

A Teoria das Restrições no Processo de Refino de Petróleo

Autores

ODILANEI MORAIS DOS SANTOS

PETROBRAS / Universidade Federal do Rio de Janeiro

PAULA DANYELLE ALMEIDA DA SILVA

PETROBRAS - Universidade Federal do Rio de Janeiro

KELLEN GONÇALVES FURTADO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

SAMUEL COGAN

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Resumo

Este trabalho tem por objetivo demonstrar, por meio de um estudo exploratório com delineamento bibliográfico, a aplicação dos conceitos da teoria das restrições na indústria de refino de petróleo. Não se pretende identificar as restrições inerentes ao processo produtivo, mas evidenciar de forma abrangente que o processo de gestão da TOC pode ser empregado nesse tipo de indústria, o que será feito por meio de uma simulação. De acordo com os princípios da TOC, os esforços da empresa devem ser direcionados visando a otimização do seu resultado global, concentrando-se na identificação e gerenciamento de suas restrições. Na indústria do refino não é diferente. O resultado global da refinaria será dado pelo *Ganho no Refino menos as Despesas Operacionais do Refino*, sendo o Ganho a soma das vendas dos diversos derivados *menos* a soma dos custos dos diversos tipos de petróleo processados. Ao se decidir qual o *mix* de petróleo a ser produzido levando-se em consideração que o sistema apresenta restrições, o lucro global da refinaria foi maior do que o lucro gerado pelo *mix* de petróleo apontado pela decisão nos moldes tradicionais e sem levar em conta a existência de restrições no sistema, ou seja, unicamente no ganho gerado por cada produto. Dessa forma, evidenciou-se que com a utilização dos princípios da TOC pode-se obter um resultado mais favorável à empresa.

1. Introdução

É inegável que o petróleo, juntamente com o gás natural, representam a principal fonte de energia primária consumida no mundo e que movimentam bilhões de dólares diariamente em atividades industriais gigantescas, passando a ser imprescindível às facilidades e comodidades da vida moderna.

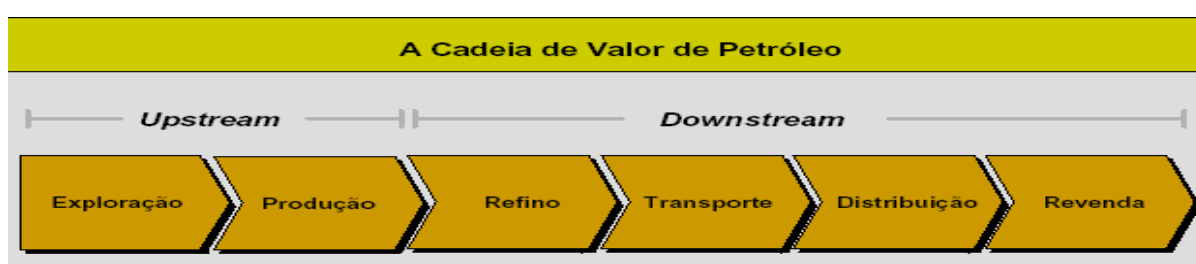
De acordo com o *BP Statistical Review of World Energy 2004*, o consumo de petróleo e gás natural representou 61,3% de toda a energia consumida no mundo em 2003, ficando a frente de outras fontes como o Carvão, com 26,5% e Energia Nuclear e Hidroelétrica, ambas com 6,1%. No Brasil, a importância do petróleo e do gás natural como fonte de energia primária também é relevante, sendo que sua participação em relação a toda energia consumida em 2003, representou cerca de 54,3% (Hidroelétrica, 38%; Carvão, 11% e Energia Nuclear, 3%).

A indústria petrolífera está dividida basicamente em dois seguimentos: o de *upstream*, responsável pelas atividades de exploração e produção (E&P); e que tem por objetivo a obtenção do petróleo e gás natural – e o segmento *downstream*, responsável pelas atividades de refino, transporte, distribuição e comercialização.

As empresas que atuam nos dois segmentos são conhecidas como verticalmente integradas e as que atuam em apenas um dos segmentos, independentes. No Brasil tem-se a Petrobras que atua de forma integrada, ou seja, “do poço ao posto” e possui onze refinarias no território brasileiro. Como empresas independentes, têm-se as Refinarias Manguinhos e Ipiranga. A figura 1 esquematiza a cadeia produtiva de uma empresa petrolífera integrada.

Conforme Mariano (2005), o petróleo em seu estado bruto tem pouquíssimas aplicações, servindo quase que somente como óleo combustível. Para que o potencial energético do petróleo seja aproveitado ao máximo, ele deve ser submetido a uma série de processos, a fim de se desdobrar nos seus diversos derivados.

O processo que consiste na obtenção desses derivados, por meio do beneficiamento do petróleo, consiste no chamado **refino do petróleo**, que tem por objetivo gerar produtos de maior interesse comercial.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 1 – Cadeia Produtiva de Empresas Petrolíferas Integradas

De forma geral, nos processos de refinação busca-se a obtenção da maior quantidade possível de derivados de alto valor comercial, ao menor custo operacional possível, com máxima qualidade e a minimização ao máximo de geração dos produtos de pequenos valores de mercado.

A teoria das restrições (do inglês *theory of constraints* ou simplesmente TOC) visa otimizar a produção, por meio da identificação das restrições (gargalos) do sistema, com o objetivo de tentar minimizá-los ou eliminá-los e, em seguida, com base nos preços vigentes no mercado, identificar os melhores produtos em termos de ganho (*throughput*) pelo fator limitativo da produção.

A TOC propõe, assim, uma seqüência coerente de passos que deveriam ser seguidos por qualquer organização que pretenda adentrar num processo focalizado de aprimoramento contínuo. Tal processo, descrito por Goldratt (1994), foi desenvolvido com o intuito de capacitar as empresas a reconhecerem sistematicamente os principais elementos do sistema que devem ser aprimorados (as restrições) a fim de se melhorar o desempenho da organização como um todo.

Assim, o objetivo deste trabalho é demonstrar, de forma genérica, a aplicação da teoria das restrições em uma indústria altamente complexa como é o caso das refinarias de petróleo e fornecer subsídios para aplicações empíricas mais profundas do tema. Para que o objetivo seja alcançado, será desenvolvido um estudo exploratório com delineamento bibliográfico.

