



**Marko Antonio López Bendezú**

**Avaliação Técnico-Econômico das Alternativas  
Tecnológicas de Transporte de Gás Natural**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientadores: Eloi Fernández y Fernández

Pedro Carajilescov

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2009



**Marko Antonio López Bendezú**

## **Avaliação Técnico-Econômico das Alternativas Tecnológicas de Transporte de Gás Natural**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Eloi Fernández y Fernández**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Pedro Carajilescov**

Co-orientador

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas -  
UFABC

**Prof. Carlos Valois Maciel Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Sergio Leal Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Jose Cesario Cecchi**

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de fevereiro de 2009

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

### **Marko Antonio López Bendezú**

Graduou-se em Engenharia Mecânica na UNI (*Universidad Nacional de Ingeniería*), Lima-Peru, em 2005. Atua na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Petróleo & Energia.

#### Ficha Catalográfica

López Bendezú, Marko Antonio

Avaliação Técnico-Econômico das Alternativas Tecnológicas de Transporte de Gás Natural / Marko Antonio López Bendezú; orientadores: Elio Fernández y Fernández, Pedro Carajilescov. – 2009.

81 f.: il.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro, 2009.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Custo de transporte. 3. Gasoduto virtual. 4. GNC. 5. LNG. 6. Gasoduto. I. Elio Fernández y Fernández. II. Pedro Carajilescov. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Aos meus pais: Jose Luis e Maria Imperio e aos meus irmãos: Pepe, Juan Carlos e Franco; pelo amor e apoio, em todos os momentos desta e de outras caminhadas.

## Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Eloi Fernandez y Fernandez e o meu co-orientador Prof. Dr. Pedro Carajilescov, pelos ensinamentos, orientações, pela ajuda durante o tempo que estive no Brasil, pela paciência e por todas as formas de colaboração para a realização de minha dissertação de mestrado. Saibam que a minha admiração e o meu respeito por vocês é muito grande.

A PUC-Rio, pela oportunidade do curso de mestrado. Orgulho-me imensamente de ser parte dessa excelente instituição que contribui para o aperfeiçoamento intelectual, acadêmico e profissional de todos os seus alunos.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) pelo apoio financeiro através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás.

A todos os professores pelos conhecimentos adquiridos, por suas aulas e pela forma que conduzem aos alunos através do mestrado.

Aos meus amigos, com os quais sempre compartilhei meus sucessos e fracassos, e que tornaram esta caminhada mais leve e tranquila, proporcionando inúmeros momentos de alegria e descontração.

A minha família que sempre esteve presente nos momentos de alegria e nas situações e decisões difíceis durante minha estadia no mestrado.

## **Resumo**

López Bendezú, Marko Antonio. **Avaliação Técnico-Econômico das Alternativas Tecnológicas de Transporte de Gás Natural.** Rio de Janeiro, 2008. 81p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Considerando países com uma grande área territorial, um obstáculo para a expansão do mercado do gás natural consiste na falta da infra-estrutura para o seu transporte. Várias alternativas foram consideradas, a fim de criar a demanda local de gás, como o transporte em caminhões como comprimido (GNC) ou liquefeito (GNL) do gás natural, ou mesmo os tradicionais gasodutos. Uma adequada escolha dos modais tende a reduzir os custos de transporte envolvidos. Assim, o presente estudo apresenta uma técnica de discussão das implicações de cada uma das alternativas de transporte e logística. Finalmente, é apresentada uma comparação econômica entre os diferentes modais em função do volume de gás a ser transportado e em função da distância.

## **Palavras-chave**

Custo de transporte; gasoduto virtual; GNC; GNL; gasoduto.

## **Abstract**

López Bendezú, Marko Antonio. **Technical and Economical Evaluation of Alternatives for Natural Gas Transportation.** Rio de Janeiro, 2008. 81p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Considering countries with a large territorial area, an obstacle for the expansion of the natural gas market consists in the lack of infrastructure for its transportation. Several alternatives have been considered in order to create local demand for gas, such as transportation in trucks as compressed (CNG) or liquefied (LNG) natural gas or even the traditional pipelines. An adequate selection of the modal will tend to reduce the transportation costs involved. So, the present study presents a technical discussion of the implications of each one of the alternatives and the transportation logistics. Finally, it is presented an economical comparison among the different modals as function of the amount of gas to be transported and as function of the distance.

