

# SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DUTOS PARTE 1



Claudio Veloso Barreto

[cveloso@simdut.com.br](mailto:cveloso@simdut.com.br)





## **Claudio Veloso Barreto, MSc** **[cveloso@simdut.com.br](mailto:cveloso@simdut.com.br)**

Engenheiro mecânico com mestrado em Termociências pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2011). Mais de 20 anos de experiência em programação de interfaces gráficas e algoritmos voltados a solução de problemas de engenharia, principalmente para o setor de petróleo e gás. Gestão e desenvolvimento de projetos de pesquisa na área de simulação termohidráulica, software especialistas e sistemas informatizados com georreferenciamento.

### **20 softwares desenvolvidos para o setor dutoviário (2002 a 2022) com destaque para:**

- CALCPRO : Simulador de Rede de Oleodutos em Regime Permanente
- PigSim : Simulador transiente de passagem de pig para dutos
- SPGAS : Simulador dinâmico de processos para pontos entrega de gás natural
- SimPE : Simulador de ponto de entrega voltado ao treinamento de operadores

### **12 publicações em congressos nacionais e internacionais (2004 a 2019)**

## **SOFTWARES DESENVOLVIDOS PARA O SETOR DUTOVIÁRIO:**

1. SPGAS- Simulador Dinâmico de Estações de Entrega de Gás Natural. 2010-2021.
2. SIMPIPE SUITE – Ferramenta de Avaliação de Integridade, Cálculo de PMOA e Reclassificação de Gasodutos. 2020-2021.
3. PipeRisk - Ferramenta de Análise de Risco para Gasodutos e Oleodutos, 2021.
4. PipeTest - Ferramenta de Cálculo de Teste Hidrostático de Dutos. 2019.
5. TBGCLASS – Ferramenta de Reclassificação de Gasodutos segundo a ISO 13623.2020
6. TBGEdife - Ferramenta de Marcação de Edificações. 2019-2020
7. SIMPE - Simulador de Treinamento de Ponto de Entrega de Gás Natural, 2015.
8. PLANPIG - Ferramenta de planejamento de passagem de pigs para avaliação de corrosão interna e externa. 2015-2019.
9. PipeData - Ferramenta de Geração e Visualização de Perfis Consolidados de Gasodutos e Oleodutos. 2018-2021.
- 10.Plug de Hidrato - Simulador de deslocamento de plugues de hidrato. 2018-2021.
- 11.MAVAZ-Ferramenta de Cálculo de Máximo Volume Vazado em Oleodutos. 2002-2021.
- 12.PipeClass - Ferramenta de Apoio à Reclassificação de Gasodutos com Mapa Iterativo. 2017-2021.
- 13.GASPEX - Ferramenta de Simulação de Escoamento e Avaliação Integrada de CAPEX e OPEX para Gasodutos, 2014
- 14.GASVTE - Ferramenta de Avaliação de Viabilidade Técnica-Econômica para Gasodutos, 2014.
- 15.Módulo1 e 2: Interfaces de treinamento de operadores de oleodutos, 2014.
- 16.DESLOCAN2-Simulador de Deslocamento de Pig em Operações de Esvaziamento de Oleodutos com Nitrogênio. 2011-2018.
- 17.Profile Tool - Ferramenta de Manipulação de Perfis de Elevação de Dutos. 2011.
- 18.CALCPRO - Ferramenta de Cálculo de Escoamento em Oleodutos em Regime Permanente. 2004-2018.
- 19.PIGSIM -Programa de Simulação de Passagem de Pigs. 2003.
- 20.DutoPro - Programa de Análise de Escoamento em Regime Transiente. 2002.

## PUBLICAÇÕES

1. THE DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR GEORREFERENCED CLASS LOCATION ASSESSMENTS, 2019.
2. Deployment of a Gas Pipeline City-Gate Simulation Tool for Training Purposes, 2015.
3. SIMULATION AND PLANNING OF PIPELINE EMPTYING OPERATIONS, 2012.
4. AVALIAÇÃO DOS CONTROLADORES DAS ESTAÇÕES DE ENTREGA DE GÁS NATURAL ATRAVÉS DE SIMULADOR, 2011.
5. TRANSIENT SIMULATION OF NATURAL GAS CITYGATES STATIONS, 2010.
6. PIPELINE OPERATORS TRAINING AND CERTIFICATION USING THERMOHYDRAULIC SIMULATORS. In: RIO PIPELINE CONFERENCE, 2009.
7. PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA EM OLEODUTOS. In: RIO PIPELINE CONFERENCE, 2007.
8. DETERMINAÇÃO DE VOLUMES EM OPERAÇÃO DE DRENAGEM DE OLEODUTOS. IBP106605, 2005.
9. MODELAGEM DINÂMICA DE VÁLVULAS DE VÁLVULAS DE RETENÇÃO. In: Rio Pipeline Conference, 2005, Rio de Janeiro. IBP109105, 2005.
10. ANÁLISE DE TRANSIENTES DEVIDO A FECHAMENTO RÁPIDO EM DUTOS CURTOS. In: CONEM 2004, 2004, Belém. CONEM 2004, 2004.
11. COMPORTAMENTO DE PULSOS DE PRESSÃO EM TRECHOS DE DIÂMETRO REDUZIDO DE DUTOS DE TERMINAIS MARÍTIMOS, 2004.
12. OPTIMIZATION OF PUMP ENERGY CONSUPTION IN OIL PIPELINES. In: IPC 2004, 2004, Calgary. IPC04-0385, 2004.

# INTRODUÇÃO

- Atualmente, o projeto e a operação de um empreendimento na área de transporte de fluidos passa obrigatoriamente por simulações computacionais em busca da melhor solução técnica e econômica.
- Mas o que é simulação de um duto???

**Envolve a criação de um modelo computacional que *responda* de acordo com o duto real.**



# INTRODUÇÃO

- Para a utilização de simuladores é necessário que se entenda o modelo físico-matemático e o modelo numérico no qual o simulador se fundamenta.
- Algumas vezes, o engenheiro envolvido com simulações numéricas adquire a errônea interpretação de que o seu trabalho se resume a dominar uma sequência de botões.
- O que se espera de um engenheiro é avaliar quais são os detalhes relevantes dos problemas que devem ser alimentados e depois do programa rodar, saber avaliar o resultado obtido, interpretando-o e verificando o que é consistente ou não nestes resultados.

# INTRODUÇÃO

- Existe um grande número de pacotes de simulação diferentes no mercado e pode ser um desafio escolher o programa correto, decidir quando e exatamente para que utilizá-lo
- Para que queremos um simulador de escoamento em dutos?
- A identificação das condições a serem analisadas deve ser feita antes da escolha do programa

# INTRODUÇÃO

- Como classificar os simuladores existentes?
- Existem **duas** formas básicas de se classificar o simulador, seja de acordo com o **padrão de escoamento**, ou quanto a **dependência temporal** do fenômeno :
  - Simuladores **monofásicos** versus **multifásicos**
  - Simuladores de **regime permanente** ou **transiente**

# INTRODUÇÃO

- **Simuladores monofásicos versus multifásicos:**

- Os primeiros modelos computacionais foram desenvolvidos para tratar escoamento de água ou vapor, mas não os dois ao mesmo tempo (**monofásicos**)
- No caso da redução da pressão até o ponto de bolha observa-se a formação de bolsas de vapor interferindo no escoamento. Alguns simuladores monofásicos têm embutido modelos para tratar este evento, quando é observado em pequenos trechos do duto
- Escoamentos em colunas de produção de poços de petróleo, envolvem tipicamente escoamento **multifásico** (óleo-gás-água) onde simuladores multifásicos são **obrigatórios**.

# INTRODUÇÃO

- **Simuladores de estado estacionário ou transiente**

- Alguns pacotes de simulação resolvem o escoamento em estado estacionário, isto é, eles somente podem dizer como a pressão, vazão e a temperatura estão distribuída ao longo do duto a partir de uma situação que de alguma forma atinge o equilíbrio
- Em muitas situações este tipo de resposta pode ser o desejado, em outras não
- Um simulador de estado transiente permite calcular todos os passos de tempo intermediários quando o sistema sai de uma situação para outra. Por outro lado, eles costumam ser mais complexos e exigir mais tempo de computação
- Escoamentos multifásicos, em sua natureza são transientes. Porém, aproximações podem ser realizadas para analisar num determinado trecho do duto qual o padrão de escoamento está se desenvolvendo .

# INTRODUÇÃO

- **Modelos térmicos (Isotérmico, Térmico e Transiente Térmico)**

- Os modelos térmicos utilizados nos simuladores variam fortemente. Desde um simples modelo isotérmico até modelos transientes térmicos sofisticados de transferência de calor entre o fluido, duto, revestimentos e o meio ambiente

- **Equações de Estado**

- Os simuladores trabalham ainda com diversos modelos de equação de estado, onde geralmente são aplicados de acordo com o tipo de fase :
  - Fase gás : Gás Ideal, CNGA, Peng-Robinson, SRK, BWRS
  - Fase líquida: correlação em função do módulo de elasticidade do líquido, coeficiente de expansão térmico.
- Para o cálculo do escoamento é necessário conhecer a massa específica e a viscosidade em função da temperatura e pressão
  - Valores fixos
  - Correlações
  - Mapas PVT

# INTRODUÇÃO

- **Principais componentes de um simulador**

Em sua maioria os simuladores podem ser divididos em **dois** componentes:

- O **motor de cálculo (solver)** que executa as operações de cálculo do escoamento, podendo ter módulos de estado estacionário, transiente, fase de escoamento, mono ou multifásico e cálculos térmicos. O motor de cálculo pode ser **não interativo** ou **interativo**, neste último o usuário pode realizar comandos, alterar parâmetros durante o processo de cálculo.
- A **interface gráfica do usuário** utilizada para construção do modelo numérico, configuração de unidades, parâmetros de solução, visualização dos resultados na forma de tabelas e gráficos. Em alguns casos pode existir um módulo adicional na interface gráfica para pós-processamento de dados, análise e otimização

# INTRODUÇÃO

## Licenças

As “*softhouses*” da área de simulação negociam licenças de módulos específicos e, conseqüentemente, deve-se avaliar com muito cuidado se todas as licenças necessárias para a solução do problema específico estão sendo adquiridas

# INTRODUÇÃO

## **Simuladores e Fases do Projeto:**

- Quando utilizar determinado simulador, ou qual o programa que deverá ser escolhido nas diversas fases de um projeto?
- As fases iniciais do projeto podem permitir cálculos relativamente simples e, nestes casos, simuladores de estado estacionário podem ser empregados. E depois?
  - Projeto de sistemas de alívio
  - Detecção de vazamento
  - Treinamento
- A utilização do mesmo *software* durante o maior número de fases do projeto possível reduz a necessidade da equipe de se familiarizar com diversas interfaces diferentes

# INTRODUÇÃO

- **Potencialidades e aplicações :**

- O projeto completo de um novo duto, a partir de condições de oferta e demanda
- Verificar determinada condição de operação de um duto existente
- Projeto de expansão para um duto existente, em função das alterações da oferta ou da demanda
- Otimização da operação
- Detecção de vazamentos
- Procedimentos de partida e parada de dutos
- Padrões de operação de compressores ou bombas
- Predição de impacto ambiental de vazamento potencial
- Comportamento de bateladas
- Efeitos da ruptura da linha

# INTRODUÇÃO

- **Alguns programas comerciais disponíveis:**

- Uma simples pesquisa na Internet utilizando termos como “*flow assurance*” ou “*pipeline simulation software*” produz centenas de respostas
- Os preços variam de 0 (grátis) até milhares de dólares
- Apesar de todos partirem da mesma teoria básica, os diferentes programas atendem diferentes nichos de mercado

# INTRODUÇÃO

- **Alguns programas comerciais disponíveis monofásicos**

Name	Contact	Comments
<b>Sinergy PipeLine Simulator</b>	<b>DNV-GL</b> <b>www.dnv-gl.com</b>	Large simulation package with many modules and support offices around the world. Relies on built-in PVT-data.
Flowmaster	Flowmaster Ltd flowmaster.com	Integrates with Matlab. Both liquid and gas. Also thermo modules. Does not focus on systems where relatively complex PVT-data are required.
Atmos Pipeline Software	Atmos atmosi.com	Involved in all sorts of single-phase pipeline computations. Offices or representatives in 28 countries.
GASWorkS	Bradley B. Bean b3pe.com	One of the many cheap of-the-shelf steady-state gas networks simulators. Developed by a competent, but very small company.
FluidFlow3	Flite Software fluidflowinfo.com	Both gas and liquid simulations. Comes with 850 pre-defined fluids in its database. Can also handle Non-Newtonian fluids.
AFT Pipeline	Applied Flow Technology aft.com	Well designed, modularized steady-state and transient software. Has separate module for PVT-data.
PipelineStudio	Energy Solutions www.energy-solutions.com	Extensive collection of software modules for design, analysis, optimizing and forecasting oil and gas networks.
FlowDesk	Gregg Engineering greggengineering.com	Gas pipeline simulator. Focuses a lot on scheduling and forecasting.
SIMONE	Liwacom liwacom.de	Simulation and optimization of natural gas pipeline systems.
H2OCalc	MWH Soft mwhsoft.com	Specialize in various types of water pipeline computations.

