

# Otimização econômica do diâmetro interno de tubulações em problemas de escoamento bifásico líquido / vapor

Rodrigo Galvão D'Império Teixeira

Petrobras, Ilha do Fundão, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
e-mail: rodrigogdt@petrobras.com.br

**Resumo:** A seleção dos diâmetros de tubulações é uma das mais freqüentes funções desempenhadas por engenheiros de processo no projeto de novos empreendimentos. Os métodos mais comumente empregados nesta situação envolvem o cálculo para simples enquadramento de restrições operacionais, como velocidades de escoamento máximas ou mínimas, sem qualquer consideração de custo econômico. Neste trabalho, a abordagem clássica do método de determinação do diâmetro mais econômico em sistemas de bombeamento é adaptada para o escoamento bifásico líquido / vapor na tubulação de diâmetro indeterminado. O cálculo das perdas de carga na tubulação são realizados pela integração dos gradientes de pressão e de entalpia na tubulação, utilizando-se aí a correlação de Beggs e Brill para escoamento bifásico. A função objetivo, que consiste no cômputo do Custo Total para dado diâmetro, é minimizada por meio de função integrante do MATLAB, de modo a atender restrições operacionais pertinentes. Analisa-se a influência de diversos parâmetros do projeto no resultado final obtido.

## 1 INTRODUÇÃO

O projeto de unidades de processamento requer diversos cálculos posteriores aos balanços de massa e energia, dentre os quais se destaca pela freqüência o dimensionamento de diâmetros de tubulações.

Estes diâmetros são freqüentemente determinados de acordo com valores tabelados de grandezas como velocidade ou perda de carga, obtidos, por sua vez, a partir de estudos econômicos ou de outra natureza (por exemplo, um limite máximo de velocidade pode ser estabelecido para prevenir problemas de erosão na tubulação).

Uma alternativa mais sofisticada é a seleção do diâmetro pelo Método do Custo Anual Mínimo, a qual, de acordo com Nolte [7], pode resultar em reduções da ordem de 4% a 18% nos custos de operação ou de instalação da unidade.

A bibliografia que trata do projeto de tubulações por esta abordagem desenvolve equações interessantes para situações envolvendo escoamentos monofásicos líquidos ou gasosos [7, 8], e apenas aproveita parte destes resultados como aproximações para problemas em que o escoamento é bifásico (líquido / vapor), privilegiando nestes casos critérios de velocidades mínimas e máximas [7], em detrimento de uma abordagem econômica mais detalhada.

O escoamento simultâneo de líquido e vapor por tubulações ocorre em diversas situações na produção de petróleo e em refinarias, em plantas petroquímicas e também em reatores nucleares, daí a importância do desenvolvimento de métodos de projeto adequados para esta situação.

## 2 JUSTIFICATIVA

Para uma vazão fixa de determinada corrente de processo, maiores diâmetros de tubulação resultam em maior custo fixo e menor consumo de energia (custo de operação) pelo equipamento motriz (bomba ou compressor), como ilustra a Figura 1. Portanto, existe um valor ótimo de diâmetro (*diâmetro econômico*), para o qual o custo total (a soma dos custos fixos e de operação) assume o menor valor possível.

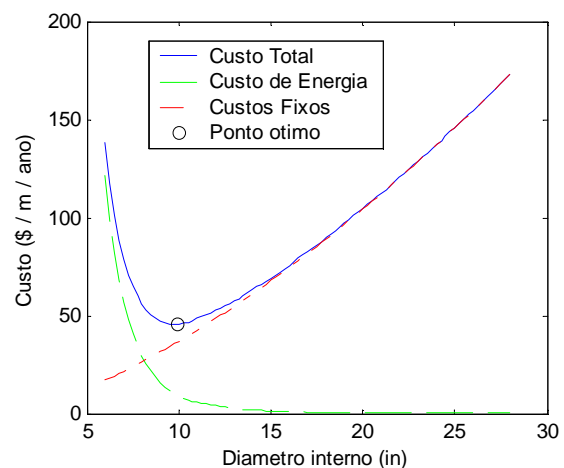


Figura 1: Variação dos custos fixos, de energia e total com o diâmetro interno da tubulação.

As tubulações em uma planta de processo respondem por uma fatia significativa (até 25%) do investimento fixo do empreendimento [8]. Por outro lado, o emprego de diâmetros muito reduzidos inviabiliza o projeto de unidades mais eficientes do ponto de vista energético. Assim, fica clara a importância da seleção do diâmetro econômico.

### 3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

#### 3.1 Método do Custo Anual Mínimo

Seja um sistema de bombeamento cuja função é fornecer a carga de uma torre de fracionamento à pressão  $P_2$ , succionando-a de um reservatório à pressão  $P_1$ . Tome-se como exemplo a tarefa de dimensionar o diâmetro de um dos trechos de tubulação que ligam a descarga da bomba ao bocal de alimentação da torre.

Combinando-se princípios de Mecânica dos Fluidos com considerações de cunho econômico, é possível obter uma expressão matemática que fornece um Custo Total ( $C_T$ ) em função do diâmetro interno da tubulação ( $d$ ). Aplicando-se técnicas apropriadas de minimização, calcula-se então o diâmetro econômico.

