

## **SIMULADOR FÍSICO DE RESERVATÓRIO DO PRÉ-SAL: UMA MODELAGEM DE MATÉRIAS E PROCEDIMENTOS**

Natália Andrade Ancajima; Ana Carolina da Silva Santos; Carlos Augusto Dos Santos Filho;  
Hermógenes Cavalcante;  
Flávia Cavalcante Souto Menezes Rodrigues Lopes.

Centro Universitário Estácio da Bahia, STIEP 179, 41770-130, Salvador - BA, Brasil.  
E-mail: natalia.ancajima@hotmail.com.

**Resumo:** O Petróleo é o recurso mais significativo da matriz energética mundial. Para a retirada desse hidrocarboneto, quando os métodos convencionais não são mais viáveis, são necessários métodos especiais a exemplo da injeção de CO<sub>2</sub>. Com a descoberta das reservas do Pré-sal, o Brasil se apresenta entre os principais produtores de petróleo do mundo produzindo óleo leve no reservatório e com uma elevada concentração de CO<sub>2</sub> dissolvido no óleo. Como a preocupação do meio ambiente é eminente, a Petrobras determinou que não será lançado esse CO<sub>2</sub> na atmosfera. O objetivo deste trabalho foi estudar os reservatórios do pré-sal, conhecendo suas rochas, tipo de óleo, para entender e especificar com detalhe a formação nesses reservatório e custos para se projetar um simulador físico de reservatório; e, como objetivos específicos teve: O estudo e especificações dos reservatórios e rochas do pré-sal; o levantamento da rocha calcária, do óleo e do CO<sub>2</sub> adequadas e similares ao reservatórios do pré-sal; Além do entendimento do funcionamento do simulador físico de danos utilizando espuma como fluido de perfuração; propondo uma adaptação a este simulador para adequá-lo a um simulador físico de reservatório do pré-sal com injeção CO<sub>2</sub>; especificar as amostras de rocha e óleo, de forma a adequar a simulação do reservatório do pré-sal para injeção do CO<sub>2</sub>. Para consolidar estes objetivos utiliza-se de uma metodologia de revisão de literatura. Por fim considera-se que a injeção desse CO<sub>2</sub> como método de recuperação aumentará a eficiência da produção do óleo e o reservatório será utilizado como sequestro geológico.

**Palavras-Chaves:** Petróleo, CO<sub>2</sub>, Pré-Sal, Simulador Físico de Reservatório.

### **Introdução**

Nas últimas décadas, o petróleo tornou-se uma das fontes de energia mais importante na vida do ser humano. Segundo Gauto (2011), dele se produzem a gasolina, combustível de avião, gás de cozinha, lubrificantes, borrachas, plásticos, tecido sintético, tintas e até mesmo energia elétrica. No Brasil, após as descobertas nos campos do pré-sal aumentou ainda mais a importância da exploração de petróleo. O pré-sal é um reservatório de petróleo que está abaixo de uma extensa camada de sal, que se estende do litoral do Espírito Santo até o litoral de Santa Catarina. Essa camada tem 800 km de comprimento e, em algumas áreas, 200 km de largura. O reservatório do pré-sal é formado por rochas carbonáticas (calcária), produzindo o óleo leve, grau API entre 28 e 30 (MELLO, 2011). O caminho do petróleo até a superfície é dificultado, pois passa por diversas barreiras geológicas, diferenças de pressão e efeitos da gravidade. Vários especialistas do ramo petrolífero, desde Geólogos, Engenheiros e Técnicos, na tentativa de obter óleo e seus derivados,