# INTRODUÇÃO

- Alguns programas comerciais disponíveis multifásicos – regime permanente ou estacionário

Name	Contact	Comments
HYSYS Pipe Segment	AspenTech aspentech.com	Not a very extensive model, but included in the much used Aspen HYSYS process simulation package. AspenTech recommends other software for more advanced export pipelines, gathering systems or riser analysis.
HYSYS PIPESYS	AspenTech aspentech.com	Licensed separately from the Hysys Process simulation package. More advanced than Hysys Pipe Segment and used for pipeline design and analysis.
PIPESIM	Schlumberger www.slb.com	One of the most well known and most used simulation packages for multiphase pipe flow. Developed to integrate nicely with the well simulator Eclipse. When PIPESIM is used with the PIPESIM NET module, it handles pipe networks. Both 2- and 3-phase.
GAP	Petroleum Experts petex.com	Part of the Integrated Production Modelling Package, which also includes various well simulation software. Can also integrate with OLGA for transient multiphase analysis. Both 2 and 3-phase.
PROFES	Aspen Tech aspentech.com	Dynamic multiphase models that can be implemented within the Aspen HYSYS environment. Both 2 and 3-phase. When the Profes Transient module is included, it can also perform transient analysis.
PIPEPHASE	Simsci-Esscor (Now owned by Invensys) www.simsci-esscor.com	Also used for well performance analysis. Developed for simulation of complex networks of pipelines and wells. Both 2 and 3-phase. Can be licensed with the TACITE transient module as an integrated part. Simsci-Esscor seems to recommend using OLGA for advanced transient network analysis.
TUFFP Pro	University of Tulsa www.tuffp.utulsa.edu	This software is integrated into PIPEPHASE and PIPESIM, but also used separately. Both 2 and 3-phase.
PIPEFLO	Neotechnology Consultants Ltd. neotec.com	One of the veteran steady-state multiphase simulators. Comes with 2-phase capabilities, but they also sell OLGAS steady-state licences for 2-phase and 3-phase steady-state modules as part of their package. They do not support transient simulations.

# INTRODUÇÃO

- Alguns programas comerciais multifásicos e transientes:

Name	Contact	Comments
OLGA	SPT Group www.sptgroup.com	Currently the most used and also probably most well documented transient pipe flow simulation software. Handles both 2 and 3 phase flow. Integrates with the most used well and process simulators, in addition to most of the steady-state multiphase pipe flow simulators.
TACITE	Simsci-Esscor www.simsci-esscor.com	Developed by Institut Francais du Petrole (IFP), but marketed by Simsci-Esscor as part of its PIPEPHASE package. Does not seem to have an open, documented API, and so can only be used together with PIPEPHASES's Graphical User Interface. The current version does not have full network capabilities. Both 2 and 3 phase.
SimSuite Pipeline	Telvent telvent.com	2-phase simulator originating in the nuclear industry, but used for both water/steam and oil/gas the last 10 years or so. It comes integrated with a steady-state simulator.
ProFES Transient	Aspen Tech aspentech.com	Developed by AEA Technology in the UK, it was formerly known as PLAC, (based on TRAC, developed for the nuclear industry), later integrated into AspenTech's ProFES simulation package to bring transient capabilities to its steady-state module. Development has been discontinued; the software is no longer marketed.
Aspen Traflow	Aspen Tech aspentech.com	Originally developed for Shell but also used in other projects. No longer developed or marketed.

# SIMULADORES DE DUTOS

- Pipeline Studio Simulator

[www.energy-solutions.com](http://www.energy-solutions.com)



- DNV Synergi Pipeline Simulator

[www.dnvgl.com](http://www.dnvgl.com)



- Schlumberger OLGA

<https://www.software.slb.com/products/olga>



# DESENVOLVIMENTO DE SIMULADORES E



**PIGSIM:** Simulador transiente de passagem de pigs



**DESLOCAN2:** simulador de deslocamento de pig com nitrogênio



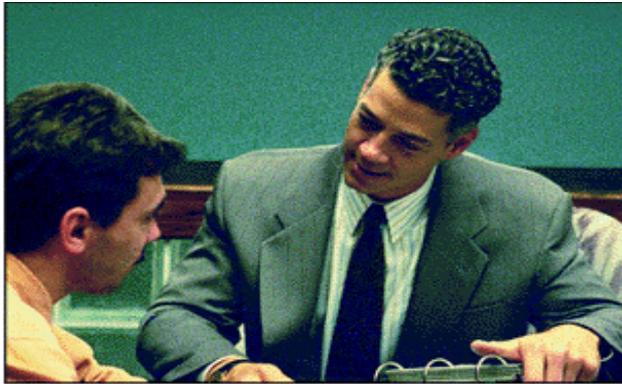
**CALCPRO:** simulador de dutos em estado estacionário



**MAVAZ:** cálculo de máximo volume vazado gravitacional e volume vazado gravitacional ao longo do tempo em oleodutos

# MODELAGEM

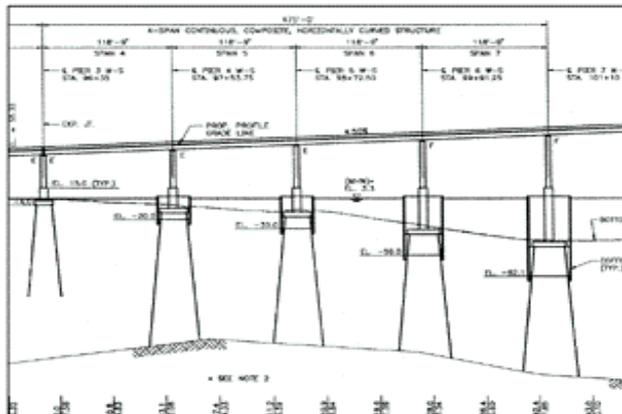
- O que é um modelo? É a descrição de algo real através de uma determinada linguagem



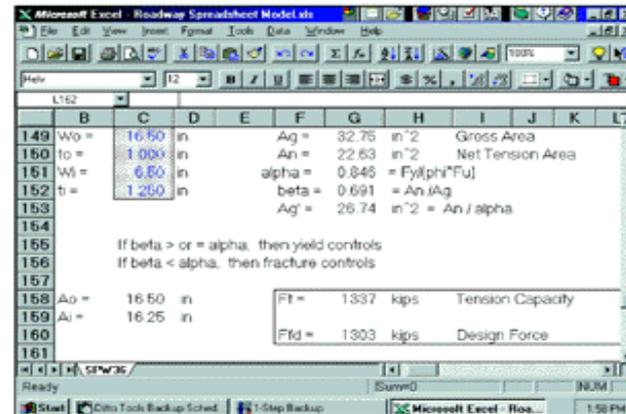
**Narrative**



**Physical**



**Schematic**



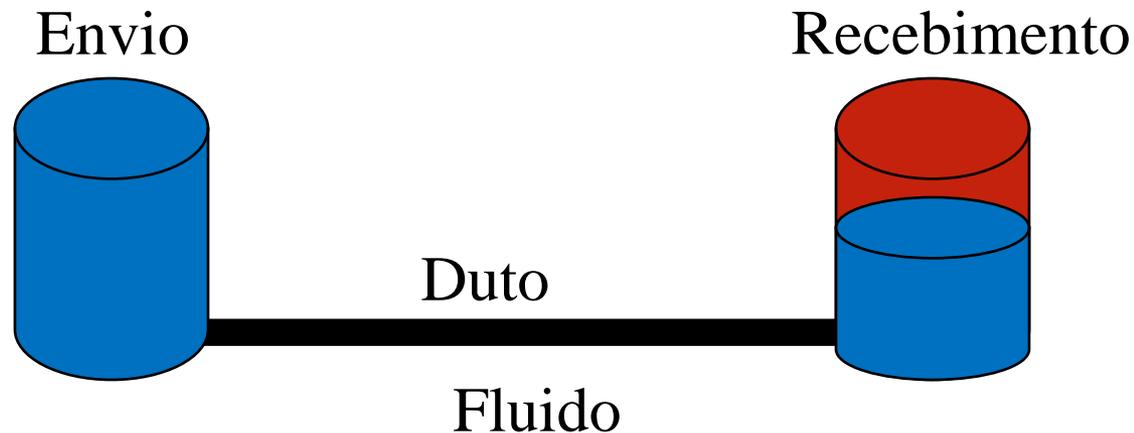
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
149	Wo =	16.50	in		Ag =	32.75	in <sup>2</sup>		Gross Area	
150	to =	1.000	in		An =	22.63	in <sup>2</sup>		Net Tension Area	
151	Wl =	6.80	in		alpha =	0.846	= Fy/(phi*Fu)			
152	ti =	1.250	in		beta =	0.691	= An/Ag			
153					Ag' =	26.74	in <sup>2</sup>		= An / alpha	
154										
155										
156										
157										
158	As =	16.50	in		Ft =	1337	kips		Tension Capacity	
159	Ai =	16.25	in		Ffd =	1303	kips		Design Force	
160										
161										

**Mathematical**

# MODELAGEM

- **Numa primeira aproximação, todo modelo de um sistema de transporte em dutos pode ser reduzido a quatro elementos básicos:**

- Características de quem envia
- Propriedades do meio de transporte (duto)
- Características de quem recebe
- Propriedades do fluido



# MODELAGEM

- Coleta e redução de dados: tanques de envio (fornecedor)
  - O fornecedor é o elemento pelo qual o fluido entra no sistema
  - Alguns simuladores só trabalham com líquido ou com gás. Para outros simuladores, que permitem trabalhar com os dois fluidos, deve-se informa se o problema a ser modelado utiliza um gás ou um líquido
  - Além disto, as características específicas do fluido devem ser passadas para que o simulador possa calcular suas propriedades
  - O ponto de fornecimento do fluido normalmente é modelado para trabalhar com uma condição de contorno ou de pressão ou de vazão máximas