O Custo Total é a soma de duas parcelas. A primeira é o Custo Fixo  $C_F$ , o qual corresponde ao custo de aquisição, instalação e manutenção da tubulação de diâmetro interno  $d$  e seus acessórios (tês, curvas, etc). A segunda parcela é o Custo de Bombeamento  $C_B$ , o qual consiste no custo da energia absorvida pela bomba para escoar a corrente de processo por essa tubulação de diâmetro interno  $d$ .

$$C_T = C_F + C_B \quad (1)$$

**Custo Fixo:** O custo fixo da tubulação pode ser estimado por:

$$C_F = (1+F) \cdot X \cdot \left( \frac{d}{0,0254} \right)^n \cdot K_F \quad (2)$$

Onde  $F$  é a razão entre o custo dos acessórios e de instalação em relação ao custo de aquisição da tubulação,  $X$  é o custo de aquisição de um metro de tubulação de diâmetro interno 0,0254 m (em \$ / m),  $n$  é um parâmetro que varia com o material da tubulação (aproximadamente 1,5 para tubulações de aço) e  $K_F$  é a razão entre custos fixos anuais (incluindo manutenção e afins) e o custo inicial da tubulação já instalada [8].

Equacionado assim,  $C_F$  é dado em (\$/(m·ano)).

**Custo de Bombeamento:** Seja  $\Delta P_{tub}$  a queda de pressão na tubulação cujo diâmetro econômico deseja-se determinar, correspondente a uma certa vazão bombeada. De toda a energia que a bomba fornece ao escoamento por unidade de tempo, a parcela necessária para que a corrente atravessasse essa tubulação é dada pela seguinte expressão de *potência útil*:

$$W_B^U = \Delta P_{tub} \cdot Q_B \quad (3)$$

Então, a correspondente *potência absorvida* pela bomba para garantir essa etapa do escoamento é dada por:

$$W_B^{abs} = \frac{\Delta P_{tub} \cdot Q_B}{\eta} \quad (4)$$

Nas equações (3) e (4),  $Q_B$  é a vazão volumétrica bombeada e  $\eta$  é a eficiência da bomba.

Sendo  $K$  o custo da energia elétrica (\$ / kWh) e  $H$  as horas de operação por ano à vazão  $Q_B$  (h / ano), o custo anual de energia  $C_{energia}$  (\$ / ano) correspondente é dado por:

$$C_{energia} = \frac{\Delta P_{tub} \cdot Q_B \cdot H \cdot K}{1000 \cdot \eta} \quad (5)$$

A equação (5) pressupõe que  $\Delta P_{tub}$  e  $Q_B$  estejam expressos no Sistema Internacional de Unidades.

Logo, o custo anual de bombeamento por unidade de comprimento reto da tubulação (de comprimento reto  $L$ ) de uma vazão  $Q_B$  vale:

$$C_{QB} = \frac{\Delta P_{tub} \cdot Q_B \cdot H \cdot K}{1000 \cdot \eta \cdot L} \quad (6)$$

A vazão bombeada  $Q_B$  não se mantém constante ao longo do ano, assumindo diferentes valores por diversos períodos de tempo ao longo do mesmo. Esta flutuação pode ser descrita pelos correspondentes  $m$  pares ( $H_j, Q_{Bj}$ ), os quais podem ser levantados a partir de unidades existentes ou estimados em projetos novos, a partir de plantas de processo similares.

O Custo de Bombeamento pode, então, ser expresso como o somatório de suas parcelas correspondentes às  $m$  diferentes vazões:

$$C_B = \sum_{j=1}^m C_{QB,j} \quad (7)$$

É importante enfatizar que na formulação apresentada, a vazão volumétrica bombeada  $Q_B$  não necessariamente corresponde à vazão mássica que escoar pela tubulação. A existência de um divisor de fluxo antes da tubulação é um exemplo de situação em que as vazões envolvidas seriam diferentes.

**Custo total:** A expressão para o custo total em função do diâmetro interno da tubulação fica:

$$C_T = (1+F) \cdot X \cdot \left( \frac{d}{0,0254} \right)^n \cdot K_F + \sum_{j=1}^m C_{QB,j} \quad (8)$$

#### 3.2 Soluções analíticas

Há situações, como o escoamento turbulento de um líquido pela tubulação, em que é possível determinar o diâmetro econômico por procedimentos analíticos. Na ausência de divisores de fluxo e de permutadores de calor entre a descarga da bomba e a tubulação (e de

qualquer operação unitária que modifique as propriedades físicas da corrente líquida), a queda de pressão na mesma pode ser determinada por:

$$\Delta P_{tub} = 0,1248 \cdot \frac{\rho_B^{0,84} \cdot L \cdot (1 + \varepsilon) \cdot Q_B^{1,84}}{d^{4,84} \cdot \mu_B^{-0,16}} + \rho_B \cdot g \cdot L \cdot \sin(\theta) \quad (9)$$

Onde  $\rho_B$  é a massa específica da corrente líquida bombeada,  $\mu_B$  é sua viscosidade,  $\varepsilon$  é a razão entre o comprimento equivalente dos acidentes da tubulação e seu comprimento reto e  $\theta$  é a inclinação da tubulação em relação à horizontal. Para calcular o fator de atrito de Moody, foi suposta uma tubulação relativamente nova de aço, para a qual vale a relação:

$$f = \frac{0,16}{(\text{Re})^{0,16}} \quad (10)$$

A equação (9) pode ser substituída em (8), resultando em uma expressão para o custo total onde a única variável é o diâmetro interno  $d$ , em uma situação hipotética de vazão constante ao longo do ano. Igualando-se a derivada desta equação em relação a  $d$  a zero, e resolvendo-se para  $d$ , determina-se a expressão analítica do diâmetro econômico:

$$d_{\text{econômico}} = \left[ \frac{6,039 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0254^n \cdot Q_B^{2,84} \cdot \rho_B^{0,84} \cdot \mu_B^{0,16} \cdot H \cdot K \cdot (1 + \varepsilon)}{\eta \cdot (1 + F) \cdot X \cdot K_F \cdot n} \right]^{\frac{1}{4,84+n}} \quad (11)$$

### 3.3 Escoamento bifásico

Suponha-se agora que, no projeto exemplificado, a corrente de processo bombeada atravessasse um permutador de calor antes de chegar à tubulação de diâmetro indeterminado, vaporizando parcialmente no equipamento. Haveria um escoamento bifásico líquido / vapor na tubulação, situação para a qual não existe uma expressão para  $\Delta P_{tub}$ .

