

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

**TÍTULO DO TRABALHO:**

Estudo Termodinâmico do Escoamento de Gases Densos

AUTORES:

Vinicius Silva Pio; Troner Assenheimer de Souza; Victor Rolando Ruiz Ahón

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal Fluminense

ESTUDO TERMODINÂMICO DO ESCOAMENTO DE GASES DENSOS

Resumo

Aquecendo e comprimindo um composto líquido ou gasoso acima da sua temperatura e pressão crítica, origina-se a fase densa. Nesta região, a densidade do gás aproxima-se a de um líquido, porém, com uma viscosidade próxima a de um gás. O objetivo deste estudo é realizar uma análise termodinâmica do escoamento de gases densos, visando compreender as variações de densidade e viscosidade ao longo da linha de transferência de gás natural e como essas propriedades termofísicas influenciam na perda de carga comparado a fase vapor. Para fins ilustrativos, diversos pontos com pressões e temperaturas diferentes de um gás natural são avaliados através de um simulador de processos químicos, Aspen Hysys, utilizando como modelo termodinâmico Peng Robinson. Este estudo também apresenta dois casos de transporte de gás natural para a comparação entre a fase vapor e a fase densa. Foram considerados cálculos para o transporte de 5 Mm³/d de gás natural, utilizando dutos de 100 km de comprimento e diâmetros externos variando de 14 a 28 polegadas. As condições de entrada são 1 MPa e 30°C, e a pressão de entrega é de 4 MPa. A partir disso, observou-se que a densidade na fase densa é mais próxima da fase líquida e que a viscosidade aproxima-se a de um gás em alguns determinados pontos na região do fluido supercrítico. Para a comparação do transporte, os resultados das simulações mostraram que a queda de pressão diminui conforme o diâmetro interno aumenta, sendo mais acentuada na fase vapor. A eficiência do transporte foi melhor na fase densa, devido à menor variação da queda de pressão por diâmetro. O estudo comparativo entre o transporte de gás natural na fase densa e na fase vapor mostrou diferenças significativas. A razão entre a queda de pressão para diâmetros pequenos e grandes é de aproximadamente 19,5:1 para a Fase vapor, enquanto para a Fase Densa essa razão é de cerca de 28,6:1. Para a fase densa é necessária maior espessura de parede, um diâmetro interno menor e menor perda de carga. Portanto, torna-se vantajoso operar na fase densa para o transferência de gás natural, porém, outros fatores, como a composição do gás, perfil de elevação e distância do duto devem ser considerados, pois também influenciam na escolha entre as duas fases de transporte. Além disso, uma análise econômica detalhada, considerando CAPEX e OPEX, é essencial para uma comparação robusta e bem embasada.

Palavras-chave: fase densa, transporte de gás natural.

Abstract

By heating and compressing a liquid or gaseous compound above its critical temperature and pressure, a dense phase is achieved. In this region, the gas density approaches that of a liquid, while the viscosity remains close to that of a gas. The objective of this study is to perform a thermodynamic analysis of dense gas flow, aiming to understand the variations in density and viscosity along the natural gas transfer line and how these thermophysical properties influence pressure drop compared to the vapor phase. For illustrative purposes, various points with different pressures and temperatures of natural gas are evaluated using a chemical process simulator, Aspen Hysys, with the Peng Robinson thermodynamic model. This study also presents two cases of natural gas transportation to compare the vapor phase with the dense phase. Calculations for the transportation of 5 Mm³/d of natural gas were considered, using pipelines 100 km in length and external diameters ranging from 14 to 28 inches. The inlet conditions are 1 MPa and 30°C, and the delivery pressure is 4 MPa. It was observed that in the dense phase, the density is closer to that of a liquid, and the viscosity approaches that of a gas at certain points within the supercritical fluid region. In terms of transportation efficiency, the results of

the simulations showed that the pressure drop decreases as the internal diameter increases, with a more pronounced effect in the vapor phase. The efficiency of transportation was better in the dense phase due to the smaller variation in pressure drop per diameter. The comparative study between natural gas transportation in the dense phase and vapor phase revealed significant differences. The ratio of pressure drop between small and large diameters is approximately 19.5:1 for the vapor phase, whereas for the dense phase, this ratio is around 28.6:1. The dense phase requires a thicker wall, a smaller internal diameter, and results in lower pressure losses. Therefore, operating in the dense phase becomes advantageous for natural gas transfer. However, other factors, such as gas composition, elevation profile, and pipeline distance, must also be considered as they influence the choice between the two transportation phases. Additionally, a detailed economic analysis, considering CAPEX and OPEX, is essential for a robust and well-founded comparison.