Conforme Gil (1996, p. 45) “a pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito, construir hipóteses ou aprimorar idéias”. A temática “teoria das restrições” já vem sendo há muito tempo objeto de estudo de vários pesquisadores e sob diversos enfoques. Contudo, estudos aplicados à indústria petrolífera ainda são pouco difundidos no campo da Contabilidade Decisória e,

sendo assim, a presente pesquisa caracteriza-se como uma pesquisa exploratória na medida em que se buscará a aplicação dos conceitos da TOC à indústria de refino de petróleo.

Quanto ao delineamento da pesquisa, a mesma se caracteriza como bibliográfica, tendo em vista a necessidade de explicitação do que é o petróleo, seus tipos, características etc, além de como se dar o processo de refino do petróleo para obtenção dos diversos derivados. Aliado a isso, a pesquisa é suportada pelos conceitos de base da teoria das restrições. Para solidificar os conceitos apresentados e atingir plenamente os objetivos propostos, serão realizadas simulações da aplicação da TOC à indústria de refino de petróleo.

Dada a complexidade da indústria objeto de estudo e de ser este um estudo introdutório, as limitações de escopo referem-se justamente em não tratar as refinarias em todas as suas complexidades, ou seja, partiu-se para uma abordagem simplificada, em que toda refinaria é composta de um conjunto de unidades de destilação para a obtenção dos derivados.

2. O Petróleo

Conforme Cardoso (2005, p. 16) o petróleo tem origem a partir da decomposição da matéria orgânica resultante de restos de animais e plantas juntamente com rochas sedimentares, que após longo tempo sofrendo ações bacterianas e químicas, ativadas pelo aumento de pressão e temperatura, acabam por se transformar em hidrocarbonetos.

Dessa forma, o petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos cujas características variam amplamente em função de suas condições geológicas de formação, as quais originam diferentes tipos de óleo com características diversas.

As principais características de um ‘tipo’ de petróleo são, conforme Martins (2005, p. 31) a *densidade* do óleo, o tipo de hidrocarboneto – ou *base* – predominante na mistura e o *teor de enxofre*.

De acordo com o autor, em relação à densidade, os diferentes tipos de petróleo são classificados segundo uma gradação que vai de *leves* (menos densos) a *pesados* (mais densos). De acordo com as normas do American Petroleum Institute, essa classificação é conhecida também como “grau API”.

Segundo essa classificação, quanto menor a densidade do petróleo, maior o grau API e conseqüentemente maior o valor comercial do petróleo, tendo em vista que será possível produzir uma parcela maior de derivados nobres, de elevado valor comercial, como a gasolina, o diesel e o GLP, relativamente a outro tipo de óleo, mais pesado (menor grau API). O grau API é maior quando se diz que o petróleo é mais leve. Petróleos com grau API maior que 32° são considerados leves; entre 24° e 31° API, são médios; abaixo de 23° API, são considerados pesados; e com grau API igual ou inferior a 10°, são petróleos extrapesados.

Seguindo as características apontadas por Martins (2005) quanto à base, ou tipo de hidrocarboneto predominante, o petróleo é classificado em três categorias: *parafínicos*, *naftênicos* ou *aromáticos*. Os hidrocarbonetos parafínicos são mais comuns e quando refinados produzem frações de gasolina de qualidade inferior (menor octanagem) do que aquela produzida com óleos do tipo aromático ou naftênico. No entanto, os óleos parafínicos são mais adequados à produção de ceras e lubrificantes, o que faz com que seu valor de mercado possa oscilar em função da demanda por esses derivados.

Por fim, quanto ao teor de enxofre, o petróleo pode ser classificado como *doce* ou *ácido*. São classificados como ácidos os óleos com percentual de enxofre superior a 0,5%; estes têm seu valor comercial reduzido devido a corrosividade e toxicidade do enxofre, que

resultam em maiores custos no processo de refino. A Tabela 1 relaciona a classificação do petróleo de acordo com o teor de enxofre e do grau API.

De acordo com Mariano (2005), as características do petróleo têm grande influência sobre a escolha das técnicas que serão adotadas para a sua refinação, e de um modo geral são elas que irão determinar quais serão os produtos que melhor poderão ser obtidos de um dado petróleo. Nem todos os derivados podem ser produzidos com qualidade e de forma economicamente viável a partir de qualquer tipo de petróleo. Também não existe uma técnica única de refino que seja aplicável a qualquer tipo de óleo bruto.

Categoria	% Enxofre	Grau API
Leve com baixo teor de enxofre	0-0,5	>32
Pesado com médio teor de enxofre	0,35-1,1	>24
Leve com elevado teor de enxofre	>1,1	>32
Pesado com elevado teor de enxofre	>1,1	24-33
Muito pesado com elevado teor de enxofre	>0,7	0-23

Fonte: TAVARES (2005, p. 60)

Tabela 1 – Classificação do Petróleo Segundo o Grau API e o Teor de Enxofre

Para Tavares (2005), a dificuldade observada na indústria do refino, de adequação da oferta à demanda, deve-se ao fato de que uma vez construída a refinaria, sua flexibilidade é muito limitada, pois a utilização de óleos com características diferentes daquelas para as quais a mesma foi inicialmente projetada implica em perdas ou custos significativos e que o mesmo é válido para o perfil da produção de uma refinaria que, mantidas as características da planta, não pode ser alterado sem que a qualidade ou a especificação dos derivados seja afetada.

A Tabela 2 a seguir relaciona alguns dos diversos tipos de petróleos espalhados pelo mundo.

País	Nome do Petróleo	Grau API	% de Enxofre	País	Nome do Petróleo	Grau API	% de Enxofre
Austrália	Griffin	54,6	0,01	Canadá	Cold Lake	13,2	4,11
	Wandoo	19,3	0,14		Rangeland South	39,5	0,75
China	Shengli	24,0	0,90	Irã	Soroosh	18,1	3,30
	Nanghai	39,5	0,05		Rostam	35,9	1,55
Indonésia	Arun	54,3	0,01	Venezuela	Anaco Wax	40,5	0,24
	Duri	21,5	0,20		Boscan	10,1	5,50
Iraque	Kirluk Blend	35,1	1,97	Mar do Norte	Curlew	51,3	0,07
Brasil	Marlim	19,2	0,78		Alba	19,4	1,24

Fonte: TAVARES (2005, p. 61)

Tabela 2 – Grau API e Teor de Enxofre de Diferentes Petróleos do Mundo

A importância dos tipos de petróleo é fundamental para definir as operações que serão usadas em uma dada refinaria para produzir os derivados desejados. Por essa razão, as refinarias podem ser muito diferentes. De qualquer forma, o processo de refino do petróleo em uma refinaria será descrito, de maneira geral, a seguir.

