## **Casos Simulados**

Não foi encontrado na literatura um bom modelo matemático para tratar de simulação de escoamento de fluidos supercríticos. Para poder avaliar melhor o escoamento do  $CO_2$  nos dutos, foram pesquisados casos onde o  $CO_2$  se encontra nos estados físicos mais conhecidos. As simulações desta dissertação estão divididas de acordo com o estado físico do  $CO_2$ . Foram estudados os efeitos das variações de diâmetro, comprimento e temperatura devido à peculiaridade do  $CO_2$ , bem como a variação da densidade com pressão e temperatura e da curva de pressão de vapor. Foi também comparado o transporte do fluido líquido e gasoso, e assim avaliada a melhor escolha de acordo com as variáveis propostas.

Um dos objetivos iniciais desta dissertação era estudar os casos reais e tentar se aproximar deles através da simulação termo-hidráulica. Foram estudados dois casos distintos, um caso no exterior onde as variáveis eram conhecidas e a experiência de EOR no Brasil, feita pela Petrobras. Entretanto, devido às dificuldades apresentadas no item 8.2.2, não foi possível obter uma simulação satisfatória da experiência de EOR no Brasil. Em todas as simulações o  $CO_2$  foi considerado com pureza absoluta, devido aos fatores observados no item 7.

Infelizmente, apesar de grande procura, não foi possível encontrar um caso real onde o  $CO_2$  seja transportado somente na forma gasosa, aparentemente porque o transporte seria muito dispendioso, como será demonstrado pelos resultados obtidos nas simulações. Entretanto, existem diversos casos onde o escoamento do  $CO_2$  para EOR ou CCS é bifásico, i.e. os casos apresentados nos itens 4.5.1 e 5.1.1.

#### 8.1.

#### Cenários para Comparação

Os casos simplificados estudados consideraram dutos de comprimento constante de 100 km e diâmetros iguais entre si. Os casos foram os mesmos para transporte na forma gasosa quanto na forma líquida, baseando-se na vazão mássica. Isso foi feito para permitir uma melhor comparação entre as duas formas

de acordo com as 18 alternativas apresentadas na Figura 35. No caso do gasoduto, poderá se observar a quantidade necessária de compressores de acordo com as condições operacionais. Através desses 18 casos simplificados, foi possível levantar o efeito que cada uma dessas variáveis tem sobre o projeto de um sistema de transporte de  $CO_2$ .



Figura 35 - Casos teóricos estudados

Para fazer as simulações de ambos os estados físicos, é muito importante estar atento à pressão de vapor do dióxido de carbono a essas temperaturas, a fim de garantir que não haja escoamento bifásico durante as simulações. Como nestes casos o escoamento será considerado isotérmico, a pressão de vapor pode ser considerada constante em cada uma das temperaturas. As Tabela 4 e 5 apresentam, respectivamente, a relação da pressão de vapor com temperatura e a pressão e custódia para cada fase do dióxido de carbono. Como se estava trabalhando com o mesmo produto, se tornam necessárias as duas condições de custódia, portanto o método de comparação será feito através da vazão mássica, que será a mesma (de acordo com a Figura 35). As espessuras utilizadas para os cálculos foram de 0,25 polegada para os dutos de 10 polegadas e 0,5 polegadas para os demais.

Tabela 4 - Pressão de Vapor nas temperaturas estudadas	5
--	---

Temperatura	Pressão de Vapor
10°C	45,70 kgf/cm <sup>2</sup>
20°C	58,14 kgf/cm <sup>2</sup>
30°C	73,05 kgf/cm <sup>2</sup>

Estado	Temperatura	Pressão	Massa Específica	Vazão Volumétrica	
Físico	[°C]	[bar]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m³/h]	[km³/dia]
CÁS	20	1	1.92	11446,89	274,73
GAS	20	1 1,82	1,82	45787,55	1098,90
ιίουπο	LÍQUIDO 20 100 831,49	25,06	0,60		
LIQUIDO		100	651,49	100,22	2,41

Tabela 5 - Condições de Custódia e Vazões Volumétricas Equivalentes

# 8.1.1.

#### Estado Gasoso

Para todas as simulações com o fluido no seu estado gasoso, foi utilizado o software comercial *Pipeline Studio*, da Energy Solutions. Esse programa é utilizado pela Petrobras, TBG e pela Transpetro, assim como outros, para a simulação termo-hidráulica dos seus gasodutos. Para simular os compressores, foram utilizados compressores ideais, inerentes ao programa, a fim de permitir um estudo de sua necessidade sem um grande detalhamento.