estudam, avaliam e implementam processos de recuperação (THOMAS, 2004). Segundo Beltrão *et al.* (2009), O óleo produzido nos reservatórios carbonáticos de Tupi é um óleo leve (28° - 30°) com uma alta quantidade de CO<sub>2</sub>, contendo de 8% a 12%. Conforme a decisão da Petrobras de não jogar na atmosfera o CO<sub>2</sub> produzido, a injeção de CO<sub>2</sub> tornou-se uma possibilidade atrativa de ser utilizado como método de recuperação avançada de óleo (OER). De acordo com Carcoana (1992), o CO<sub>2</sub> é um gás incolor, inodoro, inerte e não combustível. Tem seu peso molecular 44,01, sendo uma vez e meia maior que a massa molecular do ar. De acordo com as informações supracitadas é de grande importância estudar simuladores de reservatório do Pré-Sal para injeção de CO<sub>2</sub>. Dessa forma o objetivo deste trabalho foi estudar os materiais necessários para se projetar um simulador deste tipo, este objetivo foi desdobrado nos seguintes objetivos específicos: realizou-se um estudo detalhado das matérias- prima, matérias e custo necessários para o projeto; estudou-se os reservatórios do pré-sal, conhecendo suas rochas, tipo de óleo, para entender e especificar com detalhe a formação nesse reservatório e custos para se projetar um simulador físico se reservatório. Especificou-se as rochas calcárias, o óleo e CO<sub>2</sub> adequados e similares ao reservatório do pré-sal; entendeu-se o funcionamento do simulador físico de danos utilizando espuma como fluido de perfuração e por fim foi realizada uma proposta de adaptação deste simulador para adequá-lo a um simulador físico de reservatório do pré-sal com injeção CO<sub>2</sub>; pesquisou-se os materiais necessários para o novo projeto do simulador físico de reservatório; Avaliou-se as condições operacionais e de processo do simulador físico de dano, e comparou-se se estas condições poderiam ser utilizadas para Injeção de CO<sub>2</sub>; Os resultados encontrados mostram que foi possível a adaptação do simulador, além disto foi possível prever os custos para o novo projeto.

## **Metodologia**

Para realização deste estudo foi necessário o levantamento dos materiais, à adaptação do simulador e custo do projeto. Fez-se necessário estudar e especificar os reservatórios do Pré-sal, para serem realizados o levantamento e especificações das rochas, óleo e CO<sub>2</sub> adequadas e similar ao reservatório do Pré-sal. Com uma base de fundamentação teórica, foi preciso entender o funcionamento do simulador físico de danos para que pudesse propor uma adaptação do simulador citado para o simulador físico do reservatório do pré-sal com injeção de CO<sub>2</sub>. Com essa proposta do simulador físico de reservatório, foi feito o levantamento dos materiais necessários para o novo simulador, onde avaliou-se as condições operacionais do simulador físico de danos, e comparadas se essas condições poderiam ser utilizadas para injeção de CO<sub>2</sub>.

## Resultados

### Especificação da rocha calcária:

A referida especificação consiste em identificar na região em estudo a existência de rocha calcária, Os testes foram utilizados nas instalações do laboratório da Acrinolitrila do Nordeste, conforme Figura 1.

Figura 1: Teste de comprovação da amostra de rochas calcária em laboratório



O procedimento aconteceu em duas etapas: Na primeira foi utilizada uma solução de ácido clorídrico 0,1N, concentração ajustada para o método de rotina no laboratório. Ao colocar de forma fracionada uma pequena quantidade de ácido clorídrico sobre a rocha não se percebeu a reação esperada (formação de bolhas de  $\text{CO}_2$ ). As possibilidades para a reação não ocorrer foram: Superfície muito polida, não permitido o contato ideal entre o sal e o ácido; ou concentração muito baixa, velocidade de reação proporcionalmente baixa e consequentemente os efeitos de liberação de  $\text{CO}_2$  tão baixos que ficam imperceptíveis. Na segunda tentativa usou-se um ácido concentrado (concentração de ácido clorídrico a 37%), a reação ocorreu de forma intensa, com formação de bolhas (simulando soluções efervescentes), sendo liberada para atmosfera e de fácil visualização. Conclui-se com o teste realizado a conformidade que a rocha em estudo é uma rocha calcária. As Figuras 2 mostram como foi realizado o corte da rocha calcária nas dimensões adequadas ao processo. Para adequação da rocha calcária no processo de simulação, faz-se necessário realizar o corte da rocha calcária carbonática em plugs (corpo de prova) para teste no simulador físico de reservatório. Efetuamos o corte com as medições de comprimento largura e diâmetro das amostras da rocha calcária adequadas para serem inseridas na célula, conforme abaixo: Amostra 1: 25,23 X 43,60mm; Amostra 2: 24,10 x 44,53mm; Amostra 3: 24,70 X 25,10mm; Amostra 4: 25,20 X 40,52mm; Amostra 5: 24,77 x 25,55mm. O corte foi efetuado na seção transversal do fluxo, em simulação ao reservatório do pré-sal.

