



Philippe Barroso Krause

**Estudo de alternativa de transporte de CO₂ em
dutos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro,
Setembro de 2010



Philippe Barroso Krause

Estudo de alternativa de transporte de CO₂ em dutos

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

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo
Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Gonçalves Pires
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Mauro Sebastião de Paula Gomes
Olympus Software Científico e Engenharia

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de setembro de 2010

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

Philippe Barroso Krause

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2006.

Ficha Catalográfica

Krause, Philippe Barroso

Estudo de alternativa de transporte de CO₂ em dutos / Philippe Barroso Krause ; orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo. – 2010.

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

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Sequestro de carbono. 3. Transporte de carbono. 4. CO₂. 5. EOR. 6. CCS. I. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

*Dedico esta dissertação à minha família, seja ela consangüínea ou por escolha,
presente ou ausente.*

Agradecimentos

À minha namorada Marcela, pelo amor, carinho e compreensão sem limites.

Aos meus pais, Cláudia e Gilson, minha irmã Luisa e minhas avós Helena e Zulmira pelo total apoio e incentivo para iniciar e finalizar esta etapa da minha vida.

Aos meus avôs Carlos e Hayrton, por olharem sobre mim.

Ao meu amigo Leonardo pelo contínuo apoio e incentivo e a toda equipe do SIMDUT (Núcleo de Simulação Termohidráulica da PUC-Rio) por ajudar e incentivar meu mestrado.

Ao Luis Fernando Pires, pelo apoio técnico, acadêmico e pessoal.

Ao professor orientador Luis Fernando A. Azevedo pela orientação e pela oportunidade.

Aos amigos William, Leo, Zé, Mauro, Paula e Bia, pelo suporte nesta empreitada.

A todos os professores que compuseram o quadro de aulas oferecidas.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

E a todos que, de alguma forma, me ajudaram a concluir mais este objetivo.

Resumo

Krause, Philipe Barroso, Azevedo, Luis Fernando A. **Estudo de alternativa de transporte de CO₂ em dutos**. Rio de Janeiro, 2010. 106p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta um levantamento dos principais pontos de captura, transporte, utilização e armazenamento permanente do dióxido de carbono. Este estudo considera duas motivações importantes e complementares: (1) Os diversos usos e métodos de armazenamento permanente de CO₂ na atualidade; (2) O transporte deste fluido entre o ponto de captura e o ponto de uso e/ou armazenamento. O estudo está dividido entre os principais métodos para captura do CO₂, os principais usos do CO₂ e os métodos de transporte, mas especificamente na área de dutos. Nesta parte, foram feitas diversas simulações, tanto teóricas quanto baseadas em casos reais, assim como um breve estudo da parte de custos destes projetos.

Palavras-Chaves

Sequestro de Carbono; Transporte de Carbono; CO₂; EOR; CCS.

Abstract

Krause, Philipe Barroso, Azevedo, Luis Fernando A. **Study of alternatives for CO₂ pipeline transport**. Rio de Janeiro, 2010. 106p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation presents a compiling of the major point from the capture, transport, use and permanent storage of carbon dioxide. This study considers two main linked motivations: (1) the several uses e storage methods for CO₂ in present time; (2) The need to transport the fluid from its capture point to the de point of use or storage. The study is divided between the capture methods, the main uses for CO₂ and the methods of transportation, more specifically thru pipeline. In this part, several simulations were made, both theoretic and real case studies, including a brief study of the cost of the pipelines.

Keywords

Carbon Sequestration; Carbon Transport; CO₂; EOR; CCS.

Índice

1.	Introdução	15
2.	Propriedades Físico-Químicas do CO ₂	22
2.1.	Dióxido de Carbono Super-Crítico	23
3.	Captura de Carbono	26
3.1.	Pós-combustão	27
3.2.	Pré-combustão	27
3.3.	Oxy-fuel	28
4.	Usos do Dióxido de Carbono	29
4.1.	Indústria Alimentícia	30
4.2.	Indústrias Pesadas	32
4.3.	Indústrias Químicas e Farmacêuticas	34
4.4.	Agricultura	35
4.5.	Recuperação Avançada de Petróleo - EOR	38
4.5.1	Recuperação Avançada de Petróleo no Brasil	42
5.	Seqüestro de Carbono	46
5.1.	Armazenamento Geológico	46
5.1.1	O campo de Snøhvit	50
5.2.	Armazenamento Oceânico	52
5.3.	Carbonização Mineral	54
6.	Métodos de Transporte	58
6.1.	Transporte Rodoviário	58
6.2.	Transporte Marítimo	59
7.	Carbonoduto	62
7.1.	Aspecto Técnico	63
7.2.	Aspecto Econômico	66

8.	Casos Simulados	71
8.1.	Cenários para Comparação	71
8.1.1.	Estado Gasoso	73
8.1.2.	Estado Líquido	74
8.2.	Casos Reais	76
8.2.1.	Exterior	76
8.2.2.	Brasil	82
9.	Análise dos Resultados	87
9.1.	Comparação estado gasoso e líquido	87
9.2.	Caso Real – Exterior	88
9.3.	Caso Real – Brasil	94
10.	Conclusão	97
10.1.	Sugestões para trabalhos futuros	99
11.	Bibliografia	100

