

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E PETRÓLEO

LUKAS HITOSHI SHIROMA

Simulação de uma ramificação de Gasodutos utilizando o paradigma da
Programação Orientada a Objetos

Santos

2020

LUKAS HITOSHI SHIROMA

**Simulação de uma ramificação de Gasodutos utilizando o paradigma da
Programação Orientada a Objetos**

Versão Original

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de
Petróleo

Orientador: Prof. Dr. Rafael dos Santos Gioria

Santos

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Shiroma, Lukas

Simulação de uma ramificação de Gasodutos utilizando o paradigma da Programação Orientada a Objetos / L. Shiroma -- São Paulo, 2020.

37 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Engenharia de Petróleo 2.Mecânica dos Fluidos 3.Simulação de Escoamento 4.Programação Orientada a Objetos I.Universidade de São Paulo.

Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

RESUMO

SHIROMA, LUKAS HITOSHI. **Simulação de uma ramificação de Gasodutos utilizando o paradigma da Programação Orientada a Objetos.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Santos, 2020.

Muitas plataformas que produzem gás natural necessitam interromper sua produção por não conseguir injetar o gás no reservatório ou armazenar todo o gás produzido. Diante desse cenário, o estudo do escoamento de gás se faz pertinente para a construção de gasodutos que ligam as plataformas *offshore* com a costa brasileira.

Neste trabalho foi desenvolvido um código de programação em Python utilizando o paradigma da Programação Orientada a Objetos para simular o escoamento em gasodutos, partindo da validação através de um escoamento mais simples, onde é possível analisar resultados para diferentes condições de escoamento, em um duto simples e em dutos em série. Posteriormente, aplicou-se o modelo implementado computacionalmente a uma ramificação de gasodutos.

O método utilizado para simular o escoamento não convergiu para o caso mais complexo analisado, porém, a programação orientada a objetos foi de grande valor para o desenvolvimento do código.

ABSTRACT

SHIROMA, LUKAS HITOSHI. **Simulation of a gas pipeline branch using the Object Oriented Programming paradigm.** 2020. Undergraduate thesis (Graduate in Petroleum Engineering) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Santos, 2020.

Many platforms that produce natural gas need to stop production because they are unable to inject the gas into the reservoir or store all the gas produced. Given this scenario, the study of gas flow is pertinent to the construction of gas pipelines that connect offshore platforms with the Brazilian coast.

In this work, a Python programming code was developed using the Object Oriented Programming paradigm to simulate the flow in pipelines, starting from the validation through a simpler flow, where it is possible to analyze results for different flow conditions, in a simple duct and in series pipelines. Subsequently, the computationally implemented model was applied to a pipeline branch.

The method used to simulate the flow did not converge to the most complex case analyzed, however, object-oriented programming was of great value for the development of the code.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Rede de gasodutos do Pré-Sal. Fonte: Petrobrás (2019). p.13

Figura 2: Ilustração do escoamento simples com as pressões como valores de entrada para a formulação do escoamento. p. 22

Figura 3: Ilustração do escoamento simples com a pressão e Mach em uma das extremidades como valores de entrada para a formulação do escoamento. p. 23

Figura 4: Dois dutos ligados em série com valores das pressões nas extremidades como entrada. p. 23

Figura 5: Ilustração de três dutos conectados por um nó com as pressões das extremidades como valores de entrada. p. 25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros comuns aos casos apresentados e seus respectivos valores. p. 21

Tabela 2: Valores conhecidos das pressões nas extremidades, comprimento e diâmetro do duto. p. 22

Tabela 3: Valores conhecidos da pressão e Mach em uma das extremidades, comprimento e diâmetro do duto. p. 23

Tabela 4: Valores conhecidos da pressão e Mach em uma das extremidades, comprimentos e diâmetros dos dutos. p. 24

Tabela 5: Valores conhecidos das pressões nas extremidades, comprimentos e diâmetros dos dutos. p. 25

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.2. ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL ISOTÉRMICO EM REDE	15
2.2.1. GASODUTOS	15
2.3. PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS	18
2.3.1. CLASSES	18
2.3.2. OBJETOS	18
2.4. MÉTODO NUMÉRICO PARA SIMULAÇÃO	19
2.4.1. FUNÇÃO <i>FSOLVE</i>	19
3. METODOLOGIA	20
3.1. ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL	20
3.2. CASOS E VALIDAÇÕES	21
3.2.1. DUTO SIMPLES ISOTÉRMICO	21
3.2.1.1. PRESSÕES EM AMBAS AS EXTREMIDADES	21
3.2.1.2. PRESSÃO E MACH EM UMA DAS EXTREMIDADES	22
3.2.2. DUTOS ISOTÉRMICOS EM SÉRIE	23
3.2.3. RAMIFICAÇÃO DE DUTOS ISOTÉRMICOS	24
4. RESULTADOS	26
4.1. DUTO SIMPLES ISOTÉRMICO	26
4.1.1. PRESSÕES EM AMBAS AS EXTREMIDADES	26
4.1.1. PRESSÃO E MACH EM UMA DAS EXTREMIDADES	27
4.2. DUTOS ISOTÉRMICOS EM SÉRIE	27
4.3. RAMIFICAÇÃO DE DUTOS ISOTÉRMICOS	28
5. CONCLUSÕES	30

REFERÊNCIAS	31
APÊNDICE	32

1. INTRODUÇÃO

Em 2020, a pandemia da COVID-19 impactou diversos setores do Brasil e o setor de óleo e gás não foi exceção. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME) e da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a produção do petróleo cru e de gás natural comercializável caiu 5,1% do primeiro trimestre de 2020 para o segundo (ANP; MME, 2020). O que contrasta com a maior participação da Petrobras no mercado durante o mesmo período (de 84,5% para 88,2%) (ANP, 2020).

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o gás natural representa 13,0% da matriz energética no Brasil e 22,1% no planeta. Esses dados revelam a importância dessa fonte energética para suprir as necessidades atuais, sendo a segunda fonte de energia brasileira, ficando atrás apenas do petróleo (EPE, 2017).

Ainda segundo a EPE, 13 GW da matriz elétrica nacional é proveniente de usinas termelétricas a gás natural, o que representa cerca de 8% da capacidade instalada no Brasil. Grande parte da demanda de gás natural brasileira é destinada ao atendimento do setor elétrico (EPE, 2018).

Atualmente, o gás natural, composto por frações leves de hidrocarbonetos, possui um papel importante na possível transição da fonte energética brasileira. Contudo, para abastecer e entregar o gás com normas de segurança estabelecidas pela ANP de maneira rentável, é preciso que haja a expansão da rede de gasodutos continental.

Analisando o cenário energético atual e os gasodutos existentes (Figura 1), é necessário o estudo do escoamento para o desenvolvimento de projetos futuros. As plataformas da Bacia de Santos possuem uma rede de gasodutos que ligam os campos de produção ao continente. Apesar de toda a infraestrutura existente, essa estrutura não suporta toda a produção de gás natural *offshore* e, muitas vezes, as plataformas devem interromper sua produção por problemas no escoamento do gás, já que, em alguns casos, não se pode re-injetar ou queimar o gás em sua totalidade.

