

IBP1485\_07

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA REDUÇÃO DO  
CONSUMO DE ENERGIA EM OLEODUTOS

Aníbal Fernandes<sup>1</sup>, Adilson Santiago<sup>2</sup>, Luis F. G. Pires<sup>3</sup>, Cláudio  
Veloso<sup>4</sup>

**Copyright 2007, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*, realizada no período de 2 a 4 de outubro de 2007, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*.

---

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo estabelecer um procedimento para avaliar o consumo de energia empregada no bombeamento de oleodutos e definir as estratégias operacionais que permitam otimizar o uso de energia, reduzindo custos e, portanto melhorando a competitividade da empresa.

É notório que o custo de energia elétrica utilizada nos terminais e estações de bombeamento representa um elevado percentual na tarifa de transporte de hidrocarbonetos. O monitoramento da potência utilizada e o cálculo do consumo específico de energia são necessários para a operação eficiente de um sistema de transporte. A segurança operacional também deve ser considerada em estudos desta natureza.

Para atingir este objetivo, uma planilha eletrônica foi desenvolvida para simular as condições operacionais de um duto em regime permanente, levando em consideração os diversos alinhamentos e arranjos de bombeamento possíveis, bem como a variação do produto transportado. Os valores calculados de potência requerida para cada situação e as vazões obtidas são associados às tarifas de energia de forma a se obter o custo específico de energia para o transporte do produto. Com estas informações e a programação com os volumes a serem transportados, é possível determinar a estratégia operacional que produziria uma redução de custo. A metodologia foi aplicada ao oleoduto OSVAT para todos os arranjos de bombeamento possíveis, em função das vazões viáveis do oleoduto, para cada alinhamento. Diferenças significativas nos custos foram observadas dependendo do arranjo de bombas utilizado, e uma nova solução foi testada através de um estudo preliminar de viabilidade técnica e econômica.

## Abstract

The study's objective establishes a procedure to avail the energy consumption used in the oil pipeline pumping stations and define the most economic operational modes that can optimize the energy usage, reducing the costs, and raising the enterprise's competitive.

It's notorious that energy cost applied in pump station plants and terminals represents a high contribution of the hydrocarbon products transfer price. The power monitoring and the calculation of the specific energy consumption are necessary for a high efficiency transport system. The security conditions also must be considered due the study nature.

To accomplish this objective a spreadsheet was developed to simulate the pipeline operational conditions in the steady state, taking in account the several paths or alignments between terminal and refineries, the pumps arrangement, the change of product. The spreadsheet calculates the power required to each pipeline condition and respective volume rates that are associated with the energy prices to result the specific energy cost of the product being transported. With this information and the pipeline diary program which lists the volumes transported, it's possible to determine the operational plan that would result the minor total cost. This methodology was applied in the OSVAT, a Brazilian crude oil pipeline, for all possible pump arrangements, with the volume rates allowable for each alignment. A considerable cost reduction was observed depending on selected pump arrangement; a new solution was tested using an economical study.

---

<sup>1</sup> Engenheiro de Equipamentos – Transpetro S.A

<sup>2</sup> Engenheiro de Equipamentos – Transpetro S.A

<sup>3</sup> Doutor Engenheiro Mecânico – PUC-Rio

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico – PUC-Rio

## 1. Introdução

Este estudo visa apresentar uma metodologia de simulação de oleodutos em regime permanente voltada para a redução do custo operacional de um oleoduto real. Foi empregada neste trabalho uma planilha de cálculo que foi originalmente concebida para treinamento de operadores da indústria dutoviária, conhecida como *CALCPRO – Cálculo de Regime Permanente em Oleodutos*. Esta planilha foi adaptada para obtenção de informações adicionais pertinentes ao estudo como o consumo energético em cada estação e o custo total de energia por operação. A planilha consiste em um simulador unidimensional em regime permanente para hidrocarbonetos líquidos, ou seja, petróleo e seus derivados claros e escuros.

