



Dario Prada Parra

**Desenvolvimento de um sensor de fibra óptica
para determinar mudanças de fase do dióxido
de carbono (CO₂)**

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. Marcos Sebastião de Paula Gomes
Co-orientador: Prof. Cicero Martelli

Rio de Janeiro
Novembro de 2010



Dario Prada Parra

**Desenvolvimento de um sensor de fibra óptica para
determinar mudanças de fase do dióxido de carbono (CO₂)**

Dissertação 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. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC - RIO

Prof. Cicero Martelli

Co-Orientador

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Luiz Carlos Guedes Valente

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC - RIO

Prof. Carlos Valois Marciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC - RIO

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de dezembro de 2010

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

Dario Prada Parra

Graduou-se em Engenharia Mecânica no Depto. de Engenharia Mecânica da UIS (Universidad Industrial de Santander), em 2007. Atualmente tem continuado com a linha de pesquisa na área de Petróleo e Energia, com o desenvolvimento de um sensor de fibra óptica para determinar mudanças de fase do dióxido de carbono (CO₂).

Ficha Catalográfica

Prada Parra, Dario

Desenvolvimento de um sensor de fibra óptica para determinar mudanças de fase do dióxido de carbono (CO₂) / Dario Prada Parra ; orientador: Marcos Sebastião de Paula Gomes. – 2010.

84 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. Dióxido de carbono. 3. Fibra óptica. 4. Índice de refração. 5. Refratômetro. I. Gomes, Marcos Sebastião de Paula. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Um homem que não se alimenta de seus sonhos, envelhece cedo
William Shakespear

Agradecimentos

A meus Pais e irmãos por seu amor e apoio incondicional.

O Marcos Sebastião de Paula Gomes, meu orientador, pela confiança que teve comigo durante este tempo.

O meu co-orientador Cicero Martilli e pessoal do Laboratório de Sensores de Fibra Óptica (LSFO), pelo apoio e confiança para atingir meus objetivos.

A Paula, João e Carla pela amizade e apoio a longo deste tempo.

A meus amigos pela amizade e pelos bons momentos compartilhados nestes anos.

Agradecimentos em particular para os órgãos de fomento à pesquisa IBP, pelo apoio financeiro fornecido, sem o qual este trabalho simplesmente não teria sido possível.

Resumo

Prada Parra, Dario; Gomes, Marcos Sebastião de Paula; Martelli, Cicero. **Desenvolvimento de um sensor de fibra óptica para determinar mudanças de fase do dióxido de carbono (CO₂)**. Rio de Janeiro, 2010. 84p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

É desenvolvido um sensor baseado na tecnologia da fibra óptica que detecta a mudança de fase do CO₂. O sensor é composto de uma fibra óptica monomodo e uma bancada experimental composta por três sistemas: óptico, eletrônico e mecânico, para facilitar a aquisição das medidas. A grandeza utilizada para detectar a mudança de fase do CO₂ foi o índice de refração, para isto é utilizado um refratômetro que mede o índice de refração de substâncias e fundamentado na refração de Fresnel. Além disso, foi necessária uma calibração do sensor empregando-se substâncias padrão de índice de refração conhecidos na faixa de 1,26 a 1,40, além da calibração de índice de refração unitário para o ar. Para observar a mudança de fase do CO₂, testou-se o CO₂ mudando a temperatura na faixa entre -40 °C e 21 °C a e pressões entre 100 kPa a 5700 kPa. O sistema operou de acordo com as expectativas, detectando corretamente o índice de refração do CO₂ para as fases de gás e líquido.

Palavras-chave

Dióxido de carbono; fibra óptica; índice de refração; refratômetro.

Abstract

Prada Parra, Dario; Gomes, Marcos Sebastião de Paula (advisor); Martelli, Cícero. **Development of a fiber optic sensor to determine phase changes of carbon dioxide (CO₂)**. Rio de Janeiro, 2010. 84p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An optical fiber technology-based sensor that can detect phase changes of CO₂ was developed. The sensor is comprised of a singlemode fiber and an experimental setup composed of three systems: optical, electronic and mechanical, which helped with the data acquisition. The quantity used to detect phase changes of CO₂ was the refractive index. For this purpose, a refractometer, a device that measures the substance's refractive index based on Fresnel's reflection, was used. Moreover, it was necessary to calibrate the sensor using standard substances with well known refractive indices in the range from 1.26 to 1.40. To observe phase changes of CO₂, this substance was tested changing the temperature in a range from 21 °C to -40 °C and the pressure from 100 kPa to 570 kPa. The system performed in accordance with the expectations, detecting properly the refractive index of CO₂ for the liquid and gas phases.

