

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Paulo Roberto Pinto Lopes**

**Uso de expansores para geração de energia elétrica em  
estações de redução de pressão 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.

Orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando

**Rio de Janeiro**

**Abril de 2009**



**Paulo Roberto Pinto Lopes**

**Uso de expansores para geração de energia elétrica em  
estações de redução de pressão 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. Alcir de Faro Orlando**  
**Orientador**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Eloi Fernández y Fernández**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Washington Braga Filho**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Mauro Speranza Neto**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de abril de 2009

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

### **Paulo Roberto Pinto Lopes**

Em 1980 iniciou sua carreira profissional como técnico mecânico desenvolvendo projetos de instalações internas de gás canalizado para grandes comércios e indústrias do Rio de Janeiro e área metropolitana do Rio. Em paralelo começou sua graduação de engenharia mecânica na UERJ (Universidade Estadual do Rio de Janeiro), vindo graduar-se em 1989 na Fundação Técnico-Educacional Souza Marques. Em 1990 passou a realizar perícias de engenharia legal para o Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro. Concluiu em 1998 especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro), quando passou a realizar perícias legais de engenharia de segurança do trabalho para o Tribunal Regional do Trabalho da 1ª Região (Rio de Janeiro). Depois de 21 anos exercendo atividades na área de distribuição de gás canalizado, ingressou na TRANSPETRO e passou a atuar na área de transporte dutoviário, com ênfase em projetos de gasodutos e estudos hidráulicos voltados para gás natural. Paralelamente, em 2005 concluiu especialização em Engenharia de Dutos na PUC-Rio.

#### Ficha Catalográfica

Lopes, Paulo Roberto Pinto

Uso de expansores para geração de energia elétrica em estações de redução de pressão de gás natural / Paulo Roberto Pinto Lopes ; orientador: Alcir de Faro Orlando. – 2009.

112 f. : il.(color.) ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Expansor. 3. Estação de redução de pressão. 4. Geração de energia elétrica. 5. Transporte de gás natural. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Dedico este estudo aos meus pais, Arlindo e Deolinda, que além de serem um marco na minha formação profissional e intelectual, um dia me mostraram “que a educação é a chave que abre todas as portas”. À minha amada Martha, aos meus três queridos filhos Natália, Vinícius e Cícero, que formam o meu tesouro e são a mola que me impulsiona a vencer os novos desafios.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, professor Alcir de Faro Orlando, pelos conhecimentos ofertados, pela incansável atenção e parceria durante a realização das cadeiras e principalmente no desenvolvimento da dissertação.

À minha família pela compreensão, apoio, carinho e grande paciência nesse período mais conturbado da elaboração da dissertação.

À TRANSPETRO por ter me dado a oportunidade e apoiado na realização deste curso de mestrado.

Aos meus colegas de trabalho Sueli Tolmasquim, José Ferioli, Marcelino Guedes e Lino Moreira que me incentivaram e deram o suporte necessário.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Aos professores da banca examinadora.

A todos aqueles que não foram citados, mas que de alguma forma participaram ou apoiaram, até mesmo com a simples amizade, para realização de mais esta etapa de minha vida.

## Resumo

Lopes, Paulo Roberto Pinto; Orlando, Alcir de Faro. **Uso de expansores para geração de energia elétrica em estações de redução de pressão de gás natural**. Rio de Janeiro, 2009. 112p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O gás natural é comprimido para pressões elevadas para que possa ser transportado pelo gasoduto e distribuído aos clientes em pressões mais baixas, através de sua redução em válvulas de controle, num processo adiabático. A termodinâmica mostra que o mesmo estado de saída do gás natural poderia ser conseguido se as válvulas de controle puderem ser substituídas por expansores, gerando trabalho e, portanto, energia elétrica, e com transferência de calor obtida através da queima de combustível, que no caso é o próprio gás natural, para que sua temperatura permaneça a mesma. O investimento nos equipamentos desta substituição é pago num determinado tempo, função da economia líquida de operação, resultante da diferença entre o benefício econômico da energia elétrica gerada e o custo operacional da queima do combustível. Para a realização deste trabalho, um programa de cálculo HYSYS foi usado para quantificar o trabalho produzido e o calor necessário, a partir do registro de dados diários de 34 estações de redução de pressão operadas pela TRANSPETRO. Foram levantadas as características técnicas dos diferentes expansores existentes no mercado. Como resultado desta dissertação é apresentado um procedimento que serve para verificar a viabilidade da utilização de expansores em estações de redução de pressão da TRANSPETRO. A dissertação é, portanto, classificada como uma análise termo-econômica para determinação da viabilidade da utilização destes sistemas em instalações operadas pela TRANSPETRO, uma vez que eles já são utilizados em outras partes do mundo. Os resultados têm um impacto direto nos custos operacionais dos gasodutos.