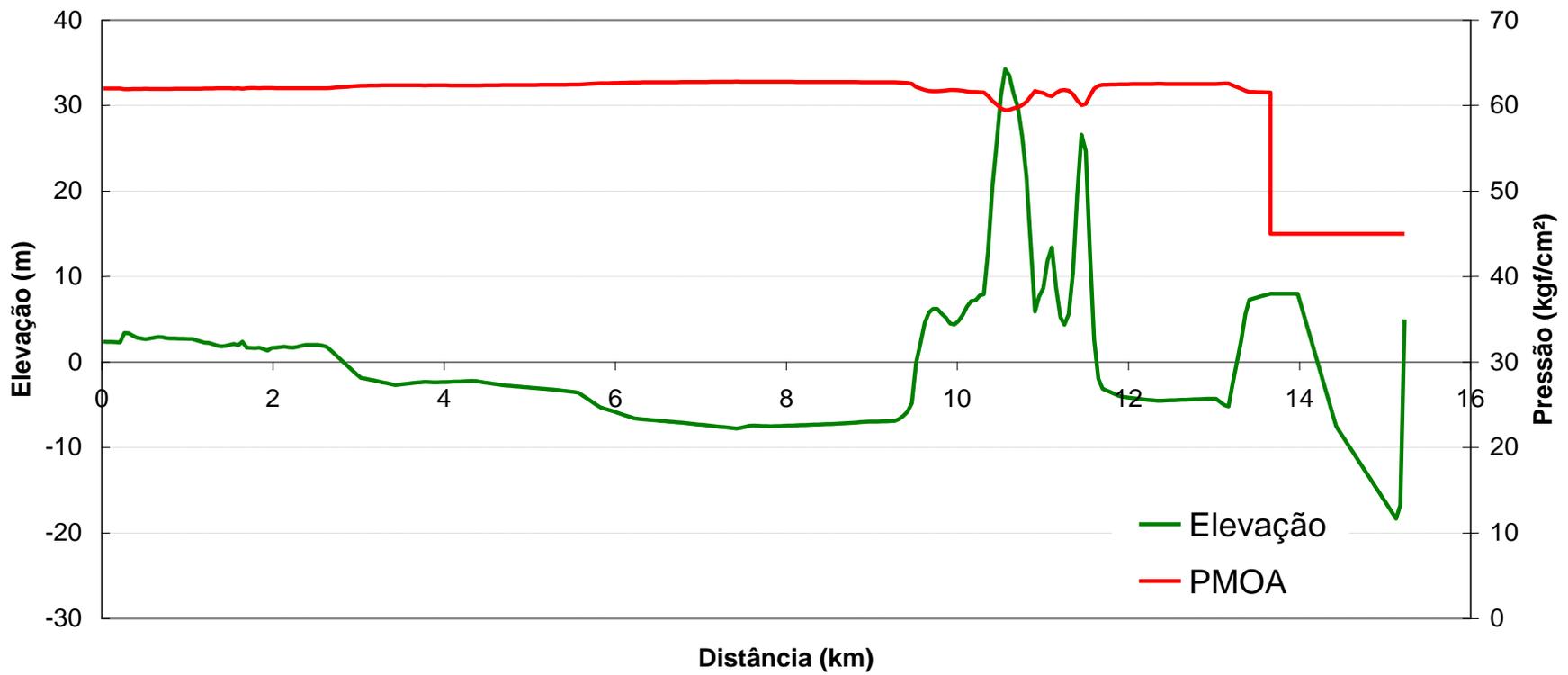
# MODELAGEM

- Definição das características geométricas do projeto
- Coleta e redução de dados para dutos já existentes



# MODELAGEM

- Definição das características geométricas do projeto
- Coleta e redução de dados para dutos já existentes



# MODELAGEM: DUTOS

ASTM / ASME B36.10M-1985  
 AMERICAN STANDARD/AMERICAN SOCIETY of MECHANICAL ENGINEERS

Customary Units				Identification			SI Units		
				Standard(STD) Extra-Strong (XS)					
Inch Nominal Size	Outside Diameter, in.	Wall Thickness, in.	Plain End Weight, lb/ft	API Spec.	Extra-Strong (XXS)	Schedule No.	Outside Diameter, mm	Wall Thickness, mm	Plain End Mass, kg/m
12	12.750	0.562	73.15	5L	...	60	323.8	14.27	108.96
12	12.750	0.625	80.93	5L	...	...	323.8	15.88	120.62
12	12.750	0.688	88.63	5L	...	80	323.8	17.48	132.08
12	12.750	0.750	96.12	5L	...	...	323.8	19.05	143.21
12	12.750	0.812	103.53	5L	...	...	323.8	20.62	154.21
12	12.750	0.844	107.32	...	...	100	323.8	21.44	159.91
12	12.750	0.875	110.97	5L	...	...	323.8	22.23	165.37
12	12.750	0.938	118.33	5L	...	...	323.8	23.83	176.33
12	12.750	1.000	125.49	5L	XXS	120	323.8	25.40	186.97
12	12.750	1.062	132.57	5L	...	...	323.8	26.97	197.48
12	12.750	1.125	139.67	5L	...	140	323.8	28.58	208.14
12	12.750	1.250	153.53	5L	...	...	323.8	31.75	228.74
12	12.750	1.312	160.27	5L	...	160	323.8	33.32	238.76
14	14.000	0.188	27.73	5L	...	...	355.6	4.78	41.35
14	14.000	0.203	29.91	5L	...	...	355.6	5.16	44.59
14	14.000	0.210	30.93	5L	...	...	355.6	5.33	46.04
14	14.000	0.219	32.23	5L	...	...	355.6	5.56	47.99
14	14.000	0.250	36.71	5L	...	10	355.6	6.35	54.69
14	14.000	0.281	41.17	5L	...	...	355.6	7.14	61.35
14	14.000	0.312	45.61	5L	...	20	355.6	7.92	67.90
14	14.000	0.344	50.17	5L	...	...	355.6	8.74	74.76
14	14.000	0.375	54.57	5L	STD	30	355.6	9.53	81.33
14	14.000	0.406	58.94	5L	...	...	355.6	10.31	87.79

# MODELAGEM

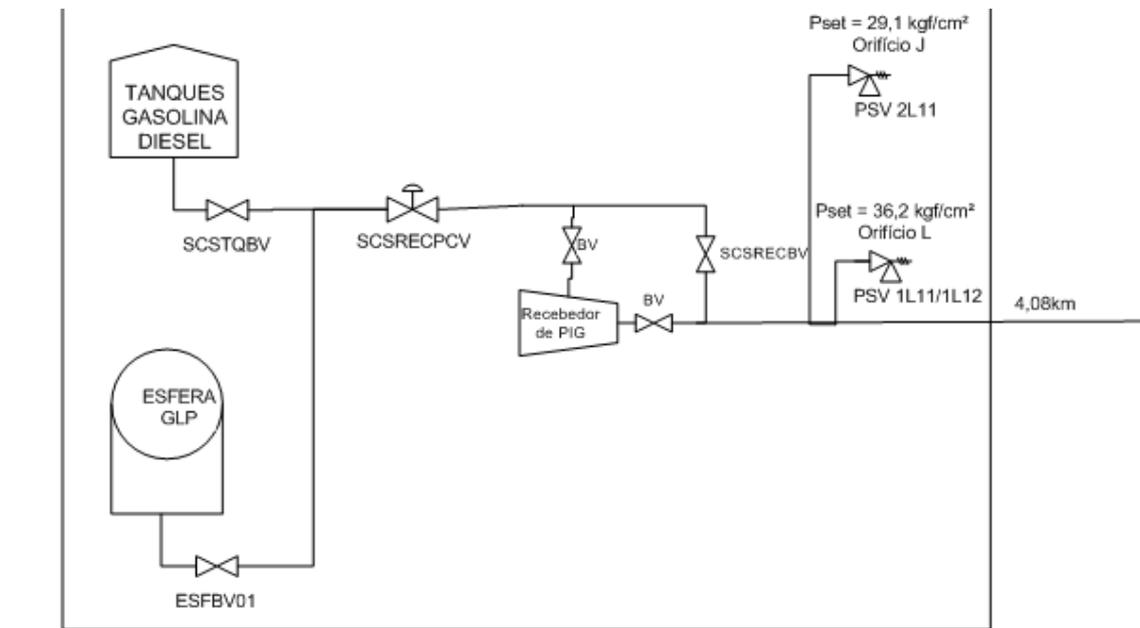
- Coleta e redução de dados: bombas e compressores
  - Normalmente os simuladores permitem que se trabalhe com duas situações
    - equipamentos com algumas características pré-definidas pelo programa: útil nas fases iniciais do projeto
    - equipamentos com características totalmente fornecidas pelo usuário: já foi definido através das características requeridas pelo projeto e da conseqüente seleção das opções no mercado



# MODELAGEM

- **Coleta e redução de dados: recebimento**

- Os diversos equipamentos do recebimento podem ser reduzidos a alguns como:
  - Tanques de recebimento
  - Controladoras
  - Sistema de proteção e alívio
  - Válvulas e scrapers



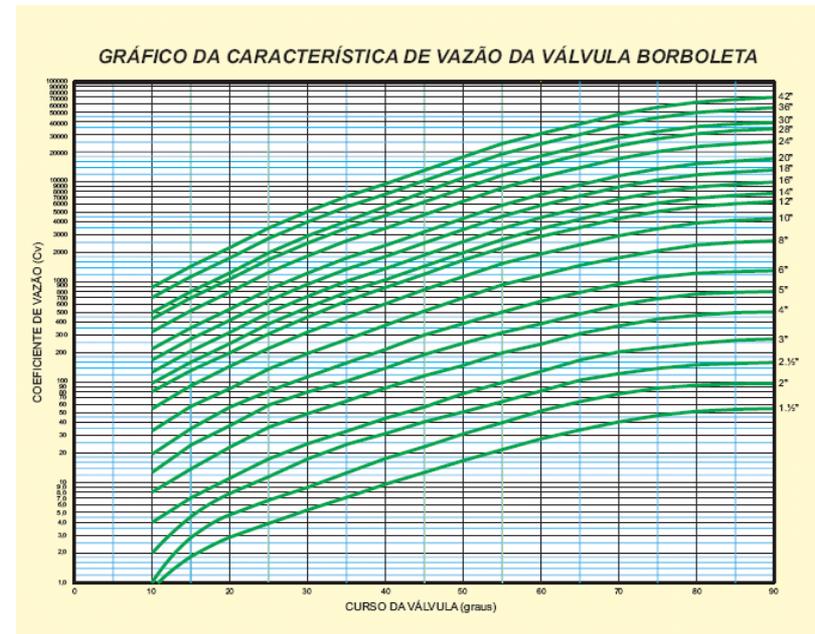
# MODELAGEM

- Coleta e redução de dados: Válvulas controle, retenção, bloqueio e alívio
  - Válvulas podem ser conectadas entre dois extremos de dutos ou entre dutos e equipamentos através dos nós. Normalmente os simuladores permitem modelar válvulas de bloqueio, válvulas unidirecionais (para evitar fluxo reverso) e válvulas de controle (de vazão ou de pressão).

$$Q = CV \sqrt{\frac{\Delta p}{SG}}$$

$$A = \frac{Q}{38 \times K_d \times K_w \times K_c \times K_v \times K_p} \sqrt{\frac{SG}{1.25p - p_b}}$$

API 520: psv mola 25%



# MODELAGEM

- Os demais equipamentos podem ser considerados como acessórios da modelagem
- **Válvulas de alívio**

<b>Duto</b>	<b>OSSP-RE4-12"-Cru</b>	
<b>TAG</b>	PSV-302239 A/B	
<b>Localização</b>	Saída do scraper	
<b>Fabricante</b>	Farris	
<b>Modelo</b>	26KA14946	
<b>Tipo</b>	Mola	
<b>Diâmetro</b>	3"x6"	
<b>Classe</b>	900#x150#	
<b>Orifício</b>	K	
<b>Pressão Aj.</b>	107 kgf/cm <sup>2</sup>	
<b>Sobrepresão</b>	10%	

# POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

## PROBLEMA

- O fluido de trabalho é um óleo com as seguintes características:
  - Condições de referência:  $T=20\text{C}$  e  $P=0\text{ kg/cm}^2$
  - Massa específica:  $880\text{kg/m}^3$
  - Viscosidade absoluta:  $25,7\text{ cP}$
  - Temperatura de  $26\text{ C}$
  - Pressão máxima na entrada é de  $65\text{ kg/cm}^2$  e a pressão na saída é de  $8\text{ kg/cm}^2$
- O duto é horizontal e tem um diâmetro externo de  $32''$  e esp =  $0.562''$  com  $182\text{ km}$  de comprimento.
- Rugosidade =  $0,0018''$
- **Determine a vazão e a potência de bombeamento**