Keywords

Carbon dioxide; optical fiber; refractive index; refractometer.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 15 |
| 1.1. Objetivo | 20 |
| 1.2. Justificativa | 21 |
| 1.3. Aplicação | 22 |
| 1.3.1. Detecção das emissões do CO ₂ em fontes fixas ou móveis | 22 |
| 1.3.2. Captura e armazenamento de carbono (<i>Carbon Capture and Storage - CCS</i>) | 23 |
| 1.3.3. Recuperação avançada de petróleo (<i>Enhanced oil recovery - EOR</i>) | 28 |
| 1.3.3.1. Método de recuperação térmico | 29 |
| 1.3.3.2. Método de solventes ou miscíveis | 29 |
| 1.3.3.3. Método de recuperação químico | 30 |
| 1.4. Conteúdo do Trabalho | 31 |
| | |
| 2. Revisão Bibliográfica | 33 |
| 2.1. Propriedades do CO ₂ | 33 |
| 2.1.1. Propriedades Termodinâmicas do CO ₂ | 34 |
| 2.2. Fibra Óptica | 39 |
| 2.2.1. Sensores a fibra óptica | 40 |
| 2.2.2. Classificação | 40 |
| 2.3. Aplicações | 43 |
| 2.3.1. Sensores de gases | 43 |
| 2.3.2. Sensores químicos | 44 |
| 2.4. Sensores ópticos de CO ₂ | 46 |
| | |
| 3. Procedimento Experimental | 51 |
| 3.1. Princípio Físico: Reflexão e Refração da Luz | 51 |
| 3.2. Bancada Experimental | 56 |
| 3.2.1. Sistema Óptico | 57 |
| 3.2.2. Sistema Eletrônico | 58 |

| | |
|---|----|
| 3.2.3. Sistema Mecânico | 59 |
| 3.3. Calibração do Sensor | 61 |
| 4. Resultados | 64 |
| 4.1. Ensaio Preliminares Caracterização do sistema | 64 |
| 4.2. Resultados Experimentais | 68 |
| 4.2.1. Procedimento experimental para o teste de estabilidade | 68 |
| 4.3. Repetitividade | 73 |
| 5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros | 78 |
| 5.1. Conclusões | 78 |
| 5.2. Sugestões para trabalhos futuros | 79 |
| 6. Referências Bibliográficas | 80 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 Custo de operação das fases do CCS (IPCC, 2005) | 28 |
| Tabela 2 Propriedades físicas do CO ₂ (Kauff, 1999) | 35 |
| Tabela 3 Propriedades físicas das fibras ópticas (Schneider et al., 2000) | 39 |
| Tabela 4 Dados obtidos da simulação empregando a equação (3.2) | 54 |
| Tabela 5 Percentagem da refletância | 55 |
| Tabela 6 Descrição específica da fibra óptica usada no projeto | 55 |
| Tabela 7 Apresenta os resultados obtidos pela equação Lorentz - Lorentz e os obtidos experimentalmente | 76 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Relação entre os setores energéticos e as emissões de CO ₂ (IPCC, 2009) | 16 |
| Figura 2 - Projeção estatística das emissões de CO ₂ por ano (EnergyTechnology Perspectives, 2008) | 17 |
| Figura 3 - Projeções das contribuições de CO ₂ feitas pelos sectores energéticos(IEA-CCS 2008) | 18 |
| Figura 4 - Concentração de CO ₂ vs aumento Temperatura Global (Karl Melillo, e Peterson 2009) | 18 |
| Figura 5 - Fontes fixas e móveis de CO ₂ (IEA CCS.2008). | 23 |
| Figure 6 - Tecnicas de captura do CO2 | 25 |
| Figura 7 - Fases que constituem o CCS (IPCC, 2006) | 26 |
| Figura 8 - Tipos de reservatórios para a injeção do CO ₂ (yang e Choi, 2008) | 27 |
| Figura 9 - Injeção em poços maduros (EOR).(IEA,2007) | 30 |
| Figura 10 - Projeção de armazenagem do CO ₂ (IEA-CCS-2008) | 31 |
| Figura 11 - Processo de fotossíntese (Govindjee,2000) | 34 |
| Figura 12 - Diagrama de fase do CO ₂ mostra as três fases de equilíbrio do CO ₂ (sólido, líquido e gasoso) | 36 |
| Figura 13 - Diagrama de fase do CO ₂ (M Baviere, 1980) | 38 |
| Figura 14 - Diagrama esquemático da fibra óptica | 40 |
| Figura 15 - Sensores de fibra óptica extrínsecos (Khazan,1993) | 41 |
| Figura 16 - Sensores de fibra óptica intrínsecos (Khazan,1993) | 42 |
| Figura 17 - Desenho óptico e eletrônico do refratômetro básico | 49 |
| Figura 18 - Desenho óptico e eletrônico do refratômetro diferencial | 50 |
| Figura 19 - Incidência normal de um feixe de luz | 52 |
| Figura 20 - fibra óptica interagando com um meio | 53 |
| Figura 21 - Representação gráfica da lei de Snell | 54 |
| Figura 22 - Simulação da equação de Fresnel | 55 |
| Figura 23 - Bancada Experimental e suas principais partes | 56 |
| Figura 24 - Desenho esquemático do circuito óptico do Refratômetro | 57 |
| Figura 25 - Circuito óptoeletrico do refratômetro óptico | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 26 - Equipamentos para a medição de Temperatura e Pressão | 59 |
| Figura 27 - Câmara de teste | 59 |
| Figura 28 - Sensor óptico projetado com seu corpo | 60 |
| Figura 29 - Montagem do sistema Mecânico | 60 |
| Figura 30 - Amostras coletadas para a calibração | 61 |
| Figura 31 - Tela do programa desenvolvido para visualizar e coletar os dados recebidos do refratômetro | 62 |
| Figura 32 - Curva de calibração do sensor de CO ₂ | 62 |
| Figura 33 - Montagem feita para calibrar o sensor | 63 |
| Figura 34 - Desenho da bancada experimental para os testes de mudança de fase do CO ₂ | 65 |
| Figura 35 - Gráfico variação da Temperatura e Índice de Refração vs Tempo para um período de 7 horas mostrando os estados termodinâmicos indicados pelos números 1, 2 e 3 | 66 |
| Figura 36 - Visualização dos três estados termodinâmicos para Temperatura vs Tempo e conseqüente alteração do índice de refração | 66 |
| Figura 37 - Gráfico variação do Índice de Refração, Temperatura vs Tempo para um período de quatro horas e meia | 67 |
| Figura 38 - Gráfico no diagrama de fase do CO ₂ com seus estados termodinâmicos para um teste de 7 horas | 67 |
| Figura 39 - Gráfico Temperatura vs volume específico do CO ₂ com seus respectivos estados termodinâmicos | 68 |
| Figura 40 - Gráfico de estabilidade da detecção da mudança de fase do CO ₂ variando a Temperatura vs Tempo e monitorando-se o índice de refração | 69 |
| Figura 41 - Gráfico variação da Pressão, Temperatura vs Tempo. | 70 |
| Figura 42 - Visualização dos cinco estados termodinâmicos no gráfica Pressão e Temperatura | 71 |
| Figura 43 - Visualização dos cinco estados termodinâmicos no gráfico Índice de Refração e Temperatura | 71 |
| Figura 44 - Gráfico no diagrama de fase do CO ₂ com seus estados termodinâmicos | 72 |

