



**Sidney Pereira dos Santos**

**Sistema de Gestão de Logística de Transporte de Gás  
Natural por Gasodutos**

**Dissertação de Mestrado**

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.

Prof. Antonio Orestes de Salvo Castro  
Orientador  
PETROBRAS

Prof. José Eugênio Leal  
Co-orientador  
PUC-Rio

Rio de Janeiro  
Março de 2008.



**Sidney Pereira dos Santos**

**Sistema de Gestão de Logística de  
Transporte de Gás Natural por Gasodutos**

Dissertação apresentada, como requisito parcial à 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. José Eugenio Leal**

Presidente

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Antonio Orestes de Salvo Castro**

Orientador

PETROBRAS

**Prof. Eduardo Saliby**

COPPEAD / UFRJ

**Prof. Jorge Roberto Abrahão Hijjar**

PETROBRAS

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico / PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de março de 2008.

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

Sidney Pereira dos Santos

Graduou-se na Fundação Técnica Educacional Souza Marques (FTESM) em Engenharia Mecânica em 1983, pós-graduado em Finanças Corporativas no IAG da PUC-Rio em 1999. Atua na área de desenvolvimento de projetos de gasodutos e sistemas de gestão baseados em tecnologia de sistema de informação geográfico. Participou no projeto do Gasoduto Bolívia-Brasil e nos projetos das expansões da malha de gasodutos da Petrobras. Apresentou trabalhos em seminários nacionais e internacionais e publicou artigos técnicos em revistas internacionais. Área de interesse em análise de risco econômico e estudos de viabilidade de projetos.

Ficha Catalográfica

Santos, Sidney Pereira dos

Sistema de gestão de logística de transporte de gás natural por gasodutos / Sidney Pereira dos Santos; orientador: Antonio Orestes de Salvo Castro ; co-orientador: José Eugênio Leal. – 2008.

101 f.: il.; 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. Gestão. 3. Logística. 4. Gasoduto. I. Castro, Antonio Orestes de Salvo. II. Leal, José Eugênio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

À minha esposa Rosania, cujo apoio, compreensão e amor foram imprescindíveis para a realização e conclusão deste trabalho. Ao meu filho Leonardo, a quem procuro ser um exemplo de dedicação, trabalho e empenho por princípios morais que agregam valor ao indivíduo e nos torna mais úteis à sociedade.

## Agradecimentos

Primariamente e acima de tudo agradeço a Deus pela vida e por ter tornado possível a consecução deste trabalho.

Ao longo dos mais de 20 anos de trabalho na PETROBRAS, pude contar com a amizade, estímulo, exemplo e companheirismo de profissionais que contribuíram positivamente para que tal projeto pudesse sair do planejamento à sua realização, em especial:

Glauco Colepicolo Legatti

Paulo Roberto Costa

João Carlos Costa

Ricardo Lima de Souza

José Maria Carvalho Resende

Durante a execução deste trabalho pude também contar com o apoio leal de amigos na verificação de textos, elaboração de gráficos e na discussão de abordagens mais adequadas ao tema, em especial:

Ubirajara Mendes Nunes Junior

Renato Cabral

## Resumo

Santos, Sidney Pereira dos; Castro, Antonio Orestes de Salvo. **Sistema de Gestão de Logística de Transporte de Gás Natural por Gasodutos**. Rio de Janeiro, 2008. 101 p. Dissertação de Mestrado (Logística) - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma gestão eficaz da cadeia de negócio do gás natural com logística de transporte por gasodutos, considerando os principais agentes, como Carregador, Produtor, Transportador e Distribuidor, requer a utilização de tecnologia de informação e sistemas de suporte à decisão. Este trabalho apresenta um Sistema de Gestão de Logística de Transporte de Gás Natural por Gasodutos – SGLT, composto de módulos ou subsistemas integrados que propiciam maximizar a comercialização do gás natural e mitigar a ocorrência de perdas de receitas e multas contratuais devido a contingências que podem gerar falha de entrega do gás natural ao Distribuidor. Permite também avaliar o nível ótimo econômico de confiabilidade que deve ser mantido pelo Transportador, através da implantação de redundâncias, para mitigar sua exposição aos riscos de perdas de receitas e multas contratuais por parte dos agentes envolvidos na cadeia do negócio de gás natural. O sistema proposto é fundamentado na simulação Monte Carlo de falhas de equipamentos da malha de gasodutos de transporte e de restrições de oferta e demanda de gás natural, bem como os fechamentos acidentais de válvulas de bloqueio de gasodutos e de falhas nos pontos de entrega de gás natural de modo a quantificar seus impactos na Cadeia do Negócio do Gás Natural. O sistema proposto é constituído de (i) um Sistema de Informação Geográfico - SIG, (ii) um modelo de dados de gasodutos (Arc Pipeline Data Model – APDM), (iii) um simulador termo-hidráulico de escoamento de gás por dutos em regime permanente e transiente – Pipeline Studio 3.0, (iv) uma base de dados dos resultados das simulações termohidráulicas, (v) um modelo de simulação Monte Carlo para avaliação da confiabilidade do sistema de transporte utilizando o software @Risk 4.5, (vi) um modelo econômico com simulação Monte Carlo utilizando o software @Risk 4.5 e (vii) um otimizador, baseado em programação