## **Keywords**

Transport cost; virtual pipeline; CNG; LNG; gas pipeline.

# Sumário

1 Introdução .....	20
1.1 Objetivos do Trabalho.....	21
1.1.1 Objetivo Geral .....	21
1.1.2 Objetivos Específicos .....	21
1.2 Organização do Trabalho .....	22
2 Estudo das Tecnologias de Transporte de Gás Natural .....	23
2.1 Introdução.....	23
2.2 Justifica do Gasoduto Virtual .....	24
2.3 Gás Natural Comprimido (GNC) .....	26
2.3.1 Unidade de Compressão de GNC.....	27
2.3.2 Veículos Transportadores de GNC .....	29
2.3.3 Sistema de Descompressão .....	31
2.4 Gás Natural Liquefeito (GNL) .....	33
2.4.1 Planta de Liquefação.....	33
2.4.2 Sistema de transporte .....	35
2.4.3 Sistema de Re-gasificação.....	36
2.5 Gasodutos .....	36
3 Análise do Custo de Transporte de Gás Natural .....	38
3.1 Introdução.....	38
3.2 Estimativa do Número de Caminhões para modal GNC e GNL .....	40
3.3 Custos do Sistema de Transporte .....	44
3.3.1 Custo de Investimento do Sistema de Transporte .....	44
3.3.2 Custo Operacional do Sistema de Transporte .....	45
3.3.3 Cálculo do Custo do Sistema de Transporte.....	52
3.4 Custos da Unidade de Compressão de GNC .....	53
3.4.1 Custo de Investimento do Compressor .....	53
3.4.2 Custo Operacional de Compressão .....	55
3.4.3 Cálculo do Custo da Unidade de Compressão .....	57

3.5 Custos na Planta de Liquefação .....	58
3.5.1 Custo de Investimento da Planta de Liquefação .....	58
3.5.2 Custo Operacional da Planta de Liquefação .....	61
3.6 Custos no Sistema de Estocagem de GNL.....	62
3.6.1 Custo de Investimento do Sistema de Estocagem.....	62
3.6.2 Cálculo do Custo da Planta de Liquefação e Estocagem.....	63
3.7 Gasoduto .....	64
3.7.1 Dimensionamento de gasoduto.....	64
3.7.1.1 Cálculo do Diâmetro interno .....	64
3.7.1.2 Escolha do Material da tubulação.....	65
3.7.1.3 Cálculo e determinação da espessura.....	66
3.7.2 Estimativa do Custo do Gasoduto .....	67
3.7.3 Cálculo do Custo de Transporte do Gasoduto .....	70
4 Resultados: Comparação entre modais .....	71
4.1 Introdução.....	71
4.2 Demanda de caminhões por distância percorrida.....	72
4.3 Escolha do Modal de Transporte do GN.....	73
4.4 Custo do transporte .....	75
5 Conclusões.....	77
5.1 Conclusões .....	77
5.2 Recomendações para trabalhos futuros .....	78
6 Referências Bibliográficas .....	79

## **Lista de figuras**

Figura 1: Tecnologias de transporte de gás natural (Fonte: Dave & Thomas) .....	24
Figura 2: Esquema de gasoduto virtual do GNC .....	26
Figura 3: Unidade compacta de compressão (Microbox®, Empresa Galileo) .....	28
Figura 4: Carreta tubulada, capacidade nominal de 5.040 Nm <sup>3</sup> (Tubulão, NEO <sup>TM</sup> gás) .....	29
Figura 5: Tipo de módulos de armazenamento (NEO <sup>TM</sup> gás e Galileo)....	30
Figura 6: Estações de descompressão (RCU e HPU, NEO <sup>TM</sup> gás) .....	32
Figura 7: Esquema de gasoduto virtual do GNL.....	33
Figura 8: Caminhão com taque criogênico (Gás Local) .....	35
Figura 9: Vista esquemática de um gasoduto. ....	36
Figura 10: Curva de desempenho (Microbox®, Galileo) .....	54
Figura 11: Aplicação da regra do fator seis décimos para uma planta de liquefação.....	60
Figura 12: Capacidade de gasoduto segundo diâmetro e comprimento ..	69
Figura 13: Variação dos números de carretas em função da distância....	72
Figura 14: Efeito da distância na escolha do modal para uma dada demanda de GN.....	74
Figura 15: Efeito da velocidade dos modais de transporte.....	74
Figura 16: Efeito da taxa de retorno do investimento.....	75
Figura 17: Custo do transporte em função da distância.....	76
Figura 18: Custo do transporte em função da demanda .....	76