Existem várias correlações disponíveis para o cálculo do gradiente de pressão ( $dP / dx$ ) em escoamentos bifásicos em tubulações. Neste trabalho, optou-se por empregar nos cálculos aquela desenvolvida por Beggs e Brill, por ser uma das poucas desenvolvidas para todos as possíveis orientações da tubulação em relação à horizontal.

O cálculo de  $\Delta P_{tub}$  então é feito pela integração do gradiente de pressão ao longo de toda a tubulação. Na indisponibilidade de estimativas adequadas do perfil de temperatura ao longo do escoamento, torna-se necessária a integração do balanço de energia (gradiente de entalpia,  $dH / dx$ ) simultaneamente ao gradiente de pressão, uma vez que o cálculo deste depende de diversas propriedades físicas das fases líquido e vapor, as quais, por sua vez, variam com a temperatura e a pressão.

A bibliografia ligada ao cálculo de perfis de pressão de

escoamentos bifásicos líquido / vapor em estado estacionário costuma recomendar, para as integrações necessárias, o que chama de “algoritmos de marcha” (*marching algorithm*) [2, 3]. Segundo estas fontes, é como funcionam os *softwares* comerciais que fazem estes cálculos. Por este algoritmo, divide-se a tubulação em diversos subintervalos de comprimento. Então, partindo-se de uma extremidade de pressão e temperatura conhecidas, calculam-se sucessivamente as pressões e temperaturas ao fim de cada subintervalo, até chegar ao último, quando estarão determinadas então a pressão e a temperatura ao final da tubulação. Em cada subintervalo, os cálculos de equilíbrio de fases e de gradientes de pressão e entalpia devem ser realizados nas suas condições médias de pressão e temperatura, exigindo-se aqui um método iterativo de solução.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Função Objetivo e Restrições

Todos os cálculos apresentados neste trabalho foram realizados no MATLAB, visando o aproveitamento de seus algoritmos de minimização e integração, e suas funcionalidades de programação e visualização de resultados.

As minimizações da função objetivo foram realizadas com a função *fmincon* do MATLAB, a qual busca o mínimo de dada função programada pelo usuário, sujeito a possíveis limites máximo e mínimo da variável independente e de modo a atender restrições lineares e / ou não-lineares de igualdade e / ou desigualdade, quando especificadas.

A função objetivo do problema em questão corresponde à equação (8). Onde não houver indicação diferente, os cálculos foram realizados considerando-se, para os parâmetros econômicos, os valores apresentados por Peters, Timmerhaus e West [8]:  $F = 1,4$ ;  $X = \$2,43 / m$ ;  $K_F = 20\%$ ;  $K = \$0,05 / kWh$  e  $n = 1,5$ . Para a eficiência da bomba, considerou-se o valor de 70%.

As restrições de projeto adotadas traduzem-se em um limite mínimo de 4 polegadas para o diâmetro interno da tubulação, e máximo de 20 ft/s para a velocidade total da mistura bifásica (a ser observado em todas as vazões bombeadas) e de 16 polegadas para o diâmetro .

Assim, para um dado conjunto de parâmetros do projeto, o problema de otimização em questão fica definido como:

$$\min C_T(d)$$

$$\text{sujeito a: } 4 \leq d \leq 16 \text{ in}$$

$$vm_i(d) \leq 20 \text{ ft/s, } i = 1, \dots, m$$

Em todos os cálculos realizados, foi verificado o valor do argumento de saída *EXITFLAG* de *fmincon*, a fim

de garantir que o motivo de terminação do algoritmo de minimização foi mesmo a convergência em um ponto ótimo.

#### 4.2 Perda de pressão na tubulação

O cálculo pelo “algoritmo de marcha” é ineficiente do ponto de vista computacional. Neste trabalho, optou-se por representar o problema – gradientes de pressão e entalpia e as restrições termodinâmicas da mistura bifásica que escoam - como um sistema de equações algébrico-diferenciais semi-implícito. As  $p$  equações diferenciais  $f_i$  e  $q$  restrições algébricas  $g_i$  de tal sistema podem ser combinadas sob a forma:

$$\underline{M} \cdot \underline{X}' = \underline{F}(\underline{X}) \quad (12)$$

Onde:

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} \underline{I}_p & \underline{0}_q \\ \underline{0}_q & \underline{0}_p \end{bmatrix} \quad (13)$$

E:

$$\underline{F}^T = [f_{1,\dots,p} \quad g_{1,\dots,q}] \quad (14)$$

A rotina *ODE15S* do MATLAB foi utilizada neste trabalho para resolver o sistema (12), bastando informar a matriz  $\underline{M}$  como a *mass matrix* mencionada na ajuda disponibilizada pelo programa (comando *help ode15s*).  $\underline{F}(\underline{X})$  foi programada separadamente, e fornecida a *ODE15S* como seu argumento *ODEFUN*.

Onde não forem citados valores diferentes, todos os cálculos foram realizados tomando-se como exemplo um escoamento de nafta (75 °API), alimentada à pressão de 8,0 kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura de 100° C em uma tubulação horizontal de aço carbono (condutividade térmica de 60,5 W / m / K) de 30 metros de comprimento. Foi suposta uma temperatura do ar externo à tubulação de 27° C. Nas condições de bombeamento, a massa específica da corrente vale 680 kg/m<sup>3</sup>.

Foi suposto que a vazão mássica de nafta permanece em 115000 kg/h em 57% das 8760 horas do ano, oscilando em 10% para cima em 13% do tempo e 15% para baixo nos 30% restantes.