3. Processo de Refino do Petróleo

Refinar petróleo é o processo de separar do mineral bruto as frações desejadas, processá-las e lhes dar acabamento, de modo a se obter produtos de grande interesse comercial. Segundo Mariano (2005, p. 10), esse beneficiamento engloba etapas físicas e químicas de separação que originam as grandes frações de destilação. Estas frações são então processadas através de uma outra série de etapas de separação e conversão que fornecem os derivados finais do petróleo.

Durante o refino, o petróleo é submetido a uma série de processos, definidos segundo o tipo de petróleo utilizado (que geralmente é uma mistura, ou *blend*, de um ou mais tipos diferentes de petróleo) e os derivados que se pretende produzir. Como não existem dois petróleos idênticos, suas diferenças vão influenciar de forma decisiva os rendimentos e a qualidade das frações que serão obtidas de cada petróleo.

De um modo geral, uma refinaria, ao ser planejada e construída, pode se destinar a dois objetivos básicos:

- produção de produtos energéticos; e,
- produção de produtos não-energéticos e petroquímicos.

O primeiro objetivo constitui a maior parte dos casos, pois a demanda por combustíveis é muito maior do que a demanda por outros produtos. São produtos energéticos: gás combustível; gás liquefeito; gasolina de aviação; gasolina automotiva; querosene de aviação; querosene de iluminação; óleo diesel; óleos combustíveis; coque verde, dentre outros.

O segundo objetivo é a maximização da produção de frações básicas de lubrificantes, parafinas e matérias-primas para a indústria petroquímica. Estes produtos possuem valores agregados muito superiores ao dos combustíveis, o que confere aos refinadores altas rentabilidades, embora os investimentos envolvidos sejam também muito mais altos do que os necessários para o caso anterior. São exemplos de produtos: gás residual; solventes; naftas; gasóleo petroquímico; óleos lubrificantes; óleos isolantes; graxas; parafinas; resíduo aromático; resíduo asfáltico; asfaltos, dentre outros.

Conforme Mariano (2005, p.13) as maiores operações unitárias que são tipicamente encontradas nas refinarias são os chamados **Processos de Separação e de Conversão**. Os processos de separação têm por finalidade desmembrar o petróleo em suas frações mais básicas, ou processar uma fração que tenha sido anteriormente gerada, para que dela se remova um grupo específico de compostos.

Os processos de separação são sempre de natureza física. Modificações de temperatura e/ou pressão ou o uso de diferentes solventes efetuam a separação desejada. As principais operações dessa natureza que são encontradas em uma refinaria são: dessalinização; destilação atmosférica; destilação a vácuo; desasfaltação a propano; desaromatização a furfural; desparafinação; desoleificação.

Os processos de conversão têm como objetivo transformar determinadas frações do petróleo em outras de maior interesse econômico. Ao contrário dos processos de separação, os processos de conversão possuem natureza química e se utilizam reações de quebra, reagrupamento ou reestruturação molecular. Os processos de conversão normalmente possuem elevada rentabilidade, pois transformam frações de baixo valor comercial, como é o caso dos gasóleos e dos resíduos de destilação, em outras frações de maiores valores de mercado. A presença de unidades de conversão nas refinarias eleva complexidade da mesma. Os principais processos de conversão utilizados no refino de petróleo são o craqueamento térmico; visco-redução; coqueamento; craqueamento catalítico; hidrocraqueamento catalítico;

hidrotratamento/hidroprocessamento; alquilação; isomerização; polimerização; reforma catalítica; e tratamentos químicos.

Segundo Abadie *Apud* Tavares (2005, p. 28) os processos existentes em uma refinaria ainda podem ser classificados em:

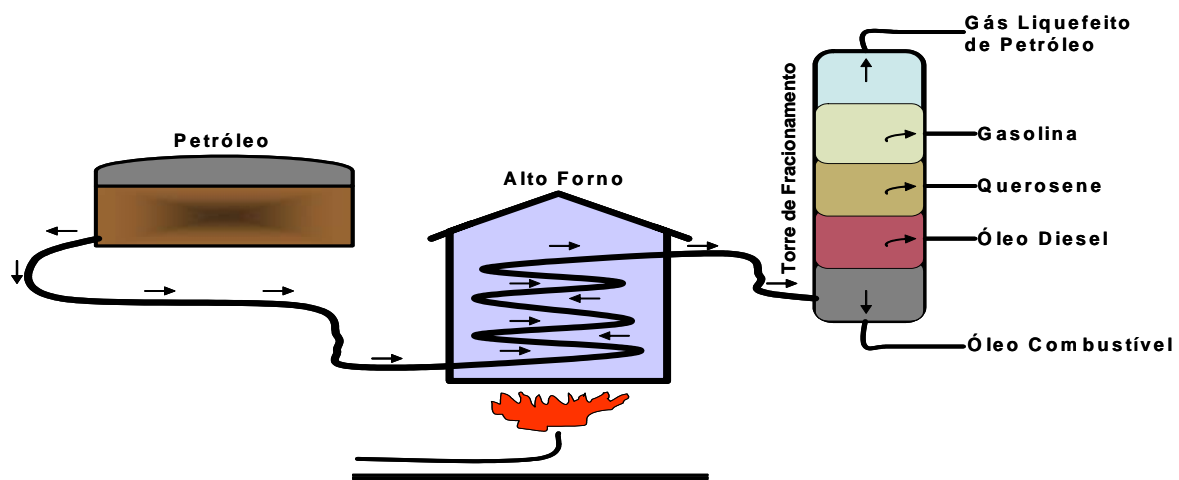
- **Processos de tratamento:** são de natureza química, porém não provocam reações profundas nas frações e causam a melhoria de cortes de produtos semi-acabados, eliminando ou reduzindo impurezas presentes em suas constituições; são bastante utilizados em frações leves (gases, GLP e naftas) não requerendo condições operacionais severas nem de grandes investimentos para sua implantação

- **Processos auxiliares:** são aqueles que se destinam a fornecer insumos à operação dos outros anteriormente citados ou tratar rejeitos desses mesmos processos (geração de hidrogênio, recuperação de enxofre, utilidades etc).

