



**Paulo Sergio Lyra da Silva**

**Aplicação da Técnica de Simulação no Dimensionamento  
da Capacidade de Armazenamento de Produtos de  
Petróleo de um Terminal ou Base de Distribuição**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Produção do Departamento de Engenharia Industrial  
da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Madiagne Diallo

Rio de Janeiro  
Setembro de 2008



**Paulo Sergio Lyra da Silva**

**Aplicação da Técnica de Simulação no Dimensionamento  
da Capacidade de Armazenamento de Produtos de  
Petróleo de um Terminal ou Base de Distribuição**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Madiagne Diallo**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Antônio Fernando de Castro Vieira**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Ricardo Vitor Jacomino da Cunha Vasconcelos**

PETROBRAS

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico / PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de setembro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Paulo Sergio Lyra da Silva**

Formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (Instituto de Química), em 1979. Em fevereiro de 1980 foi aprovado em concurso público para admissão na PETROBRAS. Em 1980 concluiu o curso de formação profissional na PETROBRAS para a atual função que exerce na empresa (Analista de Comercialização e Logística). Participou de vários cursos na PETROBRAS, destacando-se um curso de Pesquisa Operacional Aplicada (1986). Em 2008 concluiu o Mestrado Profissional em Logística pela PUC-Rio.

#### Ficha Catalográfica

Lyra da Silva, Paulo Sergio

Aplicação da Técnica de Simulação no Dimensionamento da Capacidade de Armazenamento de Produtos de Petróleo de um Terminal ou Base de Distribuição / Paulo Sergio Lyra da Silva ; orientador: Madiagne Diallo. – 2008.

206 f.; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Simulação. 3. Dimensionamento. 4. Armazenamento. 5. Produtos de petróleo. 6. Logística. 7. Cadeia de suprimento. I. Diallo, Madiagne. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## Agradecimentos

A Deus, Nosso Senhor, por sua infinita ajuda, bondade e valiosa inspiração durante os momentos mais difíceis.

A meus pais, por terem me oferecido o ensino, a partir do qual, foi possível construir minha carreira.

À minha querida Edna, mulher e companheira, pelo seu carinho que me reconfortou durante os momentos difíceis, e incentivo constante.

Ao meu orientador, Prof. Dr Madiagne Diallo, pelo crédito neste trabalho, pelo seu entusiasmo e grande competência acadêmica.

Aos professores Dr Ricardo Vítor Jacomino da Cunha Vasconcelos e Dr Antonio Fernando de Castro Vieira, por terem gentilmente aceito o convite para participar da banca de defesa desta dissertação, por sua experiência e suas valiosas sugestões e críticas apontadas durante a defesa, as quais enriqueceram o conteúdo deste trabalho, elevando a qualidade do mesmo. E pelo valioso tempo consagrado às discussões sobre este trabalho.

À PETROBRAS e à PUC, por terem me oferecido o mestrado profissional em Logística, espaço valioso para o meu desenvolvimento profissional.

Ao gerente geral Carlos Felipe Guimarães Lodi, e aos colegas Ângelo Antônio de Miranda Freitas (PETROBRAS) e Ubiracyr de Oliveira Martins (TRANSPETRO) cujas cartas de recomendação para minha participação no mestrado profissional em Logística demonstraram sua convicção sobre minha capacidade, e pelo incentivo proporcionado.

Ao corpo docente da PUC, cujos professores do mestrado profissional em Logística me proporcionaram, através das disciplinas ministradas, nova dimensão e conceitos da Logística, de importância primordial. E aos técnicos administrativos do Departamento de Engenharia Industrial e da Coordenação Central de Extensão da PUC, pelo importante auxílio em várias etapas.

Aos profissionais da gerência de Soluções de Pesquisa Operacional/Tecnologia da Informação da PETROBRAS, por fornecerem os programas e modelos de simulação que serviram de base nos estudos de caso desta dissertação, destacando-se o seu gerente, Roberto Iachan, que gentilmente disponibilizou grande parte de sua equipe em apoio aos trabalhos desta dissertação.

Em destaque, a Cláudio Duarte Pinto Limoeiro, da mesma gerência anterior, cujo apoio incluiu, além da instalação dos programas e modelos de simulação, sua assistência sobre o arcabouço do sistema, dados e resultados da simulação, e literatura disponível, além de sua preocupação constante com o andamento dos trabalhos, conselhos e críticas pertinentes.