O *Pipeline Studio* é um programa desenvolvido para trabalhar com o escoamento de fluidos em uma dimensão. Ele permite tanto o cálculo de escoamento termo-hidraulico de líquidos como gases, entretanto não ao mesmo tempo (bifásico). O programa possui em sua base de dados a grande maioria dos compostos químicos relacionados a industria de petróleo e ao transporte de duto, como metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etc. O programa permite a escolha da equação de estado utilizada dependendo do estado físico do fluido. No caso dos gases, as opções são Sarem, BWRS (Benedict-Webb-Rubin-Starling), Peng (Peng-Robinson) ou gás ideal. Para os líquidos, as opções são "TABLE" (entrada das variações de densidade e viscosidade em tabela dependendo da variação de pressão e temperatura, na forma de tabela) ou BWRS. Para o estudo do CO<sub>2</sub> na forma gasosa, foi utilizada a equação de Peng-Robinson. Essa escolha foi feita baseada na experiência de pessoas da área de transporte de CO<sub>2</sub> (Seevam P.N. 2009)[56].

A Equação de Peng-Robinson foi desenvolvida em 1976 para satisfazer algumas premissas: Os parâmetros deveriam ser expressos em termos das propriedades críticas; o modelo deveria atender a uma precisão razoável perto do ponto crítico, em particular os cálculos do fator de compressão e densidade do líquido; as leis de mistura não deveriam empregar mais de um único parâmetro binário de interação, que deveria ser independente das composições de pressão e temperatura; a equação deveria ser aplicada para o cálculo de todos fluidos presentes nos processos com gás natural (Peng. D.Y.; Robinson, D.B. – 1976)[60]. As equações de perda de carga, continuidade, momento, energia e área de escoamento se encontra no tópico "Modeling conventions and restrictions" do manual de ajuda do programa (Pipeline Studio. 2009)[57].

Apesar de o programa permitir simular mais de um duto ao mesmo tempo, devido à necessidade de avaliar a quantidade de compressores necessários de acordo com as variáveis mencionadas, optou-se por estudar cada caso em um modelo separado.

As condições de contorno de pressão utilizadas no estado gasoso, apresentadas na Tabela 6 são baseadas nas pressões de vapor da Tabela 4 e nos dados dos poços da Petrobras em Buracica, que recebem o  $CO_2$  na forma gasosa. A pressão no recebimento foi determinada por este poço.

Tabela 6 - Condições de contorno das simulações do gás

Temperatura Ambiente	Pressão Máxima	Pressão de Recebimento
10°C	44 kgf/cm <sup>2</sup>	
20°C	57 kgf/cm <sup>2</sup>	20 kgf/cm <sup>2</sup>
30°C	72 kgf/cm <sup>2</sup>	

## 8.1.2.

## Estado Líquido

Para todas as simulações com o fluido no seu estado líquido, foi utilizado o software comercial *Stoner Pipeline Simulator* (SPS), da Advantica. Esse programa é utilizado pela Petrobras, e pela Transpetro para a simulação termohidráulica dos seus oleodutos. Ao contrário do *Pipeline Studio*, o SPS não possui as características dos produtos em seus bancos de dados, portanto elas devem ser fornecidas utilizando os comandos do programa. Para pressão de recebimento, foi considerado uma pressão de 100 kgf/cm<sup>2</sup>, utilizando os dados do caso estudado no item 8.2.2. O SPS é um programa de escoamento térmico hidráulico de fluidos, podendo, assim como o *Pipeline Studio*, trabalhar tanto com líquidos como gases, mas não ambos (bifásico). Ele trabalha com escoamento unidimensional, assim como seu concorrente. Suas equações de estado gás são BWRS, AGA (*American Gas Association*) e CNGA (*Compressed Natural Gas Associoation*); e para líquido SCL (*Slight Compressive Liquid*), BWRS e TABLE.

Devido à peculiaridade do  $CO_2$  de, mesmo em seu estado líquido, ter uma grande variação de densidade com a pressão e temperatura, foi utilizado a equação de estado TABLE, onde é preciso entrar com uma tabela com as variações mencionadas dentro do intervalo estudado. A Tabela 7 apresenta os dados utilizados tanto nas simulações dos casos simplificados quanto nos casos reais. Os pontos foram retirados utilizando o programa VRTherm, da empresa VRTech, que calcula os dados dos produtos de acordo com a temperatura e pressão. A entrada de dados em tabela TABLE trabalha com capacidade térmica constante, portanto foi utilizada a do  $CO_2$  nas condições de custódia, 0,83 kJ/(kg·K).