Os cálculos relacionados ao equilíbrio de fases foram realizados de acordo com o método descrito por Edmister [4]. A determinação das propriedades físicas necessárias das fases líquido e vapor a diferentes pressões e temperaturas foi realizada a partir de correlações apropriadas para frações de petróleo, obtidas do *API Technical Data Book* [1].

De acordo com Beggs e Brill [2], a determinação de

coeficientes de transferência de calor por convecção na parte interna da tubulação é extremamente complexa quando se trata de problemas de escoamento bifásico, dadas as diversas possibilidades de *regimes de escoamento* (diferentes formas de distribuição espacial das fases líquida e vapor ao longo do escoamento). Entretanto, na maior parte de tais situações, o escoamento é turbulento, e a transferência de calor por convecção entre a mistura bifásica e a tubulação é favorecida, havendo pouca diferença de temperaturas entre a parede interna da tubulação e os fluidos que escoam. Esta última suposição foi adotada neste trabalho, desconsiderando-se a resistência convectiva correspondente no cálculo do balanço de energia (mais precisamente, na determinação do coeficiente global de transferência de calor).

A determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a parede externa da tubulação e o ar ambiente passa pela determinação do número de Nusselt, a qual, por sua vez, difere entre situações de convecção forçada e convecção livre. Neste trabalho, o mesmo foi estimado pelas relações de Churchill, obtidas de Incropera e DeWitt [5], tanto para simular a ocorrência de ventania (velocidade do ar de 36 km/h), quanto na consideração de atmosfera estável. Onde não for feita citação em contrário, foi considerada a convecção forçada (vento).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ODE15S X “Marching algorithm”

A programação realizada no MATLAB foi estruturada de maneira a permitir ao usuário a escolha do método de integração dos gradientes de pressão e entalpia ao longo da tubulação (rotina *ODE15S* do MATLAB ou “*marching algorithm*” indicado pela bibliografia) a fim de verificar os possíveis impactos desta escolha na resolução do problema.

A economia de tempo observada com o uso da função *ODE15S* é espantosa. Na primeira comparação entre a otimização com um método e outro, foram necessários 44 minutos para a minimização com o “*marching algorithm*”. Com o outro método, bastaram 2 minutos (22 vezes mais rápido).

Trata-se de uma diferença de tempo grande mas já esperada, uma vez que a integração com o “algoritmo de marcha” com dez intervalos de discretização demora 90 segundos, ou 18 vezes mais que o tempo necessário com a *ODE15S* (apenas 5 segundos).

Os resultados de pressões, temperaturas, frações vaporizadas, etc., calculados com ambos os métodos foram exaustivamente comparados, não apresentando qualquer diferença. Logicamente, as otimizações feitas com um método e outro também sempre resultaram na mesma solução. Por esse motivo, escolheu-se o método mais rápido (*ODE15S*) para fazer todos os cálculos que figuram neste trabalho.

Uma das etapas mais importantes no cálculo do gradiente de pressão pela correlação de Beggs e Brill é a determinação do regime de escoamento correspondente à orientação horizontal da tubulação, a que se segue o cálculo do *holdup* de líquido (fração volumétrica de líquido corrigida para levar em conta a diferença de velocidades entre ambas as fases).

Os valores assim calculados de *holdup* caracterizam-se por súbitas descontinuidades que surgem na mudança entre um regime de escoamento e outro, as quais chegam a impedir, em certos casos, a convergência de *ODE15S*, inviabilizando aí a otimização. Este problema foi contornado com a utilização de funções de regularização, suavizando-se assim as curvas de *holdup* nas regiões de mudança de regime de escoamento.

### 5.2 Influência do custo da energia elétrica

A otimização do problema com os valores originais produziu os resultados apresentados no Gráfico 1, onde destacam-se, além das parcelas que somadas dão o Custo Total, as velocidades correspondentes a cada diâmetro interno e o ponto ótimo encontrado. O problema foi resolvido em 186 segundos (3 minutos), resultando em um diâmetro interno de 6,56 polegadas, não havendo restrições ativas.

Foram investigados os efeitos de variações em diversos parâmetros que compõem a função objetivo, começando pelo custo da energia elétrica. Resolveu-se o problema para o dobro e o triplo do valor original, mantidas as demais condições, obtendo-se diâmetros ótimos de 7,00 e 7,42 polegadas, como mostram os resultados ilustrados nos Gráficos 2 e 3.

Conclui-se primeiramente que o custo da energia possui visível influência sobre o diâmetro ótimo, como mostram os diâmetros obtidos, uma vez que modificações deste parâmetro refletem-se proporcionalmente nas curvas de Custo de Bombeamento, como se vê nos Gráficos 1, 2 e 3. Trata-se de um resultado já esperado, mas que precisa ser enfatizado, pois deixa clara a necessidade de obter um valor preciso deste custo ao se utilizar o método do Custo Anual Mínimo na seleção do diâmetro, caso haja interesse em determiná-lo com exatidão. Percebe-se que cada aumento de  $K$  em  $\$0,05 / \text{kWh}$  levou a um aumento de cerca de 0,5 polegada no diâmetro ótimo. O custo da energia elétrica no Brasil hoje é cerca de R\\$ 0,265 / kWh, bem diferente do apresentado por Peters, Timmerhaus e West [8], referente a outra localização geográfica. Fica clara, portanto, a necessidade de adaptar o método proposto à realidade local como pré-requisito para a obtenção de resultados coerentes.

Observa-se, ainda que somente uma variação muito drástica do custo da energia elétrica seria capaz de levar a solução do problema original para a região de restrições ativas. Os resultados obtidos encontram-se sempre em regiões de velocidades menores que 10 ft/s.