As unidades de destilação primária são responsáveis pelo processo principal de separação, sendo encontradas em todas as refinarias. No entanto, dificilmente são encontradas isoladamente, em virtude da quantidade limitada de derivados nobres produzidos por esse processo. O desenvolvimento tecnológico da indústria do refino de petróleo, através da introdução de novos processos de conversão, subseqüentes à destilação primária, permitiu que a produção de derivados, inicialmente em proporções fixas, se adaptasse à necessidade de processar diferentes tipos de petróleo e atender à demanda por derivados com características específicas de qualidade e quantidade.

Dessa forma, conforme Tavares (2005, p.28), a definição ideal dos processos a serem utilizados e da forma de combiná-los em uma refinaria depende das características do óleo bruto disponível e da demanda esperada de derivados, havendo ainda um “trade-off” entre a escolha irreversível de processos que exigem menor volume inicial de capital e o uso de um tipo de petróleo de melhor qualidade (mais caro); ou processos que demandam maior volume inicial de capital, mas que utilizam óleos de qualidade inferior (mais baratos).

Além disso, é preciso que determinada refinaria atenda à demanda de seu mercado, tanto qualitativa, quanto quantitativamente, e que opere de modo a processar a gama de tipos de petróleo que lhe servem de matéria-prima da forma mais econômica e racional possível.



Fonte: adaptado de CARDOSO (2005, p. 70).

Figura 2 – Processo Simplificado de Refino de Petróleo

A figura 2 demonstra como uma refinaria opera, de forma simplificada, para a obtenção dos derivados desejados. Trata-se do processo de separação denominado de destilação atmosférica. O petróleo é aquecido a altas temperaturas (em torno de 400°C) e na torre de fracionamento, o petróleo bruto começa a desprender vapores. À medida que os vapores se elevam encontram os diversos “pratos” de condensação existente na torre. Nas partes mais altas ficam depositadas as frações de gás, nafta e gasolina; nas intermediárias, querosene e óleo diesel; e no fundo da torre, as frações de ponto de ebulição mais elevado, como o óleo combustível ou cru reduzido. (CARDOSO, 2005, p. 69-71).

4. A Teoria das Restrições – TOC

Os conceitos da teoria das restrições foram desenvolvidos pelo físico israelense Eliyahu Goldratt na década de oitenta, com o objetivo apresentar os fundamentos para a criação e implementação de um sistema computacional capaz de suportar problemas e resolvê-los no nível do chão de fábrica.

De acordo com os pressupostos presentes na teoria das restrições, restrição é qualquer fator que limita um sistema em conseguir maior desempenho em relação a sua meta. Fazendo-se uma analogia com uma corrente, restrição seria o elo mais fraco. “Todo sistema possui pelo menos uma restrição ou que toda corrente possui sempre um elo mais fraco.” (GRANADOS e SOUZA, 2003).

Pode-se encontrar dois tipos de restrição: a primeira física, ou seja, restrição de recurso que engloba mercado, fornecedor, máquinas, materiais, pedido, projeto e pessoas – sendo um gargalo um caso particular de restrição que tem capacidade insuficiente. Portanto, recurso gargalo seria aquele cuja capacidade é inferior à demanda colocada nele. Ao contrário, recurso não-gargalo é aquele cuja capacidade é maior que a demanda colocada nele, portanto não restringe a atuação do sistema.

A segunda é a restrição de política que é formada por normas, procedimentos e práticas usuais do passado, que restringe a empresa de aumentar seus lucros. As políticas são, no geral, respostas a uma problemática ocorrida há muito tempo e são quase sempre aceitas e seguidas sem pensar. As restrições resultantes de políticas podem ser de difícil identificação e se identificadas não são fáceis de elevar.

Conforme Cogan (1999), algumas das prescrições da teoria das restrições não são novas, como é o caso da maximização do ganho por unidade de restrição e do uso dos resultados sobre a base do custeio variáveis, mas que a contribuição da TOC em seu todo é interessante e merece um destaque no universo da gestão estratégica de custos.

O processo descrito por Goldratt (1994), foi desenvolvido com o intuito de capacitar as empresas a reconhecerem sistematicamente os principais elementos do sistema que devem ser aprimorados a fim de se melhorar o desempenho da organização como um todo, por meio de procedimento simples e intuitivo, constituído por cinco passos denominado de *processo decisório da teoria das restrições*, que são:

1. Identificar as restrições ou gargalos do sistema, uma vez que o resultado global da empresa depende da utilização do recurso restrição;
2. Explorar as restrições do sistema, visando maximizar a utilização das restrições do sistema e, conseqüentemente, o resultado global da empresa;
3. Subordinar tudo à decisão anterior, tendo em vista que os recursos não restrição devem ter seu nível de utilização subordinado ao nível de utilização do recurso restrição, de maneira a não comprometer a máxima utilização deste recurso e a obtenção do lucro máximo;

4. Elevar as restrições do sistema, visando aumentar a capacidade das restrições do sistema por meio da elevação da capacidade do sistema como um todo. Em geral, ao se elevar à capacidade do recurso, aparecerão outras restrições, uma vez que sem restrições o lucro é infinito;

5. Se nas etapas anteriores uma restrição for quebrada, volte à etapa número um, mas não permita que a inércia se torne uma restrição no sistema.

O início de todo o processo passa a ser a identificação da restrição ou das restrições do sistema para se determinar o fator limitante do sistema. Conhecido os elementos de restrição do sistema é preciso explorar ao máximo os recursos disponíveis para, só então, dar seqüência ao processo.

Após a definição de como as restrições serão exploradas, os recursos não limitadores (não-restrição) deverão ser subordinados às restrições do sistema, ou seja, as necessidades das restrições é que determinaram o programa de produção das não-restrições, as quais deverão fornecer tudo o que as restrições precisam na medida exata, nem mais nem menos, para que não haja perda de recursos.

Conforme Souza et al. (2004), se a meta de toda organização com fins lucrativos é ganhar dinheiro hoje e sempre, torna-se imperativo ter-se indicadores de desempenho financeiro que meçam o grau de atendimento da meta. A TOC, dessa maneira, se concentra em três variáveis: ganho, inventário e despesas operacionais.