# POTÊNCIA DE BOMBAMENTO

- **Premissas de cálculo**

- escoamento unidimensional: variações somente na direção axial
- escoamento permanente ou transiente
- escoamento isotérmico ou não isotérmico
- Transferência de calor na parede:  $U$  global ou condução de calor radial
- Caracterização dos fluidos: newtoniano ou não
- Caracterização do escoamento: monofásico ou multifásico
- Equações de estado: propriedades variando com temperatura e pressão
- Condições de referência

# POTÊNCIA DE BOMBAMENTO

Otimizar a operação passa pela procura do principal item de despesa:

$$Pot = (Q \cdot \Delta P) / \eta$$

**Pot** : potência hidráulica da bomba

**Q** : vazão volumétrica

**$\Delta P$**  : diferença de pressão entre descarga e sucção

**$\eta$**  : Rendimento da bomba

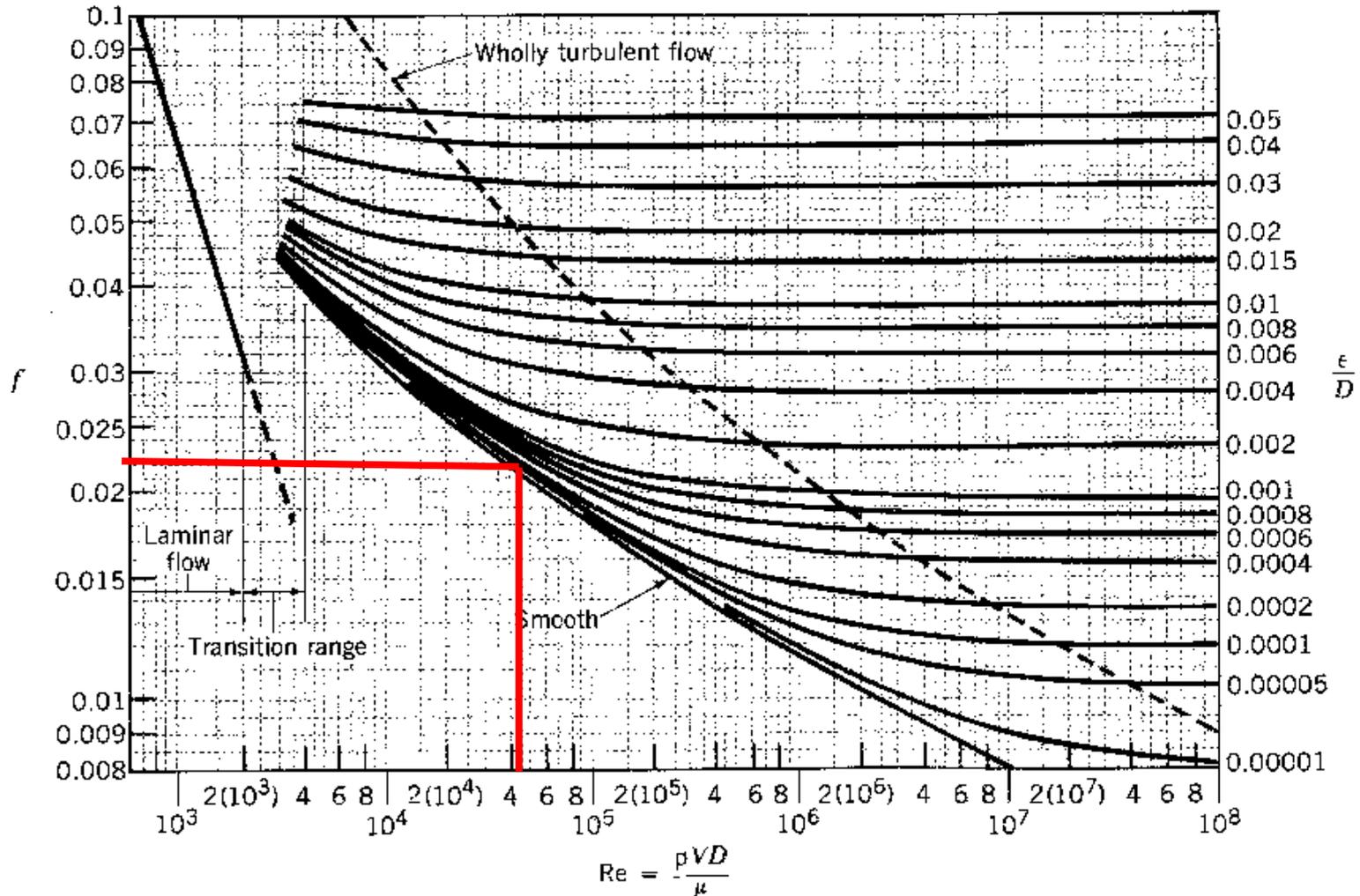
**Eq de Darcy**      $h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$      ou      $P_f = \frac{8\rho L}{\pi^2} \frac{Q^2}{D^5} f$

onde  $f$  é o fator de atrito

Obs: 1Pa.s=1000cP

# POTÊNCIA DE BOMBAMENTO

- Diagrama de Moody



# POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

- Correlações explícita de fator de atrito

Colebrook-White: **Correlação Implícita!**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{r_u}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Haaland:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.7368 - 0.7818 \cdot \log \left[ \left( \frac{r_u}{0.5 \cdot D} \right)^{1.11} + \frac{63.635}{Re} \right]$$

# POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

**SimdutTools** <http://www.simdut.com.br/simduttools/formulas.html>

- Oleodutos → Vazão Volumétrica → Colebrook-White**

Queda de Pressão em Dutos:

$$\text{Equação de Darcy-Weisback: } \Delta p = \rho \cdot g \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{r_u}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Haaland:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.7368 - 0.7818 \cdot \log \left[ \left( \frac{r_u}{0.5 \cdot D} \right)^{1.11} + \frac{63.635}{Re} \right]$$

Todos os métodos no regime Laminar  $Re < 2100$ ,  $f = \frac{64}{Re}$

## Entrada

Colebrook-White

Pressão Entrada  $p_1$

65

kgf/cm2

Elevação Entrada  $z_1$

0

m

Pressão Saida  $p_2$

8

kgf/cm2

Elevação Saida  $z_2$

0

m

M.Especifica  $\rho$

880

kg/m3

Visc Dinâmica  $\mu$

25.7

cP

Diâmetro Ext.  $D$

32

pol

Espessura  $e$

0.562

pol

Comprimento  $L$

182

km

Rugosidade  $r_u$

0.04

mm

## Saída

Vazão  $Q_v$

2752.7557216

m3/h

Velocidade  $v$

1.5829449

m/s

Reynolds

42507.9432205

Fator de Atrito  $f$

0.0218471



Calcular

# POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

**SimdutTools** <http://www.simdut.com.br/simduttools/formulas.html>

- Oleodutos → Vazão Volumétrica → Haaland

Queda de Pressão em Dutos:

$$\text{Equação de Darcy-Weisback: } \Delta p = \rho \cdot g \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{r_u}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Haaland:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.7368 - 0.7818 \cdot \log \left[ \left( \frac{r_u}{0.5 \cdot D} \right)^{1.11} + \frac{63.635}{Re} \right]$$

Todos os métodos no regime Laminar  $Re < 2100$ ,  $f = \frac{64}{Re}$

## Entrada

Haaland	Pressão Entrada $p_1$	65	kgf/cm2	Elevação Entrada $z_1$	0	m	Pressão Saída $p_2$	8	kgf/cm2
	Elevação Saída $z_2$	0	m	M.Específica $\rho$	880	kg/m3	Visc Dinâmica $\mu$	25.7	cP
Diâmetro Ext. $D$	32	pol	Espessura $e$	0.562	pol	Comprimento $L$	182	km	
Rugosidade $r_u$	0.0018	pol							

## Saída

Vazão $Q$	2768.3944556	m3/h	Velocidade $v$	1.5919378	m/s	Reynolds	42749.4359216	Fator de Atrito $f$	0.021601
<b>⚡ Calcular</b>									

# POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

## Planilha Auxiliar - Calculo de Vazão em Oleoduto Horizontal

### Calculo de Vazão em Oleodutos - Duto Horizontal

#### Entrada de Dados do Duto

Parametro	Valor	Unidade	SI
Diâmetro Externo	32	pol	0.8128
Espessura	0.562	pol	0.014275
Comprimento	182	km	182000
Rugosidade	0.0018	pol	4.57E-05

#### Cond. Contorno

Parametro	Valor	Unidade	SI
Pressão de Envio	65	kgf/cm2g	6374323
Pressão de Receb.	8	kgf/cm2g	784532

#### Dados do Produtos

Parametro	Valor	Unidade	SI
Massa Especifica	880	kg/m3	880
Viscosidade Abs.	25.7	cP	0.0257
Fator de Atrito Inicial	0.01		

#### Resultados

Parametro	Valor	Unidade
Perda de Carga	647.51	m
Diâmetro Interno	0.7842504	m
Area Interna	0.48305811	m2

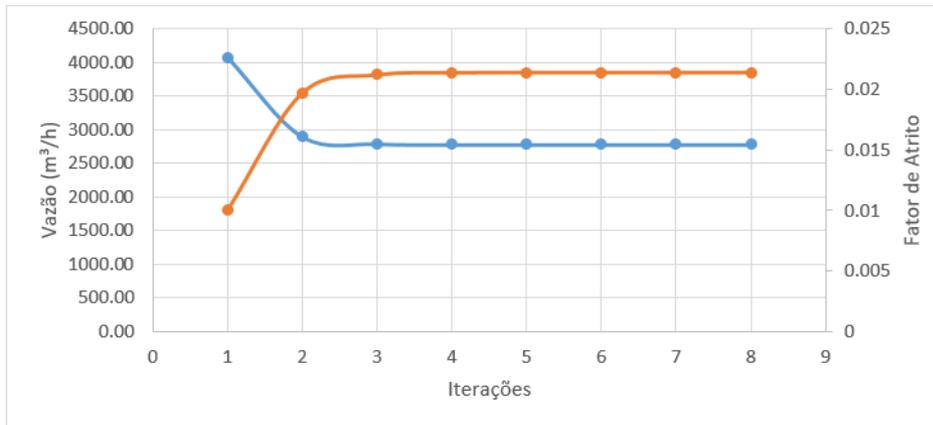
#### Equação de Darcy-Weichbach

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

#### Equação de Haaland para fator de atrito

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[ \left( \frac{e/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2}$$

Iteração	f	Velocidade	Reynolds	Vazão (m3/h)	f	erro f
1	0.01	2.340	6.51E+04	4068.79	0.019724	97.24%
2	0.01972	1.666	4.64E+04	2897.09	0.021222	7.59%
3	0.02122	1.606	4.47E+04	2793.04	0.021394	0.81%
4	0.02139	1.600	4.45E+04	2781.76	0.021413	0.09%
5	0.02141	1.599	4.45E+04	2780.51	0.021415	0.01%
6	0.02142	1.599	4.45E+04	2780.37	0.021416	0.00%
7	0.02142	1.599	4.45E+04	2780.36	0.021416	0.00%
8	0.02142	1.599	4.45E+04	2780.35	0.021416	0.00%



# POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

**SimdutTools** <http://www.simdut.com.br/simduttools/formulas.html>

- Oleodutos → Reynolds

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

Regime de Escoamento:

Laminar:  $Re < 2100$

Transição:  $2100 < Re < 3000$

Turbulento:  $Re > 3000$

Entrada

Vazão  $Q$

2768.4

m<sup>3</sup>/h



M. Específica  $\rho$

880

kg/m<sup>3</sup>



Visc Dinâmica

25.7

cP



Diâmetro Ext.  $D$

32

pol



Espessura  $e$

0.562

pol



Saída

Reynolds

42749.5215382

Regime

Turbulento



Calcular

# POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

**SimdutTools** <http://www.simdut.com.br/simduttools/formulas.html>

- Oleodutos → Reynolds

O que acontece se aumentarmos a viscosidade para 300 cP ??