linear, para maximização da comercialização de gás e para minimização de perdas de receitas e multas contratuais devido a cortes de fornecimento de gás decorrentes de situações contingenciais. Este trabalho permitiu identificar, quantificar e justificar economicamente a implantação de unidades compressoras reservas nas estações de compressão do Gasoduto Bolívia-Brasil, e aumentar a disponibilidade do sistema de compressão, reduzindo acentuadamente a exposição do Transportador a perdas de receita e penalidades contratuais por redução de capacidade de transporte decorrentes da entrada em manutenção de unidades compressoras e de falhas não-programadas de tais equipamentos. Foram também identificadas e quantificadas as falhas de válvulas de bloqueio de gasoduto e das estações de entrega de gás, não cabendo, nestes casos, a implantação de redundância.

## **Palavras-chaves**

Gestão, logística, gasoduto, Monte Carlo, disponibilidade, programação linear, simulação.

## Abstract

Santos, Sidney Pereira dos; Castro, Antonio Orestes de Salvo. **Logistic Management System for Natural Gas Transportation by Pipeline**. Rio de Janeiro, 2008. 101 p. Dissertação de Mestrado (Logística) - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An efficient management of the natural gas business chain, based on pipeline transmission network and taking into consideration the interaction between the main players such as Shippers, Suppliers, Transmission Companies and Local Distribution Companies, requires the use of information technology and decision-making support systems. This work presents a Natural Gas Logistic Transportation Management System, composed of integrated modules or subsystems that allow maximizing natural gas commercialization and allow mitigating revenue losses and contractual penalties due to contingencies that may cause failures in gas delivery to Local Distribution Companies. The proposed system also allow evaluating the optimum economic level of availability to be maintained by the Transmission Company by using stand-by equipment to mitigate its risk exposures to revenue losses and contractual penalties from the agents of the natural gas chain. The proposed system is based on Monte Carlo simulation of equipment failures of the gas transmission network, on the supply/delivery unexpected shortfalls, unexpected block valves closing and failures on the city-gates in order to quantify their impact on the natural gas business chain. The proposed system is made of (i) a geographic information system - GIS, (ii) a pipeline data model (Arc Pipeline Data Model – APDM), (iii) a gas pipeline thermo-hydraulic simulation for steady and transient states – *Pipeline Studio 3.0*, (iv) a data base of thermohydraulic simulation results and (v) a Monte Carlo simulation model to evaluate the reliability of the transmission system by using *@Risk 4.5* and (vi) an economic model with Monte Carlo simulation using *@Risk 4.5* and (vii) an optimizer, based on linear programming, for gas commercialization maximization and minimization of revenue losses and contractual penalties for not delivering the gas volumes at the

contracted level. This work has identified, quantified and proved feasible the installation of stand-by compressor units at the Bolivia-Brail Gas Pipeline compressor stations and therefore improved the transmission system availability. As a direct benefit has reduced the Transmission Company risk exposure to revenue losses and contractual penalties due to reduction of pipeline transmission capacity as consequence of compressor units scheduled and non-scheduled outages. Failures of pipeline block valves and city-gates have also been identified and quantified but redundancy improvements were not required.

## **Keywords**

Management, logistic, gas pipeline, Monte Carlo, availability, linear programming, simulation.

## Sumário

1	Objetivo	15
1.1	Objetivos Específicos	17
2	Introdução	18
3	Revisão bibliográfica	26
3.1	Sistemas de gestão de transporte	26
3.2	Simulação	27
3.2.1	Simulação Monte Carlo	28
3.2.2	Simulação termohidráulica	29
3.3	Confiabilidade do sistema de transporte	30
3.4	Sistema de informação geográfico - SIG	31
3.5	Modelo de dados	32
3.5.1	ORM	34
3.5.2	APDM	34
3.6	Programação linear	34
3.7	Avaliação econômica	35
4	Metodologia	37
5	Modelagem do gasoduto Bolívia - Brasil	41
5.1	Malha de gasodutos do gasoduto Bolívia - Brasil	41
5.2	Gasoduto	42
5.3	Estação de compressão	45
5.3.1	Mapas de desempenho dos compressores e turbinas a gás	47
6	Confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos	50
6.1	Estações de compressão	51
6.1.1	Electric Power Research Institute	51
6.1.2	North American Electric Reliability Council	52
6.2	Válvula de bloqueio e ponto de entrega	53
6.2.1	Válvulas de bloqueio	55
6.2.2	Ponto de entrega do gás	56
6.3	Pontos de recebimento de gás	58
7	Simulação Monte Carlo	61