Ganho – corresponde ao índice no qual o sistema gera dinheiro por meio das vendas. Representa a diferença entre as vendas reais e o custo do material direto, sendo este considerado como a única despesa variável. Segundo Cogan (1999), corresponde à margem de contribuição do custeio variável onde todas as despesas são fixas à exceção do material direto.

Inventário/Investimento – corresponde a todo o dinheiro que o sistema investe na compra de coisas que o sistema pretende vender.

Despesas Operacionais – corresponde a todo dinheiro que o sistema gasta para transformar inventário em ganho, ou seja, são os custos de conversão, incluindo todo os custos com empregados, sejam diretos ou indiretos.

A TOC faz uso integrado destas três medidas como fatores para tomada de decisão. Elas devem sempre se voltar para o impacto global dentro da empresa, devendo, portanto, serem sempre analisadas conjuntamente.

Partindo do pressuposto que a meta de qualquer empresa é ganhar dinheiro hoje e no futuro e que qualquer outro objetivo é secundário, Goldratt (1999) define que as medidas de desempenho para possibilitar a avaliação do cumprimento da meta são:

- **Lucro líquido** – é a medida absoluta de desempenho da empresa, que visa identificar claramente quanto dinheiro ela está gerando num determinado período, e seria medida pela expressão: $Lucro\ Líquido = Ganho - Despesas\ Operacionais$; e,

- **Retorno sobre investimento** – é a medida relativa de desempenho da empresa, permitindo verificar a relevância do lucro líquido face ao montante investido, por meio da expressão: $Retorno\ sobre\ investimento = (Ganho - Despesas\ Operacionais) / Inventário$.

O modelo de produção proposto pela TOC é denominado de Tambor-Pulmão-Corda (TPC). Ele parte do princípio que para construir um plano de produção deve-se, primeiramente, identificar as principais restrições que interferem no resultado da empresa. Para a TOC, os recursos produtivos devem se vistos como uma cadeia de elos dependentes,

que devem operar de maneira compartilhada procurando sempre o objetivo principal de uma empresa que é ganhar dinheiro hoje e sempre.

O **Tambor** é a programação da produção feita para o recurso restritivo que mais limita o ganho e a possibilidade da empresa ganhar mais dinheiro; o **Pulmão** é um tempo/estoque de segurança contra possíveis variações estatísticas que poderiam interferir no ganho da empresa; e a **Corda** é um sistema de informação que permite a subordinação da liberação de matéria-prima ao Tambor, liberando material um pulmão de tempo antes do momento de chegada deste na restrição.

Segundo Souza et al. (2004), existem três tipos de pulmão que podem ser utilizados: **Pulmão de Restrição**, que procura proteger a restrição de eventuais problemas no processo anterior a ela; **Pulmão de Mercado/Expedição**, que visa proteger o desempenho na entrega dos produtos evitando atrasos aos clientes; **Pulmão de Montagem**, que procura garantir que as peças que não passam pelos recursos restritivos cheguem de forma sincronizada nos setores onde ocorrerá o processo de montagem final dos produtos.

5. A Teoria das Restrições no Processo de Refino de Petróleo

Conforme já demonstrado, a capacidade de produção de derivados nobres, de alto valor comercial por uma refinaria depende do tipo de petróleo utilizado e da variedade e capacidade de suas unidades de separação, conversão e tratamento. Quanto maior o número destas unidades e a sua capacidade (medida em relação à capacidade de destilação primária) maior a complexidade da refinaria e, conseqüentemente, a sua capacidade de produção de derivados nobres.

Os custos (fixos e variáveis) relacionados com as unidades de refino de petróleo dependem de alguns parâmetros, dentre os quais se destacam a idade, a capacidade de processamento, o fator de utilização e a complexidade da refinaria. Os custos fixos representam a parcela mais significativa dos custos de processamento da refinaria, desconsiderando os custos de matéria-prima (petróleo). No caso da indústria do refino de petróleo, a participação do petróleo bruto e outras matérias-primas utilizadas podem representar mais de 85% do custo total por barril refinado. (MASSERON, 1990 *Apud* TAVARES, 2005, p. 47).

Em relação à receita, a mesma varia em função da qualidade dos derivados produzidos, uma vez que derivados de qualidade superior são mais valorizados. A rentabilidade de refinarias mais complexas é então, objetivamente, diferencial, pois depende da diferença de preços entre os óleos de melhor e pior qualidade (custos), e do diferencial de preços (receita) entre os produtos de qualidade inferior e superior no mercado de combustíveis. Graficamente, podem-se visualizar as relações existentes entre as receitas e os custos associados na Figura 3.

Com isso, os resultados de uma refinaria, de acordo com a TOC, será dado por:

$$\text{Lucro Global da Refinaria} = \text{Ganhos no Refino} - \text{Despesas Operacionais do Refino}$$

$$\text{Ganhos no Refino} = \text{Receitas de Vendas de Derivado} - \text{Custo do Petróleo Processado}$$