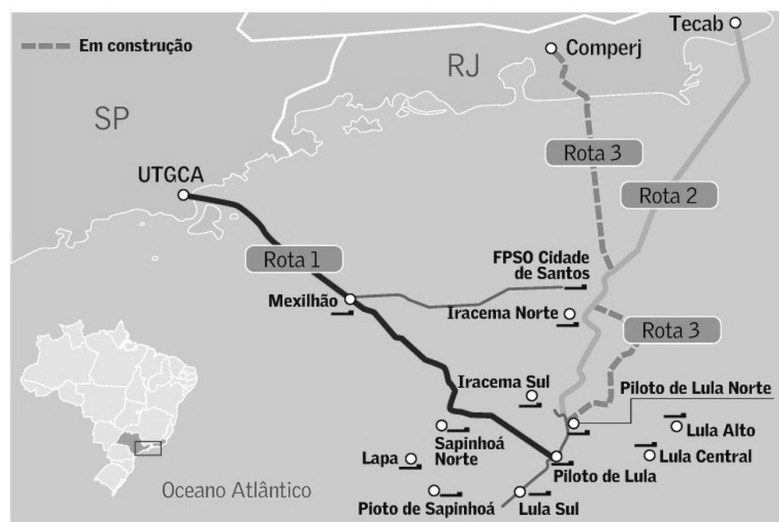


Figura 1 - Rede de gasodutos do Pré-Sal. Fonte: Petrobrás (2019)

Neste trabalho, desenvolveu-se uma simulação das características do escoamento do gás em uma ramificação de gasodutos utilizando a programação orientada a objetos com a apresentação e discussão dos resultados. A metodologia utilizada parte da validação inicial para um escoamento em um duto simples e comparando os resultados obtidos com os valores presentes na literatura. Validados os resultados, há o incremento gradual da complexidade até a implementação do método em uma ramificação.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é o desenvolvimento de um código computacional em Python para simular uma ramificação de gasodutos utilizando o paradigma da programação orientada a objetos.

A partir da simulação de um escoamento simples, um gasoduto retilíneo sem perdas de carga singulares e com valores iniciais das pressões nas extremidades do duto, validar o procedimento pela comparação dos resultados obtidos com os resultados presentes na literatura.

Em seguida, simular o escoamento a partir de dados em apenas uma das extremidades do duto, mantendo-se as mesmas condições da validação anterior. Posteriormente, variar pontualmente o diâmetro com a manutenção das condições de contorno do escoamento.

Com a validação de todos os casos anteriores, é possível a simulação de um escoamento em uma ramificação e avaliar os resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bibliografia destaca a relevância do gás como fonte de energia. Essa análise é reforçada pela problemática da produção de gás em alto mar, onde a estocagem ou transporte se tornam problemas relevantes.

2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para Benner et al. (2018) a importância do tema aumenta com a ampliação do caso de uso para aplicações mais complexas. O trabalho apresenta a descrição da física dos dutos e de redes de gasodutos. A discretização espacial do problema é aplicada a quatro redes diferentes de quatro complexidades diferentes. As diferentes complexidades facilitam a compreensão do problema em redes mais simples e o gradual aumento da complexidade permite comparar os resultados com o esperado fisicamente. Ao fim do texto, os códigos e dados estão disponíveis e complementam toda a teoria apresentada.

Arakaki, T. K. (2017) simulou redes de gasodutos do Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL) a partir de ferramentas computacionais existentes no mercado (HYSYS® e iiSE). Utilizando delas para simular gasodutos longos e lineares, e para simular redes complexas. Foram feitas as avaliações das equações de estado na simulação de rede de gasodutos.

De maneira geral, Costa et al. (1998) descrevem o algoritmo numérico para simulação da rede de dutos para fluidos compressíveis. O modelo é composto por um sistema de equações lineares e não-lineares, resolvidos pelo método de Newton-Raphson associados à sequência de substituições sucessivas. O modelo pode prever pressões, vazões, temperaturas e composição gasosa em qualquer ponto da rede. Os resultados estão de acordo com as referências e literaturas em análise, implicando na eficácia do método aplicado. Com isso, é possível a utilização dos resultados para validar os cálculos e sistemas desenvolvidos por outros métodos, mantendo-se as condições necessárias.

Oosthuizen, P. H. e Carscallen, W. E. (2014) descrevem o escoamento isotérmico em um duto de área constante, incluindo os aspectos de fricção. O transporte de gases por gasodutos longos que não são isolados termicamente, podem ser considerados aproximadamente isotérmicos. Esta condição implica na premissa de que o escoamento não é adiabático, pois, apesar da baixa taxa de transferência de calor, a longa extensão do escoamento implica que efeitos de fricção não podem ser desprezados. Com a densidade (ρ), volume (V), pressão (p) e área (A), descreve-se o escoamento pelas equações de conservação de massa (1), quantidade de movimento (2) e energia (3) e, também, da lei dos gases ideais (4).

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (1)$$

$$dp + \tau_w \frac{P}{A} dx + \rho V dV = 0 \quad (2)$$

$$dq = V dV \quad (3)$$

$$\frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} \quad (4)$$

Com f o fator de fricção do duto e v a velocidade, a tensão de cisalhamento na parede do duto, τ_w , é descrita por:

$$\tau_w = \frac{f \rho v^2}{2} \quad (5)$$

2.2. ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL ISOTÉRMICO EM REDE

Para o desenvolvimento do escoamento compressível na rede de dutos, a estrutura geral do projeto é montada sobre gasodutos, como desenvolvido por Costa et al. (1998) e Oosthuizen e Carscallen (2014)

2.2.1. GASODUTOS

Desconsiderando-se os efeitos de escoamentos multifásicos e críticos e baseando-se na equação de energia, a equação da vazão volumétrica utilizada para escoamentos compressíveis em gasodutos unidimensionais, os cálculos

em dutos com fricção, simples e isotérmicos seguem as descrições de Oosthuizen e Carscallen (2014).

Como ponto de partida, busca-se obter as propriedades do duto em questão. Portanto, é necessário o cálculo da área, A , da seção transversal do duto em função do diâmetro D :

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (6)$$

Em seguida, para se obter as características das perdas por fricção do duto:

$$Fanno = \frac{4fL}{D} \quad (7)$$

Com o diâmetro da seção transversal D , comprimento do duto L e o fator de fricção f .

Com base no modelo de gás ideal, descreve-se o fluido a partir de seu coeficiente de expansão adiabática k e a massa molar M de modo a se encontrar a constante R_{fluido} e a capacidade térmica C_p do fluido em questão:

$$R_{fluido} = \frac{R}{M} \quad (8)$$

$$c_p = \frac{kR_{fluido}}{k-1} \quad (9)$$

Com R sendo a constante universal dos gases.

