecionando os mais aptos da população atual. Alguns membros da nova geração *evoluem* por meio dos operadores genéticos de *cruzamento* e *mutação* as quais são inspiradas nas leis Mendelianas da genética. Após várias gerações, é esperada a convergência do algoritmo para a solução ótima do problema.

Sob estas considerações, mostra-se o pseudo código do algoritmo genético denominado na literatura como *Programa Evolutivo* (PE):

**Iniciar:** Neste primeiro estágio em  $t = 1$ , os indivíduos da população são inicializados aleatoriamente de acordo a um determinado domínio dos parâmetros de cada processo estocástico.

**Avaliar:** Neste estágio, os indivíduos da população são avaliados com base na função verossimilhança  $h(\theta)$ .

**Selecionar:** Neste estágio, os indivíduos da população anterior são selecionados, dando mais chance aos que possuem maiores valores para a função avaliada. Os indivíduos selecionados formam a nova população.

**Evoluir:** Neste estágio, alguns indivíduos da população atual sofrem alterações através dos operadores genéticos de *cruzamento* e *mutação*. As operações de cruzamento se dão da seguinte maneira: dois indivíduos selecionados  $A$  e  $B$  sofrem dois cruzamentos e geram dois novos indivíduos  $C$  e  $D$  através das Equações 43 e 44:

$$C = \gamma A + (1 - \gamma)B \quad (43)$$

$$D = (1 - \gamma)A + \gamma B \quad (44)$$

onde  $\gamma \in [0,1]$

Posteriormente os indivíduos  $C$  e  $D$  sofrem mutações e geram novos indivíduos  $E$  e  $F$  que serão reavaliados. A mutação é feita com a soma de um ruído aos indivíduos anteriores.

$$E = C + \varepsilon$$

$$F = D + \varepsilon \quad \text{onde } \varepsilon \text{ é o ruído}$$

A solução final é obtida, escolhendo o melhor indivíduo após várias gerações.

### 5.3.2.

#### Cálculo Via Regressão

Na reversão à média, seja  $P_t$  o preço no instante  $t$ . Calcula-se os logaritmos  $\ln(P_t)$  de cada série. Se os preços seguem o MRM, com base na Equação 45 em tempo discreto:

$$\ln(P_t) = a + b \ln(P_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (45)$$

Onde,  $\varepsilon_t$  segue uma distribuição Normal com média zero e variância  $\sigma^2/N$ . O coeficiente  $b$  será menor que um, ou seja, se  $0 < b < 1$ , tem-se indícios de reversão à média. Fazendo a regressão:

$$\ln(P_t) - \ln(P_{t-1}) = a + (b-1)\ln(P_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (46)$$

Obtendo o valor de  $a$  e  $b$ , calculam-se os parâmetros para o MRM através das Equações 47, 48 e 49 corrigidas por Dias do Dixit&Pindyck (1994).

$$\eta = -\ln(b) \cdot N \quad (47)$$

$$\sigma = \sigma_\varepsilon \sqrt{N} \sqrt{\frac{2\ln(b)}{b^2 - 1}} \quad (48)$$

$$\bar{P} = \exp\left[\frac{(a + 0,5\sigma^2 / N)}{(1-b)}\right] \quad (49)$$

Aplicando essas fórmulas, foram obtidos os parâmetros que estão nas Tabelas 10 e 11, calculou-se tanto para as séries originais quanto para as séries convertidas. Os valores da Velocidade de Reversão à média para o Lubrificante e Parafina estão diferentes nas duas tabelas devido à taxa de câmbio aplicada para a conversão das séries.