Keywords: dense phase, natural gas transportation.

Introdução

Aquecendo e comprimindo um composto líquido ou gasoso acima da sua temperatura e pressão crítica, origina-se a fase supercrítica ou densa, na qual as propriedades físico-químicas da matéria tem características que não podem ser descritas pelos sentidos. De acordo com Bothamley e Moshfeghian (2009), na região da fase densa, a densidade do gás é tão alta que, embora pareça ser um gás, demonstra propriedades de um líquido altamente compressível com a viscosidade de um gás, tornando-o atraente para transporte de gás natural e para a injeção de dióxido de carbono no reservatório de petróleo bruto para recuperação aprimorada de petróleo, tendo em vista seu grande poder de solvatação e baixa viscosidade.

A alta densidade da fase densa viabiliza o transporte de maiores volumes de gás através de tubos de menor diâmetro, o que possibilita transportar mais massa por unidade de volume. Além disso, trabalhar em alta pressão permite que o gás seja transportado em uma única fase sem a formação de condensado nas linhas, reduzindo os procedimentos de limpeza e diminuindo o custo operacional ao longo do projeto (Humberto et al., 2020).

O objetivo deste estudo é analisar termodinamicamente, através de simulações realizadas em linhas de transferência de gás natural, o escoamento de gases densos para a avaliação de suas propriedades para que seja aplicada nas definições padrões de escoamento. Com isso, compreender como a espessura e a perda de carga variam de acordo com as propriedades termofísicas do gás natural. Considerando que a pressão e a temperatura não permanecem constantes ao longo de todo o percurso do gasoduto. Para fins ilustrativos, diversos pontos com pressões e temperaturas diferentes de um gás natural são avaliados através de um simulador de processos químicos, Aspen Hysys, utilizando como modelo termodinâmico Peng Robinson. Este estudo apresenta dois casos de transporte de gás natural para a comparação entre a fase vapor e a fase densa.

Metodologia

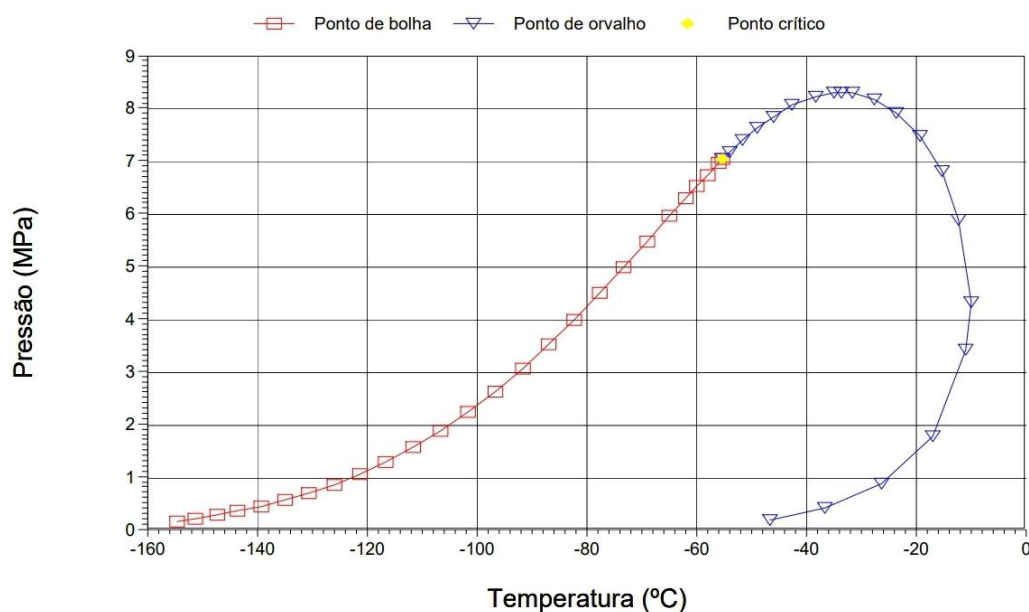
No presente trabalho, foi estudado o gás natural com a composição apresentada na Tabela 1. Para selecionar os pontos de pressão e temperatura próximos e na fase densa, utilizou-se o diagrama de