A partir da condição de pressão p temperatura T e do fator de compressibilidade Z em um determinado ponto do escoamento, é possível obter a densidade ρ e a velocidade do som c nesse mesmo ponto:

$$\rho = \frac{p}{ZR_{fluido}T} \quad (10)$$

$$c = \sqrt{kR_{fluido}T} \quad (11)$$

Utilizando o modelo de Darcy para cisalhamento, é possível obter:

$$\frac{dp}{p} + \frac{\rho v^2}{p} \frac{2f}{D} dx + \frac{\rho v}{p} dv = 0 \quad (12)$$

Pela relação do número de Mach (M):

$$M = \frac{v}{c} \quad (13)$$

Pode-se obter a seguinte relação:

$$\frac{dv}{v} = -\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dM}{M} = -\frac{dp}{p} = \left[\frac{kM^2}{1-kM^2} \right] \frac{2f}{D} dx \quad (14)$$

Pelo fator no denominador, é possível notar que o ponto crítico, ou Mach crítico (M_{crit}), é em:

$$M_{crit} = \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (15)$$

Utilizando na conservação de energia e na relação de entropia:

$$\frac{dq}{v^2} = \frac{dv}{v} = \left[\frac{kM^2}{1-kM^2} \right] \frac{2f}{D} dx \quad (16)$$

$$\frac{ds}{c_p T} = -\left(\frac{k-1}{k} \right) \left[\frac{kM^2}{1-kM^2} \right] \frac{2f}{D} dx \quad (17)$$

Com as propriedades de estagnação podendo ser obtidas das relações isentrópicas locais:

$$\frac{T_0}{T_0^*} = \frac{1 + \frac{k-1}{2} M^2}{1 + \frac{k-1}{2k}} \quad (18)$$

$$\frac{P_0}{P_0^*} = \frac{1}{M\sqrt{k}} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2} M^2}{1 + \frac{k-1}{2k}} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (19)$$

Buscando-se aproximar os cálculos de processos reais, Costa et al. (1998) propuseram a idealização de três casos de escoamento: isotérmico,

adiabático e politrópico. Essas idealizações também são utilizadas nas equações de energia, definida pelo balanço energético em regime permanente num duto.

Por fim, a vazão mássica é obtida através da seguinte relação:

$$\dot{m} = \rho M c A \quad (20)$$

Em dutos extensos, é necessário o cálculo em frações menores para se diminuir possíveis erros acumulados causados por aproximações numéricas.

2.3. PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS

A programação orientada a objetos (POO) baseia-se nos conceitos de objetos, referência à uma alocação de memória com determinado valor com métodos e atributos, e classes, conjunto de características e comportamentos que definem os objetos.

2.3.1. CLASSES

Para o desenvolvimento do sistema, foram definidas as classes que são utilizadas para referenciar objetos. Esse método permite a reutilização do código para cada exemplo a ser implementado, sendo desnecessária a repetição da mesma porção de código a cada nova geração de um novo objeto.

Além disso, é possível obter os valores de propriedades específicas de cada objeto de maneira mais clara e didática.

2.3.2. OBJETOS

Definidas as classes, cada objeto é referenciado com a inclusão de parâmetros que definem as características atribuídas e calculadas. Os objetos permitem a fácil navegação por essas propriedades físicas do problema.

2.4. MÉTODO NUMÉRICO PARA SIMULAÇÃO

O método utilizado para a simulação é baseado na definição das equações de escoamentos compressíveis descritas por Oosthuizen, P. H. e Carscallen, W. E. (2014) ((1), (2), (3) e (4)). Definidos os sistemas de equações e as condições de contorno, a resolução do sistema é realizada utilizando o método *optimize.fsolve* da biblioteca SciPy v1.5.4 do Python.

2.4.1. FUNÇÃO *FSOLVE*

O método *fsolve* encontra as raízes de uma função ou de um sistema de equações não-lineares, partindo de um dado palpite inicial.

A função recebe como argumentos um arranjo com os palpites iniciais para cada variável e uma tupla (lista imutável) com as condições de contorno de cada equação. Como retorno, a função retorna um arranjo com as soluções numéricas encontradas.

Quando o palpite inicial destoa em determinado nível dos valores das raízes, o método numérico para encontrar as soluções não converge, o que implica na escolha de um bom palpite inicial para se encontrarem as soluções. Em casos mais complexos, a escolha de um bom palpite inicial é muito sensível e por uma diferença baixa em relação ao resultado, o método não consegue encontrar as soluções.

3. METODOLOGIA

3.1. ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

Para estruturar o sistema na lógica computacional e, de maneira numérica, possibilitar que o mesmo encontre uma solução plausível (próxima dos valores encontrados na literatura) para o problema, as entidades e seus atributos são declarados seguindo o paradigma da Programação Orientada a Objetos em uma linguagem voltada para essa construção: Python.

Os dutos, fluidos e condições são instanciados como classes e cada uma possui um conjunto de características (atributos) que descrevem esses objetos. Além deste grupo de objetos, há, também, funções referentes aos nós e aos números de Mach, que recebem as propriedades dos objetos como parâmetros de entrada.

A classe de dutos apresenta as características de comprimento, diâmetro e fator de fricção e, a partir delas, é calculado o valor de área da seção circular e do coeficiente de Fanno (7).

Os fluidos recebem valores de viscosidade, massa molar e calor específico e dessas propriedades obtêm-se os valores de capacidade térmica (7) e da constante R (8) para o fluido em questão.

A classe de condições, que se refere às condições físicas em determinado ponto de um certo duto com um certo fluido, herda todas as propriedades dos fluidos e dutos, além delas, a classe recebe, também, propriedades de pressão e temperatura. Com todas essas características atribuídas, é possível calcular a densidade do fluido (10) e a velocidade do som (11).

Para o primeiro caso, de um duto simples e escoamento isotérmico e compressível, foram realizadas validações iniciais do modelo para seguir com o incremento da complexidade até a formulação do escoamento em uma ramificação.

3.2. CASOS E VALIDAÇÕES

Em seguida, são apresentados e detalhados os casos em ordem de desenvolvimento e com aumento gradual de complexidade, de maneira a validar de maneira sincronizada com o modelo computacional desenvolvido.

Em todos os casos, utilizam-se os seguintes valores conhecidos de fator de fricção, massa molar, calor específico e temperatura:

Tabela 1: Parâmetros comuns aos casos apresentados e seus respectivos valores.

f	0,004 fanning
M_{CH_4}	16 g / mol
k	1,3
T	283 K
Z	1

3.2.1. DUTO SIMPLES ISOTÉRMICO

Como ponto de partida do projeto, é realizado o desenvolvimento em um caso simplificado do escoamento: um duto de área constante com perdas e escoamento isotérmico e compressível. A escolha dessa estrutura é devida à sua complexibilidade menor, de modo a validar os cálculos iniciais.