De acordo com a equação (11), dobrar ou triplicar o custo da energia elétrica em situação de escoamento incompressível altera o diâmetro econômico por fatores de 1,1157 e 1,1896, respectivamente. No escoamento bifásico aqui investigado, os fatores correspondentes são de 1,0671 e 1,1311, o que permite concluir que, em ambas as situações estudadas, a influência do valor deste parâmetro é semelhante.

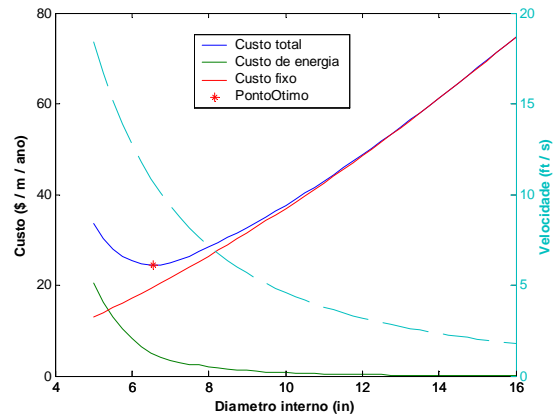


Gráfico 1

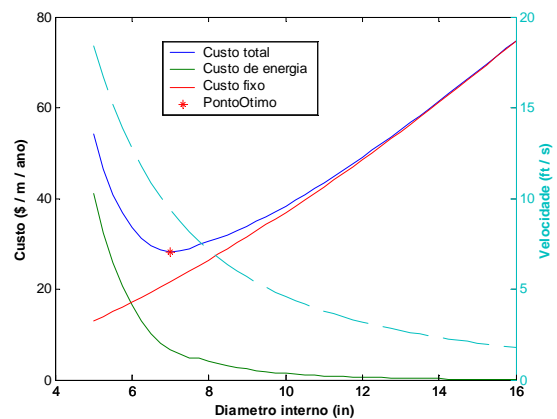


Gráfico 2

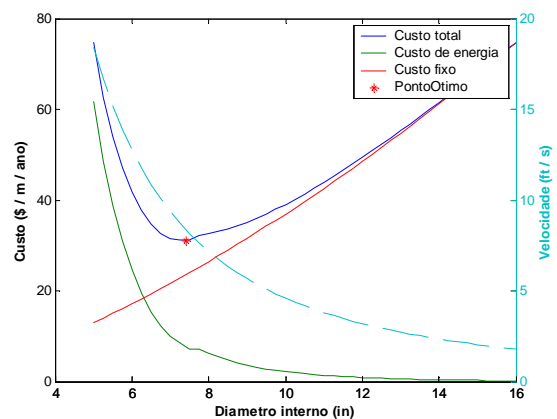


Gráfico 3

### 5.3 Influência da vazão mássica

A vazão de 115000 kg/h de nafta foi duplicada e triplicada, mantendo-se suas flutuações percentuais ao longo do ano. Calculou-se o diâmetro ótimo

correspondente às duas situações. Foram obtidos diâmetros de 8,90 e 10,63 polegadas, como pode-se ver nos Gráficos 4 e 5.

Os resultados mostram que a vazão influencia decisivamente o valor do diâmetro econômico determinado. Isto já era esperado, uma vez que a mesma aparece diretamente na expressão do Custo de Bombeamento, além de ser determinante também para o valor da perda de carga na tubulação.

Os Gráficos 4 e 5 mostram que duplicando-se e triplicando-se a vazão mássica, modifica-se em grandes proporções a curva do Custo de Bombeamento, sem que o ponto de mínimo do Custo Total se aproxime muito da região de restrições ativas. Esta condição se mantém quando se calcula o diâmetro ótimo correspondente aos triplos da vazão e do custo da energia elétrica, como se vê no Gráfico 6 (diâmetro ótimo de 11,56 polegadas).

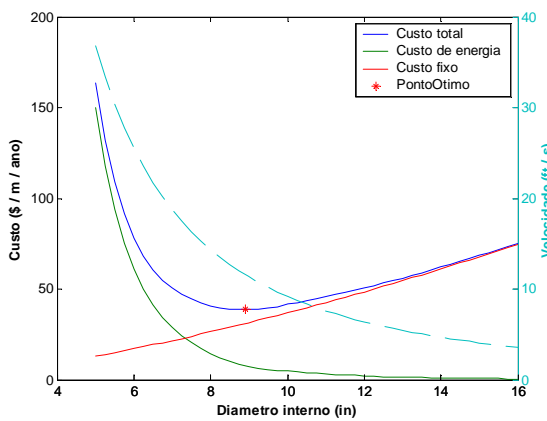


Gráfico 4

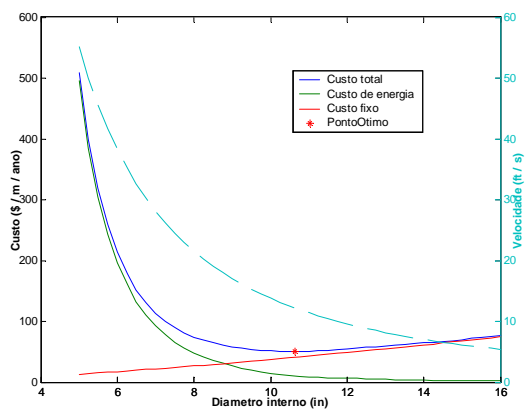


Gráfico 5

#### 5.4 Influência do ângulo de inclinação da tubulação

A correlação de Beggs e Brill para o gradiente de pressão em escoamento bifásico líquido / vapor possui um componente hidrostático dado por  $\rho_s \cdot g \cdot \text{sen}(\theta)$ , sendo  $\rho_s$  uma massa específica representativa da mistura bifásica. Quanto maior o ângulo de inclinação  $\theta$  em relação à horizontal, maior a contribuição do

termo hidrostático, o qual chega, em dado ponto, a tornar insignificante o valor da perda de carga por atrito. Espera-se, portanto, que este fator modifique bastante as curvas de custos de bombeamento e conseqüentemente, o valor do diâmetro ótimo.