A Luiz Carlos Bitencourt Coelho (PETROBRAS), cuja experiência no campo da Logística, e em dutos e terminais contribuiu decisivamente para assegurar precisão de importantes conceitos que foram colocados nesta dissertação, e pelo grande incentivo proporcionado, e pelo seu manual intitulado “Apoio Metodológico para Dissertar”.

A Anderson Mazzoli Lisboa (CILOG), por indicar e facilitar a utilização da técnica de projeto fatorial de experimentos nesta dissertação.

Aos profissionais dos terminais de Guaramirim e Itajaí da TRANSPETRO (SC) e da Base de Araucária (PR) que me assistiram durante as visitas técnicas, destacando o gerente Carlos Renato Aragones (TRANSPETRO) que gentilmente guiou as visitas.

Aos profissionais e técnicos da Biblioteca Central da PETROBRAS, pelo apoio na pesquisa bibliográfica.

Ao gerente e aos colegas da gerência de estudos logísticos (AB-LO/PO/DEL), pelo apoio proporcionado.

Aos colegas do mestrado, pela boa convivência e incentivo durante os períodos de aulas e de elaboração da dissertação.

Aos demais colegas e amigos que apoiaram e colaboraram com este trabalho, citados a seguir:

Alfredo Rival Blanco – PETROBRAS/BR  
Ana Chan – PETROBRAS  
Bruno Thomé de Abrantes – GERDAU  
Daniel Barry Vieira Fuller – PETROBRAS  
Emília de Vasconcelos Barbeta – PETROBRAS  
Fábio da Costa Pereira Brandão - PIRA  
Isa de Barros Furriel – PETROBRAS  
Luciano Rosa Pereira – PETROBRAS/BR  
Marina Atanaka dos Santos - UFMT  
Mario Jorge Lima – PETROBRAS  
Nelson de Maria da Silva – PETROBRAS  
Ricardo de Lima – TRANSPETRO

## Resumo

Lyra da Silva, Paulo Sergio; Diallo, Madiagne (Orientador). **Aplicação da técnica de simulação no dimensionamento da capacidade de armazenamento de produtos de Petróleo de um terminal ou base de distribuição**. Rio de Janeiro, 2008. 206p. Dissertação de Mestrado (opção profissional) – Departamento de Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação será apresentada uma metodologia para utilização da técnica de simulação como ferramenta de apoio à decisão na solução do problema do dimensionamento da capacidade de armazenamento. O objeto de estudo é uma unidade logística de armazenamento de produtos de petróleo (Terminal ou Base de Distribuição), seja ela existente na cadeia de suprimento, ou em projeto. A principal contribuição da metodologia apresentada deverá se traduzir em agilidade, tanto na análise, quanto na escolha da melhor opção (quando possível) de tancagem ou estocagem.

## Palavras-chave

Simulação; dimensionamento; armazenamento; produtos de petróleo; logística; cadeia de suprimento.

## Abstract

Lyra da Silva, Paulo Sergio; Diallo, Madiagne (Advisor). **Utilization of the simulation technique as a supporting tool to the sizing of oil products storage capacity of a terminal or distribution center.** Rio de Janeiro, 2008. 206p. MSc. Dissertation (opção profissional) – Departamento de Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work is concerned with the utilization of simulation techniques as a decision support tool for the resolution of the tank farm sizing problem and the related decision-making process. The focus is a logistic storage facility (a terminal or a distribution center) for oil products, supposed to be already part of the supply-chain, or still in project. The methodology herein should provide more agility and expertise in further analysis of results, allowing for the best choice (when possible) for the tank farm capacity or product stock levels.

## Keywords

Simulation; tank farm sizing; logistics; storage; oil products; supply-chain.