fases (Gráfico 1) obtido através do simulador Aspen Hysys. De acordo com o simulador, a *cricondenterm* e a *cricondenbar* são -9,999 °C e 8,326 MPa, respectivamente. O modelo termodinâmico escolhido foi Peng Robinson.

Tabela 1 - Componentes e suas composições

Componente	Composição
CO ₂	0,003
C ₁	0,886
C ₂	0,068
C ₃	0,024
IC ₄	0,005
NC ₄	0,006
IC ₅	0,001
NC ₅	0,001
C ₆	0,001
N ₂	0,006
Soma	1,001

Gráfico 1 - Diagrama de fases do gás natural



Para fins de ilustração, considerou-se o transporte de 5 Mm³/d de gás natural em um gasoduto de 100 km de comprimento, com diâmetros internos variando de 14 a 28 polegadas, com incremento de 2 polegadas. As condições de entrada são 1 MPa e 30 °C. As Figuras 1 e 2 apresentam a simulação

do gás natural, sendo GN o gás natural na fase vapor e GND o gás natural na fase densa. As seguintes hipóteses foram utilizadas para a simulação:

- Base seca
- Curso estável
- Pressão de entrega de 4 MPa
- Queda de pressão em cada trocador de 35 kPa
- Sem elevação
- Rugosidade de 45 microns
- Número de incrementos: 10 (cada segmento com 10 km)
- Coeficiente global de transferência de calor: 1,5 W/m²K
- Temperatura ambiente de 30 °C

Figura 1 - Simulação do gás natural na fase densa

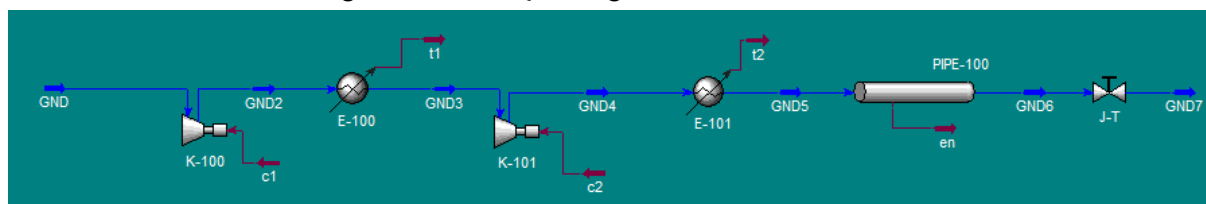
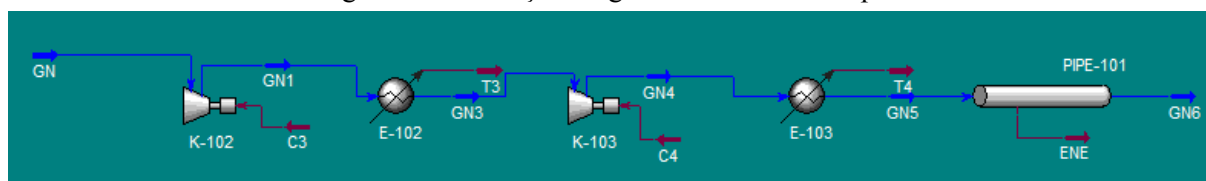


Figura 2 - Simulação do gás natural na fase vapor



Na simulação do gás natural na fase vapor, o fluido é comprimido a uma pressão suficientemente alta em dois estágios para alcançar a pressão de entrega de 4 MPa no destino. O gás comprimido após cada estágio de compressão é resfriado a 30°C.

O diagrama de fluxo de processo para o gás natural a fase densa é idêntico ao do GN, exceto pela pressão de saída do gasoduto, que deve terminar na região da fase gasosa densa. Além disso, uma válvula Joule-Thompson é adicionada na saída da tubulação para reduzir a pressão até a pressão de entrega especificada de 4000 kPa.