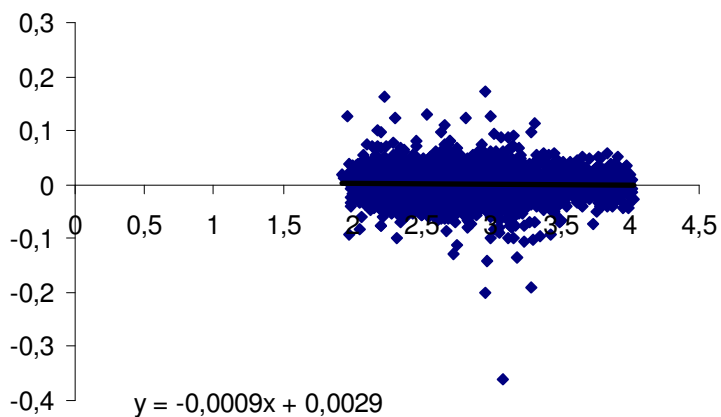
	Velocidade de Reversão à		
	Média	Volatilidade	Média de Longo Prazo
Gás Natural	32,97%	40,75%	4,77 US\$/MMBtu
Óleo Pesado	19,98%	21,66%	26,47 US\$/Bbl
Nafta	34,36%	36,85%	82,51 US\$/gal
Diesel	1,82%	2,88%	3139,57 US\$/Ton
Parafina	155,94%	91,43%	3,09 R\$/L
Lubrificante	59,66%	118,51%	16,74 R\$/L

Tabela 10 – Parâmetros Via Regressão das séries originais

	Velocidade de Reversão à		
	Média	Volatilidade	Média de Longo Prazo
Gás Natural	32,97%	40,75%	242,87 US\$/Ton
Óleo Pesado	19,98%	21,66%	178,82 US\$/Ton
Nafta	34,36%	36,85%	34,65 US\$/Bbl
Diesel	1,82%	2,88%	419,73 US\$/Bbl
Parafina	100,64%	73,45%	205,16 US\$/Bbl
Lubrificante	43,81%	75,87%	833,76 US\$/Bbl

Tabela 11 – Parâmetros Via Regressão das séries convertidas

Fazendo a regressão acima para as séries originais, se a inclinação da reta for próxima de zero, não se pode rejeitar a hipótese de MGB. Se a inclinação for negativa, é indício de MRM. As Figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26 mostram essas



regressões.