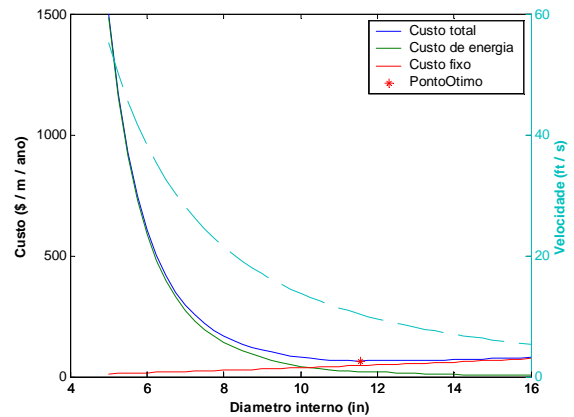


Gráfico 6

Para verificar o comportamento do diâmetro econômico frente a variações de  $\theta$ , foram feitas otimizações para valores de  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , obtendo-se, respectivamente, 6,15; 5,92; 7,86; 7,855 polegadas como diâmetros ótimos, como mostram os Gráficos 7 a 10.

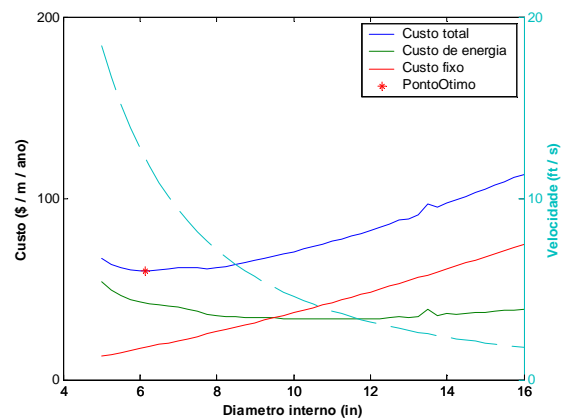


Gráfico 7

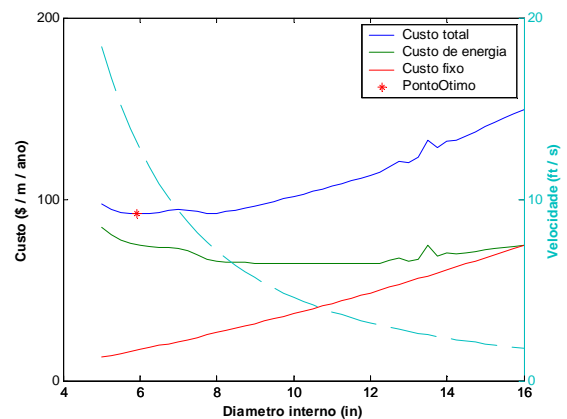
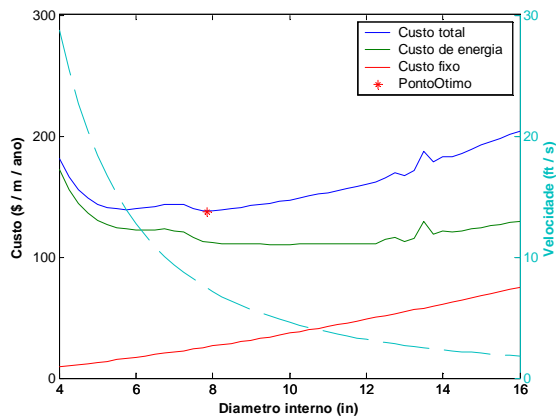


Gráfico 8

A primeira constatação a ser feita refere-se ao perfil da curva dos Custos de Bombeamento, que assume um

comportamento diferente e patamares cada vez maiores à medida que aumenta a inclinação. Em diâmetros menores, onde a perda de carga por atrito ainda é significativa, o valor da perda de pressão total na tubulação diminui com o aumento do diâmetro. A partir de certo valor de diâmetro, essa perda friccional torna-se irrelevante frente ao componente hidrostático. Este por sua vez, varia pouco com o diâmetro interno. Como resultado, obtém-se perdas de pressão na tubulação decrescentes na região de menores diâmetros, e quase constantes para diâmetros maiores. O Custo de Bombeamento é proporcional à queda de pressão na tubulação, e portanto, sua curva apresenta o mesmo comportamento.



**Gráfico 9**

Há que se destacar também o surgimento de mínimos locais nas inclinações de 60° e 90°, na região de menores diâmetros. Este estranho fenômeno tem relação com as súbitas descontinuidades características da correlação de Beggs e Brill.

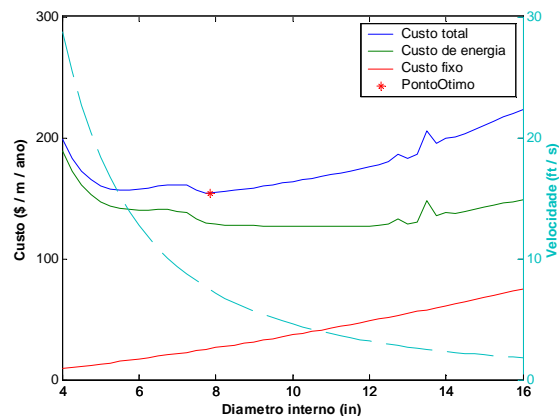
Observa-se nos gráficos 9 e 10 que a curva de Custos de Bombeamento, que vinha decrescendo com o diâmetro interno, inverte esta tendência e assume um perfil crescente em torno de diâmetros de 6 polegadas, voltando depois a decair. Isto ocorre porque entre os diâmetros de 6 e 8 polegadas, ocorre mudança de regime de escoamento - de “distribuído” para “intermitente” - e *ODE15S* apresenta problemas de convergência quando não se usa as funções de regularização, como descrito anteriormente. A suavização da curva de *holdup* por este método não se mostrou capaz de corrigir por completo a curva de Custos de Bombeamento, produzindo o “efeito colateral” observado, que afetou de maneira idêntica a função objetivo (Custo Total). Como consequência, verifica-se o surgimento de ótimos locais, e sensibilidade do método à estimativa inicial do diâmetro econômico.