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

Regime de Escoamento:

Laminar:  $Re < 2100$

Transição:  $2100 < Re < 3000$

Turbulento:  $Re > 3000$

Entrada

Vazão  $Q$

1870

m<sup>3</sup>/h

M. Específica  $\rho$

880

kg/m<sup>3</sup>

Visc Dinâmica

300

cP

Diâmetro Ext.  $D$

32

pol

Espessura  $e$

0.562

pol

Saída

Reynolds

2473.7504884

Regime

Transição



Calcular

# POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

**Determine a vazão e a potência hidráulica :**

$$Pot_w = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta_w}$$

$$Pot_d = \frac{Pot_w}{\eta_d \cdot \phi}$$

**Pot<sub>w</sub>** : Potência hidráulica da bomba

**Pot<sub>d</sub>** : Potência do motor

**Q** : Vazão = 2768 m<sup>3</sup>/h

**ΔP** : Diferença de pressão entre descarga e sucção

Considerando Psuc=4kgf/cm<sup>2</sup>

**ΔP**= 65-4 = 61kgf/cm<sup>2</sup>

**η<sub>w</sub>** rendimento da bomba=70%

**η<sub>d</sub>** rendimento do motor = 95%

**φ**: fator de potência do motor = 0.92

$$Pot = (Q \cdot \Delta P) / \eta = (2768 / 3600 * 61 * 98066.5) / 0.7 / 745.7 = 8811 HP$$

Obs: 1 HP = 745,7 W

# POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

**SimdutTools** <http://www.simdut.com.br/simduttools/formulas.html>

- **Bombas → Potência Hidráulica e do Motor**

Potência Motor:

$$P_d = \frac{P_w}{\eta_d \cdot \phi}$$

Potência Hidráulica:

$$P_w = \frac{(p_2 - p_1) \cdot Q}{\eta_b}$$

## Entrada

Eficiência Bomba  $\eta_b$  70 %

Eficiência Motor  $\eta_d$  95 %

Fator de Potência  $\phi$  0.92

Vazão  $Q$  2768 m3/h

Pressão Sucção  $p_1$  4 kgf/cm2

Pressão Descarga  $p_2$  65 kgf/cm2

## Saída

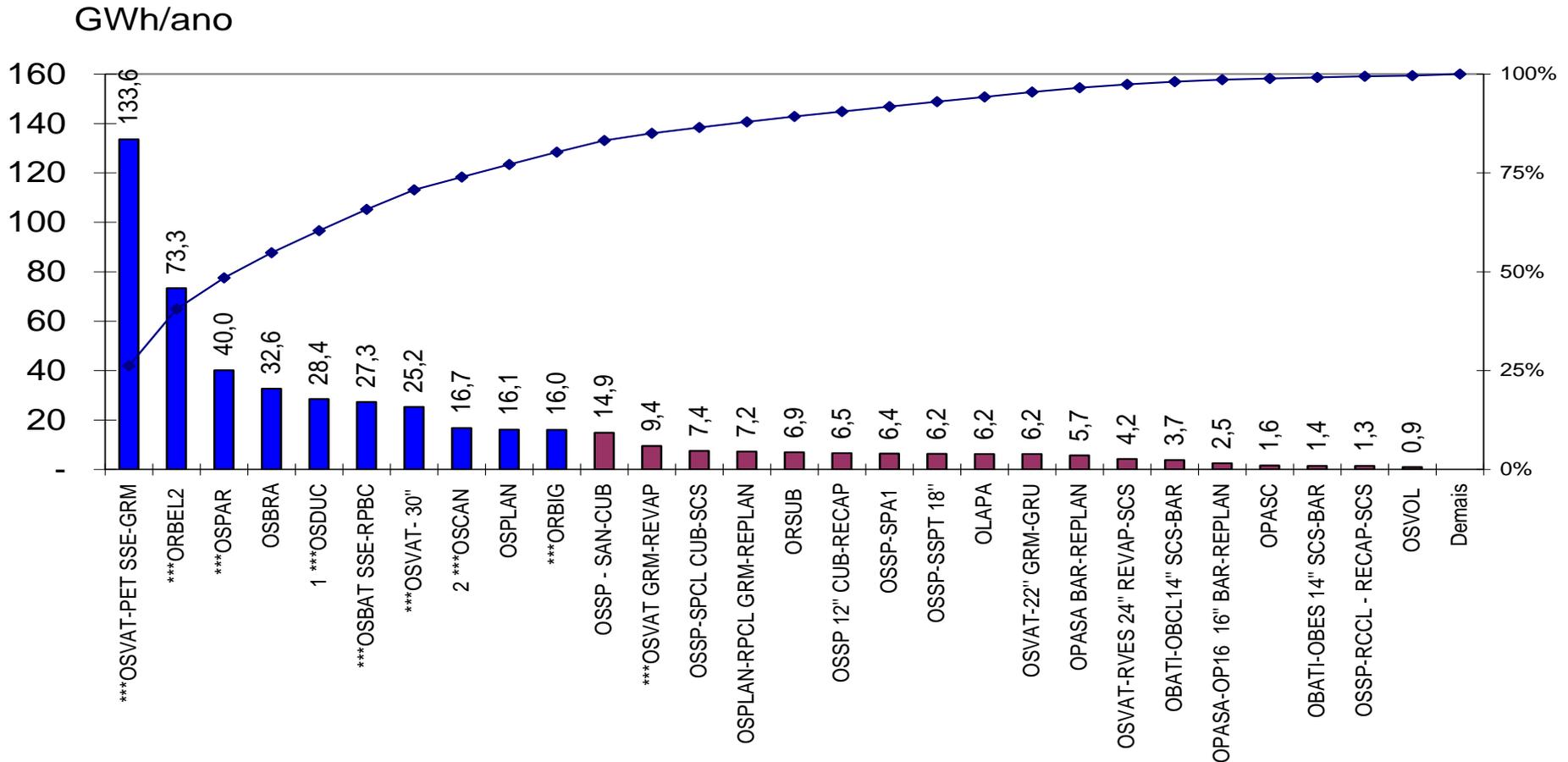
Potência Motor  $P_d$  10081.8574991 HP

Potência Hidráulica  $P_w$  8811.5434542 HP

⚡ Calcular

# POTÊNCIA DE BOMBAMENTO

## Consumo de energia por duto/sistema

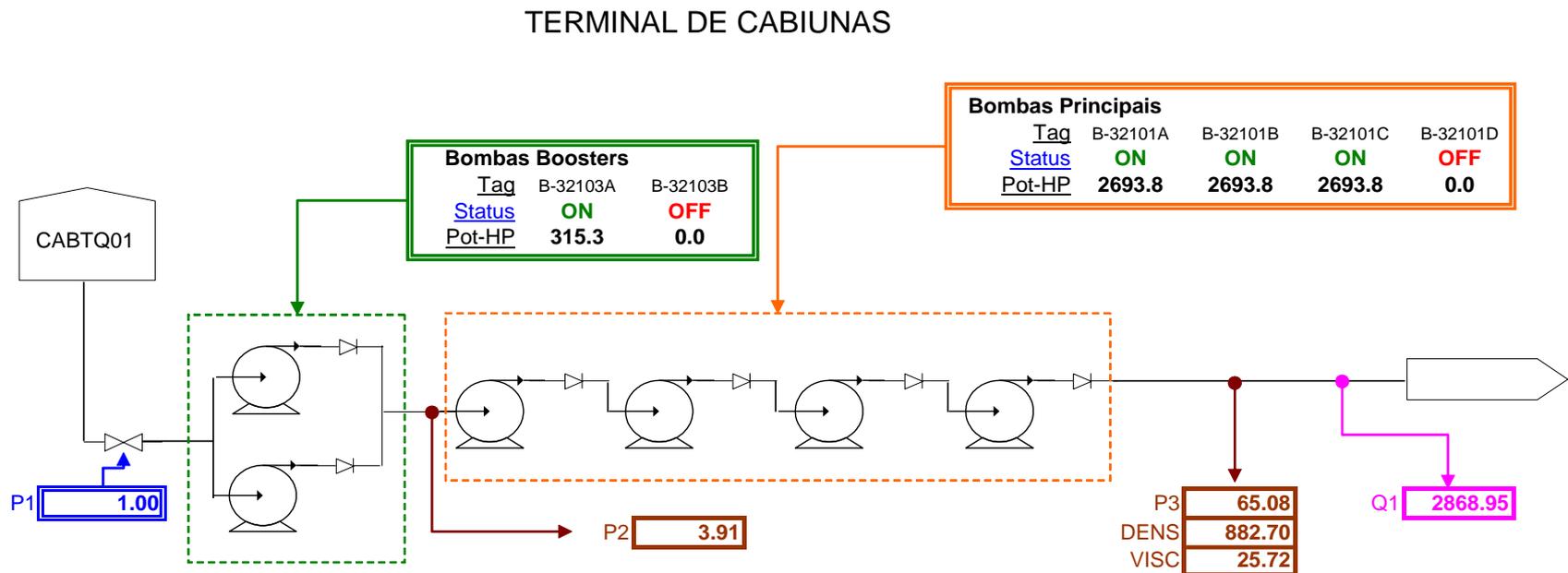


# POTÊNCIA ESPECÍFICA

- Potência de bombeamento em função do arranjo
- Potência de bombeamento em função do produto
- Potência específica ou energia para transporte por  $m^3$
- Custo específico
- Custo total

# POTÊNCIA ESPECÍFICA

- Calcule o custo de movimentação de **1.944.000m<sup>3</sup>** de petróleo pelo OSDUC I, assumindo R\$0,24 o kW.h



# POTÊNCIA ESPECÍFICA

- Calcule o custo de movimentação de **1.944.000m<sup>3</sup>** de petróleo pelo OSDUC I, assumindo R\$0,24 o kW.h (Albacora e Marlim)

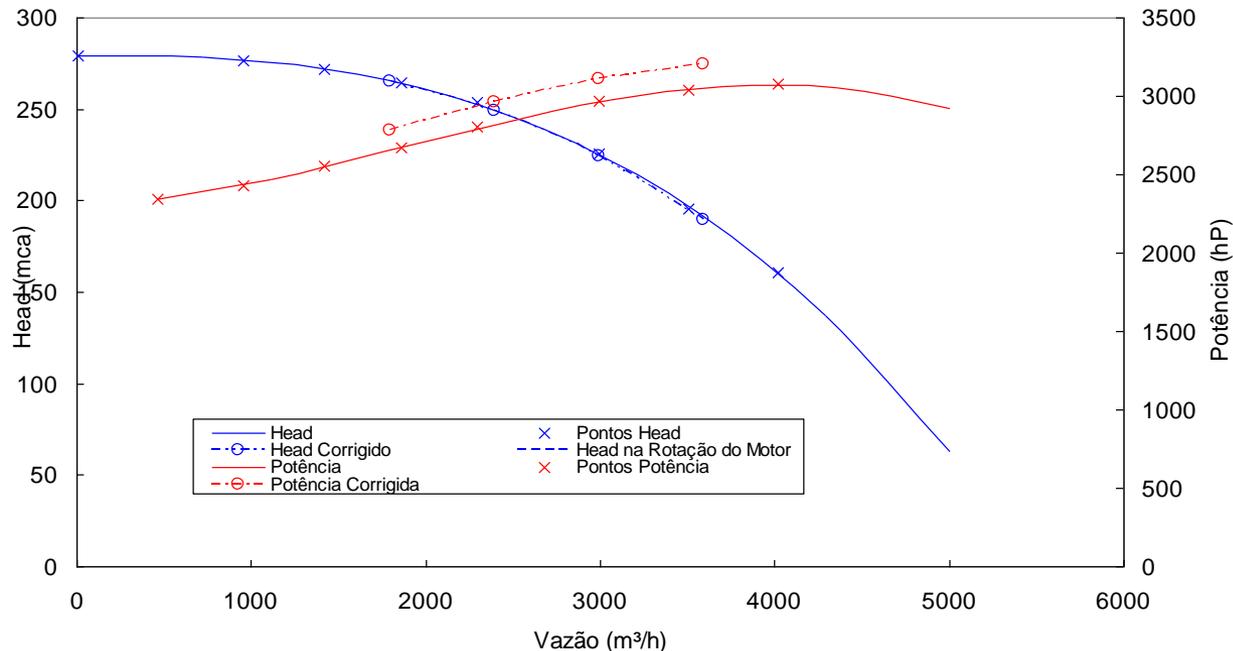
## CALCPROV3\_0 OSDUC32\_ALUNO.xls

	Pot(HP)	Pot(kW)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Volume (h)	Tempo (h)	Consumo (kWh)	Custo (R\$/kWh)	Custo	R\$/m <sup>3</sup>
Albacora	8239	6143.822	2868	1944000	677.8243	4164431.852	0.24	R\$ 999,463.64	R\$ 0.51
Marlim	9855	7348.874	2202	1944000	882.8338	6487833.826	0.24	R\$ 1,557,080.12	R\$ 0.80