Figura 21 – Regressão para o Óleo Pesado

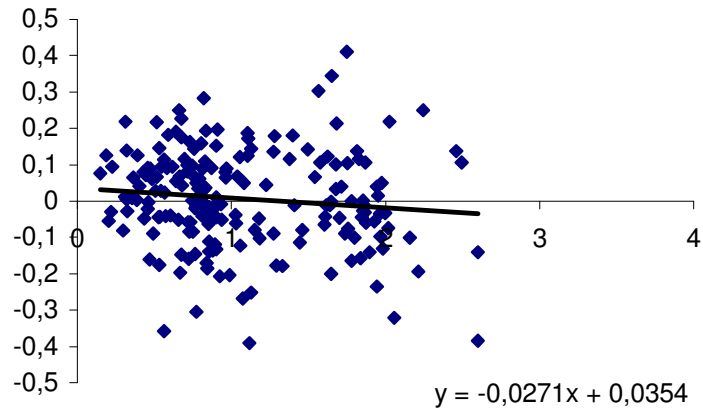


Figura 22 – Regressão para o Gás Natural

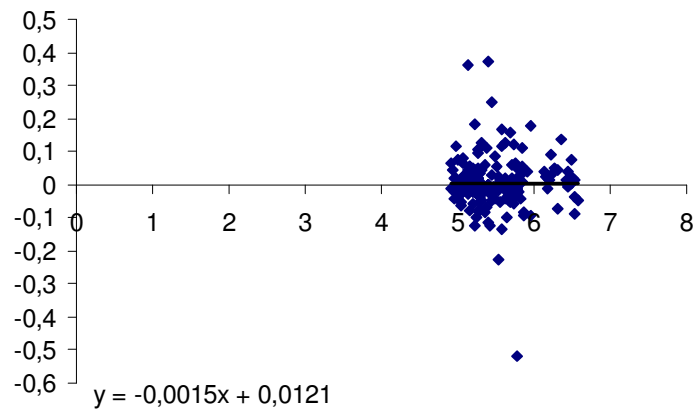


Figura 23 – Regressão para o Diesel

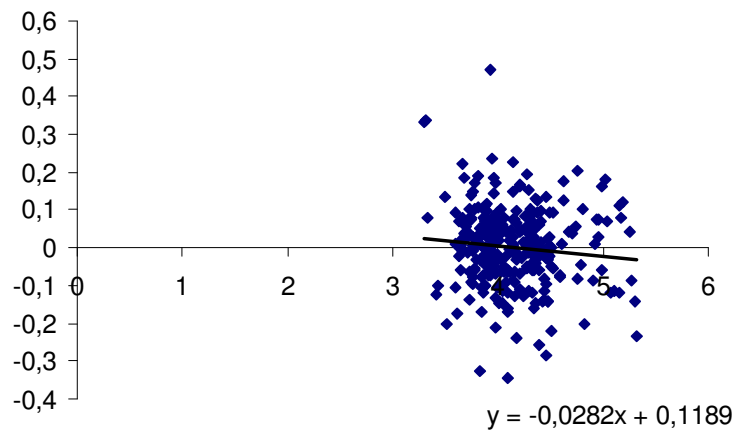


Figura 24 – Regressão para a Nafta

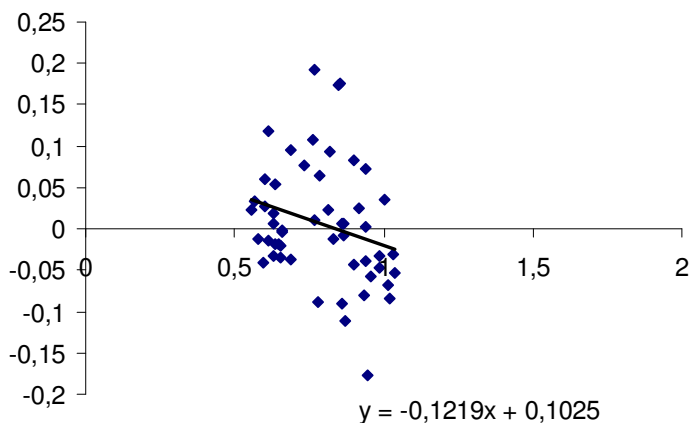


Figura 25 – Regressão para a Parafina

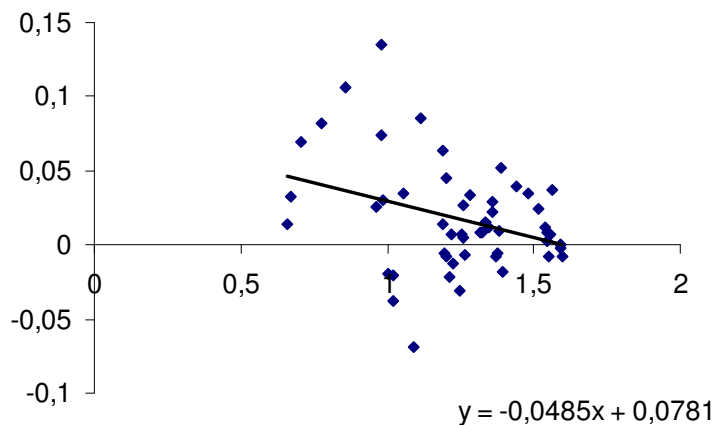


Figura 26 - Regressão para Lubrificante

As figuras mostram que a inclinação das regressões do OP e do diesel tende a zero, ou seja, não rejeitam o MGB. As outras regressões apresentam uma ligeira inclinação negativa que mostra um indício de reversão à média.

Evidências empíricas e a lógica microeconômica indicam que o processo estocástico do preço das *commodities* tendem a ter o componente de reversão à média. Os testes econométricos só costumam rejeitar o MGB quando as séries são muito longas. Com séries de 30 a 40 anos não se costuma rejeitar o MGB. Como as séries usadas são muito menores, faz sentido não se rejeitar o MGB em algumas figuras.