## **Lista de tabelas**

Tabela 1: Modelos de carretas de armazenamento .....	30
Tabela 2: Dados de entrada para o cálculo do número de caminhões ....	43
Tabela 3: Custo de investimento do sistema de transporte.....	45
Tabela 4: Exemplo de uma planilha de custos.....	51
Tabela 5: Custo operacional do sistema de transporte .....	52
Tabela 6: Cálculo do Custo do Sistema de Transporte para o GNL e GNL .....	53
Tabela 7: Cálculo do Custo da Unidade de Compressão.....	57
Tabela 8: Cálculo do Custo da Planta de Liquefação e Estocagem.....	64
Tabela 9: Dados de entrada do gasoduto .....	67
Tabela 10: Capacidade dos gasodutos (Fonte: Elaboração própria) .....	68
Tabela 11: Diâmetro nominal de um gasoduto segundo o comprimento e a capacidade .....	69
Tabela 12: Custo unitário de construção de um gasoduto .....	70
Tabela 13: Custo de Transporte do Gasoduto .....	70
Tabela 14: Premissas econômicas para o cálculo do custo de transporte .....	71

## **Lista de quadros**

Quadro 1: Formulário para calcular o número de caminhões	40
Quadro 2: Formulário para cálculo de itens de custo de transporte	49

## Lista de símbolos

$Cap_{PL.proj}$	Capacidade da planta de liquefação do projeto.
$Cap_{tanq.ref}$	Capacidade de um tanque de referência.
$Cap_{PL.ref}$	Capacidade de uma planta de liquefação de referência.
$Con_{ener.comp}$	Consumo anual de energia do compressor.
$Con_{ener.PL}$	Consumo de energia da planta de liquefação.
$Con_{esp}$	Consumo específico do compressor.
$CO_{ener.PL}$	Custo de energia da planta de liquefação.
$CI_{PL.proj}$	Custo de investimento da planta de liquefação do projeto.
$CI_{tanq.ref}$	Custo de investimento de um tanque de referência.
$CI_{PL.ref}$	Custo de investimento de uma planta de liquefação de referência.
$CI_{duto}$	Custo de investimento do gasoduto.
$CI_{cav}$	Custo de investimento em cavalos.
$CI_{tan.proj}$	Custo de investimento em tanque do projeto.
$CI_{trans}^{Tot}$	Custo de investimento total do sistema de transporte.
$CO_{duto}$	Custo de operação & manutenção do gasoduto
$CI_{comp}$	Custo do investimento do compressor.
$CI_{car}$	Custo do investimento em carretas.

$CI_{mod}$	Custo do investimento em módulos.
$CI_{oc}$	Custo do investimento em obras civis.
$CI_{comp}^{Tot}$	Custo do investimento total do compressor.
$Cf$	Custo fixo mensal por conjunto (cavalo e carreta).
$CO_{PL}$	Custo operacional da planta de liquefação.
$CO_{ener.comp}$	Custo operacional de energia do compressor.
$CO_{comp}^{Tot}$	Custo operacional total do compressor.
$CU_{f(L,D)}$	Custo unitário de construção de um gasoduto.
$Cv$	Custo variável por km rodado.
$C_i$	Custos de operação e manutenção referentes ao ano i.
$CO_{trans}^{Tot}$	Custo operacional total do sistema de transporte.
$V_i$	Demandas no ano i.
$D$	Diâmetro externo do duto.
$\phi$	Diâmetro interno.
$d_e$	Dias de estoque desejado.
$L$	Distância percorrida ou comprimento do duto.
$L_a$	Distância percorrida por ano.
$t$	Espessura do duto.
$f$	Fator de escala.
$f$	Fator de rugosidade.
$\gamma$	Gravidade específica.