O modelo em planilha representa matematicamente o oleoduto real através de suas propriedades geométricas (diâmetro, comprimento, espessura, rugosidade), dados dos equipamentos (curva das bombas e ponto de ajuste das válvulas de controle), condições operacionais nas extremidades (pressões e temperaturas), e a vazão em pontos de entrega intermediário, também conhecida como vazão de sangria. Na Figura 1 são ilustradas todas as variáveis de entrada, ações envolvidas na determinação da vazão de regime permanente e as variáveis de saída dependentes da vazão. O estudo de redução do consumo energético será aplicado a partir do modelo do OSVAT Petróleo que consiste em um sistema de oleodutos que abastece, a partir do Terminal de São Sebastião, as refinarias REVAP em São José dos Campos e REPLAN em Paulínea.

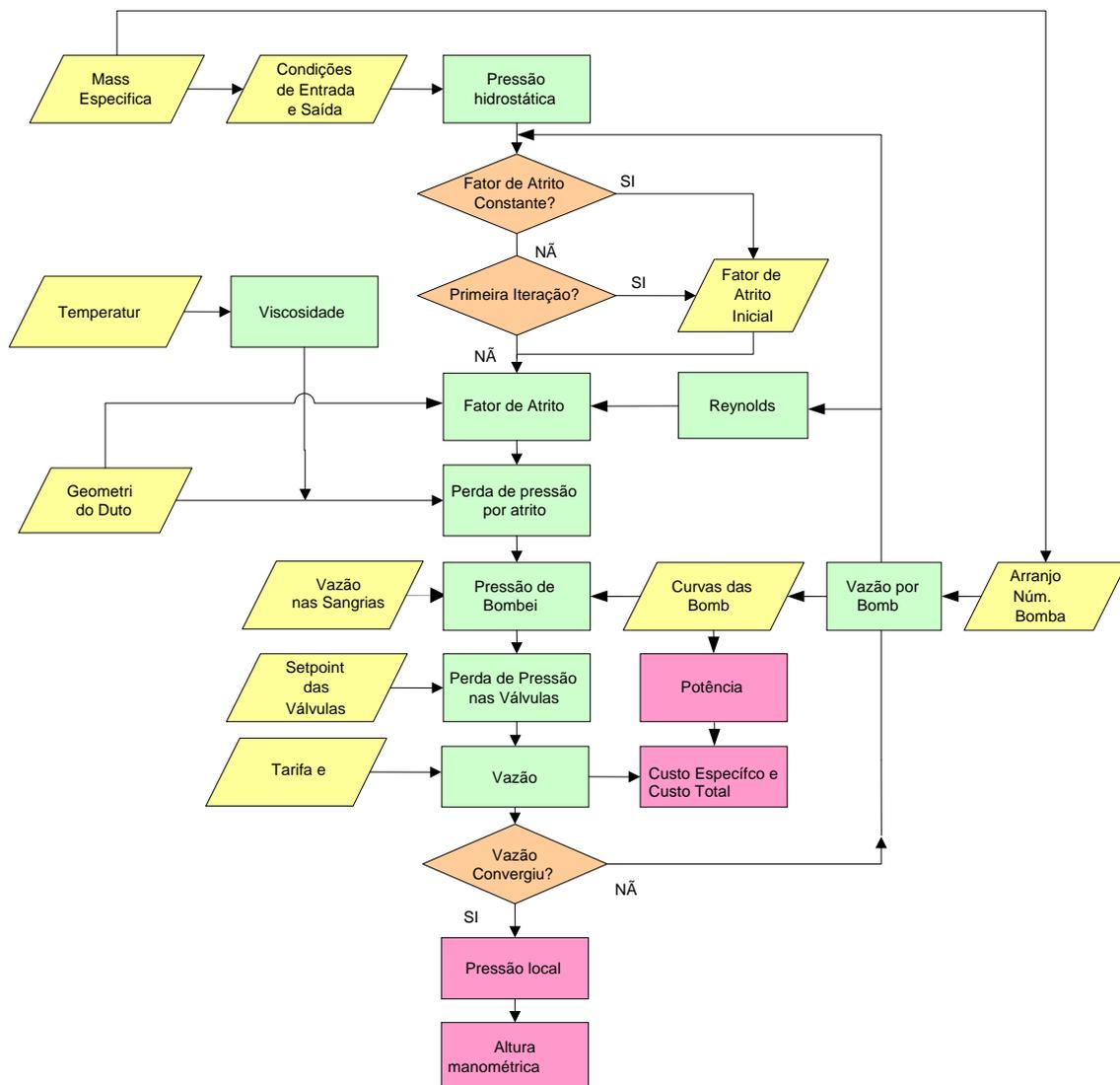


Figura 1 – Fluxograma de Ações da Planilha de Cálculo em Regime Permanente

## 2. Metodologia e Premissas do Cálculo

A planilha CALCPRO realiza o cálculo da vazão de regime permanente em oleodutos utilizando-se de macros em Visual Basic para implementação de rotina de cálculo iterativo. Na modelagem do estudo foram consideradas as seguintes metodologias e premissas de cálculo:

- Escoamento isotérmico e permanente
- Temperatura ambiente ao longo de toda extensão do duto igual a 20°C.
- Fator de atrito calculado com a correlação de Colebrook-White (Fox e McDonald, 1998)
- Curvas características das bombas são ajustadas em um polinômio do 3º grau, usando método de mínimos quadrados.
- Cálculo da potência corrigida em função da viscosidade do produto de acordo com a recomendação do Hydraulic Institute.
- As perdas de carga decorrentes de tubulação, curvas, válvulas e demais acidentes, nas instalações internas não foram calculadas, apenas as perdas nas válvulas de controle de descarga das bombas foram consideradas.

Para obtenção dos resultados do estudo de redução do custo descritos nesse estudo, foram adotadas as seguintes premissas visando à segurança operacional:

- Pressão local em regime permanente deve ser inferior a PMOA local para cada ponto ao longo de todo o duto. A pressão máxima operacional admissível – PMOA do duto, corresponde ao menor valor dentre a pressão máxima calculada em função da pressão de teste hidrostático (PTH) e a pressão máxima calculada em função da pressão nominal, determinada para uma tensão de 72% da tensão de escoamento do material do duto (SMYS).
- O limite de pressão das válvulas de controle na descarga das bombas é 95% do ponto de ajuste de pressão das válvulas de alívio existentes;
- O limite de pressão das válvulas de controle no recebimento é de 90% do ponto de ajuste de pressão das válvulas de alívio;
- A menor pressão ao longo do duto deve estar 2,0 kgf/cm<sup>2</sup> acima da pressão de vapor do produto considerado, para isso é feito o controle de pressão no recebimento de forma a forçar a condição de coluna fechada (CF).

Alguns recursos computacionais foram adicionados à interface original do CALCPRO para obtenção dos parâmetros necessários ao estudo de redução do consumo energético. Os parâmetros importantes ao estudo são o consumo por estação (kWh), custo específico de energia de transporte (R\$/m<sup>3</sup>), o custo total (R\$) e o tempo operacional (horas). O custo específico foi calculado a partir das tarifas atuais de energia elétrica (março, abril e maio de 2007) conforme apresentado na Tabela 1, e o custo total operacional estimado usando os volumes mensais movimentados de produto.

Além disto, a planilha permite a execução de vários casos em seqüência com possibilidade de troca de produtos, alinhamentos e arranjos de bombeio. No final da seqüência de cálculos, os resultados são atualizados de forma automática nas tabelas e gráficos comparativos para cada mês de operação.

**Tabela 1 – Custos de energia elétrica nas Estações de Bombeio**

Estação / Terminal	Custo (R\$/MWh)
TEBAR	220,43
Rio Pardo	231,61
Guararema	233,85

## 3. Descrição do Sistema de Dutos Analisado

O Sistema de Oleodutos OSVAT Petróleo é formado por quatro trechos, sendo eles: OSVAT 42" (35 km), OSVAT 38" (49,6 km), OSVAT 34" (36,2 km) e OSVAT 30" (152,8 km). Este sistema é utilizado para transporte de óleo cru do terminal de São Sebastião (TEBAR) para o terminal de Guararema (TEGUA), e de Guararema para as Refinarias de Paulínia (REPLAN) e Henrique Lage (REVAP), em São José dos Campos. O sistema ainda possui uma estação de bombeamento intermediária localizada em Rio Pardo (RPA) entre os terminais TEBAR e TEGUA. A Figura

2 apresenta um esquema simplificado do sistema de dutos, indicando os trechos de dutos e a localização dos conjuntos de bombas e válvulas controladoras.