## Sumário

1. Introdução	13
1.1. Motivação	13
1.2. Objetivo	15
1.3. Estrutura do documento	15
2. Revisão Bibliográfica - O Problema do Dimensionamento	17
2.1. Por que dimensionar	17
2.2. O que dimensionar	20
2.3. A ferramenta mais apropriada	23
2.4. O que podemos inferir	25
2.5. Fatores relevantes	27
3. Revisão Bibliográfica - O Papel da Estatística na Simulação	32
3.1. Questões estratégicas	32
3.2. Avaliação das soluções	37
3.3. Tratamento estatístico	41
4. A Modelagem do Problema – Estratégia de Solução	44
4.1. Introdução	44
4.2. Produtos - características	46
4.3. Os locais de armazenamento de produtos	48
4.4. Os modais de transporte de produtos	54
4.5. O mercado e a projeção de demanda de produtos	60
4.6. Elementos importantes na modelagem	64
4.7. As regras fundamentais	70
4.8. Etapas críticas e subprocessos	78
4.9. Variáveis e indicadores relevantes	84
4.10. Indicadores de custos	92
4.11. Conduzindo a análise	100
4.12. Interpretação dos resultados dos indicadores	105
5. Aplicação da Metodologia em Estudos de Caso	113
5.1. Descrição	113
5.2. Metodologia	113
5.2.1. Visitas técnicas	113
5.2.2. Simulação	114
5.2.3. Projeto fatorial de experimentos	114
5.3. Considerações	115
5.4. Estudo de Caso I - Armazenamento de Diesel no Terminal de Canoas-RS e nas Bases de Ijuí, Passo Fundo e Rio Grande (RS)	116
5.5. Estudo de Caso II – Ampliação da Capacidade de Armazenamento de Diesel em um Terminal Marítimo na Região NE	127
6. Conclusão	137

Referências Bibliográficas	139
ANEXO I – GLOSSÁRIO	144
I.i. Principais produtos derivados de petróleo e biocombustíveis	144
I.ii. Locais de armazenamento de produtos de petróleo e biocombustíveis	147
I.iii. Modalidades de transporte de produtos de petróleo e biocombustíveis	147
I.iv. Instalações de Embarque e Desembarque de Petróleo e Gás Natural	148
I.v. Propriedades dos produtos de petróleo e biocombustíveis	148
Apêndice II – Fundamentação Teórica	151
II.i. Conceitos Básicos em Simulação	151
II.i.1. Definições	151
II.i.2. Tipos de simulação e modelos	154
II.i.3. Verificação e validação de modelos de simulação	157
II.ii. Projeto Fatorial de Experimentos	158
II.ii.1. Conceitos e aplicações	158
II.ii.2. Abordagem de otimização em projetos de experimentos. Método da superfície de resposta	163
Apêndice III – Fichas Técnicas dos Estudos de Caso	169
III.i. Estudo de Caso I - Armazenamento de Diesel no Terminal de Canoas-RS e nas Bases de Ijuí, Passo Fundo e Rio Grande (RS)	169
III.ii. Estudo de Caso II – Ampliação da Capacidade de Armazenamento de Diesel em um Terminal Marítimo na Região NE	172
Apêndice IV – Tabelas	174
Apêndice V – Formulação Quantitativa	191
Apêndice VI – Diagramas, Fluxogramas, Mapas	197

## Lista de Tabelas

Tabela 2.3.1: Áreas de Competição Entre as Técnicas de Otimização e Simulação	25
Tabela 3.1.1: Distribuições aplicáveis quando não há disponibilidade de dados.	36
Tabela 4.4.1: Classificação dos modais de transporte por características de desempenho.	56
Tabela 4.7.1: Trocas de modal normalmente viáveis na movimentação de granéis	75
Tabela 4.7.2: Degradações de produtos em unidades de armazenamento	77
Tabela 4.7.3: Interfaces de produtos claros em duto	78
Tabela 4.10.1: Relação dos custos com o nível de estoque	100
Tabela 4.11.1. Estimativa do intervalo de confiança da média do indicador $X$	102
Tabela 4.12.1: Interpretação dos Resultados do Indicador Nível de Estoque (média e evolução)	108
Tabela 4.12.2: Interpretação da Redução do Indicador Nível de Serviço	109
Tabela 4.12.3: Interpretação dos Resultados do Indicador Ocupação da Tancagem	110
Tabela 4.12.4: Interpretação dos Resultados do Indicador Giro da Tancagem	111
Tabela 4.12.5: Interpretação dos Resultados dos Indicadores Giro de Estoque e Excedentes	112
Tabela 5.4.1: Principais indicadores nas Bases do sistema do RS	119
Tabela 5.4.2: Custos relevantes nas Bases do sistema do RS	120
Tabela 5.4.3: Estoques de Segurança (dias)	121
Tabela 5.4.4: Análise de variância do modelo fatorial – Indicador custo total	123
Tabela 5.4.5: Estoques de Segurança (dias)	123
Tabela 5.4.6: Análise de variância do modelo quadrático reduzido – Indicador custo total	124
Tabela 5.4.7: Combinações de fatores geradas e o custo total correspondente obtido da nova simulação	125
Tabela 5.4.8: Análise de variância do modelo com interação de 2 fatores (2FI) – Indicador custo total	126
Tabela 5.4.9: Principais indicadores nas Bases do sistema do RS – após a solução de armazenagem	126
Tabela 5.4.10: Custos relevantes nas Bases do sistema do RS – após a solução de armazenagem	127
Tabela 5.5.1: Projeto fatorial inicial	129
Tabela 5.5.2: Projeto fatorial inicial – Análise de variância de modelo linear	129
Tabela 5.5.3: Método <i>steepest descent</i> – primeira etapa	130
Tabela 5.5.4: Projeto fatorial – primeira etapa	131
Tabela 5.5.5: Projeto fatorial - primeira etapa – Análise de variância de modelo linear	132