$Inv_i$	Investimento realizado no ano i.
$S$	Máxima tensão permissível do material.
$N_{car}$	Número de carretas.
$N_v$	Número de carretas/dia descarregando.
$N_{cav}$	Número de cavalos.
$N_{mod}$	Número de módulos.
$CO_{outros.comp}$	Outros custos de O&M do compressor
$CO_{outros.PL}$	Outros custos de O&M da planta de liquefação.
$P_{cb}$	Percentual de carretas de back-up.
$Pot_{Tot}$	Potência total do compressor.
$Pot_{un}$	Potência unitária do compressor.
$n$	Prazo de avaliação.
$P_{elet}$	Preço da energia elétrica.
$P_{gas}$	Preço do gás natural combustível.
$P_{car}$	Preço por carreta.
$P_{cav}$	Preço por cavalo.
$P_{mod}$	Preço por módulo.
$P_{comp}$	Preço unitário do compressor.
$Pr_d$	Pressão de descarga.
$Pr_s$	Pressão de succção.
$p_2$	Pressão final.

$p_1$	Pressão inicial ou de desenho.
$P$	Pressão interna de serviço do gasoduto.
$Es$	Quantidade a ser estocada.
$R_{comp}$	Razão de compressão.
$R_{PL}$	Rendimento energético da planta de liquefação.
$r$	Taxa de retorno.
$T$	Temperatura do fluido a transportar.
$T_{car}^a$	Tempo de abastecimento por carreta.
$T_{car}^{cons}$	Tempo de consumo equivalente a uma carreta.
$T_{car}^e$	Tempo de estrada da carreta.
$T_{car}^o$	Tempo de operação diária por carreta.
$T_{car}^{tb}$	Tempo de transbordo (carregamento) por carreta.
$T_{car}^d$	Tempo descarregamento por carreta.
$T_{car}^{Tot}$	Tempo total gasto por carreta.
$C$	Tolerância à corrosão recomendada para o material do duto.
$M$	Tolerância de manufatura.
$VR_n$	Valor residual ao final do ano n.
$Q$	Vazão de desenho.
$V_m$	Velocidade média do caminhão no trecho percorrido.
$Vol_{car}^{ef}$	Volume efetivo da carreta.

$Vol_{car}^{Tot}$  Volume total por carreta.

## Subscritos

<i>car</i>	carretas.
<i>cav</i>	cavalos.
<i>comp</i>	compressor.
<i>d</i>	descarga.
<i>ener.PL</i>	energia da planta de liquefação.
<i>ener.PL</i>	energia da planta de liquefação.
<i>ener.comp</i>	energia do compressor.
<i>elet</i>	energia elétrica.
<i>esp</i>	específico.
<i>2</i>	final.
<i>n</i>	final do ano n.
<i>gas</i>	gás natural combustível.
<i>duto</i>	gasoduto.
<i>1</i>	inicial ou desenho.
<i>m</i>	média.
<i>mod</i>	módulo.
<i>oc</i>	obras civis.

<i>PL</i>	planta de liquefação.
<i>PL.ref</i>	planta de liquefação de referência.
<i>PL.proj</i>	planta de liquefação do projeto.
<i>i</i>	referentes ao ano i.
<i>tran</i>	sistema de transporte.
<i>s</i>	sucção.
<i>tanq.ref</i>	tanque de referência.
<i>Tot</i>	total.
<i>um</i>	unitário.

## Sobrescritos

<i>a</i>	abastecimento.
<i>cons</i>	consumo equivalente.
<i>d</i>	descarregamento.
<i>ef</i>	efetivo.
<i>e</i>	estrada.
<i>o</i>	operação diária.
<i>Tot</i>	Total.
<i>tb</i>	transbordo (carregamento).

## **Abreviatura**

ANP	Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível.
EUA	Estados Unidos da América.
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo.
GN	Gás Natural.
GNL	Gás Natural Liquefeito.
GNV	Gás Natural Veicular.
GNC	Gás Nural Comprimido.
GTL	Gas to Liquids (Gás para Líquido).
GTW	Gas to Wire.
GTC	Gas to Commodity.
GWh	Giga Watt hora.
HGN	Hidrato de Gás Natural.
MW	Mega Watt.
MMBTU	Milhão British Thermal Unit.
MMm <sup>3</sup>	Milhões metros cúbicos.
MMPC	Milhões Pés Cúbicos.
SFC	Standard Cubic Feet (Pé Cúbico Padrão).
TCF	Trillon Cubic Feet.