Para a validação, é possível comparar os resultados com a solução analítica desenvolvida por Oosthuizen e Carscallen (2014).

3.2.1.1. PRESSÕES EM AMBAS AS EXTREMIDADES

O primeiro caso desenvolvido tem como valores conhecidos as pressões nas duas extremidades do duto, a partir destes dados iniciais, obtém-se os números de Mach e a vazão mássica do escoamento.



Figura 2: Ilustração do escoamento simples com as pressões como valores de entrada para a formulação do escoamento, com p_{1_e} e p_{1_s} a pressão do duto 1 na entrada e saída.

Utilizando o modelo de Oosthuizen e Carscallen (2014) e os seguintes valores como condição de contorno, buscou-se encontrar os valores do número de Mach para a entrada e para a saída e a vazão mássica do duto:

Tabela 2: Valores conhecidos das pressões nas extremidades, comprimento e diâmetro do duto.

p_{1_e}	1.085.000 Pa
p_{1_s}	150.000 Pa
L_1	3.000 m
D_1	0,1 m

Os resultados são validados com os valores presentes na literatura. O acerto dos procedimentos para os cálculos referidos permite o prosseguimento para os casos seguintes.

3.2.1.2. PRESSÃO E MACH EM UMA DAS EXTREMIDADES

Neste caso, são utilizados os valores de Mach e pressão em apenas uma extremidade do duto, toda a formulação busca encontrar os valores de pressão e Mach da outra extremidade e o valor da vazão mássica do escoamento.

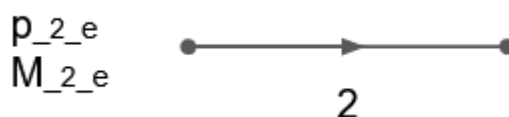


Figura 3: Ilustração do escoamento simples com a pressão e Mach em uma das extremidades como valores de entrada para a formulação do escoamento. Sendo p_{2_e} e M_{2_e} a pressão e o Mach na entrada do duto 2.

Tabela 3: Valores conhecidos da pressão e Mach em uma das extremidades, comprimento e diâmetro do duto.

p_{2_e}	1.085.000 Pa
M_{2_e}	0,039485
L_2	3.000 m
D_2	0,1 m

Neste caso os palpites iniciais para a pressão e Mach na saída são da mesma ordem de grandeza da pressão e Mach de entrada.

3.2.2. DUTOS ISOTÉRMICOS EM SÉRIE

Para dutos isotérmicos com fricção em série, são dadas as pressões das extremidades da sequência e, entre um duto e outro, variam-se os valores de diâmetro, fator de fricção e comprimento, de modo a verificar se as variações dos resultados são condizentes com o esperado fisicamente.



Figura 4: Dois dutos ligados em série com valores das pressões nas extremidades como entrada. Sendo p_{3_e} a pressão na entrada do duto 3 e p_{4_s} a pressão de saída do duto 4.

Tabela 4: Valores conhecidos da pressão e Mach em uma das extremidades, comprimentos e diâmetros dos dutos

p_{3_e}	1.085.000 Pa
p_{4_s}	150.000 Pa
L_3, L_4	1.500 m
D_3	0,1 m
D_4	0,05 m

A resolução do problema passa pelos palpites iniciais das pressões de saída do primeiro duto e entrada do segundo. Esses palpites são as médias entre as pressões das extremidades. Para os palpites de Mach, o valor é um décimo do Mach crítico para o escoamento.

Esse caso passou pela validação que mimetiza o caso do duto simples com as pressões das extremidades e em seguida, atribuiu-se a variação do diâmetro em um dos dutos.

3.2.3. RAMIFICAÇÃO DE DUTOS ISOTÉRMICOS

Com todas as validações anteriores, é possível formular as equações necessárias para a simulação do escoamento em uma ramificação de dutos.

Para $i \in [5; 7]$, descrevem-se (21) e (22) que compõem 6 das equações do sistema para encontrar os números de Mach das extremidades e as pressões do nó.

$$\frac{1-kM_{i_e}^2}{kM_{i_e}^2} + \ln(kM_{i_e}^2) = \left(\frac{1-kM_{i_s}^2}{kM_{i_s}^2} \right) + \ln(kM_{i_s}^2) + \frac{4f_i L_i}{D_i} \quad (21)$$

$$M_{i_e} \cdot p_{i_e} = M_{i_s} \cdot p_{i_s} \quad (22)$$

A conservação de massa no nó é descrita por:

$$M_{5_s} \cdot D_5^2 \cdot p_{5_s} = M_{6_e} \cdot D_6^2 \cdot p_{6_e} + M_{7_e} \cdot D_7^2 \cdot p_{7_e} \quad (23)$$

Da relação (14), obtém-se:

$$M_{5_s} \cdot p_{5_s} = M_{6_e} \cdot p_{6_e} \quad (24)$$

$$M_{5_s} \cdot p_{5_s} = M_{7_e} \cdot p_{7_e} \quad (25)$$

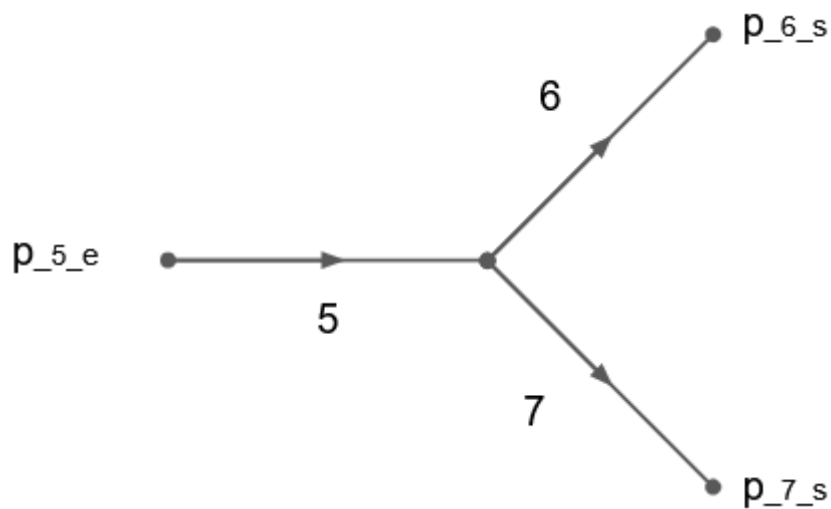


Figura 5: Ilustração de três dutos conectados por um nó com as pressões das extremidades como valores de entrada. Sendo p_{5_e} a pressão na entrada do duto 5 e p_{6_s} e p_{7_s} as pressões nas saídas dos dutos 6 e 7.

Tabela 5: Valores conhecidos das pressões nas extremidades, comprimentos e diâmetros dos dutos.

p_{5_e}	1.085.000 Pa
p_{6_s}	150.000 Pa
p_{7_s}	150.000 Pa
L_5, L_6, L_7	1.500 m
D_5, D_6, D_7	0,1 m

Nesse caso, a convergência do método para encontrar as raízes das equações é extremamente sensível ao palpite inicial. Um bom palpite inicial permite a convergência do método e um palpite ruim implica na não-convergência do mesmo.