Especificação do óleo: A especificação do óleo do pré-sal, óleo mineral e óleo sintético estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificação do óleo e CO<sub>2</sub>

Propriedade do óleo	Óleo do Pre-sal	Óleo mineral	Óleo sintético	Propriedade do CO <sub>2</sub>	White Martins	Linde Gás
Viscosidade	1,14 cp	10 cp	11cp	Volume	0,55 m <sup>3</sup> /hg	0774m <sup>3</sup> /kg
Massa específica	30 g/cm <sup>3</sup>	0.8654g/cm <sup>3</sup>	0,8546 g/cm <sup>3</sup>	Pressão de serviço	2631 psi	834,33 psi
Temperatura crítica	64°C	25°C	25°C	Temperatura crítica	31°C	31°C
Pressão	580 kgf/cm <sup>2</sup>	-	-	Peso molecular	44, 01 g/mol	44, 01 g/mol
				Densidade relativa a 21°C	1,52	-
				Peso específico relativo	-	1,53

Os óleos sintéticos e minerais têm propriedades similares, mas o que mais atende as condições de processo para o projeto é o óleo mineral, pois o óleo sintético contém aditivos químicos extras que podem interferir no processo da simulação, além do alto valor de mercado comparado ao óleo mineral.

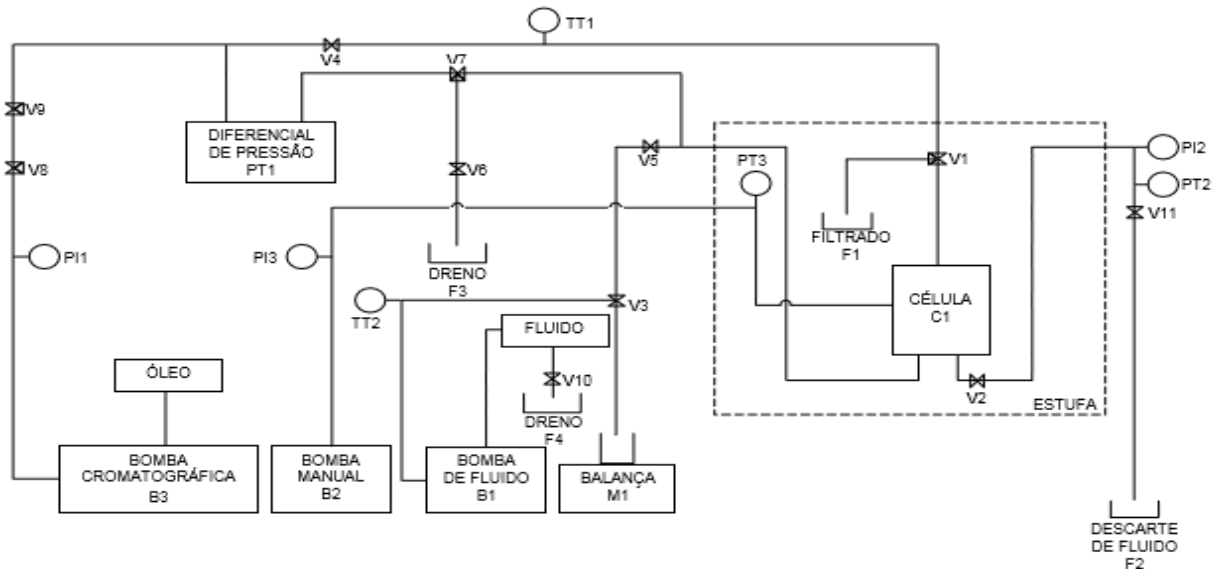
Para conseguir uma especificação ideal de CO<sub>2</sub> nas condições de processos adequadas ao simulador físico e ao laboratório, fez-se necessário a busca por alguns fornecedores, dentre eles a *White Martins* e Linde Gás, no qual a *White Martins* foi o fornecedor que atende a necessidade para o projeto devido a pressão do serviço está adequada ao projeto.