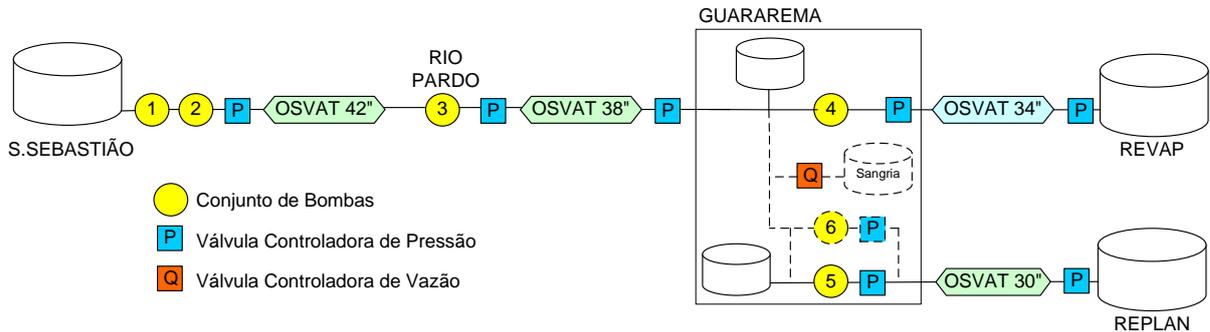


Figura 2 – Fluxograma esquemático do sistema OSVAT

Seguindo a ordenação da Figura 2 o terminal de São Sebastião possui três bombas auxiliares em paralelo com potência de 1500HP (1) e três bombas principais em paralelo de 8000HP (2). A estação intermediária de Rio Pardo é formada por um conjunto de três bombas principais em paralelo de 7000HP (3). A partir dos tanques do Terminal de Guararema é possível bombear para a REVAP ou para REPLAN. Em cada caso, utilizam-se conjuntos de bombas distintos. O alinhamento para a REVAP possui duas bombas principais em série de 2300HP (4), enquanto o alinhamento para a REPLAN possui seis bombas principais em paralelo de 3500HP (5), mas devido aos limites máximos operacionais do OSVAT 30”, apenas duas serão utilizadas no estudo. Foi incluído para este estudo uma nova interligação que permita abastecimento direto da REPLAN a partir de do Terminal de S.Sebastião. Neste caso foram modelados um novo conjunto de bombeio e uma válvula controladora de vazão (6) na operação com sangria, adequando o sistema para o recebimento mútuo em Guararema e na REPLAN. Na Figura 3 é exibida a tela de configuração do Terminal de São Sebastião contida na planilha CALCPRO do OSVAT.

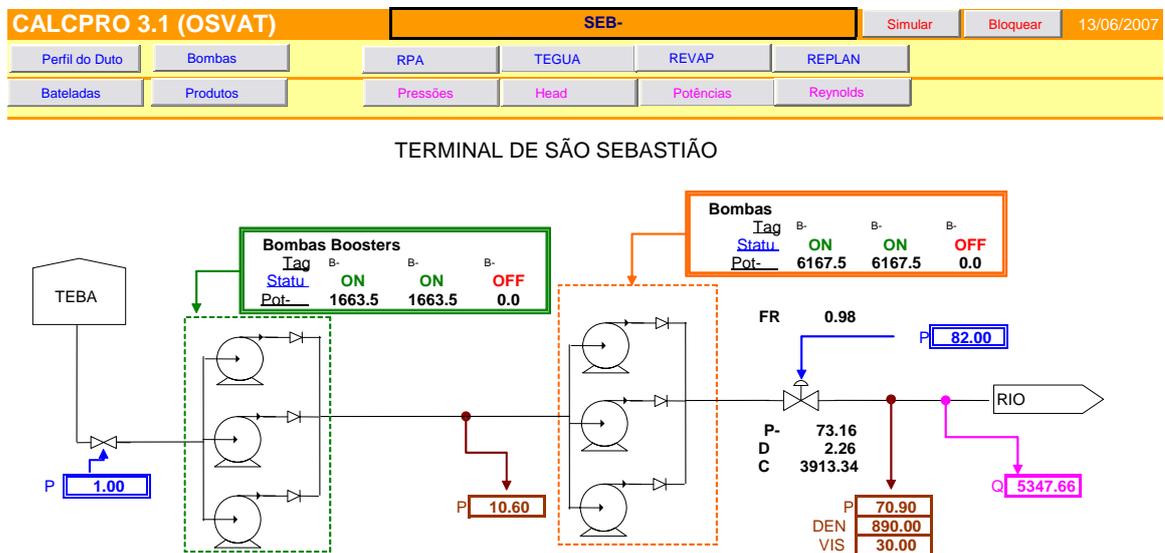


Figura 3 – Tela de Configuração do Terminal de São Sebastião – Sistema OSVAT Petróleo

#### 4. Resultados obtidos

As simulações foram realizadas com o objetivo de determinar o consumo de energia requerido em cada estação de bombeamento. Assim, foram simulados os custos com energia elétrica em função da vazão de operação levando-se em consideração as tarifas atuais com os fornecedores de energia.