7.1	Simulação termohidráulica	68
7.1.1	Modelo de dados dos resultados	69
7.1.2	Análise dos resultados das simulações	74
8	Programação linear	78
8.1	Maximização da comercialização do gás	79
8.2	Minimização das perdas (receitas e multas contratuais)	81
9	Avaliação econômica	83
9.1	Trecho boliviano (GTB)	84
9.1.1	Premissas econômicas	84
9.1.2	Resultados da avaliação econômica	84
9.1.3	Estudo do impacto das alternativas	86
9.1.4	Avaliação da análise econômica	89
9.2	Trecho brasileiro (TBG)	89
9.2.1	Premissas econômicas	90
9.2.2	Resultados da avaliação econômica	90
9.2.3	Estudo do impacto das alternativas	91
9.3	Avaliação da análise econômica	95
10	Scenario Builder	96
11	Conclusões	97
12	Referências	100

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Resultado da Avaliação de Indisponibilidade para Válvula de Bloqueio de Gasoduto	54
Tabela 2 - Resultado da Avaliação de Indisponibilidade para Ponto de Entrega	54
Tabela 3 - Unidades Compressoradas da Estação de Rio Grande	58
Tabela 4 - Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da GTB – Sem Unidades Compressoradas Reservas	63
Tabela 5 – Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da GTB – Com 2 Unidades Compressoradas Reservas	63
Tabela 6 – Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da GTB – Com 4 Unidades Compressoradas Reservas	64
Tabela 7 – Resultados das Simulações Monte de Carlo para avaliação da disponibilidade do Sistema da Transporte da TBG – Sem Unidades Compressoradas Reservas	64
Tabela 8 - Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da TBG – Com 5 Unidades Compressoradas Reservas	65
Tabela 9 - Resultado das Simulações Monte de Carlo Para Avaliação da Disponibilidade do Sistema de Transporte da TBG – Com 10 Unidades Compressoradas Reservas	65
Tabela 10 - Resumo Comparativo ente as Alternativas de Instalação de Unidades Compressoradas Reservas – GTB	88
Tabela 11 - Resumo Comparativo ente as Alternativas de Instalação de Unidades Compressoradas Reservas – TBG	93

## Lista de figuras

Figura 1 - Diagrama Funcional do SGLT	16
Figura 2 – Cadeia de Negócio do Gás Natural	19
Figura 3 – Mercado de Gás Natural no Brasil	20
Figura 4 – Arquitetura do SGLT	21
Figura 5 – Gasoduto Bolívia-Brasil	24
Figura 6 - Processo de Modelagem da Base de Dados	33
Figura 7 - Diagrama Esquemático do Gasbol e Interligação com Malha de Gasodutos da Petrobras	43
Figura 8 - Perfil de Elevação do Gasbol ao Longo do Traçado	44
Figura 9 - Estação de Compressão Típica do Gasbol	46
Figura 10 - Diagrama de Processo e Instrumentação Típico de Uma Estação de Compressão	47
Figura 11 - – Mapa Típico de Desempenho de Um Compressor Centrífugo	48
Figura 12 - Mapa Típico de Desempenho de Uma Turbina a Gás	49
Figura 13 - Arranjo das Estações de Compressão do Gasbol como Instaladas	50
Figura 14 - Arranjo Simplificado das Estações de Compressão do Gasbol	51
Figura 15 - Árvore de Falha para Avaliação da Indisponibilidade de Válvula de Bloqueio do Gasoduto	55
Figura 16 – Configuração e Árvore de Falha para Avaliação da Disponibilidade de Ponto de Entrega	57
Figura 17 - Estação de Compressão de Rio Grande	58
Figura 18 – Frequência de Capacidade de Suprimento sem Unidade Compressora Reserva – Estação de Rio Grande	59
Figura 19 – Frequência de Capacidade de Suprimento com Unidade Compressora Reserva – Estação de Rio Grande	59
Figura 20 - Curva de Capacidade de Transporte versus Probabilidade Acumulada	67
Figura 21 - Curva de Capacidade de Transporte versus Probabilidade Acumulada	67

Figura 244 - Modelo Lógico dos Resultados das Simulações Termohidráulicas das Falhas de Válvulas de Bloqueio	73
Figura 25 - Arquitetura do Sistema de Cadastramento	74
Figura 26 - Diagrama de Casos de Uso	76
Figura 27 – Diagrama de Classes de Objetos	77
Figura 28 - Frequência de Capacidades de Transporte – GTB Sem Reservas	86
Figura 29 - Frequência de Capacidades de Transporte – GTB com 2 Unidades Compressoras Reservas	87
Figura 30 - Frequência de Capacidades de Transporte – GTB com 4 Unidades Compressoras Reservas	87
Figura 31 - Frequência de Capacidades de Transporte – TBG Sem Reservas	92
Figura 32 - Frequência de Capacidades de Transporte – TBG com 5 Unidades Compressoras Reservas	92
Figura 33 - Frequência de Capacidades de Transporte – TBG com 10 Unidades Compressoras Reservas	93