4. RESULTADOS

Nesta seção, são descritos os resultados de cada caso apresentado na formulação do problema.

4.1. DUTO SIMPLES ISOTÉRMICO

Para o duto simples isotérmico, foram utilizadas duas condições de contorno diferentes para se validar o modelo.

Nos dois casos, são utilizados valores equivalentes para se afirmar a validade dos cálculos.

4.1.1. PRESSÕES EM AMBAS AS EXTREMIDADES

Os valores do número de Mach, utilizados como palpites iniciais, são metade dos valores calculados do Mach crítico:

$$M_{crit} / 2 \cong 0,438529$$

Os valores de Mach de entrada e saída são, respectivamente:

$$M_{1_e} \cong 0,039485 \text{ e}$$

$$M_{1_s} \cong 0,285610$$

Como resultado, o valor de vazão mássica é:

$$\dot{m} \cong 1,000404 \text{ kg/s}$$

Os valores dos números de Mach de entrada e saída e o valor de vazão mássica condizem com os valores obtidos por Oosthuizen e Carscallen (2014).

Esse é um indicativo da validade do modelo e, sendo assim, é possível utilizá-lo no caso seguinte.

4.1.1. PRESSÃO E MACH EM UMA DAS EXTREMIDADES

Os palpites iniciais para encontrar os valores da pressão e do número de Mach da outra extremidade são um décimo da pressão e dez vezes o Mach da outra extremidade.

Os valores de Mach e pressão na saída são, respectivamente:

$$p_{2_s} \cong 150.000 \text{ Pa e}$$

$$M_{2_s} \cong 0,285610$$

Como resultado, o valor de vazão mássica é:

$$\dot{m} \cong 1,000404 \text{ kg/s}$$

Os valores da pressão e número de Mach da saída e o valor de vazão mássica condizem com os valores obtidos por Oosthuizen e Carscallen (2014) e com os valores obtidos no caso anterior. A confirmação é importante para validar os todos os cálculos utilizados até o momento. E com essa validação, é possível seguir com o incremento da complexidade do problema.

4.2. DUTOS ISOTÉRMICOS EM SÉRIE

Para os valores iniciais das pressões e dos números de Mach são utilizadas a média das pressões e um décimo do Mach crítico, respectivamente.

Os valores de Mach e pressões são:

$$p_{3_s} \cong 1.073.553,24 \text{ Pa,}$$

$$M_{3_e} \cong 0,008202,$$

$$M_{3_s} \cong 0,008289,$$

$$p_{4_e} \cong 268.388,31 \text{ Pa},$$

$$M_{4_e} \cong 0,033156 \text{ e}$$

$$M_{4_s} \cong 0,059324$$

Como resultado, o valor de vazão mássica é:

$$\dot{m} \cong 0,207796 \text{ kg/s}$$

Os valores obtidos para as pressões, Mach e vazões mássicas são fisicamente condizentes. Como a validação inicial mimetizando o primeiro caso foi confirmada, o método utilizado para a resolução dos cálculos é acertado.

4.3. RAMIFICAÇÃO DE DUTOS ISOTÉRMICOS

Para os palpites iniciais, foram utilizados diversos valores buscando a convergência do método numérico para o sistema de equações não-lineares.

Para os palpites dos números de Mach do duto 5, utilizaram-se valores da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos nos casos anteriores. Como os casos anteriores passaram pela validação com os valores da literatura, esses valores são palpites com uma boa acurácia, de mesma ordem de grandeza.

$$M_{5_e} \cong 0,039485,$$

$$M_{5_s} \cong 0,055171,$$

Os palpites para as pressões no nó são as médias das pressões nas extremidades.

$$p_{avg} \cong 461.666,66 \text{ Pa},$$

Já para os números de Mach dos dutos 6 e 7, os palpites iniciais seguiram a mesma lógica dos casos anteriores, utilizando valores derivados do Mach crítico. Nesse caso, variaram-se os valores buscando a convergência do método.

Porém, o método se mostrou extremamente sensível ao palpite inicial. Mesmo com uma série de palpites para os números de Mach dos dutos 6 e 7, o programa não encontrou raízes para o sistema. Nesse caso, nota-se que a complexidade influenciou bastante na sensibilidade dos palpites iniciais para se determinar os valores que aproximam o sistema de suas raízes.

5. CONCLUSÕES

A utilização da programação orientada a objetos facilita na compreensão e análise da formulação dos problemas. Com cada objeto e suas propriedades mapeadas, é possível realçar cada propriedade em estudo no código fonte. Essa análise é importante para simplificar o entendimento da programação e como ela se liga ao assunto em questão. No escopo deste trabalho, a POO permitiu a navegação pelas propriedades dos dutos e fluidos de maneira intuitiva. Essa navegação é importante para se entender como cada propriedade se comporta em cada objeto.

O método numérico utilizado para a resolução das equações não-lineares se mostrou eficiente até certo ponto. Porém, ao se aumentar a complexidade do sistema de equações, o método se mostrou muito dependente da escolha de um bom palpite inicial para as iterações. Nos casos em que o palpite inicial não se aproximava das raízes do sistema, o método não convergia para uma solução plausível.

Para os próximos passos, é de extrema importância a definição entre: trocar o método numérico para a resolução dos sistemas de equações ou definir uma metodologia acurada para a escolha dos palpites iniciais para o método numérico atual.

REFERÊNCIAS

ARAKAKI, T. K. Simulação de rede de distribuição de gás, Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química. São Paulo, 2017.

BENNER P., et al. Gas Network Benchmark Models, Applications of Differential - Algebraic Equations: Examples and Benchmarks. Differential - Algebraic Equations Forum. Springer, Cham, 2018.

CHURCHILL, S. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. Chemical Engineering, v.84, New York, 1977.

COSTA, A. L. H., et al. Steady State Modeling and Simulation of Pipeline Networks for Compressible Fluids, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Volume 15, n. 4, 1998.

LUNA, D. & NUNES, F. Vendas de petróleo e gás da Petrobrás caem com pandemia, aponta relatório. O Estado de São Paulo, São Paulo, 21 de julho de 2020. Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,vendas-d-e-petroleo-e-gas-da-petrobras-caem-com-pandemia-aponta-relatorio,70003371712>>. Acesso em: 01 de agosto de 2020.

OOSTHUIZEN, P. H. & CARSCALLEN, W. E. Introduction to compressible fluid flow. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.crcnetbase.com/isbn/9781439877920>. Acesso em: 6 ago. 2020.