Foram selecionados a partir do elenco de produtos transferidos pelo OSVAT, dois produtos com características diferentes. As propriedades dos produtos foram coletadas na temperatura ambiente, sendo que o produto denominado CRU-1 possui densidade de 0,890 e viscosidade de 30cP (0,03 Pa.s), e o outro produto, denominado CRU-2, possui

densidade de 0,910 e viscosidade de 130cP (0,13 Pa.s). As vazões obtidas no estudo são as máximas obtidas em cada configuração de bombas, de acordo os limites operacionais supracitados. O seguinte cenário será adotado no estudo, o abastecimento da REVAP dar-se-á com o produto mais pesado (CRU-2) e a refinaria REPLAN receberá o produto mais leve (CRU-1).

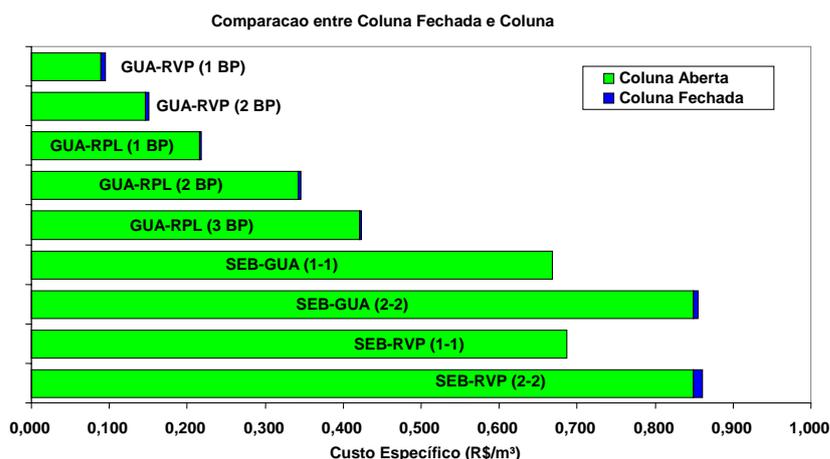
Atualmente 04 alinhamentos são realizados no sistema OSVAT Petróleo: S.Sebastião-Guararema, S.Sebastião-REVAP, Guararema-REVAP, Guararema-REPLAN. Os alinhamentos S.Sebastião-Guararema e S.Sebastião-REVAP operam com os seguintes arranjos de bombas: 2-2 (02 bombas principais em S.SEBASTIÃO e 02 em Rio Pardo) e 1-1 (01 bomba principal em S.SEBASTIÃO e 01 em Rio Pardo). O alinhamento Guararema-REVAP pelo OSVAT 34" opera com 1 ou 2 bombas principais, e o alinhamento Guararema-REPLAN pelo OSVAT 30" pode utilizar 1, 2, ou 3 bombas principais. Os volumes mensais para março, abril e maio neste sistema estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Volume Mensal Transportado para Refinarias**

Mês	Volume Mensal (m <sup>3</sup> )	
	REVAP	REPLAN
Março/2007	1.083.220	1.788.081
Abril/2007	1.204.020	1.720.747
Maio/2007	1.177.124	1.674.537

#### 4.1 Custo específico com coluna fechada e aberta

Como atualmente o duto opera com coluna aberta, inicialmente estudou-se o custo adicional atribuído à operação do duto com coluna fechada (CF). Esta situação é obtida alterando-se a pressão de ajuste da válvula de controle no recebimento. Esta condição é importante para segurança operacional, garantia de escoamento e precisão dos métodos de detecção de vazamentos do oleoduto. A Figura 4 apresenta um gráfico de barras com o comparativo de custo específico de CRU-1 (R\$/m<sup>3</sup>) para todas as operações existentes variando a quantidade de bombas para duas condições: coluna aberta (CA) e coluna fechada (CF). Nota-se que nas operações S.Sebastião-REVAP e S.Sebastião-Guararema com arranjo 1-1, não é possível operar com CF. Em todos os alinhamentos a diferença de custo é muito pequena, sendo a maior diferença de custo específico encontrada de 0,0116 R\$/m<sup>3</sup> na operação São Sebastião-REVAP no arranjo (2-2).