### 5.5 Influência do custo de aquisição da tubulação

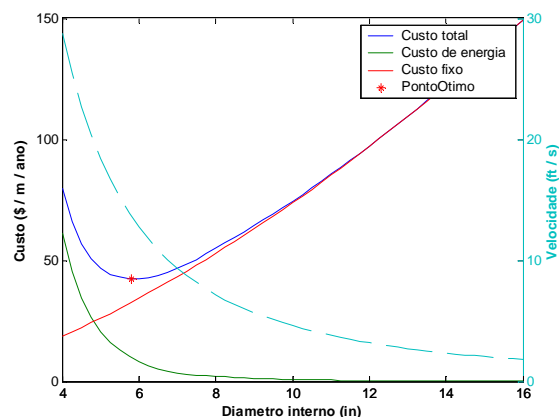
Todos os parâmetros investigados até aqui influenciam somente o Custo de Bombeamento, mantendo-se os mesmos Custos Fixos em todas as situações.

Para verificar a influência do custo de aquisição da tubulação nos resultados do problema, resolveu-se o

mesmo considerando o valor original dobrado, e depois, triplicado, como mostram os Gráficos 11 e 12. Foram obtidos, como diâmetros ótimos, 5,82 e 5,43 polegadas. Os custos de energia mantiveram-se os mesmos e, diante de custos de tubulação crescentes, o diâmetro econômico assumiu valores cada vez menores, correspondentes a menores aquisições de material.



**Gráfico 10**

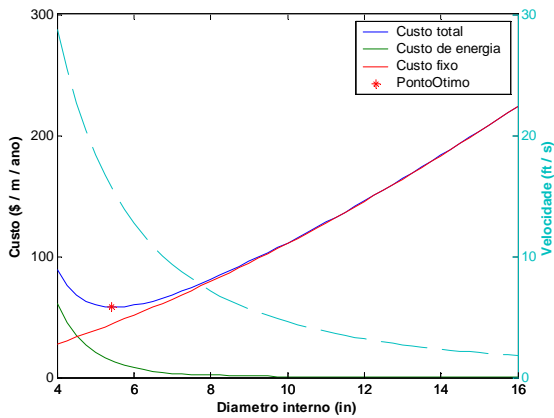


**Gráfico 11**

Observa-se que o custo de aquisição da tubulação apresenta influência considerável no valor do diâmetro econômico, dado que a consideração de um valor muito distante da realidade (no caso, três vezes menor) poderia modificar o diâmetro ótimo em cerca de uma polegada. A exemplo do custo de energia elétrica, este é mais um parâmetro que precisa estar bem determinado de acordo com a realidade local, quando o objetivo é determinar o diâmetro ótimo de maneira precisa.

A equação (11) mostra que dobrar e triplicar o custo de aquisição da tubulação em caso de escoamento incompressível reduziria o diâmetro econômico por fatores de 0,8963 e 0,8406, respectivamente. Na situação de escoamento bifásico aqui simulada, os fatores correspondentes determinados foram de 0,8872 e 0,8277, mostrando que em ambas as naturezas de escoamento, a influência deste parâmetro é aproximadamente a mesma.



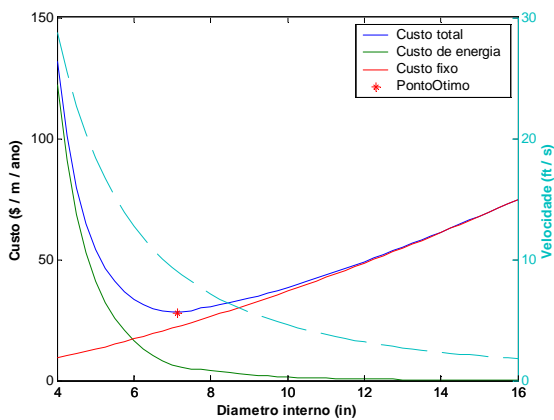


**Gráfico 12**

As conclusões acerca de modificações no valor de  $X$  valem também para o parâmetro  $K_F$ , dado que modificações de mesmas proporções nesses parâmetros refletem-se de maneira idêntica nos Custos Fixos e na função objetivo.

### 5.6 Influência da eficiência da bomba

Para verificar a importância da estimativa da eficiência da bomba no cálculo do diâmetro econômico, resolveu-se o problema de otimização com uma eficiência de 35%, obtendo-se um diâmetro econômico de 7,127 polegadas e o Gráfico 13.



**Gráfico 13**

Aqui, a menor eficiência da bomba refletiu-se na necessidade do dobro da energia requerida pelo bombeamento, para valores idênticos de perda de carga na tubulação.

Constata-se que valores precisos deste parâmetro são importantes para obter-se diâmetros econômicos coerentes com a realidade. Se a bomba já existe ou é conhecida, estimativas podem ser feitas a partir das curvas fornecidas pelo fabricante.