| | |
|---|----|
| Figura 45 - Gráfico Temperatura vs volume específico do CO ₂ com seus respectivos estados termodinâmicos atingidos durante o teste | 72 |
| Figura 46 - Gráfico variação da Índice de Refração, Temperatura vs Tempo para um período de 18 horas | 73 |
| Figura 47 - Visualização em 3D da Pressão, Temperatura e índice de Refração para um período de 18 horas | 74 |
| Figura 48 - Gráfico no diagrama de fase do CO ₂ com seus estados termodinâmicos para um teste de 18 horas | 74 |
| Figura 49 - Gráfico Temperatura vs volume específico do CO ₂ com seus respectivos estados termodinâmicos | 75 |
| Figura 50 - Gráfico Densidade vs Índice de Refração do CO ₂ com seus respectivos estados termodinâmicos | 77 |

Lista de símbolos

| | | |
|------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| A | Valor dependente da substancia | $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$ |
| ΔG | Energia livre de Gibbs | [KJ] |
| H | Entalpia | [kJ] |
| m | massa | [kg] |
| n_f | Índice de Refração da fibra | |
| n_f | Índice de Refração da fibra | |
| n_1 | Índice de Refração do meio 1 | |
| n_s | Índice de Refração da substância | |
| n_2 | Índice de refração do meio 2 | |
| V | Volume | $[\text{m}^3]$ |
| n_s | Índice de refração da substância | |
| N | Índice de Refração | |
| P | Pressão | [kPa] |
| S | Entropia | $[\text{kJ K}^{-1}]$ |
| T | Temperatura | $[\text{°C}; \text{K}]$ |
| T_{pt} | Temperatura do ponto triplo | $[\text{°C}; \text{K}]$ |
| P_{pt} | Pressão do ponto triplo | [MPa] |
| T_c | Temperatura critica | $[\text{°C}; \text{K}]$ |
| P_c | Pressão critica | [MPa] |
| t | Tempo | [s] |
| R | Reflatancia | |

Símbolos gregos

| | | |
|----------|---------------------------------|-----------------------------------|
| α | Estado Sólido do CO_2 | |
| γ | Estado gasoso do CO_2 | |
| v | Volume especifico | $[\text{m}^3 \text{kg}^{-1}]$ |
| ρ | Densidade ou massa especifica | $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ |
| β | Estado líquido do CO_2 | |