# POTÊNCIA ESPECÍFICA

## Observações:

- A mudança do produto interfere:
  - No coeficiente de atrito  $f=f(Re, e/D)$  onde  $Re= \rho vD/\mu$
  - e conseqüentemente na vazão
  - A mudança da vazão altera o ponto de operação da bomba e o rendimento

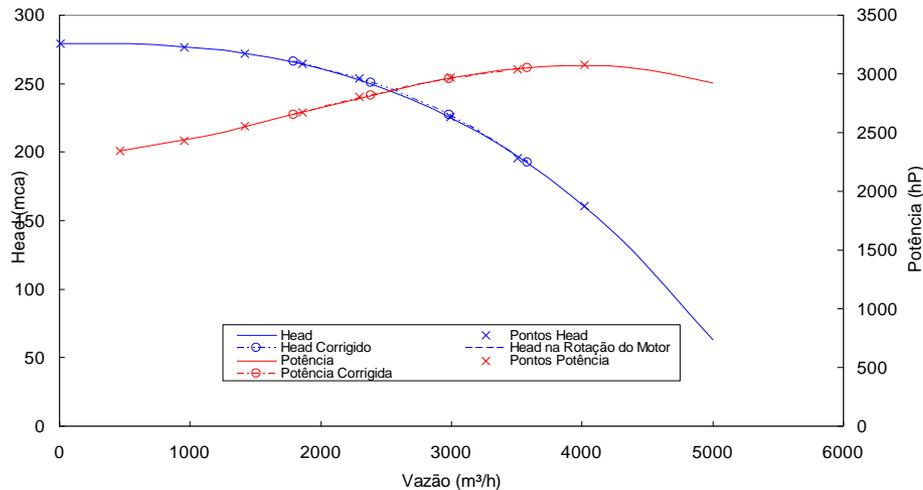


# POTÊNCIA ESPECÍFICA

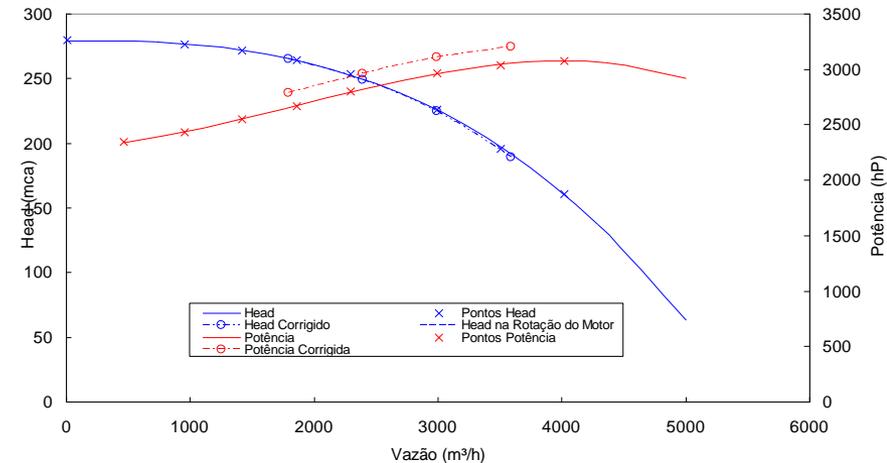
## Observações

A viscosidade altera o desempenho da bomba:  
*Effects of Liquid Viscosity on Rotodynamic (Centrifugal and Vertical) Pump Performance ANSI/HI 9.6.7-2010*