**Figura 4 – Custo Específico com Coluna Aberta e Coluna Fechada (CRU-1)**

#### 4.2 Custo específico entre produtos

Foi realizada também uma avaliação da faixa de variação do custo específico em função das características do produto. A Figura 5 apresenta um gráfico de barras com a comparação do custo específico entre os produtos para todos os alinhamentos previstos com coluna fechada, exceto as operações no arranjo 1-1 que somente opera com coluna aberta. Observa-se que o custo de transferência do produto CRU\_2 é maior para todos os alinhamentos estudados. A

maior diferença de custo específico é de 0,2158 R\$/m<sup>3</sup> e ocorre quando o duto opera no alinhamento S.Sebastião-Guararema com arranjo 1-1.

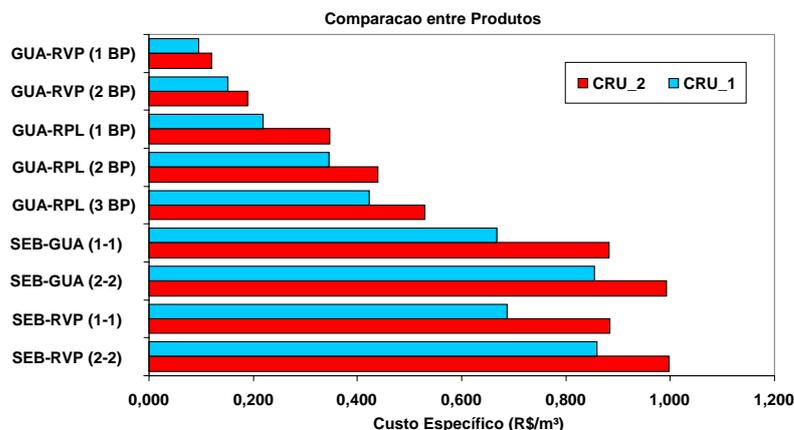


Figura 5 – Comparação de Custo Específico entre Produtos

#### 4.3 Custo Total com e sem Tancagem em Guararema para Abastecimento da REVAP

Por razões de logística de abastecimento existe a opção de tancagem do produto no terminal de Guararema, antes do envio ao seu destino final nas refinarias. Para o abastecimento da REVAP com tancagem no Terminal de Guararema duas operações são necessárias: S.Sebastião-Guararema e Guararema-REVAP, e quando não é necessária a tancagem de Guararema, o alinhamento S.Sebastião-REVAP é adotado. A Tabela 3 mostra a taxa de utilização do duto, que é a razão entre o tempo disponível e o tempo de transferência simulado, e o custo de cada operação para quatro condições possíveis de abastecimento da REVAP com CRU-2 durante março de 2007. Na Figura 6 é ilustrada a contribuição de cada estação para cada uma das condições. Todas as condições operacionais estudadas podem ser utilizadas, mas devido à alta taxa de utilização do sistema OSVAT, este deve operar na maior parte do tempo com alta vazão (arranjo 2-2).

Tabela 3 – Taxa de Utilização e Custo por Operação – Abastecimento REVAP (CRU-2) em março de 2007

Condição	Operação Trecho 1	% Uso	Custo (R\$)	Operação Trecho 2	% Uso	Custo (R\$)	Custo Total (R\$)
Sem tancagem e baixa vazão	SEB-RVP (1-1) CA	49,51	957.254,89				957.254,89
Com tancagem e baixa vazão	SEB-GUA (1-1) CA	49,50	957.058,09	GUA-RVP (1 BP) CA	43,6	123.063,50	1.080.121,59
Sem tancagem e alta vazão	SEB-RVP (2-2) CF	29,34	1.081.710,01				1.081.710,01
Com tancagem e alta vazão	SEB-GUA (2-2) CF	29,09	1.075.662,83	GUA-RVP (2 BP) CF	34,4	205.499,87	1.281.162,69