#### O entendimento do funcionamento do simulador físico de danos:

O fluxo do óleo mineral, que simula o óleo da formação, é feito a partir de uma bomba cromatográfica que trabalha a vazão constante. O óleo bombeado vai até a célula onde passa pelo corpo de prova no sentido axial em seguida é coletado em um recipiente posicionado sobre uma balança. A balança é utilizada para medir a vazão mássica do óleo. Um transdutor de pressão indica o diferencial de pressão entre a linha de alta (entrada da célula) e a linha de baixa (saída) (COSTA, 2004). A célula encontra-se dentro da estufa e se constitui de um corpo cilíndrico onde internamente fica acondicionado o corpo de prova. Este fica envolvido em uma camisa de elastômero e submetido, em condições de operação do equipamento, a uma pressão externa superior a pressão de bombeio do óleo mineral de modo a evitar o fluxo radial e forçar a passagem do óleo pelo plugue no sentido axial topo-fundo (COSTA, 2004). A pressurização da camisa de borracha dentro da

célula é feita a partir de bombas manuais hidráulicas. O óleo empregado nesses equipamentos (óleo hidráulico) é impulsionado manualmente pelas bombas hidráulicas até uma determinada pressão (pressão de confinamento), superior à pressão de teste. A Figura 3 indica etapas importantes no processo de entendimento do funcionamento do simulador físico de danos ao processo:

Figura 3: Fluxograma do simulador físico de dano.



Fonte: (COSTA, 2004)

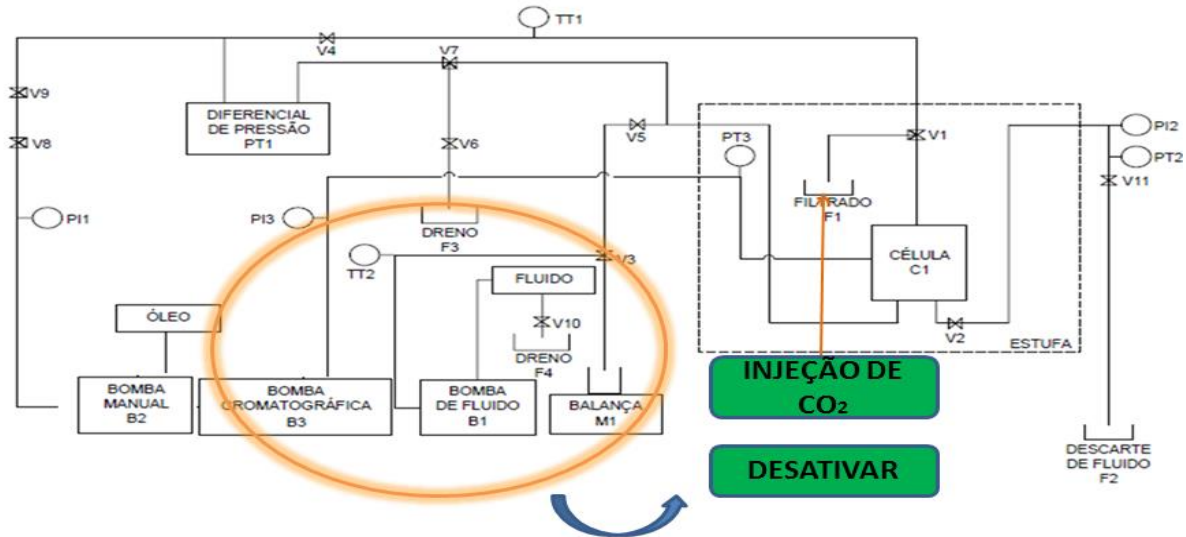
O fluido de teste é bombeado por meio de uma bomba adequada ao tipo de fluido utilizado. O sentido de fluxo dentro da célula é tangencial à base do corpo de prova, sendo, ao final do percurso, coletado em um recipiente de descarte. Parte do fluido que penetra no corpo de prova (filtrado) atravessa-o perpendicularmente e é coletado pelo topo em um recipiente (coletor de filtrado) posicionado dentro da estufa (COSTA, 2004).

#### A proposta de adaptação do simulador no cenário do pré-sal:

A Figura 4, indica as etapas importantes no processo de entendimento do funcionamento do simulador físico e as adaptações do mesmo para injeção de CO<sub>2</sub>. O fluxo do óleo mineral, que imita o óleo da formação, é feito a partir de uma bomba manual. Que suga o óleo vindo do recipiente para dentro do cilindro e depois empurra para o sistema até a célula na forma axial (de cima para baixo). Um transdutor de pressão indica a diferença de pressão entre a linha de alta (entrada da célula) e a linha de baixa (saída). A célula encontra-se dentro da estufa e se constitui de um corpo cilíndrico onde interiormente fica acomodado os plugs. Esse fica acondicionado em uma camisa de elastômero. A uma pressão de bombeio do óleo mineral de modo a evitar o fluxo no sentido radial e força o mesmo na passagem do óleo pelo plug. O CO<sub>2</sub> é injetado no processo a partir do cilindro envasado pela White Martins na posição axial com pressão superior a de confinamento para evitar a

contra pressão. A função do CO<sub>2</sub> é empurrar o óleo da rocha e melhorar o fator de recuperação da mesma. A partir desse simulador de reservatório podem-se obter diferentes resultados.