APÊNDICE

```

import math
from scipy.optimize import fsolve
import numpy as np

class Pipe(object):
    def __init__(self, length, diameter, friction_factor,):
        self.length = length
        self.diameter = diameter
        self.friction_factor = friction_factor

    def area(self):
        return(math.pi * self.diameter ** 2 / 4)

    def fanno_flow(self):
        return(4 * self.friction_factor * self.length /
self.diameter)

class Fluid(object):
    def __init__(self, molar_mass, specific_heat_ratio):
        self.molar_mass = molar_mass
        self.specific_heat_ratio = specific_heat_ratio

    def R_fluid(self):
        return(8314.46261815324 / self.molar_mass)

    def heat_capacity(self):
        return(self.specific_heat_ratio * self.R_fluid() /
(self.specific_heat_ratio - 1))

class Condition(Fluid, Pipe):
    def __init__(self, pressure, temperature, fluid, pipe):
        self.pressure = pressure
        self.temperature = temperature
        Fluid.__init__(self, fluid.molar_mass,
fluid.specific_heat_ratio)
        Pipe.__init__(self, pipe.length, pipe.diameter,
pipe.friction_factor)

    def density(self):

```

```

        return(self.pressure / (Fluid.R_fluid(self) *
self.temperature))

    def sound_velocity(self):
        return(math.sqrt(self.specific_heat_ratio *
Fluid.R_fluid(self) * self.temperature))

temperature = 283
friction_factor = .004
molar_mass = 16
specific_heat_ratio = 1.3

fluid= Fluid(molar_mass, specific_heat_ratio)

'''Duto Simples Isotermico Pressao e Mach da entrada'''

def Case_2(vars, *Marg):
    M_s, p_s = vars
    p_e, M_e, k, pipe = Marg
    f, L, D, F = pipe.friction_factor, pipe.length, pipe.diameter,
pipe.fanno_flow()
    return (
        (1 - k * M_e ** 2) / (k * M_e ** 2) + np.log(k * M_e ** 2)
        - ((1 - k * M_s ** 2) / (k * M_s ** 2) + np.log(k * M_s **
2))
        - F,
        M_e * p_e - M_s * p_s
    )

pressure_2_e = 1085000
mach_2_e = 0.03948519639496014
length_2 = 3000
diameter_2 = .1

pipe_2 = Pipe(length_2, diameter_2, friction_factor)
condition_2_e = Condition(pressure_2_e, temperature, fluid, pipe_2)
mass_flow_rate = (
    condition_2_e.density() * mach_2_e
    * condition_2_e.sound_velocity() * pipe_2.area())

M_crit = (1 / specific_heat_ratio) ** 0.5
Marg = (pressure_2_e, mach_2_e, specific_heat_ratio, pipe_2)

```



```

sol = fsolve(Case_2, (M_crit / 2, pressure_2_e / 10), args = Marg)

print("p_2_s:", sol[1])
print("M_2_s:", sol[0])
print("m._2:", mass_flow_rate)

'''Dutos em Série'''

def Case_3(vars, *Marg):
    M_1_e, M_1_s, M_2_e, M_2_s, p_1_s, p_2_e = vars
    p_1_e, p_2_s, k, pipe_1, pipe_2 = Marg
    f_1, L_1 = pipe_1.friction_factor, pipe_1.length
    D_1, F_1 = pipe_1.diameter, pipe_1.fanno_flow()
    f_2, L_2 = pipe_2.friction_factor, pipe_2.length
    D_2, F_2 = pipe_2.diameter, pipe_2.fanno_flow()
    return (
        (1 - k * M_1_e ** 2) / (k * M_1_e ** 2) + np.log(k * M_1_e
** 2)
        - ((1 - k * M_1_s ** 2) / (k * M_1_s ** 2) + np.log(k *
M_1_s ** 2))
        - F_1,
        M_1_e * p_1_e - M_1_s * p_1_s,
        M_1_s * D_1 ** 2 - M_2_e * D_2 ** 2,
        (1 - k * M_2_e ** 2) / (k * M_2_e ** 2) + np.log(k * M_2_e
** 2)
        - ((1 - k * M_2_s ** 2) / (k * M_2_s ** 2) + np.log(k *
M_2_s ** 2))
        - F_2,
        M_2_e * p_2_e - M_2_s * p_2_s,
        M_1_s * p_1_s - M_2_e * p_2_e
    )

pressure_3_e = 1085000
length_3 = 1500
diameter_3 = .1
friction_factor_3 = .004

pressure_4_s = 150000
length_4 = 1500
diameter_4 = .05
friction_factor_4 = .004

```

```

pipe_3 = Pipe(length_3, diameter_3, friction_factor_3)
pipe_4 = Pipe(length_4, diameter_4, friction_factor_4)
condition_4_s = Condition(pressure_4_s, temperature, fluid, pipe_4)

M_crit = (1 / specific_heat_ratio) ** 0.5
p_avg = (pressure_3_e + pressure_4_s) / 2
Marg = (pressure_3_e, pressure_4_s, specific_heat_ratio, pipe_3,
pipe_4)
x0 = (M_crit / 10, M_crit / 10, M_crit / 10, M_crit / 10, p_avg,
p_avg)
sol = fsolve(Case_3, x0, args = Marg)
mass_flow_rate = (
    condition_4_s.density() * sol[3] *
    condition_4_s.sound_velocity() * pipe_2.area())

print("p_3_s:", sol[4])
print("M_3_e:", sol[0])
print("M_3_s:", sol[1], "\n")
print("p_4_e:", sol[5])
print("M_4_e:", sol[2])
print("M_4_s:", sol[3], "\n")
print("m._3:", mass_flow_rate)

'''Nó com 3 Dutos'''

def Case_4(vars, *Marg):
    M_1_e, M_1_s, M_2_e, M_2_s, M_3_e, M_3_s, p_1_s, p_2_e, p_3_e =
vars
    pressures, k, pipes = Marg
    p_1_e, p_2_s, p_3_s = pressures[0], pressures[1], pressures[2]

    f, L, D = [], [], []
    for pipe in pipes:
        f.append(pipe.friction_factor)
        L.append(pipe.length)
        D.append(pipe.diameter)
    f_1, f_2, f_3 = f[0], f[1], f[2]
    L_1, L_2, L_3 = L[0], L[1], L[2]
    D_1, D_2, D_3 = D[0], D[1], D[2]

    return (

```

```

(1 - k * M_1_e ** 2) / (k * M_1_e ** 2) + np.log(k * M_1_e
** 2)
- ((1 - k * M_1_s ** 2) / (k * M_1_s ** 2) + np.log(k *
M_1_s ** 2))
- (4 * f_1 * L_1 / D_1),
M_1_e * p_1_e - M_1_s * p_1_s,
(1 - k * M_2_e ** 2) / (k * M_2_e ** 2) + np.log(k * M_2_e
** 2)
- ((1 - k * M_2_s ** 2) / (k * M_2_s ** 2) + np.log(k *
M_2_s ** 2))
- (4 * f_2 * L_2 / D_2),
M_2_e * p_2_e - M_2_s * p_2_s,
(1 - k * M_3_e ** 2) / (k * M_3_e ** 2) + np.log(k * M_3_e
** 2)
- ((1 - k * M_3_s ** 2) / (k * M_3_s ** 2) + np.log(k *
M_3_s ** 2))
- (4 * f_3 * L_3 / D_3),
M_3_e * p_3_e - M_3_s * p_3_s,
(M_1_s * D_1 ** 2 * p_1_s - M_2_e * D_2 ** 2
* p_2_e - M_3_e * D_3 ** 2 * p_3_e),
M_1_s * p_1_s - M_2_e * p_2_e,
M_1_s * p_1_s - M_3_e * p_3_e
)