### Árabe leve

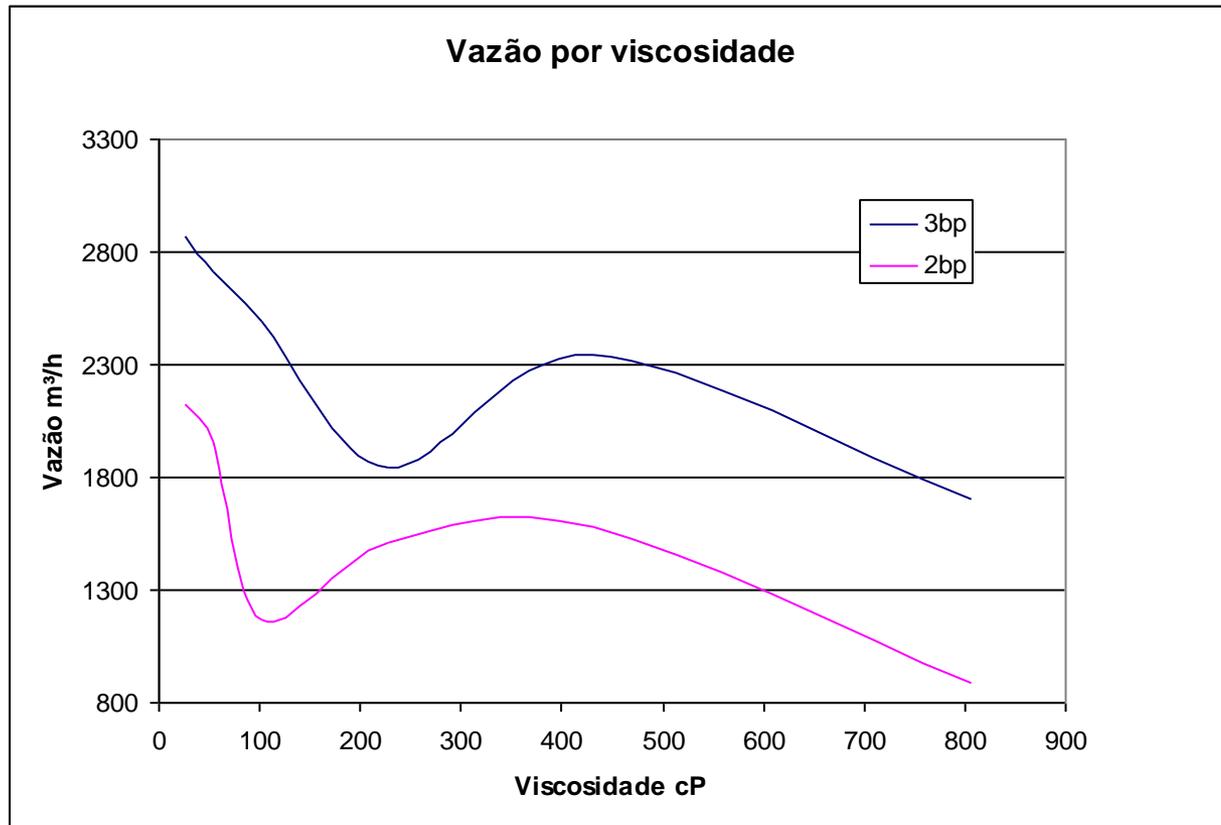


### Cabiúnas



# VARIAÇÃO DA VAZÃO EM FUNÇÃO DA VISCOSIDADE

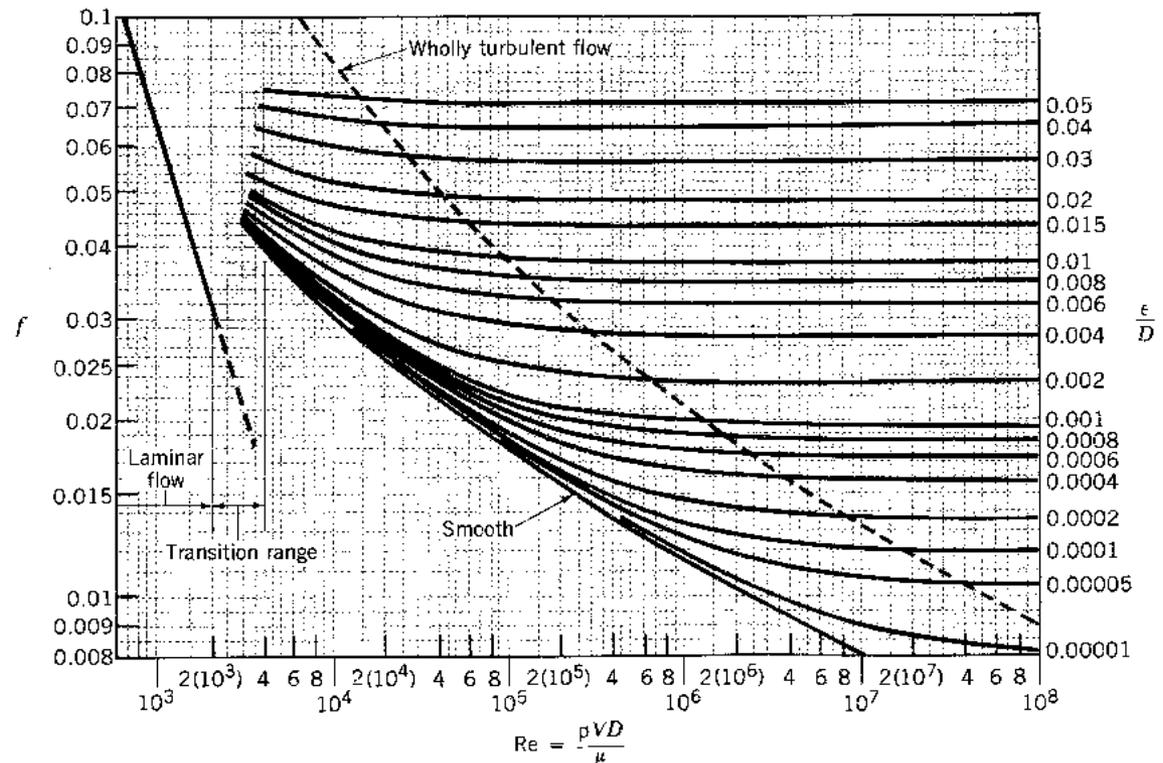
OSDUC I



Observar a proporção ideal na  
realização de misturas

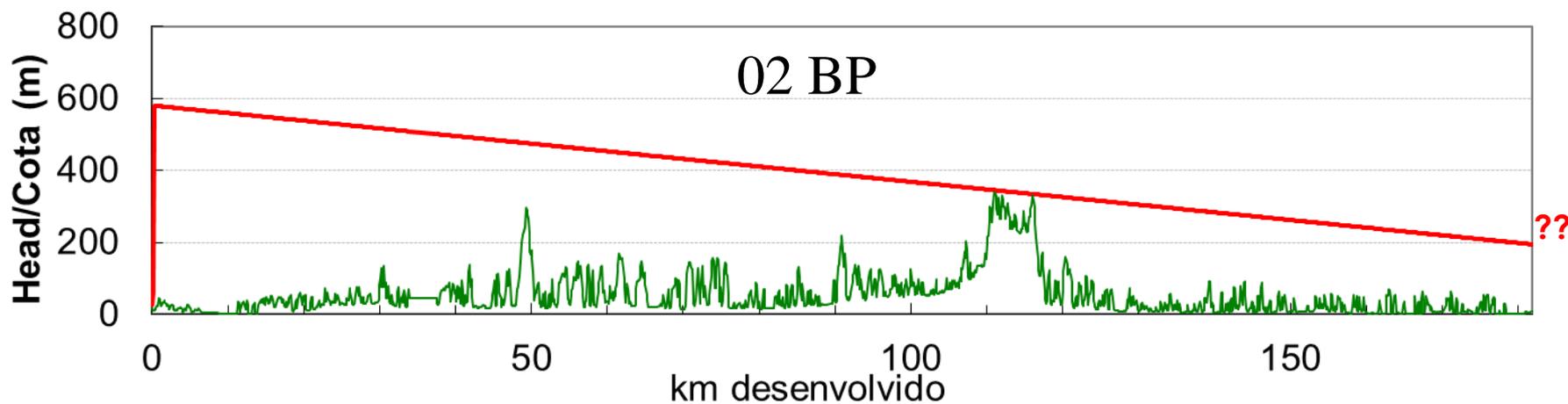
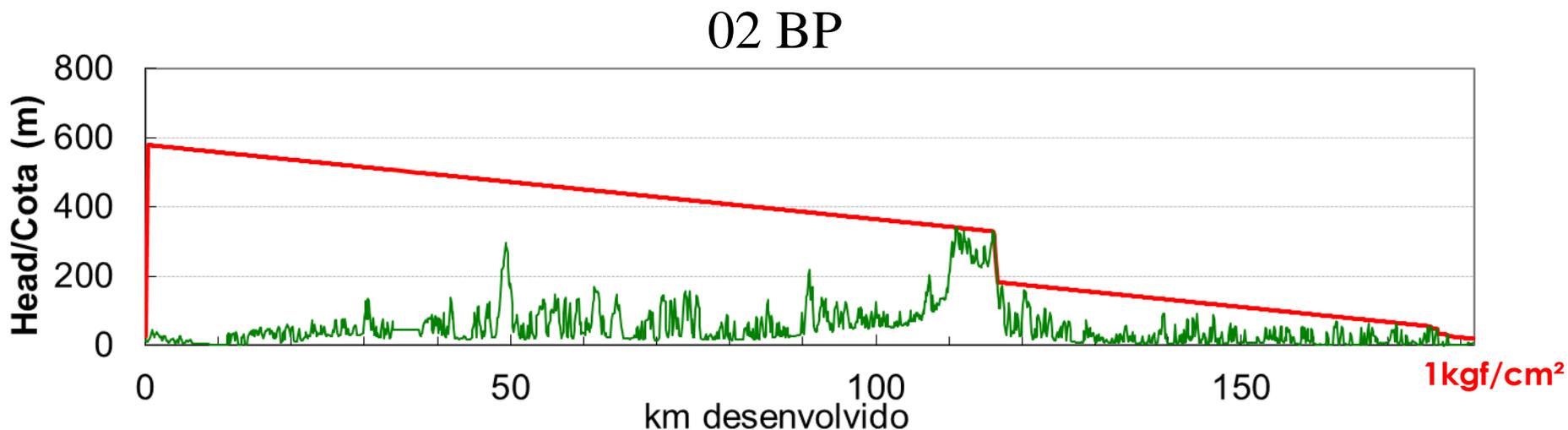
# VARIAÇÃO DA VAZÃO EM FUNÇÃO DA VISCOSIDADE

- Normalmente os dutos são projetados para operar em regime turbulento
- Com o aumento da viscosidade o Re diminui
- Ao passar do regime turbulento para laminar o coeficiente de atrito sofre uma redução



# COLUNA ABERTA E COLUNA FECHADA

- O fenômeno de vaporização da coluna de líquido também conhecido como quebra de coluna ocorre sempre quando a pressão no local é menor que pressão de vapor do líquido.



# OPERAÇÃO COM COLUNA FECHADA

- **Conceito de operação com coluna fechada**

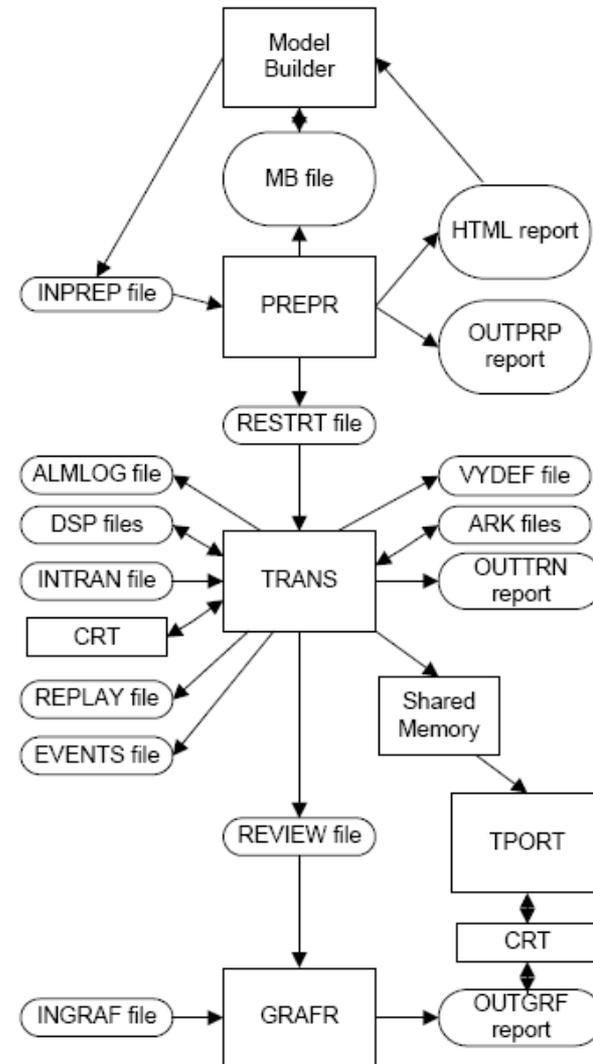
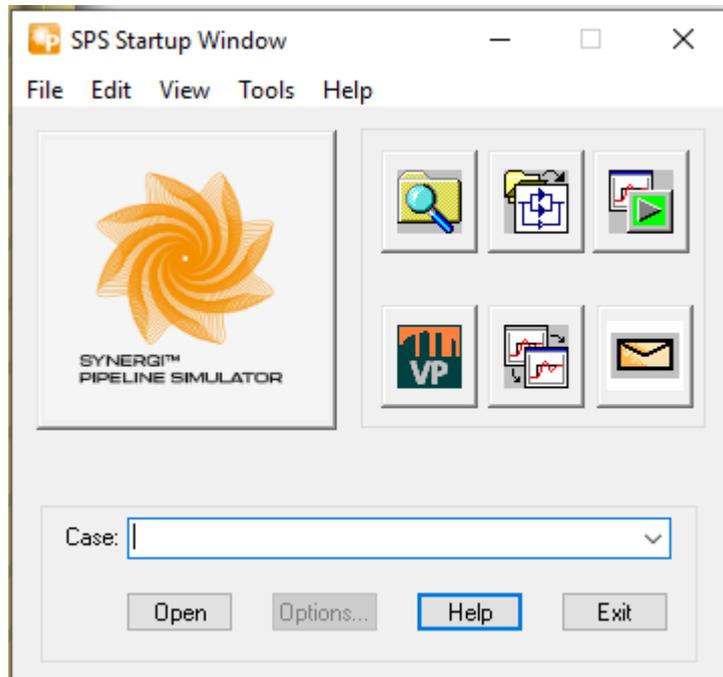
Para os arranjos e produtos listados, identificar a pressão de recebimento para fechar coluna com 1,0 kgf/cm<sup>2</sup> no ponto mais alto e calcular a potência específica.

Arranjo	Produto	Condição	Pressão Receb (kgf/cm <sup>2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Potência BA+BP (hp)	Pot.Especifica (hp/m <sup>3</sup> /h)
3BP	Albacora	Coluna Aberta	1.0	2869	8239	2.872
3BP	Albacora	Coluna Fechada				
2BP	Albacora	Coluna Aberta	1.0	2121	5227	2.464
2BP	Albacora	Coluna Fechada				
3BP	Marlim	Coluna Aberta	1.0	2202	9855	4.475
3BP	Marlim	Coluna Fechada				

**Qual a conclusão?**

# SPS - SYNERGI PIPELINE SIMULATOR

- O SPS é um conjunto de programas e arquivos



# SPS: ARQUIVOS *INPREP*

## Exemplo SPS 1

/\*TITULO  
Duto Horizontal

/\*FLUIDO  
=LIQUID

/\*UNIDADES  
=METRIC

/\* Definições de unidades fora do Systems S.I.  
USEUNITS DIAMETER IN /\* External diameter given in inches  
USEUNITS WALL IN /\* Wall thickness in inches  
USEUNITS ROUGHNESS IN /\* Pipe roughness in inches

...  
USEUNITS VALVE.COEFF GAL/MIN-PSI.5 /\* Valve flow coefficient

/\*ESPECIFICACOES GLOBAIS  
=ISOTHERMAL 20  
STATE SCL  
+FLUID OLEO  
+DENSITY 1.033 20. 880.  
+VISC 25.7

SET.LIMIT  
+ T \* LEN 0.0160934 0.160934 180.4672 321.869 16.0934 KM

PIPEPARMS  
/\* +KNOT 2  
+ FRICTION COLE 0.0018  
CUSTODY PRES = 1.033, TEMP = 20

/\*EQUIPAMENTOS E DUTOS  
=EQUIPMENT

/\*FORNECIMENTO DO LIQUIDO  
E FORNECE NODE1 TAKE 65. 0. 26.

/\*DUTO  
T PIPE000A NODE1 NODE2 182 32 0.562  
+ ELEVATION 0. 0.  
+ MAOP 100.

/\*RETIRADA  
E RECEBE NODE2 SALE 8. 0. 26.

# SPS: ARQUIVOS *INTRAN*

BEGIN 0,

+ BEGIN.TIME = 0

INTERACTIVE MSWIN

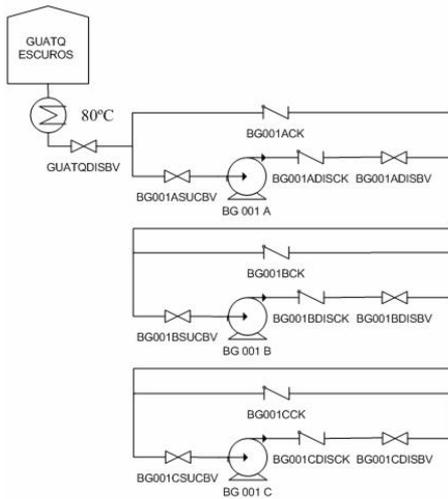
MACRO (INIT, ppressao)