Figura 4: Adaptação do simulador no cenário do pré-sal.



Fonte Adaptadas pelos os autores.

Caracterização da rocha antes da injeção de CO<sub>2</sub> para ver: Porosidade; Permeabilidade; Propriedades da rocha após a injeção de CO<sub>2</sub>; Analisar o fator de recuperação; Materiais necessários para um novo projeto de simulador: Quantidades necessárias para utilizar na adaptação do novo projeto: 1Pç-Manômetro 6.000 PSI Saída Reta 1/4"φ 2.1/2 Com Glicerina Para Óleo; 1 Pç - Manômetro Para Pressão De óleo 3.000 PSI;1 Pç - Manômetro 1.500 PSI; Pç - Balança de Precisão Adventurer - 4100g divisão de 0,01;1 Pç - Bomba Hidráulica Manual de Alumínio 0,33 Litros - ABS300;12m- Tubing Inox 316 S/C 12.7x1,65 6.000 PSI (1/2"OD);4- Pç Válvula Monobloco 3 Vias 1/2" Rosca X Rosca 6.000 PSI Al 316;3- Pç Válvula Esfera 2 Vias 1/2" Roscado Rosca Fêmea Al 316 6.000 PSI;2- Pç Válvula Agulha Com Rosca Fêmea Al 316 1/2".

#### Avaliação das condições operacionais e de processo:

A partir de estudos feitos do simulador físico de danos, no qual chegou-se a conclusão de que as condições de operações aplicado no mesmo, seria as ideais para a adaptação do simulador de reservatório do Pré-sal. Custo da rocha: A Tabela 3, informa os dados que serão aplicados uma pressão de confinamento de 3000 psi, uma vazão de óleo media de 1 cm<sup>3</sup>/min. Apesar da estufa permitir o controle de temperatura, os experimentos foram conduzidos à temperatura ambiente do laboratório, de em torno de 25 C°, (COSTA, 2004). A Tabela 4, mostra os custos que foram necessários para adaptar a rocha ao simulador.

Tabela 3: Condições operacionais utilizada no simulador.

<i>Propriedade</i>	<i>valores</i>	<b>variáveis de custo</b>	<b>valores</b>
<i>Pressão de confinamento</i>	<i>3000 psi</i>	Valor da rocha	Doado pela UFBA
<i>Vazão do óleo</i>	<i>1 cm<sup>3</sup>/min</i>	Mão de obra	(R\$) 80,00
<i>temperatura</i>	<i>25°C</i>	Equipamento para corte	(R\$) 20,00
<i>Massa específica</i>	<i>0,8473 g/cm<sup>3</sup></i>	<b>Custo total</b>	<b>(R\$) 100,00</b>
<i>Viscosidade</i>	<i>20 cp</i>		

Fonte: Costa, 2004. Fonte: Marmoraria Carnaíba.

A amostra da rocha calcária foi cedida pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Para adequar a rocha nas especificações necessárias da aplicação ao simulador físico do reservatório do Pré-sal, foi preciso fazer os cortes com as dimensões adequadas do corpo de prova (plugues).

Resultados dos custos. A Tabela 5, apresenta os custos para o óleo mineral e sintético, custo do cilindro do CO<sub>2</sub>, custos dos materiais e equipamentos, pode-se observar o custo com aluguel e o valor do cilindro de 33Kg de CO<sub>2</sub>.