Resultados e Discussão

Os dois diagramas de fluxo de processo mostrados nas Figuras 1 e 2 são simulados para os 8 diâmetros internos diferentes. As Tabelas 2 e 3 apresentam um resumo dos resultados da simulação.

Tabela 2 - Dados da simulação da fase vapor

Fase Vapor						
T (C)	Pressão de entrada (MPa)	Pressão de saída (MPa)	Delta P (MPa)	D(in)	DI (in)	e (in)
11,15	10,23	4,00	6,23	14	13,69	0,31

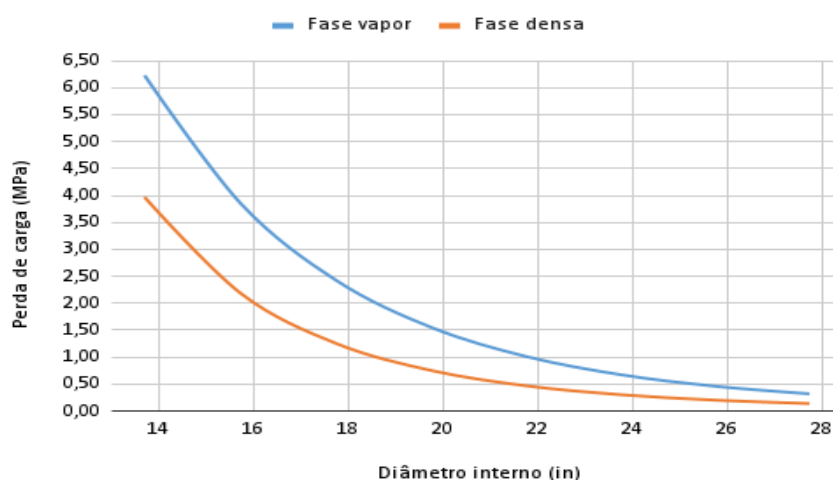
19,42	7,85	4,00	3,85	16	15,73	0,27
23,99	6,42	4,00	2,42	18	17,75	0,25
26,51	5,55	4,00	1,55	20	19,76	0,24
27,92	5,01	4,00	1,01	22	21,77	0,23
28,72	4,67	4,00	0,67	24	23,76	0,24
29,19	4,46	4,00	0,46	26	25,75	0,25
29,47	4,32	4,00	0,32	28	27,74	0,26

Tabela 3 - Dados da simulação da fase vapor

Fase Densa						
T (C)	Pressão de entrada (MPa)	Pressão de saída (MPa)	Delta P (MPa)	D (in)	DI (in)	e (in)
21,11	12,97	9,00	3,97	14	13,61	0,39
25,33	11,18	9,00	2,18	16	15,62	0,38
27,48	10,25	9,00	1,25	18	17,61	0,39
28,59	9,75	9,00	0,75	20	19,58	0,42
29,17	9,47	9,00	0,47	22	21,56	0,44
29,50	9,30	9,00	0,30	24	23,52	0,48
29,68	9,20	9,00	0,20	26	25,49	0,51
29,80	9,14	9,00	0,14	28	27,45	0,55

