



**Flavia Garcia Serpa**

**Modelo de programação matemática para suporte à  
decisão na compra e distribuição de dutos e umbilicais**

**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. Silvio Hamacher

Rio de Janeiro

Março de 2012



**Flavia Garcia Serpa**

**Modelo de programação matemática para suporte à  
decisão na compra e distribuição de dutos e umbilicais**

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

**Prof. Dr. Silvio Hamacher**

Presidente e Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-RJ

**Dr. Carlos Fernando Fontenelle Dumans**

PETROBRAS

**Prof. Dr. Luiz Felipe Roriz Rodriguez Scavarda do Carmo**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-RJ

**Prof. Dr. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-RJ

Rio de Janeiro, 28 de Março de 2012

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

## Flavia Garcia Serpa

Graduou-se em Química Industrial na PUC-RJ em 1984. Cursou Gestão Empresarial na FGV-RJ e Gestão Empresarial Avançada na COPPEAD. Trabalha na PETROBRAS desde 1985 como analista de sistemas, tendo atuado no desenvolvimento de sistemas na área de logística de transporte de E&P, no planejamento da logística de transporte de E&P. No momento, atua em planejamento e gestão da Unidade de Serviços de Contratação do E&P Serviços.

### Ficha Catalográfica

Serpa, Flavia Garcia

Modelo de programação matemática para suporte à decisão na compra e distribuição de dutos e umbilicais / Flavia Garcia Serpa; orientador: Silvio Hamacher – 2012.

73 f.: Il. (color.) : 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, Rio de Janeiro, 2012.

Inclui bibliografias

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Logística. 3. Modelo matemático. 4. Planejamento. 5. Apoio à decisão. I. Hamacher, Silvio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título

CDD: 658.5

À minha família,  
meus pais Ivan<sup>†</sup> e Solange pela minha  
formação e educação,  
meu marido José Eduardo pelos nossos 25  
anos de conquista e  
meus filhos, Isabel e Artur, meus presentes de  
Deus.

## Agradecimentos

Ao José Eduardo, Isabel e Artur pelo incentivo, carinho e, sobretudo paciência durante este período do mestrado.

Ao Prof. Silvio Hamacher pela assertividade nas suas orientações, sempre contribuindo para o desenvolvimento deste trabalho e por estender a mão em um momento difícil.

Ao Sr. Eberaldo de Almeida Neto pela confiança durante todo o tempo que trabalhamos juntos.

Aos Drs. Carlos Fernando Fontenelle Dumans e Luiz Felipe Roriz Rodrigues Scavarda do Carmo por aceitarem o convite para compor a banca examinadora.

Ao Sr. Marcos Antônio Rodrigues Marques pelas orientações e informações sobre engenharia submarina. Sem sua ajuda, esta dissertação não seria possível.

À Sra. Evely Forjaz Loureiro e ao Sr. Carlos André Campos Ayres por me convencerem a não pedir demissão em 1998.

Ao Sr. Último Melo Mariz pela “dica” sobre o tema da dissertação.

Ao Sr. Vinícius Chagas de Oliveira pela disponibilização de dados do SAP ao longo do trabalho.

Ao Dr. Leonardo Souza Ribeiro e ao Sr. João Batista de Andrade Neto pela ajuda nas últimas revisões.

À equipe que trabalha comigo pelo constante apoio.

## Resumo

Serpa, Flavia Garcia; Hamacher, Silvio (Orientador). **Modelo de programação matemática para suporte à decisão na compra e distribuição de dutos e umbilicais**. Rio de Janeiro, 2012. 73p. Dissertação de Mestrado (opção profissional) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A atividade de exploração e produção (E&P) de petróleo no segmento *offshore* no Brasil apresentou um crescimento vertiginoso nos últimos anos e, com a descoberta do pólo pré-sal da bacia de Santos pela PETROBRAS, a expectativa é de que haja um incremento ainda maior. Dentro da cadeia produtiva de E&P, uma etapa fundamental para garantir a produção de petróleo é a interligação dos equipamentos submarinos às Unidades Estacionárias de Produção. Esta interligação é feita através de dutos (rígidos ou flexíveis) e umbilicais, cujo mercado fornecedor é bastante restrito. Para que estes dutos e umbilicais sejam transportados até a locação, é necessária utilização de bases, que atuam como centro de distribuição na cadeia logística. Este trabalho apresenta um modelo de Programação Linear Inteira Mista cujo objetivo é de apoiar a decisão na compra e distribuição de dutos flexíveis e umbilicais, indicando, para cada demanda dos projetos, qual fábrica e qual base deverá ser utilizada. O modelo também permite uma análise sobre a influência do aumento na capacidade de produção no Brasil em relação aos custos logísticos e fabricação nacional. Como resultado desta análise, por exemplo, poderá ser observado que, em não havendo aumento da capacidade de produção no Brasil, além do que já foi previsto, as compras no mercado nacional, no período 2013 a 2016, representarão em torno de 70% da demanda.