Tabela 5: Custo com aluguel e cilindro de CO<sub>2</sub>

<b>Tipo de Óleo</b>	<b>Custo por litro</b>	<b>Variáveis</b>	<b>WHITE MARTINS</b>	<b>LINDE GÁS</b>
Óleo mineral	R\$ 20,00	Aluguel do cilindro mensal	R\$ 35,00	R\$ 27,00
Óleo sintético	R\$ 27,00	Valor do cilindro de 33 kg	R\$ 412,50	R\$ 346,50
		<b>Custo total</b>	<b>R\$ 447,50</b>	<b>R\$ 373,50</b>

Diante de várias pesquisas conclui-se que o melhor óleo para o projeto seria o óleo mineral, pois é derivado do próprio petróleo. É resultado da junção de vários hidrocarbonetos de tamanhos diversos encontrados no petróleo bruto com boa molécula de viscosidade. De acordo com os dados da Tabela 5, a *White Martins* é o fornecedor que atende melhor as necessidades para o projeto, em relação ao custo benefício do cilindro e possui pressões elevadas na casa dos 3.000 psi.

Custos dos materiais e equipamentos: A Tabela 7, informa o custo de todos os materiais necessários após pesquisas com fornecedores para montar o simulador físico de reservatório do pré-sal.

Tabela 7: Custo dos materiais e equipamentos

<b>Descrição dos materiais /custo</b>	<b>Qtd/Un Preço</b>	<b>Unit. Total/ R\$</b>
Tubing inox 316 S/C 12,7x 1,65 6.000 PSI (1/2" OD)	12 m 64,50	774,00
Válvula monobloco 3 vias 1/ 2" Rosca x Rosca 6.000 PSI AL316	4 pç 735,00	2.940,00
6.000 PSI	3 pç 375,00	1.125,00
Válvula agulha com Rosca fêmea AL 316 ."	2 pç 270,00	540,00

Manômetro 6.000 PSI saída reta .” φ 2.1/2 com Glicerina	1 Pc 127,50	127,50
Manômetro para pressão de óleo 3.000 PSI	1 pç 127,50	127,50
Manômetro 1500 PSI	1 pç 127,50	127,50
Balança de precisão Adventurer- 4100g divisão de 0,01	1 Un 3.289,68	3.289,68
Bomba hidráulica manual de Alumínio 0,33 litros- ABS300	1 Un 1.166,76	1.166,76
	<b>Total R\$10.217,94</b>	

Fonte: Autoria própria

Para a cotação dos preços dos materiais e equipamentos partiu-se com o seguinte procedimento :Cotação do tubing, foi necessário informar o tipo de aço, temperatura e pressão de confinamento. Para cotação das válvulas e conexões, foram informadas as pressões do sistema. Cotação dos manômetros foram informadas as pressões do sistema. Para cotação da bomba hidráulica manual, foi necessário informar a pressão e vazão do sistema. A cotação da balança de precisão foi necessária informa densidade do óleo. De acordo com as informações cotadas o custo total do projeto foi R\$15.4017,64, sendo R\$504,5 da matéria-prima; R\$10.217,94 de material; 3.534,77 de mão de obra e 1.060,43 de projeto.

### Conclusões

Diante da pesquisa, da revisão de literatura posta e do levantamento de matérias primas e custo do projeto atestou-se a viabilidade do mesmo. Concluiu-se, que o projeto do simulador físico de reservatório do pré-sal, é economicamente viável. Pois, é uma oportunidade vindoura de construir um laboratório de pesquisa. Visando o crescimento de qualquer instituição de ensino que queira investir neste setor de pesquisa, podendo contribuir para sociedade, através de desenvolvimento de pesquisa mais aprofundada sobre a maximização de um reservatório de petróleo, e ao mesmo tempo aumentar o fator de recuperação do poço de petróleo utilizando o método de recuperação de CO<sub>2</sub>.

### Referências

- DOROBK, S.; PICCOLI, L.; COFFEY, B.; ADAMS, A. **Carbonate Rock- forming Processes in the Pre- salt ‘Sag’ Successions of Camps Basin, Offshore Brazil**: 2012.
- ESTRELA, G. O.; AZEVEDO, R. L. M.; FORMIGLI FILHO, J. M. **Pré-sal: Conhecimento estratégico e Oportunidades**”, in J. P. R. Veloso (coord.). Teatro Mágico da Cultura, Crise Global e Oportunidades do Brasil. Rio de Janeiro, José Olympio, 2009, pp 67- 78.
- GAUTO, Marcelo. **Petróleo S. A. Exploração, Produção, Refino e Derivados**. Rio de Janeiro: editora Ciência moderna ltda, 2011.