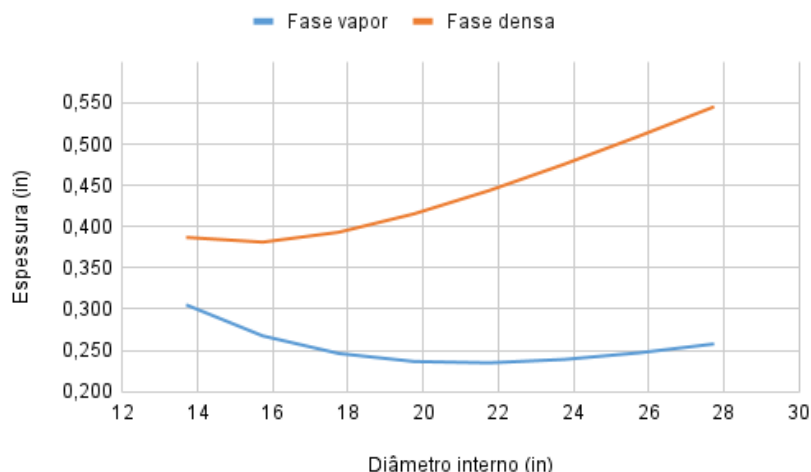
O Gráfico 2 apresenta a variação da queda de pressão linear ao longo do comprimento do gasoduto em função do diâmetro interno. Conforme esperado, a queda de pressão diminui à medida que o diâmetro aumenta. A Figura também revela que, à medida que o diâmetro diminui, a queda de pressão no caso da Fase vapor aumenta a uma taxa menor do que na Fase Densa. Especificamente, a razão entre a queda de pressão para diâmetros pequenos e grandes é de aproximadamente 19,5:1 para a Fase vapor, enquanto para a Fase Densa essa razão é de cerca de 28,6:1.

Gráfico 2 - Correlação da queda de pressão com o diâmetro



O Gráfico 3 apresenta a espessura da parede calculada para os 8 diâmetros analisados. Na Fase Densa, observa-se que, à medida que o diâmetro diminui, a espessura da parede também diminui, apesar do aumento da pressão, o que representa um impacto favorável. No entanto, do diâmetro de 22 até 14 polegadas, ocorre o comportamento oposto na fase vapor, onde a espessura da parede aumenta conforme o diâmetro diminui e a pressão aumenta. Já para diâmetros de 28 até 22 polegadas, observa-se um comportamento similar ao da Fase Densa.

Gráfico 3 - Variação da espessura com o diâmetro



Vale ressaltar que, para o cálculo da espessura, foi utilizado o modelo matemático recomendado pela norma NBR 12712:2002 da ABNT, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Modelo matemático para calcular a espessura

$$e = \frac{P \cdot D}{2 S_y \cdot F \cdot E \cdot T}$$

Onde P é a pressão de projeto, assumida como 1,1 vezes a pressão de entrada; D é o diâmetro externo do tubo; E é o fator de eficiência da junta, considerado como 0,8; T é o fator de temperatura, assumido como 1; F é o fator de projeto, variando entre 0,4 e 0,72, e assumido como 0,72 para áreas remotas; e S_y é a tensão mínima de escoamento especificada para o material do tubo, considerada como 448 MPa para o grau do material X65.

Conclusões

Conclui-se que a fase densa oferece vantagens significativas no transporte de gás natural, especialmente em termos de queda de pressão e eficiência operacional. Observou-se que, para a fase densa, é necessária uma espessura de parede maior, enquanto um diâmetro interno menor contribui para uma queda de pressão por atrito mais baixa, favorecendo a manutenção da pressão ao longo do gasoduto.

Além disso, a composição do gás desempenha um papel crucial, influenciando as propriedades termofísicas que determinam a eficiência do transporte na fase densa. O perfil de elevação e a distância do gasoduto são fatores que devem ser cuidadosamente considerados no projeto, uma vez que impactam diretamente na escolha do diâmetro e na espessura da parede.

Por fim, uma análise econômica detalhada, considerando tanto os custos de capital (CAPEX) quanto os custos operacionais (OPEX), é essencial para uma comparação robusta e bem embasada.

Agradecimentos

Ao Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor petróleo, gás natural e biocombustíveis (PRH-ANP) pelo apoio financeiro, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP no 50/2015.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12712:2002. Transporte de gás natural - Requisitos para o projeto de dutos. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

BOTHAMLEY, M.; MOSHFEGHIAN, M. Variation of properties in the dense phase region; Part 1 – Pure Compounds. *PetroSkills*, dez. 2009.

HUMBERTO, B.; VERA, V.; MARÍA, A.; SANTIAGO, R.; ENRIQUE, M.; SIMANCAS, C. Gas Transport At Dense Phase Conditions For The Development Of Deepwater Fields In The Colombian Caribbean Sea. *Ciencia. Tecnologia y Futuro*, v. 10, n. 1, p. 17-32, jun 2020.

MOSHFEGHIAN, M. Transportation of Natural Gas in Dense Phase. *PetroSkills*, agosto de 2012.