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema Simplificado do Balanço Energético da Terra	15
Figura 2 - Concentração de CO ₂ na atmosfera de 2006 a 2010	19
Figura 3 - 20 maiores emissores de gases de efeito estufa	20
Figura 4 - Diagrama de Pressão por temperatura do CO ₂	23
Figura 5 - Gráfico de estado de um fluido supercrítico	24
Figura 6 - Variação da massa específica do CO ₂ supercrítico com Pressão e Temperatura	24
Figura 7 - Variação da Capacidade Térmica e Massa Específica na temperatura crítica	25
Figura 8 - Métodos de Separação de CO ₂	27
Figura 9 - Ciclo do Carbono	29
Figura 10 - Esquema de CO ₂ em industria de bebidas	31
Figura 11 - Posição relativa dos lasers de acordo com espectro eletromagnético	33
Figura 12 - Limpeza de supercondutores	35
Figura 13 - Exemplo de Estufas ao redor do mundo	35
Figura 14 - Variação do crescimento das plantas de acordo com a quantidade de CO ₂	36
Figura 15 - Processo de fotossíntese das algas	37
Figura 16 - O maior bioreator de micro-alga no mundo	38
Figura 17 - Esquema simplificado de EOR	39
Figura 18 - Atividades de CCS nos EUA	40
Figura 19 - Atividades de CCS na Europa	41
Figura 20 - Esquema simplificado do EOR de CO ₂	42
Figura 21 - Produção de Petróleo na Bacia do Recôncavo	43
Figura 22 - Fluxograma do EOR da Petrobras na bacia do Recôncavo	44

Figura 23 - Produção de petróleo e injeção de CO ₂ no campo de Buracica	45
Figura 24 - Opções de armazenamento geológico de CO ₂	48
Figura 25 - Representação do Campo de Snøvit	51
Figura 26 - Esquema simplificado do CSS de Snøvit	52
Figura 27 - Estratégias de Armazenamento Oceânico de CO ₂	54
Figura 28 - Processo de Carbonização Mineral	56
Figura 29 - Os dois tipos de navio de transporte de LGN: de Esfera e de Membrana	59
Figura 30 - Planta genérica de um navio transportador de GNL	60
Figura 31 - Aumento das emissões de CO ₂ pelo transporte marítimo	61
Figura 32 - Efeito das impurezas nas propriedades do CO ₂	65
Figura 33 - Relação de custo de investimento de dutos para CO ₂ por distância e diâmetro	68
Figura 34 - Planta de Liquefação de CO ₂	70
Figura 35 - Casos teóricos estudados	72
Figura 36 - Bacias petrolíferas do Vietnã	77
Figura 37 - Plataforma Gian 1, localizada no White Tiger Field	78
Figura 38 - Esquematização do Plano de EOR	79
Figura 39 - Caminho dos dutos de CO ₂ para o White Tiger Field	80
Figura 40 - Perfil dos dutos utilizado na simulação	80
Figura 41 - Fluxograma do Modelo	81
Figura 42 - Localização dos dutos do Alinhamento	82
Figura 43 - Esquemático do Sistema de Carboduto de Miranga	83
Figura 44 - Perfil do duto de 10" entre Camaçari e Santiago	84
Figura 45 - Perfil do duto de 6" entre Santiago e Miranga	84
Figura 46 - Temperatura ao longo do duto de 16" de acordo com a temperatura marítima	91
Figura 47 - Temperatura ao longo do duto de 20" de acordo com a temperatura marítima	91

Figura 48 - Vazão real ao longo do duto de 16" em função da temperatura marítima	92
Figura 49 - Vazão real ao longo do duto de 20" em função da temperatura marítima	92
Figura 50 - Massa específica ao longo do duto de 16" em função da temperatura marítima	93
Figura 51 - Massa específica ao longo do duto de 20" em função da temperatura marítima	93
Figura 52 - Variação da Velocidade do escoamento do duto	95
Figura 53 - Variação de Head no duto	96
Figura 54 - Variação de Pressão no duto	96

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Emissões no Brasil	21
Tabela 2 - Projetos de Armazenamento Geológico	49
Tabela 3 - Custos estimados para duas alternativas de dutos de CO ₂	69
Tabela 4 - Pressão de Vapor nas temperaturas estudadas	72
Tabela 5 - Condições de Custódia e Vazões Volumétricas Equivalentes	73
Tabela 6 - Condições de contorno das simulações do gás	74
Tabela 7 - Propriedades do CO ₂ de acordo com Pressão e Temperatura	75
Tabela 8 - Temperaturas Estudadas	81
Tabela 9 - Propriedades do CO ₂ de acordo com Pressão e Temperatura	85
Tabela 10 - Resumo da comparação entre o transporte líquido e gasoso de CO ₂	87
Tabela 11 - Resultados Iniciais de Vazão	89
Tabela 12 - Resultado após alteração de espessura	90
Tabela 13 - Comparação entre CO ₂ Compressível e Incompressível	95

“Time flies like an arrow. Fruit flies like a banana.”

- Groucho Marx