#### 4.4 Custo Total com e sem sangria em Guararema para Abastecimento da REPLAN

Nas condições atuais, a refinaria REPLAN somente pode ser abastecida através dos tanques no Terminal de Guararema, e deve ser realizado com duas operações: S.Sebastião-Guararema e Guararema-REPLAN. Para abastecimento direto da REPLAN, foi estudada uma nova interligação que habilite a operação com sangria no terminal de Guararema. Esta operação permitirá o recebimento mútuo em Guararema e na REPLAN. A melhor configuração para operação com sangria, a qual proporciona as maiores vazões, ocorre quando as bombas de SEB e RPA estão no arranjo 2-2, com sangria de 3000 m<sup>3</sup>/h no terminal de Guararema. Ainda assim, como não é possível trabalhar todo o tempo nesta operação o volume recebido em Guararema, será posteriormente transferido a REPLAN, com 02 ou 03 bombas principais (BPs).

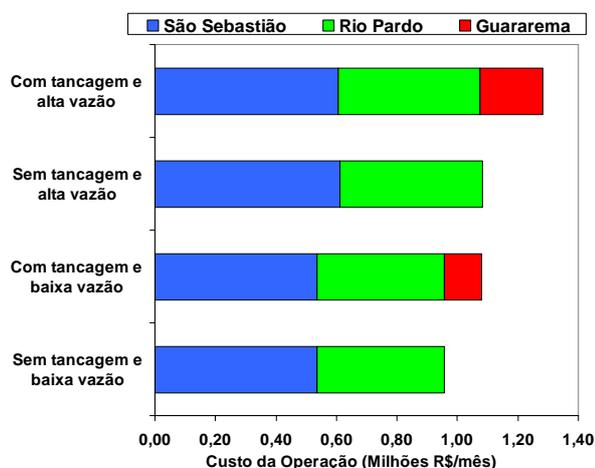
Durante as simulações verificou-se que as bombas existentes em Guararema operam com baixa eficiência (59%) quando fazem recalque no terminal de Guararema, por esta razão, um novo sistema de bombeio foi modelado

com eficiência estimada de 85%, o que gerou duas novas condições de abastecimento: (i) Com sangria e 01 bomba nova de recalque e (ii) Com sangria, 01 bomba nova para recalque e 02 bomba novas em série para envio a partir dos tanques de Guararema. Na Tabela 4 estão dispostos a taxa de utilização e o custo operacional obtido para cada uma das condições de abastecimento da REPLAN com óleo CRU-1 no mês de março de 2007. A Figura 7 ilustra o custo de cada estação para cada uma das operações analisadas.

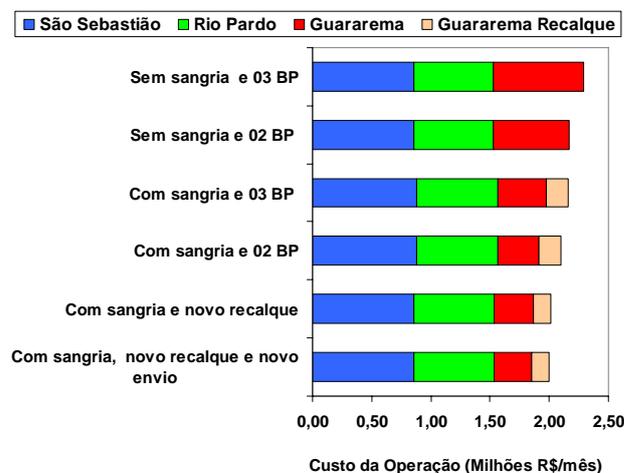
A Tabela 5 apresenta os custos de transporte para as duas refinarias nos diversos meses avaliados.