### 5.3.3.

#### Escolha e Análise dos Parâmetros

A estimação dos parâmetros de reversão com séries temporais de apenas 2 a 5 anos, podem fornecer estimadores não confiáveis. Com base nos estimadores encontrados nos dois métodos e com a intuição de mercado dos profissionais da Petrobras, os parâmetros que foram usados para as simulações dos processos estão na Tabela .

Observando as análises e os gráficos, os preços do OP e do diesel se comportam mais como MGB do que como reversão, assim, os parâmetros estimados não seriam muito significativos. No caso do diesel, seus parâmetros estão fora da realidade pra os valores da velocidade e da média de longo prazo. Já para o OP, os parâmetros são mais realistas, mesmo tendendo para MGB.

Para o OP serão usados os parâmetros encontrados via otimização e para o GN e a nafta os parâmetros da regressão. Já para a série de parafina os valores estimados no otimizador estão mais razoáveis do que os da regressão. O pior caso é para lubrificantes, pois o maior problema é o tamanho da série que é muito pequeno e isso faz com que os parâmetros estejam fora da realidade. Nesse estudo serão usados os parâmetros do otimizador. Já no caso do Diesel, os parâmetros do otimizador são mais consistentes e por isso serão usados, mesmo não parecendo muito realistas.

	Velocidade de Reversão à		
	Média	Volatilidade	Média de Longo Prazo
Gás Natural	32,97%	40,75%	242,87 US\$/Ton
Óleo Pesado	21,63%	38,17%	216,89 US\$/Ton
Nafta	34,36%	36,85%	34,65 US\$/Bbl
Diesel	6,00%	25,18%	112,62 US\$/Bbl
Parafina	94,48%	33,48%	163,95 US\$/Bbl
Lubrificante	47,05%	23,78%	400 US\$/Bbl

Tabela 12 – Parâmetros Utilizados

Analisando a correlação entre os produtos e observando a Tabela , é possível verificar um elevado nível na correlação entre a maioria das séries. Isso já era previsível, pois todos os preços estão muito correlacionados ao preço do petróleo. Para verificar isso, basta observar a correlação de cada um com o OP, pois este é um percentual do preço internacional do petróleo.

	óleo Pesado	GN	Diesel	Nafta	Parafina	Lubrificante
óleo Pesado	1	0,82497	0,95188	0,98179	0,64214	0,92408
GN	0,82497	1	0,87163	0,83818	0,40121	0,58712
Diesel	0,95188	0,87163	1	0,95867	0,76488	0,94350
Nafta	0,98179	0,83818	0,95867	1	0,67365	0,90100
Parafina	0,64214	0,40121	0,76488	0,67365	1	0,84516
Lubrificante	0,92408	0,58712	0,94350	0,90100	0,84516	1

Tabela 13 - Correlações

A correlação positiva entre os preços diminui o valor da opção, mas seria necessária uma correlação muito alta para desprezar o valor da opção. Como essas correlações são altas, isso pode afetar o valor das opções, mas não necessariamente torná-las desprezíveis.

#### 5.4.

#### Simulação do Processo de Reversão à Média

Considerando o processo de reversão à média da Equação 50

$$dx = \eta(\bar{x} - x)dt + \sigma dz \quad (50)$$

Cuja solução é dada pela Equação 51 com a integral estocástica

$$x(T) = x(0)e^{-\eta T} + \bar{x}(1 - e^{-\eta T}) + \sigma e^{-\eta T} \int_0^T e^{-\eta t} dz(t) \quad (51)$$

Onde  $\eta$  é a velocidade de reversão. A variável  $x(t)$  tem distribuição normal com média e variância.



$$\begin{aligned}
 E[x(T)] &= x(0)e^{-\eta T} + \bar{x}(1 - e^{-\eta T}) \\
 Var[x(T)] &= [1 - e^{-2\eta T}] \sigma^2 / (2\eta)
 \end{aligned}
 \tag{52}$$

Para fazer simulação é preciso da equação de discretização do processo estocástico, ou seja,  $x(t)$  em função de  $x(t-1)$ . Nesse trabalho usou-se uma discretização exata, que é uma discretização tal que a precisão independe do tamanho  $\Delta t$ , assim fica possível simular muitos anos à frente<sup>22</sup>.