Tabela 5.5.6: Projeto fatorial reduzido – primeira etapa	132
Tabela 5.5.7: Projeto fatorial reduzido - primeira etapa – Análise de variância de modelo linear	133
Tabela 5.5.8: Método <i>steepest descent</i> – segunda etapa	133
Tabela 5.5.9: Intervalo de confiança para o indicador custo total – Estudo do Terminal do NE	134
Tabela 5.5.10: Projeto fatorial reduzido - segunda etapa – Análise de variância de modelo linear	134
Tabela 5.5.11: Comparação dos indicadores de desempenho logístico	135
Tabela 5.5.12: Comparação de custos relevantes	136
Tabela II.ii.1.1: Estoques de segurança (em dias) como fatores em um projeto de experimentos	160
Tabela II.ii.2.1: Método <i>steepest descent</i> – resultados dos experimentos caracterizados	165
Tabela II.ii.2.2: Intervalo de confiança para o indicador custo total – Resultados estatisticamente indiferentes	166
Tabela III.i.1: Previsão de demanda diária alocada por unidade de armazenamento (distribuição normal)	170
Tabela III.i.2: Fatores sazonais para as vendas de diesel	170
Tabela III.i.3: Fatores de rateio intra-semanal das entregas de diesel em 5 dias da semana	170
Tabela III.i.4: Fatores de rateio intra-semanal das entregas de diesel em 6 dias da semana	171
Tabela III.ii.1: Fatores sazonais para as vendas de diesel	173
Tabela III.ii.2: Fatores de rateio intra-semanal das entregas de diesel em 5 dias da semana	173
Tabela IV.i.1: Estudo de Caso I - Condução dos experimentos – Criação do 1º projeto fatorial	174
Tabela IV.i.2: Estudo de Caso I - Condução dos experimentos - Utilização do Método da Superfície de Resposta - Criação do 2º projeto fatorial (projeto fatorial composto) – Resultados para os pontos axiais	176
Tabela IV.i.3: Estudo de Caso I - Condução dos experimentos – 3º projeto fatorial	177
Tabela IV.ii.1: Estudo de Caso II - Condução dos experimentos - Projeto fatorial inicial	181
Tabela IV.ii.2: Estudo de Caso II - Condução dos experimentos - Projeto fatorial – primeira etapa	183
Tabela IV.ii.3: Estudo de Caso II - Condução dos experimentos - Projeto fatorial reduzido – primeira etapa	186
Tabela IV.ii.4: Estudo de Caso II - Condução dos experimentos - Projeto fatorial reduzido – segunda etapa	188

## Lista de Figuras

Figura 2.2.1: Componentes operacionais da armazenagem em um tanque	22
Figura 4.3.1: Dispositivos de atracação em um terminal marítimo (da esquerda para a direita): cais acostável; píer de atracação; monobóia; quadro de bóias múltiplas; quadro de âncoras	49
Figura 4.3.2: Base Primária e Base Secundária na cadeia de suprimento	52
Figura 4.4.1: Composição percentual de cargas no ano 2000	58
Figura 4.8.1: Etapas de um giro de estoque em um tanque	79
Figura 4.9.1: Custo de estoques e armazenagem versus custo de transporte e produção	85
Figura 4.12.1: Comportamento do nível de serviço em função do estoque numa Base no RS	106
Figura 4.12.2: Compensação entre custo de estoques e custo de aquisição e faltas de produto.	107
Figura 5.4.1: Gráfico de probabilidade normal	122
Figura II.ii.1.1: Método da Superfície de resposta (RSM) – evolução dos experimentos	162
Figura II.ii.2.1: Fase inicial da técnica <i>steepest ascent</i> . As curvas de nível da superfície de resposta tendem a retas paralelas	164