```

```

pressure_5_e = 1085000
length_5 = 1500
diameter_5 = .1
friction_factor_5 = .004

```

```

pressure_6_s = 150000
length_6 = 1500
diameter_6 = .1
friction_factor_6 = .004

```

```

pressure_7_s = 150000
length_7 = 1500
diameter_7 = .1
friction_factor_7 = .004

```

```

pipe_5 = Pipe(length_5, diameter_5, friction_factor_5)
pipe_6 = Pipe(length_6, diameter_6, friction_factor_6)
pipe_7 = Pipe(length_7, diameter_7, friction_factor_7)

```

```

pipes = [pipe_5, pipe_6, pipe_7]

M_crit = (1 / specific_heat_ratio) ** 0.5
print("M_crit:", M_crit)
Marg = ([pressure_5_e, pressure_6_s, pressure_7_s],
        specific_heat_ratio, [pipe_5, pipe_6, pipe_7])
p_avg = (pressure_5_e + pressure_6_s + pressure_7_s) / 3
print(p_avg)

M = fsolve(Case_4, (
    0.03948519639496014,
    0.055170881099778954,
    M_crit,
    M_crit * 3,
    M_crit,
    M_crit * 3,
    776522.6372051436,
    p_avg,
    p_avg), args = Marg)

```

ANEXO A

Universidade de São Paulo

Engenharia de Petróleo – Escola Politécnica

Número USP: 9023030

Data: 15/11/2020



Simulação de uma ramificação de Gasodutos utilizando o paradigma da Programação Orientada a Objetos

Lukas Hitoshi Shiroma

Orientador: Prof. Dr. Rafael Dos Santos Gioria

Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um código de programação em Python para simular uma ramificação de gasoduto, partindo da validação através de um escoamento mais simples, onde é possível analisar resultados para diferentes condições de escoamento. Posteriormente, aplicou-se o modelo implementado computacionalmente a uma ramificação de gasodutos e os resultados foram analisados.

Abstract

In this work, a Python programming code was developed to simulate a pipeline branch, starting from the validation through a simpler flow, where it is possible to analyze results for different flow conditions. Subsequently, the computationally implemented model is applied to a branch of gas pipelines and the results were analyzed.

Introdução

Em 2020, a pandemia da COVID-19 impactou diversos setores do Brasil e o setor de óleo e gás não foi exceção. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME) e da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural (GN) e Biocombustíveis (ANP), a produção do petróleo cru e de gás natural comercializável caiu 5,1% do primeiro trimestre de 2020 para o segundo (ANP; MME, 2020). O que contrasta com a maior participação da Petrobrás no mercado durante o mesmo período (de 84,5% para 88,2%) (ANP, 2020).

Analisando o cenário energético atual e os gasodutos existentes, é necessário o estudo do escoamento para o desenvolvimento de projetos futuros. As plataformas da Bacia de Santos possuem uma rede de gasodutos que ligam os campos de produção ao continente. Apesar de toda a infraestrutura existente, essa estrutura não suporta toda a produção de gás natural *offshore* e muitas vezes, as plataformas devem que interromper sua produção por problemas no escoamento do gás, já que, em alguns casos, não se pode re-injetar ou queimar o gás em sua totalidade.

Neste trabalho, desenvolveu-se a simulação das características do escoamento do gás em uma ramificação de gasodutos utilizando o paradigma da programação orientada a objetos com a apresentação e discussão dos resultados. A metodologia utilizada parte da validação inicial em um

escoamento em um duto simples com o incremento gradual da complexidade até a implementação da simulação do escoamento em uma ramificação.

Metodologia

Para estruturar o sistema na lógica computacional e, de maneira numérica, possibilitar que o mesmo encontre uma solução plausível para o problema, as entidades e seus atributos são declarados seguindo o paradigma da Programação Orientada a Objetos em Python 3.

Os dutos, fluidos e condições são instanciados como classes e cada uma possui um conjunto de características (atributos) que descrevem esses objetos. Além deste grupo de objetos, há, também, funções referentes aos nós e aos números de Mach, que recebem as propriedades dos objetos como parâmetros de entrada.

Os fluidos recebem valores de massa molar e calor específico e dessas propriedades obtêm-se os valores de capacidade térmica [Eq. (1)] e da constante R [Eq. (2)], descritas por Carscallen (2014), para o fluido em questão.

$$c_p = \frac{kR_{fluido}}{k-1} \quad (1)$$

$$R_{fluido} = \frac{R_{universal}}{M} \quad (2)$$

A classe de condições, que se refere às condições físicas em determinado ponto de um certo duto com um certo fluido, herda todas as propriedades dos fluidos e dutos, além delas, a classe recebe, também, propriedades de pressão e temperatura. Com todas essas características atribuídas, é possível calcular a densidade do fluido [Eq. (3)] e a velocidade do som [Eq. (4)].

$$\rho = \frac{p}{R_{fluido}T} \quad (3)$$

$$c = \sqrt{kR_{fluido}T} \quad (4)$$

Para o primeiro caso, de um duto simples e escoamento isotérmico e compressível, foram realizadas validações iniciais do modelo para seguir com o incremento da complexidade até a formulação do escoamento em uma ramificação.

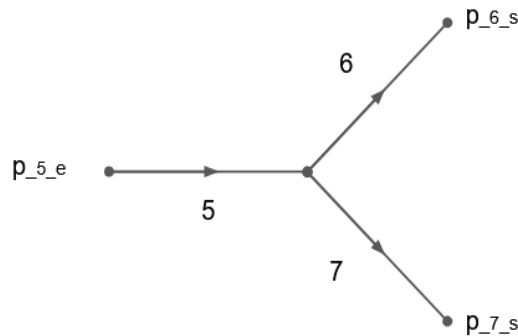


Figura 1 – Ramificação de gasodutos com pressões nas extremidades.

Das propriedades de estagnação, a seguinte relação é base para se encontrar as pressões ou o número de Mach:

$$\frac{P_0}{P_0^*} = \frac{1}{M\sqrt{k}} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2}M^2}{1 + \frac{k-1}{2k}} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (5)$$

Pode-se obter a vazão mássica por:

$$\dot{m} = \rho M c A \quad (6)$$

Definidos os sistemas de equações e as condições de contorno, a resolução do sistema é realizada utilizando o método *optimize.fsolve* da biblioteca SciPy v1.5.4 do Python. O método *fsolve* encontra as raízes de uma função ou de um sistema de equações não-lineares, partindo de um dado palpite inicial.