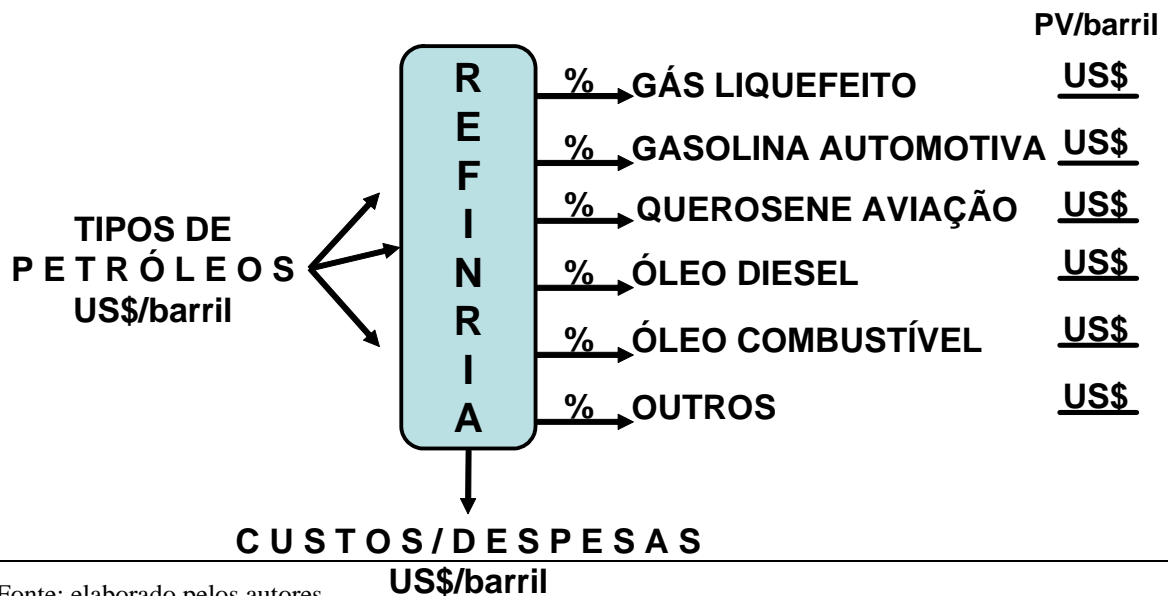
$$\text{Receitas Vendas Derivados} = \sum PV_{p/\text{barril Derivado}_n} \times Q_{\text{dte barril Vendido Derivado}_n}$$

$$\text{Custo Petróleo Processado} = \sum \text{Preço barril Petróleo}_n \times \text{Qdte barril Processado Petróleo}_n$$

$$\text{Despesas Operacionais do Refino} = \sum \text{Custos Diretos(*) e Indiretos} + \text{Despesas}$$

(*) Não inclui os custos da matéria-prima

Mas ligado a esses fatores, tem-se a capacidade das unidades de processamento das refinarias, que quanto mais complexa for uma refinaria, maior quantidade de derivados nobres poderá ser produzida, mesmo com petróleos mais pesados.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 3 – Esquema de Lucro Global de uma Refinaria

Como afirma Tavares (2005, p. 61), a qualidade do petróleo mundial tem se deteriorado muito nos últimos anos. Se por um lado à matéria-prima está se tornando mais pesada e com maior teor de enxofre, por outro, a demanda por derivados leves/médios (gasolina e diesel) e com teores de enxofre cada vez mais reduzidos vem aumentando. Estas restrições forçam a indústria do petróleo a investir em unidades de refino mais complexas para atender a estas especificações.

O grau de complexidade de uma refinaria exerce influência sobre os custos de capital e sobre os custos variáveis, na medida em que refinarias mais complexas, capazes de processar óleos mais baratos (mais pesados), também consomem maior quantidade de catalisadores e outros reagentes químicos, contrabalançando, em parte, a vantagem de custos diretos decorrente da utilização de um tipo de petróleo de qualidade inferior (petróleos mais baratos).

Segundo Masseron (1990) *Apud* Tavares (2005), os investimentos relativos a unidades de processo podem dobrar de uma refinaria complexa para uma refinaria ultracomplexa de mesma capacidade de destilação. Os investimentos em instalações gerais aumentam em cerca de 35%. Já os custos de uma refinaria ultracomplexa podem ser 72% superiores aos custos de uma refinaria complexa, devido, principalmente, ao aumento dos custos fixos.

O lucro global de uma refinaria (também chamada de margem de refino) mede, por um lado, a rentabilidade das refinarias, a possibilidade de ela obter recursos financeiros para investimento, a curto prazo, no contexto específico em que ela se insere, e depende dos preços da matéria-prima, dos derivados e dos seus custos. Por outro lado, as margens de refino tendem a ser pouco atrativas devido à estreita diferença entre preços de petróleo e de seus derivados.

Um outro fator determinante na análise das restrições de uma refinaria, aliado aos fatores já comentado, diz respeito à demanda do mercado consumidor. No caso do mercado brasileiro, nos últimos cinco anos a produção de óleo diesel vem sendo o principal derivado produzido, encerrando 2004 com participação de 38,29% em relação ao total produzido (Tabela 3). Isto se explica em função do perfil da demanda brasileira, onde o setor de transportes está fortemente baseado no modal rodoviário, o que implica no grande consumo deste energético

Em seguida, vêm as produções da gasolina automotiva e do óleo combustível, que em 2004, representavam, respectivamente, 17,60% e 16,51% da produção nacional de derivados. O óleo combustível é um dos derivados de menor valor no mercado, e que vem sendo substituído progressivamente, nos últimos anos, pelo gás natural.

O petróleo brasileiro é um petróleo predominantemente médio a pesado. Com este tipo de petróleo sendo processado, o percentual de produtos pesados é elevado, ainda que a demanda por estes tipos de produtos não exista ou esteja em redução. Esta questão justifica o investimento crescente em unidades de conversão “fundo de barril” nas refinarias existentes.

PRODUTO (%) de Produção	2000	2001	2002	2003	2004
Asfalto	1,90	1,67	1,76	1,20	1,42
Coque	2,11	1,84	1,92	1,88	1,74
Gasolina Automotiva	20,01	19,86	19,80	18,67	17,60
Gasolina de Aviação	0,09	0,10	0,08	0,08	0,08
GLP	7,40	7,63	8,02	8,34	8,14
Lubrificante	0,80	0,73	0,81	0,83	0,71
Nafta	10,97	10,20	9,28	9,47	8,75
Óleo Combustível	17,30	18,03	17,26	16,58	16,51
Óleo Diesel	33,15	34,02	34,80	36,11	38,29
Parafina	0,16	0,12	0,14	0,14	0,14
QAV	4,03	3,82	3,82	4,01	4,15
Querosene Iluminação	0,22	0,23	0,24	0,20	0,11
Solvente	0,55	0,64	0,72	0,82	0,83
Outros	1,31	1,11	1,36	1,67	1,52

Fonte: Agência Nacional do Petróleo – Dados mensais de produção de derivados.

Tabela 3 – Perfil de Produção de Derivados das Refinarias Brasileiras

As análises dessas restrições são fundamentais para formação do lucro global das refinarias, sendo fator determinante a sua sobrevivência.

6. Simulação da Aplicação da TOC em uma Refinaria

Para solidificar os conceitos apresentados e atingir plenamente os objetivos propostos, a seguir será realizada uma simulação da aplicação da TOC à indústria de refino de petróleo.