Temperatura [°C]	Pressão [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Massa Específica [kg/m³]	Viscosidade [cP]
0	90	977,193	0,109
0	100	986,132	0,109
0	110	994,549	0,109
0	120	1002,510	0,109
10	90	901,789	0,091
10	100	914,500	0,091
10	110	926,170	0,091
10	120	936,973	0,091
20	90	807,910	0,074
20	100	827,879	0,074
20	110	845,298	0,074
20	120	860,812	0,074
25	90	749,235	0,065
25	100	776,031	0,065
25	110	798,284	0,065
25	120	817,460	0,065
30	90	676,220	0,058
30	100	715,402	0,058
30	110	745,188	0,058
30	120	769,578	0,058

Tabela 7 - Propriedades do CO2 de acordo com Pressão e Temperatura

Para calcular a curva da variação da densidade e viscosidade com a pressão e temperatura, o SPS utiliza as seguintes equações:

Densidade:

$$\rho = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3P + a_4TP + a_5P^2 + a_6T^3 + a_7T^2P + a_8TP^2$$

Viscosidade:

$$\log \mu = b_0 + b_1 T + b_2 P + b_3 T^2 + b_4 T P + b_5 P^2 + b_6 T^3 + b_7 T^2 P + b_8 T P^2$$

Onde os coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$ ,...,  $a_8$  e  $b_0$ ,  $b_1$ ,...,  $b_8$  são determinados pelo programa para produzir a melhor curva a partir dos dados fornecidos.

As equações de perda de carga, continuidade, momento, energia e área de escoamento se encontram no manual do programa, nas páginas 215 a 223 (Stoner Pipeline Simulator. 2007)[58].

8.2. Casos Reais 8.2.1. Exterior

Para se obter uma validação da modelagem dos dutos de transporte líquido de CO<sub>2</sub> utilizando um software comercial, foi utilizado um caso real, de transporte de CO<sub>2</sub> para a Recuperação Avançada de Petróleo. O caso em questão é um projeto no Vietnã, com recuperação de dióxido de carbono proveniente de uma usina de fornecimento de energia (*Phu My Power Plant*) para o campo marítimo *White Tiger Field* (ou *Bach Ho*) [61], como pode ser visto na Figura 36.



Figura 36 - Bacias petrolíferas do Vietnã

O Vietnã é o terceiro maior produtor de petróleo da Associação das Nações do Sudeste da Ásia, atrás apenas da Indonésia e da Malásia. Em 2004, a produção foi de 130 milhões de barris de petróleo e 200 bilhões de pés cúbicos de gás natural. A estimativa na época é que ainda restavam cerca de 6,5 a 8,5 bilhões de barris de petróleo e 75 a 100 trilhões de pés cúbicos de gás natural (Brown, D. – 2005)[62].

O White Tiger Field é um grande campo petrolífero na Cuu Long Basin, no Mar da China Meridional localizado a leste do Mekong Delta, no Vietnã. É o maior campo petrolífero do Vietnã, descoberto em 1974 e posto em produção em 1986, desenvolvido pela antiga entidade Russo-Vietnamita Vietsovpetro. O campo contém reservas importantes hospedadas em rochas graníticas altamente fraturadas. Com o início do declínio de produção em 1999, a Recuperação Avançada de Petróleo se tornou vital para o programa de petróleo vietnamita. A Figura 37 apresenta a plataforma Gian 1, localizada no campo em questão, onde ocorrerá a injeção de CO<sub>2</sub>.



Figura 37 - Plataforma Gian 1, localizada no White Tiger Field

O projeto de EOR a ser estudado provém de um projeto da Mitsubishi para o campo. O duto seguirá a faixa de um gasoduto pré-existente, que abastece a usina de energia. Um esquema do plano de EOR se encontra na Figura 38 e os principais dados pertinentes obtidos sobre o plano de EOR se encontram listados abaixo:

- Usina localizada a 70 km sudoeste de Ho Chi Minh City (Saigon)
- Quantidade de CO<sub>2</sub> disponível: 35 000 ton/d
- Pureza do CO<sub>2</sub>: 99,9%
- Capacidade de compressão: 10 unidades de 3 000 ton/d cada
- Pressão de descarga máxima dos compressores: 2000 psig ou 13,79 MPa
- Distância total: 143,6 km (terrestre 37,1 km e marítimo 106,5 km)
- Tamanho dos dutos: 16" com vazão de 9 000 ton/d e 20" com vazão de 21 000 ton/d
- CO<sub>2</sub> entregue na plataforma como líquido (pressão acima de 1 200 psig ou 8,27 MPa)



Figura 38 - Esquematização do Plano de EOR

O perfil dos dutos foi adquirido através do programa Google Earth, utilizando o caminho disposto por (Mitshubishi – 2004)[61], o tamanho dos trechos do duto em terra e submarino e a localização da plataforma Gian 1, localizada no campo *White Tiger*, exemplificado na Figura 37. A Figura 39 demonstra o caminho percorrido pelo duto utilizado como base para as simulações feitas. A espessura do duto foi considerada constante ao longo do mesmo. A Figura 40 demonstra o perfil simplificado das simulações.



Figura 39 - Caminho dos dutos de CO<sub>2</sub> para o White Tiger Field Fonte: Google Earth



De acordo com os dados obtidos acima, foi elaborado um modelo simplificado dos dois dutos em paralelo. Como não foram obtidos os dados dos compressores de CO<sub>2</sub>, nem das instalações de recebimento, a usina de energia foi modelada como um tanque pressurizado de vazão constante, e a plataforma como um tanque de recebimento a pressão constante (acima de 1200 PSI ou 8,27 MPa).

Foi considerado como local de recebimento na plataforma um ponto a 20 metros do nível do mar. Foram modelados simultaneamente os dois dutos operando em paralelo. A Figura 41 demonstra a esquematização feita no modelo. Considerou-se inicialmente uma espessura constante de 0,5 polegadas para ambos os dutos.



Ao modelar o sistema, no entanto, notou-se a falta de uma informação importante: a temperatura do mar ao longo da profundidade do duto. Devido à dificuldade de se obter essa informação, surgiu a possibilidade de um estudo dos efeitos da temperatura do mar no escoamento do duto. Para isto, foram consideradas temperaturas conhecidas da profundidade do litoral brasileiro e uma temperatura comum a em águas muito mais baixas, a fim de estudar com maior precisão esses efeitos. A Tabela 8 apresenta as temperaturas estudadas. A fim de observar melhor essas variações, a temperatura marítima foi considerada constante ao longo do trecho submerso. A temperatura do trecho em terra foi considerada de 20°C.

Tabela 8 - Temperaturas Estudadas			
Caso	o Temperatura do Mar		
Caso 1	4°C		
Caso 2	8°C		
Caso 3	12°C		
Caso 4	18°C		

Ao modelar os dutos no SPS, no entanto, encontrou-se outro problema. O SPS só trabalha com dutos enterrados, ou seja, não houve o cálculo do efeito da corrente marítima no duto. Para minimizar este problema, foi considerado um duto sem isolamento térmico, com massa específica do aço de 7846 kg/m<sup>3</sup>, capacidade térmica de 0,44 kJ/(kg·K) e condutividade térmica de 217,8 kJ/h·m·K.

Foi considerado o duto enterrado a 2 metros de profundidade, a massa específica do solo de 1396 kg/m<sup>3</sup>, o capacidade térmica de 3,2322 kJ/kg·K e condutividade térmica de 6,6855 kJ/h·m·K.

## 8.2.2.

## Brasil

Além do projeto de EOR e CSS visto no item 4.5.1, o Brasil possui ainda um segundo projeto, em escala menor, para o campo de Miranga. Este projeto tem o duplo intuito de servir como projeto de EOR e CSS, assim como testar a tecnologia de separação de gás por membrana, que poderá futuramente ser utilizada nos poços *off-shore*. A Figura 42 apresenta o traçado dos dutos visto por satélite, utilizando o programa Google Earth, da empresa Google para identificar a faixa de duto.



Figura 42 - Localização dos dutos do Alinhamento Fonte: Google Earth

Parte do sistema já se encontrava instalada, e levava dióxido de carbono oriundo da estação de Camaçari até a estação de Santiago, através de um

carboduto de 10" de diâmetro por uma extensão de aproximadamente 33 km. O novo carboduto possui um diâmetro de 6" e se interligará ao sistema existente na estação de Santiago levando o  $CO_2$  por uma extensão de aproximadamente 18 km até a estação de Miranga, onde está localizado o sistema de injeção nos poços, como dito por (Furley, S.J.S.; Carvalho, L.D.C. – 2007)[63]. A Figura 43 mostra um arranjo esquemático desse sistema.