## **Palavras-chave**

Expansor; estação de redução de pressão; geração de energia elétrica; transporte de gás natural.

## Abstract

Lopes, Paulo Roberto Pinto; Orlando, Alcir de Faro. **Use of expanders for generating electrical energy in natural gas pressure reduction stations.** Rio de Janeiro, 2009. 112p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The natural gas is compressed to high pressures in order to be transported in the gas pipeline and delivered to the clients at lower pressures, using pressure reduction control valves in an adiabatic process. It can be shown that the same natural gas thermodynamic output state is achieved if the control valves can be substituted by expanders, producing work and, therefore, electric energy, with heat transfer from natural gas burning, so that the output temperature remains the same. The payback of the needed investment in equipments is a function of the operational net saving, which is equal to the difference between the economical benefit of produced electric energy and the operational cost of the fuel burning. All the necessary calculations were made with the HYSYS software used to quantify the produced work and the needed heat transfer, from available daily values of temperature, pressure and gas flow rate for 34 pressure reduction stations operated by TRANSPETRO. The technical characteristics of the different expanders in the market were used to calculate the produced work and thermal energy. This dissertation presents a procedure which is useful to verify the feasibility of the utilization of expanders in pressure reduction stations operated by TRANSPETRO. This dissertation is, therefore, classified as a thermo-economical analysis to determine the feasibility of the utilization of expanders in TRANSPETRO facilities, as they are used in other parts of the world. The results have a direct impact on the operational costs of the gas pipelines.

## **Keywords**

Expander; pressure reduction station; electric energy generation; natural gas transport.

# Sumário

1	Introdução	16
1.1	Motivação	16
1.2	Visão geral	16
1.3	Objetivo	19
1.4	Revisão bibliográfica	19
2	Fundamentos teóricos	21
2.1	Termodinâmica	21
2.1.1	Escoamento através de uma válvula de controle	22
2.1.2	Escoamento através de um expansor	23
2.1.3	Estudo de casos	26
2.2	Expansores	28
2.2.1	Expansor alternativo	30
2.2.2	Expansor rotativo	31
2.3	Procedimento de cálculo de potência térmica e potência elétrica	32
2.3.1	Parâmetros de cálculo	32
2.3.2	Método iterativo	33
2.3.3	Aplicação do HYSYS	38
3	Avaliação técnica	41
3.1	Metodologia de análise e processamento de dados	41
3.1.1	Teste realizado	42
3.2	Procedimento adotado	44
3.2.1	Consumo anual de gás combustível ( $C_g$ )	45
3.2.2	Energia elétrica gerada por ano ( $E_e$ )	45
3.2.3	Consumo específico de combustível ( $CEC$ )	46
3.3	Análise de sensibilidade	46
4	Avaliação econômica	48
4.1	Critério de análise do custo benefício	48
4.2	Metodologia para dimensionamento do sistema de recuperação de energia	49

4.2.1 Levantamento de dados para elaboração da planilha econômica	51
4.2.2 Procedimento adotado	54
5 Resultados	59
6 Conclusões	66
7 Referências bibliográficas	68
8 Apêndices	70
8.1 Apêndice 1	70
8.2 Apêndice 2	75
8.3 Apêndice 3	110