A Refinaria utiliza três tipos de petróleo, sendo a quantidade de matéria-prima, o custo da matéria-prima (custo do barril de petróleo) e as despesas/custos operacionais do processamento do petróleo descritos conforme quadro abaixo.

Tipo de Petróleo	Quantidade Estoque (barris)	Custo (\$) / barril	Despesas \$/barril
Petróleo Leve	40.000	50,00	\$7,50
Petróleo Pesado	50.000	40,00	\$7,90
Petróleo Ultra Pesado	30.000	30,00	\$8,50

Os derivados são frações do petróleo bruto processado, que para efeito de simulação, é apresentado no quadro a seguir, a quantidade gerada de derivados, por barril processado, além do preço de venda de cada um.

Tipo de Petróleo	Derivados (em barril)				
	Gás Liquefeito	Gasolina Automotiva	Querosene Aviação	Diesel	Óleo Combustível
Petróleo Leve	0,10	0,50	0,05	0,35	0,00
Petróleo Pesado	0,05	0,30	0,05	0,20	0,40
Petróleo Ultra Pesado	0,02	0,20	0,03	0,15	0,60
Preço de Venda (\$/barril)	\$33,50	\$68,00	\$64,30	\$63,50	\$29,50

Existe demanda para consumo de toda a produção da Refinaria e as receitas geradas na comercialização dos derivados serão demonstradas abaixo (para essa simulação considerou-se o processamento de um barril de petróleo, para efeito dos cálculos unitários).

Tipo de Petróleo	Receitas de Vendas dos Derivados					Receitas por Tipo de Petróleo
	Gás Liquefeito	Gasolina Automotiva	Querosene Aviação	Diesel	Óleo Combustível	
Petróleo Leve	\$3,35	\$34,00	\$3,22	\$22,23	-	\$62,79
Petróleo Pesado	\$1,68	\$27,20	\$3,22	\$12,70	\$ 8,85	\$53,64
Petróleo Ultra Pesado	\$0,67	\$13,60	\$1,93	\$ 9,53	\$17,70	\$43,42

Com essas informações é possível identificar o produto mais lucrativo, ou seja, qual o lucro global para cada tipo de petróleo.

Tipo Petróleo	Receitas Vendas	Custo Petróleo	Ganho no Refino	Despesas Operacionais	Lucro Global
Petróleo Leve	\$62,79	\$50,00	\$12,79	\$7,50	\$5,29
Petróleo Pesado	\$53,64	\$40,00	\$13,64	\$7,90	\$5,74
Petróleo Ultra Pesado	\$43,42	\$30,00	\$13,42	\$8,50	\$4,92

Analisando o lucro global, o processamento do petróleo pesado é aquele que proporciona o maior lucro por barril. Contudo é necessário primeiramente identificar as restrições do sistema, que no caso desta simulação é a capacidade de processamento das unidades.

A Refinaria possui duas unidades de processamento: uma unidade de destilação atmosférica e uma unidade de destilação a vácuo. Todas as duas unidades possuem capacidade instalada para processar a quantidade de petróleo demandada. Contudo, existem

restrições quanto a disponibilidade de cada unidade em relação ao tempo gasto para processar o petróleo, tendo em vista que o tempo gasto para o processamento são diferentes para os diversos tipos de petróleo.

Unidade de Processamento	Petróleo Leve	Petróleo Pesado	Petróleo Ultra Pesado	Carga Diária	Capacidade Disponível	% da Carga Diária
Destilação Atmosférica	40.000x1,1s = 44.000s	50.000x0,70s = 35.000s	30.000x0,6s = 18.000s	97.000 seg./dia	86.400 seg./dia	112%
Destilação a Vácuo	-	50.000x0,9s = 45.000s	30.000x1,2s = 36.000s	81.000 seg./dia	86.400 seg./dia	94%

Dessa forma, o processamento do petróleo na unidade de destilação atmosférica constitui a restrição do sistema, tendo em vista que são necessários 97.000 segundos/dia para processar a quantidade demandada de petróleo, contra uma capacidade de 86.400 segundos/dia (24h x 60min x 60seg).

Para definir o *mix* de petróleo a ser processado, deve-se considerar o lucro global obtido pelo tempo de restrição. O produtor que tiver o maior ganho por tempo de restrição é aquele que deve ter sua produção incentivada.

Petróleo	Leve	Pesado	Ultra Pesado
Lucro global	\$5,29 (2°)	\$5,74 (1°)	\$4,92 (3°)
Tempo na restrição	1,1 segundos	0,7 segundos	0,6 segundos
Ganho por tempo de restrição	\$4,81/seg	\$8,20/seg	\$8,21/seg
Ordem de Preferência	3°	2°	1°

Analisando o lucro global com o tempo utilizado para processar o petróleo na restrição o produto (petróleo) que apresenta o maior ganho por recursos restritos é o petróleo ultra pesado, seguido do pesado e do leve, mudando a ordem se a decisão fosse tomada apenas com base no lucro global. Com isso, é possível definir o *mix* ótimo de petróleo a ser processado que levará a Refinaria a obter a maximização do lucro global.

Processando toda a carga de petróleo ultra pesado (30.000 barris) gasta-se 18.000 seg. dos 86.400 seg. disponíveis, resultando numa sobra de 68.400 seg. Seguindo a ordem de preferência, com o processamento do petróleo pesado (50.000 barris) gasta-se 35.000 seg., resultando numa sobra de 33.400 seg. Como a quantidade disponível não é suficiente para o processamento de toda a carga do petróleo leve, calcula-se a quantidade de barris correspondentes a 33.400 seg, que são 30.364 barris (33.400 seg / 1,1 seg/barril).

Definido o *mix* ótimo de petróleo é possível conhecer o lucro global obtido pela refinaria.

Petróleo	Barris Processados	Lucro por Barril	Lucro p/ Petróleo
Leve	30.364	\$5,29	\$160.623,64
Pesado	50.000	\$5,74	\$287.000,00
Ultra Pesado	30.000	\$4,92	\$147.720,00
Lucro Global da Refinaria			\$595.343,64

Para efeito de comparação e considerando o lucro por barril como parâmetro de decisão e sem levar em conta a restrição do sistema, o lucro global da refinaria seria de \$559.329,33, conforme demonstrado a seguir.