Figura 43 - Esquemático do Sistema de Carboduto de Miranga Fonte: IBP1473\_07

Retirou-se o perfil de cada trecho dos dutos através das curvas de nível inerentes ao programa *Google Earth*. Existe uma alta taxa de incerteza nos dados de perfil, devido a imprecisão do *software* em questão, mas foi decidido continuar o estudo com o traçado obtido, devido as baixa variação altimétrica do local, o que reduz o efeito desta imprecisão no modelo. O perfil do trecho entre Camaçari e Santiago se encontra na Figura 44 e o trecho entre Santiago e Miranga na Figura 45.



Figura 44 - Perfil do duto de 10" entre Camaçari e Santiago



Figura 45 - Perfil do duto de 6" entre Santiago e Miranga

Como não havia dados de espessura do duto, assumiu-se uma espessura de 0,375" para o duto de 10" e 0,312" para o duto de 6". As premissas do duto para as simulações, de acordo com os dados fornecidos por (Furley, S.J.S.; Carvalho, L.D.C. – 2007)[63], são as seguintes:

Pressão de entrada em Camaçari de 120 kgf/cm<sup>2</sup>

- Temperatura de entrada em Camaçari de 45°C
- Pressão de saída em Miranga de 100 kgf/cm<sup>2</sup>
- Temperatura do solo variando entre 20 e 30°C
- Vazão máxima esperada para o projeto é de 470 ton/d

Inicialmente, utilizou-se destes dados para tentar construir um modelo de escoamento de  $CO_2$  supercrítico. O Pipeline Studio não trabalha na faixa de pressão e temperatura fornecida no caso de gás, portanto tentou-se validar o modelo utilizando o SPS para fazer os cálculos. Utilizando-se da mesma metodologia do item 8.1.2, utilizou-se da da entrada de dados de estado em forma de tabela TABLE para introduzir os dados da Tabela 9 no modelo.

[°C]	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	viscosidade [cP]
34	100	657,566	0,0556971
34	110	696,997	0,0556971
34	120	727,325	0,0556971
34	130	752,278	0,0556971
37	100	606,225	0,0556971
37	110	656,638	0,0556971
37	120	692,944	0,0556971
37	130	721,785	0,0556971
42	100	500,922	0,0556971
42	110	579,776	0,0556971
42	120	629,929	0,0556971
42	130	667,111	0,0556971
45	100	434,274	0,0556971
45	110	528,460	0,0556971
45	120	588,799	0,0556971
45	130	632,067	0,0556971
48	100	381,575	0,0556971
48	110	476,760	0,0556971
48	120	546,052	0,0556971
48	130	595,698	0,0556971

 Tabela 9 - Propriedades do CO2 de acordo com Pressão e Temperatura

 Temperatura
 Pressão

 Massa Específica
 Viscosidade

Entretanto, ao entrar com os dados de capacidade térmica, encontrou-se um sério problema: A capacidade térmica do  $CO_2$  no estado supercrítico não é constante, como visto em (Jing, H.; Subramaniam, B. – 2003)[18] e no item 2.1 desta dissertação. Entretanto a entrada de dado em forma de tabela TABLE

utilizada pelo SPS só aceita um valor constante de capacidade térmica, como mencionado anteriormente. Tentou-se validar o modelo utilizando um valor médio, entretanto a vazão encontrada foi aproximadamente 3 vezes maior que a apresentada por (Furley, S.J.S.; Carvalho, L.D.C. – 2007)[63].

Mesmo não sendo possível validar este modelo, decidiu-se aproveitar as condições de contorno do mesmo, excluindo a temperatura de envio e a vazão máxima, para testar a afirmação feita em (Vandeginste, V.; Piessens, K. - 2008)[49] que em certos intervalos de pressão em temperatura a densidade do  $CO_2$  pode ser considerada constante, como explicitado no item 7.1. Para isso, utilizou-se os dados estudados no item 8.1.2 e as mesmas condições de custódia e para os valores constantes de  $CO_2$  a massa específica de 884 kg/m<sup>3</sup> e uma viscosidade de 6,06 x 10<sup>-5</sup> Pa.s. Foram estudados o regime isotérmico a 3 temperaturas: 20, 25 e 30°C.