REVIEW SIZE 160000000

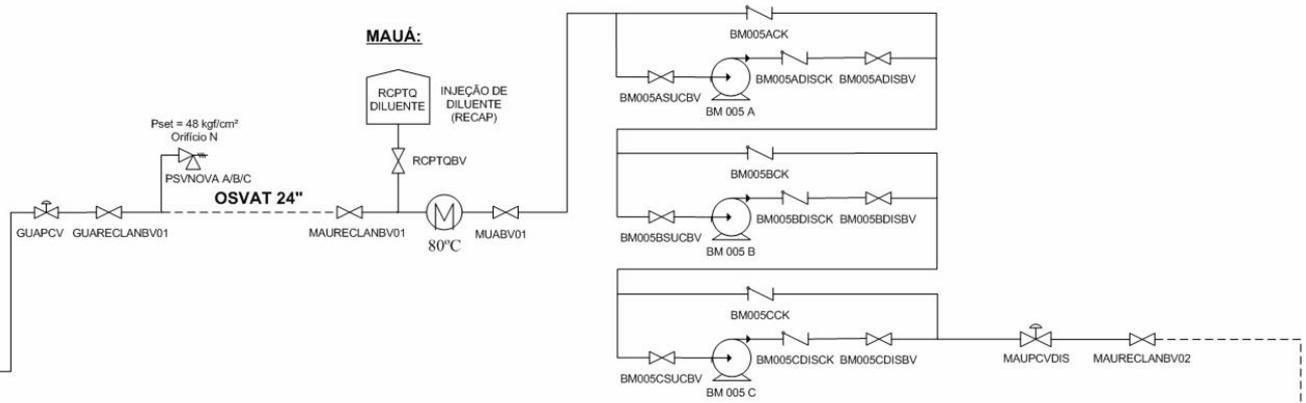
TRENDLIST \*

# SPS: MODELANDO O SISTEMA DE DUTOS

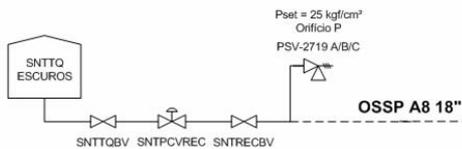
## GUARAREMA:



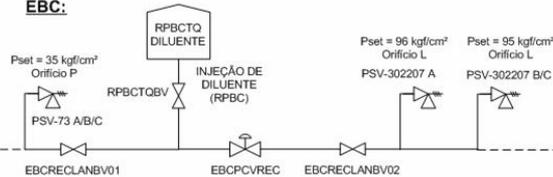
## MAUÁ:



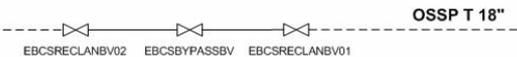
## SANTOS:



## EBC:



## EBCS:



# SPS: OPÇÕES DE MODELAGEM

- **Opções de modelagem:**

- GAS: especifica se o escoamento é de gás
- LIQUID: especifica se é líquido
- CUSTODY: define as condições de pressão e temperatura de referência
- PIPEPAMS: define a dimensão dos volumes de controle e a correlação de fator de atrito
- SET.LIMITS: define valores limites para diversos parâmetros dos equipamentos
- ENGLISH: unidades no sistema inglês
- METRIC: unidades no sistema métrico
- USEUNITS: utiliza uma outra opção de unidade pré-definida para uma propriedade, ou uma unidade definida através da opção DEFUNITS.
- As unidades default e as unidades pré-definidas devem ser consultadas no manual.

# SPS: OPÇÕES DE MODELAGEM

- ISOTHERMAL
- THERMAL
- TRANSTERMAL
- Equação de Estado: **SCLPROP**

# SPS: MODELAGEM DE EQUIPAMENTOS

- As ligações entre os equipamentos são feitas através das conexões entre eles, chamadas de NÓS

## Exemplo SPS 2



```
/*FORNECIMENTO DO LIQUIDO  
E FORNECE NODE1 TAKE 1. 0. 26.
```

```
P BOMBA1 NODE1 NODE2 1750. 2000.  
- 1750. 1700. 104. 4600  
+ DISCHARGE CHECK 0.2 3000.
```

```
/*DUTO  
T PIPE000A NODE2 NODE3 12 812.8 8.07  
+ ELEVATION 13. 13.  
+ MAOP 20.
```

```
B+ BLOCK NODE3 NODE4 OPEN2 CLSE2 0. 20000 0.166
```

```
/*RETIRADA  
E RECEBE NODE4 SALE 1. 0 26.
```

# SPS: MODELAGEM DE EQUIPAMENTOS

- Cada equipamento tem um letra correspondente que inicia a sintaxe deste equipamento, isto é:
  - T: duto de transporte
  - P: bomba
  - V: válvula de controle
  - B: válvula de bloqueio
  - E: tanque de entrada ou saída de produto
- A próxima informação dentro da instrução é o nome, que deve ser único e os nós de conexão. A partir deste ponto, cada instrução continua com características próprias e devem ser obtidas no manual do SPS.

# SPS: MODELAGEM DO ESCOAMENTO

- Nos relatórios da saída de dados, os valores de vazão poderão ser positivos ou negativos: valores positivos indicam que o fluxo se dá do lado negativo para o positivo do equipamento e valores negativos quando se dá de forma inversa.
- O SPS considera a variação da velocidade de propagação da onda sonora no duto em função da compressibilidade do fluido e das características do duto (módulo de elasticidade e dimensões).
- Apesar do SPS ser um simulador de escoamento de uma fase, é possível tratar algumas situações nas quais a pressão em determinados pontos do duto atinge a pressão de vapor.

# GOLPE DE ARÍETE

## • Transientes de Fechamento de Válvulas

**Duto de 12km de comprimento, horizontal, diâmetro de 32" e espessura de 0,312".**

- Bomba com ponto de operação de 4900m<sup>3</sup>/h para um head de 100m
- Tanque de retirada e recebimento com 1,0kg/cm<sup>2</sup>
- Válvula com tempo de fechamento de 10 segundos
- Condições de referência: T=20C e P=0 kg/cm<sup>2</sup>g
  - Fluido com massa específica: 865kg/m<sup>3</sup> e viscosidade: 10,7 cp
  - Módulo de bulk: 19000 kg/cm<sup>2</sup> (Velocidade de propagação ~ 1450 m/s)

- A equação de golpe de aríete para fechamento instantâneo **Joukowsky Equation** pode ser aplicada quando a condição de fechamento instantâneo é atendida :

$$\Delta P = -\rho a \Delta V \quad t_{close} < \frac{2L}{a}$$

$a$  = velocidade de propagação da onda sonora (m/s)

**Determine a variação de pressão promovida pelo fechamento da válvula de recebimento, considerando fechamento instantâneo**

# GOLPE DE ARÍETE

**SimdutTools** <http://www.simdut.com.br/simduttools/formulas.html>

- Oleodutos → Velocidade do Som

Veloc. Sônica Líquidos

Velocidade de propagação da onda em dutos:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho \cdot \left(1 + K_R \cdot B \cdot \frac{D}{e \cdot Y}\right)}}$$

## Entrada

Duto Enterrado

Massa Específica  $\rho$

865

kg/m3

Módulo de Bulk  $B$

19000

kgf/cm2

Módulo de Young  $Y$

210

GPa

Módulo de Poisson  $\nu$

1

Diâmetro Ext.  $D$

32

pol

Espessura  $e$

0.312

pol

## Saída

Velocidade da Onda

1442.3012376

m/s



Calcular

# GOLPE DE ARÍETE

**SimdutTools** <http://www.simdut.com.br/simduttools/formulas.html>

- **Oleodutos → Golpe de Aríete (Joukowski)**

## Equação Fundamental de Joukowski

Cálculo do golpe de ariete para transientes com condição de fechamento instantâneo:

Pressão Máxima do Transiente

$$p_{\max} = p_{\text{steady}} + \rho \cdot c \cdot \frac{\Delta Q}{A}$$

$$\text{Tempo de travessia da onda: } \Delta t_J = \frac{2 \cdot L}{c}$$

Os resultados desta equação somente podem ser aplicados para intervalos  $t \leq \Delta t_J$

Para intervalos de  $t > \Delta t_J$  obter resultados com simuladores transientes de oleodutos.

### Entrada

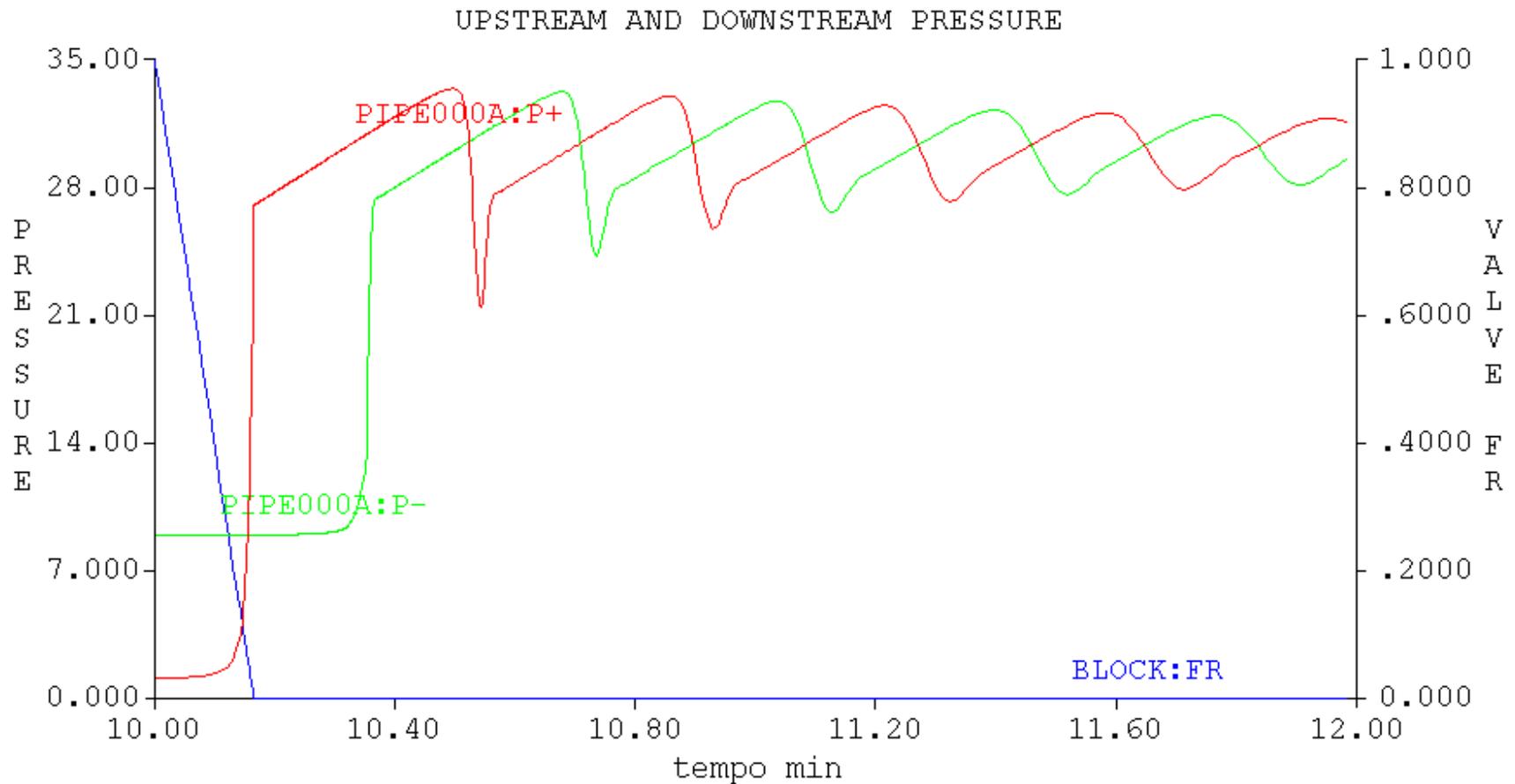
$p_{\text{steady}}$	0	kgf/cm2	$Q_{\text{steady}}$	4900	m3/h	$Q_{\text{close}}$	0	m3/h
Comprimento $L$	12	km	Diâmetro Ext. $D$	32	pol	M. Específica $\rho$	865	kg/m3
Veloc. do Som $c$	1450	m/s	Espessura $e$	0.312	pol			

### Saída

$p_{\max}$	34.8983221	kgf/cm2	$\Delta t_J$	16.5517241	seg	<b>⚡ Calcular</b>
------------	------------	---------	--------------	------------	-----	-------------------

# GOLPE DE ARÍETE

## Transiente de Fechamento de Válvula no Recebimento



- 
- Obrigado!
  - [cveloso@simdut.com.br](mailto:cveloso@simdut.com.br)
  - [www.simdut.com.br](http://www.simdut.com.br)