A SMC será feita com base num processo neutro ao risco, pois é o mais indicada para valorar opções e derivativos, enquanto que a simulação real é mais útil para casos de planejamento e para análise de risco e usa uma taxa de desconto ajustada ao risco. Para o ativo base pode usar um dos dois métodos, mas para a opção deve-se usar simulação neutra ao risco, pois não se sabe a priori qual q taxa ajustada ao risco da opção. Além disso, operacionalmente a simulação neutra ao risco é mais fácil de ser feita.

A simulação dos preços foi feita baseada na Equação 53 de Dias onde entra a taxa ajustada ao risco do ativo base  $\mu$ :

$$\begin{aligned}
 P(t) = \exp \left\{ \right. & \left[ \ln[P(t-1)] \exp[-\eta \Delta t] \right] + \left[ \ln(\bar{P}) - \frac{\mu - r}{\eta} (1 - \exp[-\eta \Delta t]) \right] \\
 & \left. - \left[ (1 - \exp[-2\eta T]) \frac{\sigma^2}{4\eta} \right] + \sigma \sqrt{\frac{1 - \exp[-2\eta \Delta t]}{2\eta}} N(0,1) \right\}
 \end{aligned}
 \tag{53}$$

Onde:  $\eta$  = velocidade de reversão

$\bar{P}$  = média de longo prazo (valor de equilíbrio)

---

<sup>22</sup> A SMC para MRM está explicada no apêndice.

A equação para fazer a simulação real é muito parecida com a equação acima, basta suprimir o termo  $\left(\frac{\mu - r}{\eta}\right)$ . Esse termo é um prêmio de risco normalizado que penaliza  $\ln(\bar{P})$ .

Para ilustrar a diferença entre a simulação real e a neutra ao risco, a Figura 27 apresenta dois possíveis caminhos para diferentes simulações. É fácil observar que uma simulação neutra ao risco é sempre mais conservadora do que a simulação real.

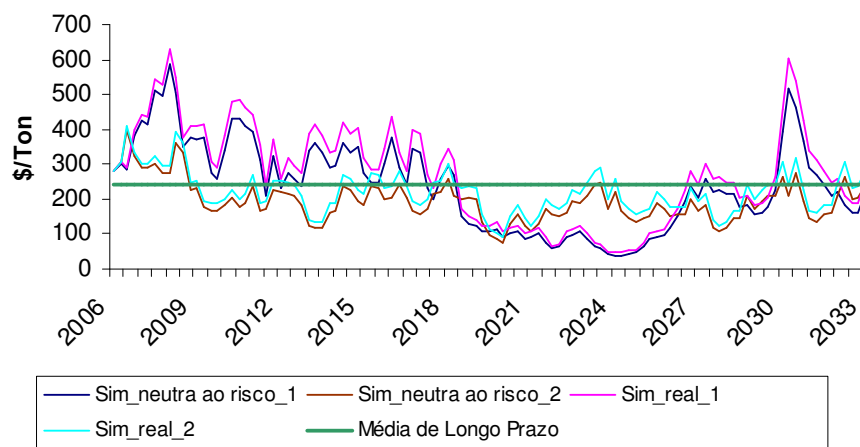


Figura 27 – Simulação Real e Neutra ao Risco para o preço do GN

Considerando como se fosse uma sequência de opções europeias, em que se escolhe em cada trimestre o maior *payoff*, usa-se SMC para obter um resultado.