Petróleo	Barris Processados	Lucro por Barril	Lucro p/ Petróleo
Leve	40.000	\$5,29	\$211.600,00
Pesado	50.000	\$5,74	\$287.000,00
Ultra Pesado	12.333	\$4,92	\$ 60.729,33
Lucro Global da Refinaria			\$559.329,33

É importante frisar que os dados aqui apresentados são meramente hipotéticos e foram utilizados unicamente para as simulações, não representando, assim, dados reais do processo de refino de petróleo, o que só seria possível com uma pesquisa empírica nesse sentido.

7. Considerações Finais

Teve-se o objetivo de demonstrar, por meio de um estudo exploratório, a aplicação dos conceitos da teoria das restrições em uma indústria altamente complexa como é o caso das refinarias de petróleo. Não se pretendeu identificar as restrições inerentes ao processo produtivo, dado o escopo da pesquisa, mas evidenciar de forma abrangente que o processo de gestão da TOC pode ser empregado nesse tipo de indústria.

De acordo com os princípios da TOC, os esforços da empresa devem ser concentrados nos pontos do sistema (restrições) que determinam seu desempenho, ou seja, para a otimização do resultado global, a empresa deve concentrar-se em suas restrições e não na otimização das partes de um sistema.

Na indústria do refino não é diferente. Para a otimização do resultado global, a refinaria deve ter em vista basicamente o tipo de petróleo utilizado, as unidades de processamento possuídas, os derivados produzidos e o mercado a ser atendido.

No mercado mundial, de um modo geral, a qualidade do petróleo tem se deteriorado muito nos últimos anos, tornando-se cada vez mais pesado e com altos teores de enxofre, mas a demanda por derivados leves/médios (gasolina e diesel) e com teores de enxofre cada vez mais reduzidos vem aumentando. Por este motivo, as vantagens absolutas de custos das empresas estabelecidas na aquisição de matérias-primas, assim como de outros fatores de produção (capital e serviços de transporte/armazenamento, principalmente), podem representar uma importante barreira à lucratividade da indústria de refino.

Estas restrições forçam a indústria do petróleo a investir em unidades de refino mais complexas e que possam processar petróleos pesados e gerar produtos leves e médios, e unidades de tratamento que permitam reduzir o teor de enxofre dos derivados (em função de restrições ambientais mais severas) produzidos e estabilizar os derivados leves e médios produzidos.

Contudo, as refinarias são intensivas em capital e que necessitam de longos períodos para serem construídas, uma vez construídas, são pouco flexíveis, ou seja, necessitam de significativos investimentos para que haja uma modificação significativa no seu perfil de produção. Algumas grandes empresas de petróleo começaram a reconhecer o impacto das fracas ligações da refinaria de petróleo com o mercado de derivados de petróleo e passaram a promover uma maior integração do refino com o marketing e com a distribuição, o que proporciona uma melhor previsão das tendências da demanda, uma programação mais efetiva da produção da refinaria, um melhor atendimento das exigências de qualidade dos clientes, diminuição dos custos de estocagem na etapa de distribuição e maior satisfação dos clientes

Além dessas alternativas visando superar possíveis restrições, tem-se também a integração com a produção de petróleo bruto, que é considerada, na indústria do refino, uma forma de proteção contra a própria oscilação desses preços e dos preços dos derivados, ou seja, uma forma de absorver internamente tais flutuações e manter a rentabilidade da empresa como um todo. Entretanto, investimentos no setor de produção e exploração (E&P) exigem grandes quantidades de investimentos num negócio em que o risco é elevadíssimo (o de não encontrar petróleo).

O campo de pesquisa vislumbrado com este estudo é vasto. O estudo apresentado constitui uma pesquisa preliminar que visa a abrir caminhos para outras abordagens. Assim, como sugestão para futuras pesquisas indica-se a aplicação empírica em uma refinaria; utilização de pesquisa operacional para definir a carga ótima de petróleo e/ou dos derivados produzidos, dentre outros.

8. Referências Bibliográficas

- ANP – Agência Nacional do Petróleo. **Dados mensais de produção de derivados**. Disponível em < http://www.anp.gov.br/petro/refino_dados.asp>. Acesso em: 31.10.2005.
- BRITISH PETROLEUM. **BP Statistical Review of World Energy 2004**. Disponível em <www.bp.com>. Acesso em 11.02.2005.
- CARDOSO, Luiz Cláudio. **Petróleo do poço ao posto**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.
- COGAN, Samuel. Teoria das restrições versus custeio baseado em atividades: um aparente conflito. In: Congresso Brasileiro de Custos, 6., 1999, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABC/FEA/USP, 1999. (CD ROM).
- COGAN, Samuel. Teoria das restrições versus custeio baseado-em-atividades: uma questão de curto- ou de longo-prazo?. In: Congresso de Controladoria e Contabilidade, 5., 2005, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: FEA/USP, 2005. (CD ROM).
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1996.
- GOLDRATT, Eliyahu M. **Mais que sorte, um processo de raciocínio**. São Paulo: Educator, 1994.
- GOLDRATT, Eliyahu M. **A Síndrome do Palheiro**. São Paulo: Claudiney Fullmann, 1991.
- GRANADOS, Claudinei Gaona e SOUZA, Fernando Bernardi de. Proposta de um modelo conceitual de análise de viabilidade econômica considerando a teoria das restrições e a teoria das opções reais. In Simpósio de Engenharia de Produção - SIMPEP, 10., 2003, Bauru. **Anais ...** Bauru: UNESP, 2003. (CD ROM).
- MARIANO, Jacqueline Barbosa. **Impactos ambientais do refino do petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.
- MARTINS, Cristiano de Almeida. **Introdução da concorrência e barreiras à entrada na atividade de refino de petróleo no Brasil**. Dissertação de Mestrado em Economia. Rio de Janeiro: Instituto de Economia/UFRJ, 2003.
- SOUZA, Fernando Bernardi de. *et. al.* Utilização da abordagem da teoria das restrições na gestão da cadeia de suprimentos: uma revisão conceitual. In Simpósio de Engenharia de Produção - SIMPEP, 11., 2004, Bauru. **Anais ...** Bauru: UNESP, 2004. (CD ROM).
- TAVARES, Marina Elisabete Espinho. **Análise do refino no Brasil: estado e perspectiva – uma análise “cross-section”**. Tese de Doutorado em Ciências em Planejamento Energético. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.