A função recebe como argumentos um arranjo com os palpites iniciais para cada variável e uma tupla com as condições de contorno de cada equação. Como retorno, a função devolve um arranjo com as soluções numéricas encontradas.

Resultados

Nesta seção, são descritos os resultados de cada caso apresentado na formulação do problema.

DUTO SIMPLES ISOTÉRMICO

Para o duto simples isotérmico, foram utilizadas duas condições de contorno diferentes para se validar o modelo.

Nos dois casos, são utilizados valores equivalentes para se afirmar a validade dos cálculos.

PRESSÕES EM AMBAS AS EXTREMIDADES

Os valores do número de Mach, utilizados como palpites iniciais, são metade dos valores calculados do Mach crítico:

$$M_{crit} / 2 \cong 0,438529$$

Os valores de Mach de entrada e saída são, respectivamente:

$$M_{1_e} \cong 0,039485$$

$$M_{1_s} \cong 0,285610$$

Como resultado, o valor de vazão mássica é:

$$\dot{m} \cong 1,000404 \text{ kg/s}$$

Os valores dos números de Mach de entrada e saída e o valor de vazão mássica condizem com os valores obtidos por Carscallen (2014). Esse é um indicativo da validade do modelo e, sendo assim, é possível utilizá-lo no caso seguinte.

PRESSÃO E MACH EM UMA DAS EXTREMIDADES

Os palpites iniciais para encontrar os valores da pressão e do número de Mach da outra extremidade são um décimo da pressão e dez vezes o Mach da outra extremidade.

Os valores de Mach e pressão na saída são, respectivamente:

$$p_{2_s} \cong 150.000 \text{ Pa}$$

$$M_{2_s} \cong 0,285610$$

Como resultado, o valor de vazão mássica é:

$$\dot{m} \cong 1,000404 \text{ kg/s}$$

Os valores da pressão e número de Mach da saída e o valor de vazão mássica condizem com os valores obtidos por Carscallen (2014) e com os valores obtidos no caso anterior. A confirmação é importante para validar os todos os cálculos utilizados até o momento. E com essa validação, é possível seguir com o incremento da complexidade do problema.

DUTOS ISOTÉRMICOS EM SÉRIE

Para os valores iniciais das pressões e dos números de Mach são utilizadas a média das pressões e um décimo do Mach crítico, respectivamente.

Os valores de Mach e pressões são:

$$p_{3_s} \cong 1.073.553,24 \text{ Pa}$$

$$M_{3_e} \cong 0,008202$$

$$M_{3_s} \cong 0,008289$$

$$p_{4_e} \cong 268.388,31 \text{ Pa}$$

$$M_{4_e} \cong 0,033156$$

$$M_{4_s} \cong 0,059324$$

Como resultado, o valor de vazão mássica é:

$$\dot{m} \cong 0,207796 \text{ kg/s}$$

Os valores obtidos para as pressões, Mach e vazões mássicas são fisicamente condizentes. Como a validação inicial mimetizando o primeiro caso foi confirmada, o método utilizado para a resolução dos cálculos é acertado.

RAMIFICAÇÃO DE DUTOS ISOTÉRMICOS

Para os palpites iniciais, foram utilizados diversos valores buscando a convergência do método numérico para o sistema de equações não-lineares.

Para os palpites dos números de Mach do duto 5, utilizaram-se valores da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos nos casos anteriores. Como os casos anteriores passaram pela validação com os valores da bibliografia, esses valores são palpites com uma boa acurácia.

$$M_{5_e} \cong 0,039485$$

$$M_{5_s} \cong 0,055171$$

Os palpites para as pressões no nó são as médias das pressões nas extremidades.

$$p_{avg} \cong 461.666,66 \text{ Pa}$$

Já para os números de Mach dos dutos 6 e 7, os palpites iniciais seguiram a mesma lógica dos casos anteriores, utilizando valores derivados do Mach crítico. Nesse caso, variaram-se os valores buscando a convergência do método.

Porém, o método se mostrou extremamente sensível ao palpite inicial. Mesmo com uma série de palpites para os números de Mach dos dutos 6 e 7, o programa não encontrou raízes para o sistema. Nesse caso, nota-se que a complexidade influenciou bastante na sensibilidade dos palpites iniciais para se determinar os valores que aproximam o sistema de suas raízes.

Conclusão

Originalmente, o trabalho visava a formulação de uma rede real de gasodutos. Mas como o tempo para o desenvolvimento foi limitado e o método numérico não foi eficiente após certo ponto, mudou-se o objetivo do projeto de maneira a se extrair o máximo do conteúdo até então produzido.

A utilização da programação orientada a objetos facilita na compreensão e análise da formulação dos problemas. Com cada objeto e suas propriedades mapeadas, é possível realçar cada propriedade em estudo no código fonte. Essa análise é importante para simplificar o entendimento da programação e como ela se liga ao assunto em questão. No escopo deste trabalho, a POO permitiu a navegação pelas propriedades dos dutos e fluidos de maneira intuitiva. Essa navegação é importante para se entender como cada propriedade se comporta em cada objeto.

O método numérico utilizado para a resolução das equações não-lineares se mostrou eficiente até certo ponto. Porém, ao se aumentar a complexidade do sistema de equações, o método se mostrou muito dependente da escolha de um bom palpite inicial para as iterações. Nos casos em que o palpite inicial não se aproximava das raízes do sistema, o método não convergia para uma solução plausível.

Para os próximos passos, é de extrema importância a definição entre: trocar o método numérico para a resolução dos sistemas de equações ou definir uma metodologia acurada para a escolha dos palpites iniciais para o método numérico atual.

Referências

- ARAKAKI, T. K. Simulação de rede de distribuição de gás, Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química. São Paulo, 2017.
- BENNER P., et al. Gas Network Benchmark Models, **Applications of Differential - Algebraic Equations: Examples and Benchmarks. Differential - Algebraic Equations Forum**. Springer, Cham, 2018.
- CHURCHILL, S. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. Chemical Engineering, v.84, New York, 1977.
- COSTA, A. L. H., et al. Steady State Modeling and Simulation of Pipeline Networks for Compressible Fluids, **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Volume 15, n. 4, 1998.

LUNA, D. & NUNES, F. Vendas de petróleo e gás da Petrobrás caem com pandemia, aponta relatório. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 21 de julho de 2020. Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,vendas-d-e-petroleo-e-gas-da-petrobras-caem-com-pandemia-aponta-relatorio,70003371712>>. Acesso em: 01 de agosto de 2020.

OOSTHUIZEN, P. H. & CARSCALLEN, W. E. **Introduction to compressible fluid flow**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.crcnetbase.com/isbn/9781439877920>. Acesso em: 6 ago. 2020.