**Tabela 4 – Taxa de Utilização e Custo por Operação – Abastecimento REPLAN (CRU-1)**

Condição em Guararema	Operação Trecho 1	% Uso	Custo (R\$)	Operação Trecho 2	% Uso	Custo (R\$)	Custo Total (R\$)
Com tancagem total e 03 BP envio	SEB-GUA (2-2)	44,76	1.528.468,12	GUA-RPL 3 BP	86,56	762.754,04	2.291.222,16
Com tancagem total e 02 BP envio	SEB-GUA (2-2)	44,76	1.528.468,12	GUA-RPL 2 BP	92,26	642.029,74	<b>2.170.497,86</b>
Com sangria e 03 BP envio	SEB-RPL (2-2) 1 BP recalque	46,40	1.566.817,19	GUA-RPL 3 BP	93,19	593.790,51	2.160.607,70
Com sangria e 02 BP envio	SEB-RPL (2-2) 1 BP recalque	46,40	1.566.817,19	GUA-RPL 2 BP	96,27	528.532,79	2.095.349,98
Com sangria e novo recalque	SEB-RPL (2-2) 1 BP nova recalque	44,90	1.531.844,93	GUA-RPL 2 BP	93,17	482.381,20	<b>2.014.226,13</b>
Com sangria, novo recalque e novo envio	SEB-RPL (2-2) 1 BP nova recalque	44,90	1.531.844,93	GUA-RPL 2 BP novas em série	94,62	470.084,33	2.001.929,26



**Figura 6 – Custo Total por Estação em março de 2007 para abastecimento da REVAP**



**Figura 7 – Custo Total por Estação em março de 2007 para abastecimento da REPLAN**

**Tabela 5 – Custo Total de Transferência para Refinarias nos meses estudados**

Mês	REVAP com tancagem	REVAP sem tancagem	REPLAN sem sangria	REPLAN com sangria*
março	1.281.162,69	1.081.710,01	2.170.497,86	2.014.226,13
abril	1.424.037,14	1.202.341,62	2.088.763,14	1.938.376,15
maio	1.392.226,28	1.175.483,11	2.032.670,20	1.886.321,81

\* sangria com novo recalque (01 bomba de 2500 HP)

#### 4.5 Avaliação do investimento para implementação da operação com sangria em Guararema

O impacto das mudanças necessárias ao funcionamento do alinhamento S.Sebastião-REPLAN com sangria serão avaliadas sob o ponto de vista técnico-econômico nesta parte do estudo. Foi verificado que a interligação interna necessária à operação com sangria já existe no terminal de Guararema. A Tabela 6 exibe a redução de custo, o valor do investimento de compra e instalação do novo sistema de bombeio, o tempo de amortização e a taxa de retorno ao ano para duas opções de mudança.

**Tabela 6 – Redução Taxa de Retorno de Investimento**

Mudança	Redução de custo por ano (R\$)	Investimento (R\$)	Tempo de Amortização	Taxa de Retorno
Sangria com novo recalque e novo envio 02 bombas de 2500 HP	2.022.823,15	9.700.000,00	4 anos e 9 meses	20,85% a.a
Sangria com novo recalque 01 bomba de 2500 HP	1.875.260,72	4.850.000,00	2 anos e 7 meses	38,67% a.a

#### 5. Conclusões

Um estudo de consumo energético através de ferramenta de simulação foi utilizado para apontar os possíveis melhoramentos que podem ser aplicados no sistema de abastecimento de petróleo de duas refinarias de São Paulo. A análise considerou os produtos atualmente bombeados nestes dutos em condições seguras de operação e dimensionou os custos de transferência considerando as opções de tancagem existentes. Para o cenário do mês de março o abastecimento da REVAP com tancagem em Guararema aumenta o custo de transferência em R\$199.452,68 (18% do custo total da operação). Por esta razão esta operação não é normalmente realizada. No abastecimento da refinaria REPLAN a diferença de custo entre a operação atual com envio a partir do terminal de Guararema e a sugerida com opção de sangria e novo sistema de bombeamento em Guararema é de R\$ 156.271,73 (7,8% do custo total da operação). Esta opção, se aplicada, possui um tempo de amortização do investimento de 2 anos e 7 meses e taxa de retorno do investimento de 38,67% a.a.

#### 6. Agradecimentos

Os autores desejam agradecer a TRANSPETRO Petrobrás Transportes S.A. pela colaboração técnica indispensável para a execução deste trabalho.

#### 7. Referências

Fox, R. W. and McDonald. Introdução à Mecânica dos Fluidos, Ed. Guanabara. , A. T., 1995  
 Hydraulic Institute Standards. [www.pumps.org](http://www.pumps.org)  
 Norma Petrobras N-2098 – Inspeção de Duto Terrestre em Operação  
 Faturas de energia elétrica das unidades Tebar, Rio Pardo e Guararema