## Lista de figuras

Figura 1 – Fluxo de gás natural do poço ao consumidor	17
Figura 2 – Vista geral de um ponto de entrega de gás natural	18
Figura 3 – Fluxos de massa e energia num volume de controle	21
Figura 4 – escoamento através de uma válvula de controle e através de um expansor	22
Figura 5 – Gráfico temperatura <i>versus</i> entropia de um gás qualquer	24
Figura 6 – Gráfico temperatura x entropia para estudo de casos	26
Figura 7 – Instalação típica de uma estação de redução de pressão com expansor em paralelo	29
Figura 8 – Tipos de expansores existentes no mercado	30
Figura 9 – Processo do expansor alternativo real	30
Figura 10 – Esquemático do expansor rotativo	31
Figura 11 – Diagrama T <i>versus</i> s do conjunto expansor-aquecedor com processos termodinâmicos ideal e real	32
Figura 12 – Fluxograma do método iterativo	36
Figura 13 – Resultado da simulação numérica com o programa HYSYS	39
Figura 14 – Modelo de planilha de cálculo	57
Figura 15 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CAP - dados diários)	62
Figura 16 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CAP - dados mensais)	63
Figura 17 – % da potência elétrica máxima x dia do ano	65
Figura 18 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (SUZ - dados mensais)	77
Figura 19 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CVR - dados mensais)	78
Figura 20 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (ESV - dados mensais)	79
Figura 21 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CAB - dados mensais)	80
Figura 22 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (TER - dados mensais)	81
Figura 23 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (FOR - dados mensais)	82
Figura 24 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (SJC - dados mensais)	83
Figura 25 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (JAP - dados mensais)	84
Figura 26 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (SBC - dados mensais)	85
Figura 27 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CCQ - dados mensais)	86
Figura 28 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (PIN - dados mensais)	87
Figura 29 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (BET - dados mensais)	88
Figura 30 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (ARC - dados mensais)	89
Figura 31 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CAT - dados mensais)	90
Figura 32 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (GUA - dados mensais)	91
Figura 33 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (SRI - dados mensais)	92
Figura 34 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (MAC - dados mensais)	93

Figura 35 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (LOR - dados mensais)	94
Figura 36 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (PAC - dados mensais)	95
Figura 37 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (ESB - dados mensais)	96
Figura 38 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (TAU - dados mensais)	97
Figura 39 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (SBS - dados mensais)	98
Figura 40 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (RES - dados mensais)	99
Figura 41 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CTQ - dados mensais)	100
Figura 42 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (REC - dados mensais)	101
Figura 43 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CTD - dados mensais)	102
Figura 44 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (PIR - dados mensais)	103
Figura 45 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (JUI - dados mensais)	104
Figura 46 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CCD - dados mensais)	105
Figura 47 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (CRU - dados mensais)	106
Figura 48 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (PAR - dados mensais)	107
Figura 49 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (ARA - dados mensais)	108
Figura 50 – TIR x investimento/kW gerado x % potência máx (BAR - dados mensais)	109
Figura 51 – Potência elétrica gerada e potência térmica requerida	111
Figura 52 – Potência térmica requerida em função da potência máxima	111
Figura 53 – Energia elétrica gerada x % da potência elétrica máxima	112
Figura 54 – Consumo anual de gás x % da potência máxima	112

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Aplicação do método iterativo	37
Tabela 2 – Quadro comparativo entre as três amostras	43
Tabela 3 – Análise de sensibilidade	47
Tabela 4 - Modelo de registro de dados operacionais	59
Tabela 5 – Resumo geral dos dados operacionais e cálculo de calor e trabalho	61
Tabela 6 – Teste realizado, estação CAP mês de JAN/2008	71
Tabela 7 – Teste realizado, estação CAP mês de FEV/2008	72
Tabela 8 – Teste realizado, estação CAP mês de MAR/2008	73
Tabela 9 - Teste realizado, estação CAP mês de ABR/2008	74
Tabela 10 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação CAP	76
Tabela 11 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação SUZ	77
Tabela 12 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação CVR	78
Tabela 13 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação ESV	79
Tabela 14 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação CAB	80
Tabela 15 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação TER	81
Tabela 16 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação FOR	82
Tabela 17 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação SJC	83
Tabela 18 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação JAP	84
Tabela 19 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação SBC	85
Tabela 20 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação CCQ	86
Tabela 21 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação PIN	87
Tabela 22 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação BET	88
Tabela 23 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação ARC	89
Tabela 24 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação CAT	90
Tabela 25 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação GUA	91
Tabela 26 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação SRI	92
Tabela 27 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação MAC	93
Tabela 28 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação LOR	94
Tabela 29 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação PAC	95
Tabela 30 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação ESB	96
Tabela 31 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação TAU	97

Tabela 32 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação SBS	98
Tabela 33 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação RES	99
Tabela 34 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação CTQ	100
Tabela 35 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação REC	101
Tabela 36 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação CTD	102
Tabela 37 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação PIR	103
Tabela 38 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação JUI	104
Tabela 39 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação CCD	105
Tabela 40 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação CRU	106
Tabela 41 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação PAR	107
Tabela 42 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação ARA	108
Tabela 43 – Dados operacionais e cálculo de potência da estação BAR	109