## Palavras-chaves

Logística; modelo matemático; planejamento; apoio à decisão

## Abstract

Serpa, Flavia Garcia; Hamacher, Silvio (Advisor). **Mathematical model to support decision making in the purchase and distribution of flowlines and umbilicals**. Rio de Janeiro, 2012. 73p. Dissertação de Mestrado (opção profissional) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Offshore oil exploration and production activities in Brazil have presented an enormous rise in recent years and, following Petrobras's discovery of pre-salt accumulations in Campos Basin, an even greater rise is expected. Inside E&P production chain, a fundamental step to achieve oil production is the connection of the underwater equipment to the stationary production units. This connection is made through the use of flowlines (both flexible and rigid) and umbilicals, which have a strict vendor market. In order to transport these flowlines and umbilicals to the well location, the use of an onshore base is required, acting like a distribution center in the logistics chain. This paper presents a model for Mixed Integer Linear Programming which aims to support the decision making process in the purchase and distribution of flowlines and umbilicals, indicating, for each project's demand, which factory and which onshore base shall be used. The model also allows an analysis of the influence of the increase in the production capacity related to logistics cost and national manufacturing. As a result, for example, the national market should account for 70% of the demand, between the years 2013 and 2016.

## Keywords

Logistics; mathematical model; planning; decision making support.

## Sumário

1	Introdução	12
1.1.	Objetivo	14
1.2.	Metodologia	15
1.3.	Estrutura do trabalho	15
2	Projeto submarino	16
2.1.	O petróleo	16
2.1.1.	Exploração	17
2.1.2.	Perfuração	18
2.1.3.	Produção	18
2.2.	Sistema submarino	19
2.2.1.	Classificação dos dutos e umbilicais	19
2.3.	Construção do arranjo submarino	22
2.3.1.	Instalação de dutos e umbilicais	23
3	Estudo de caso	24
3.1.	Caracterização da empresa	24
3.2.	Caracterização da operação	25
3.2.1.	Compras de dutos e umbilicais	26
3.2.2.	Bases de carregamentos	29
3.2.3.	Contratações de embarcações PLSV	30
3.3.	Descrição do problema	31
3.4.	Análise da demanda de dutos	34
3.4.1.1.	Previsão da Demanda e Correlação Linear	34
3.4.2.	Análise dos dados	36
4	Modelos de programação linear	39
4.1.	Premissas	39
4.2.	Função objetivo	40
4.2.1.	Modelo determinístico	41
4.3.	Modelo estocástico	47
4.4.	Implementação	52

5 Resultados	53
5.1. Demanda 2010 – 2011	54
5.2. Modelo determinístico – Demanda 2013 – 2016	58
5.3. Modelo determinístico – Demanda 2013 – 2016 com variações	62
5.4. Modelo estocástico – Demanda 2012 – 2016	64
5.4.1. Comparação entre modelos	64
5.4.2. Análise de capacidade das bases	67
6 Conclusões	68
6.1. Recomendações para futuros trabalhos	70
7 Referências Bibliográficas	71

## Lista de Figuras

Figura 1 - Configuração de instalação de risers	20
Figura 2 - Estrutura interna do duto flexível	21
Figura 3 - Umbilical eletro-hidráulico	21
Figura 4 - Desenho esquemático de um arranjo submarino	22
Figura 5 - Embarcação PLSV	23
Figura 6 - Crescimento da produção de óleo e gás no Brasil	25
Figura 7 - Matriz de categorização de itens - Bens	27
Figura 8 - Localização das fábricas de dutos e umbilicais	28
Figura 9 - Histórico do estoque de dutos e umbilicais - Base Vitória-ES	30
Figura 10 - Fluxo dos dutos e umbilicais	32
Figura 11 - Localização das bases de carregamento	32
Figura 12 - Distribuição de custos	33
Figura 13 - Medidas de erros em previsão	36
Figura 14 - Correlação entre demanda de dutos e produção de petróleo	37
Figura 15 - Projeção da demanda de dutos	38
Figura 16 - Sequência de etapas na otimização	52
Figura 17 - Custos logísticos - demanda 2010-2011	55
Figura 18 - Aquisição de dutos no exterior	55
Figura 19 - Custo e capacidade de produção	56
Figura 20 - Custos logísticos para 1 base de carregamento	57
Figura 21 - Custos logísticos para 2 bases de carregamento	57
Figura 22 - Custo logístico - demanda 2013-2016	58
Figura 23 - Parcelas do custo logístico - demanda 2013-2016	59
Figura 24 - Capacidade de produção no Brasil e custo logístico	60
Figura 25 - Capacidade de produção e compra de dutos no Brasil	61
Figura 26 - Estoque nas bases	62
Figura 27 - Estoque na base Vitória-ES	64
Figura 28 - Estoque resultante do modelo estocástico	65
Figura 29 - Estoque nas bases - modelo estocástico	66
Figura 30 - Estoque x capacidade das bases	67

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação de itens adquiridos	26
Tabela 2 - Características das bases de carregamento	29
Tabela 3 - Quantidade instalada de dutos e umbilicais	34
Tabela 4 - Cálculo do erro para a projeção de dutos	37
Tabela 5 - Aquisição de dutos por região	59
Tabela 6 - Aquisição de dutos e umbilicais por região, considerando aumento de produção de dutos no Brasil	60
Tabela 7 - Utilização das bases	61
Tabela 8 - Comparação entre cenários de demanda 2013-2016	63