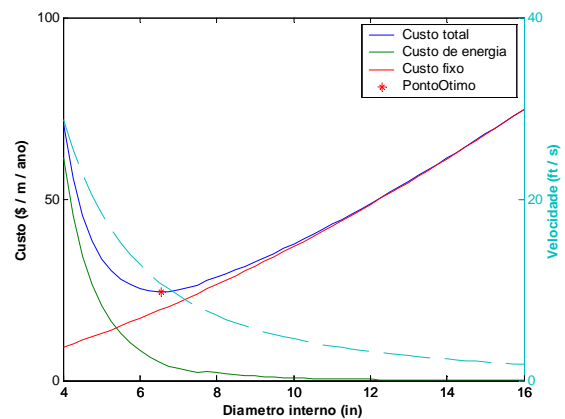
Como em todos os cálculos apresentados até aqui, observa-se que na solução ótima, não há restrições ativas.

De acordo com a equação (11), a divisão por dois da

eficiência da bomba levaria a um aumento do diâmetro econômico por um fator de 1,1157 em uma situação de escoamento incompressível. No presente trabalho, o valor do fator correspondente é bem próximo dessa previsão (1,0864).

### 5.7 Influência da velocidade do vento e da temperatura externa

A comparação das pressões, temperaturas, frações vaporizadas, etc, calculadas ao longo da tubulação sob diversas circunstâncias de temperatura externa e velocidade do vento mostrou que estes são dois parâmetros que pouco ou nada influenciam os referidos resultados. Dado que não modificam a perda de carga calculada para a tubulação, não é esperado que possam influenciar de maneira significativa o diâmetro econômico correspondente. Para certificar-se disto, resolveu-se o problema em condições drasticamente diferentes das praticadas até aqui: temperatura externa de 40° C (correspondente a um dia de muito calor em uma refinaria em solo brasileiro) e ar parado. Os resultados correspondentes encontram-se representados no Gráfico 14.



**Gráfico 14**

O diâmetro ótimo determinado foi de 6,56. Idêntico, portanto, em relação às condições originais, como esperado. A conclusão é que, ao contrário de diversos outros parâmetros estudados, a especificação exata de condições atmosféricas e temperatura do ar externo à tubulação não é importante para a determinação do diâmetro econômico correto.

## 6 CONCLUSÕES

Os gráficos apresentados mostram que velocidades acima do máximo estabelecido (20 ft/s) ocorrem apenas em diâmetros menores, associados a maiores custos de energia. Portanto, respeitado o referido limite, o projetista pode selecionar um diâmetro a partir de uma grande faixa de valores, onde o custo total pode dobrar ou até triplicar de uma possível escolha para outra, em casos extremos. Torna-se clara a importância da abordagem desenvolvida neste trabalho, mostrando que a seleção apenas pelo critério de velocidade pode resultar em soluções desnecessariamente antieconômicas.



Os resultados obtidos mostram que, para dada corrente de processo de composição química definida, a propriedade que determina a ordem de grandeza do diâmetro econômico correspondente é a sua vazão. A discussão sobre a influência dos valores dos parâmetros envolvidos na otimização econômica mostrou que mesmo desvios razoáveis dos mesmos não foram suficientes para provocar erros muito maiores que uma polegada no diâmetro selecionado. Tais erros resultariam em um certo excesso de gastos com energia ou material, mas dificilmente a solução obtida seria mais dispendiosa que a seleção por simples enquadramento da velocidade.

Trata-se de uma conclusão animadora, uma vez que a maior desvantagem do Método do Custo Anual Mínimo é justamente a necessidade de levantar os valores de parâmetros econômicos que traduzam a realidade local de custos. Para dada vazão de determinada corrente de processo, valores próximos da realidade já são suficientes para uma boa indicação do melhor diâmetro a selecionar. Por outro lado, não se pode confiar nos resultados obtidos quando não se tem qualquer idéia dos custos envolvidos.

Todo projeto de unidade de processamento possui, em seu cronograma de execução, previsão de uma ou mais etapas de avaliação econômica. Tornar acessíveis os dados econômicos necessários aos engenheiros responsáveis pelos projetos seria um passo decisivo na direção de conceber empreendimentos mais lucrativos, pela possibilidade de se aplicar métodos de otimização como o abordado aqui.

As conclusões deste trabalho não devem ser generalizadas para todos os problemas de escoamento bifásico líquido / vapor. Nas condições de pressão e temperatura consideradas na entrada da tubulação, a mistura bifásica encontra-se 21,5% vaporizada (em volume). Novo estudo nos mesmos moldes teria de ser realizado quando o problema de interesse envolver porcentagens vaporizadas maiores ou correntes de composição química muito diversa.

## 7 NOMENCLATURA

$C_B$  = custo de bombeamento por metro de tubulação por ano de operação ( $\$/ (m \cdot ano)$ )

$C_F$  = custo fixo por metro de tubulação por ano de operação ( $\$/ (m \cdot ano)$ )

$C_T$  = custo total por metro de tubulação por ano de operação ( $\$/ (m \cdot ano)$ )

$d$  = diâmetro interno da tubulação

$F$  = razão entre o custo dos acessórios e de instalação em relação ao custo de aquisição da tubulação

$g$  = aceleração da gravidade

$H$  = horas de operação por ano a dada vazão ( $h/ano$ )

$K$  = custo da energia elétrica ( $\$/kWh$ )

$K_F$  = razão entre custos fixos anuais e o custo inicial da

tubulação já instalada.

$L$  = comprimento reto da tubulação

$m$  = número de diferentes vazões volumétricas bombeadas ao longo do ano

$n$  = parâmetro relacionado ao material da tubulação (1,5 para tubulações de aço)

$Re$  = número de Reynolds

$Q_B$  = vazão volumétrica bombeada

$v_m$  = velocidade total da mistura bifásica

$X$  = custo de aquisição de um metro de tubulação de diâmetro interno 0,0254 m ( $\$/m$ )

$W_B^U$  = potência útil fornecida pela bomba para vencer a queda de pressão  $\Delta P_{tub}$  (W)

$W_B^{abs}$  = potência absorvida pela bomba para vencer a queda de pressão  $\Delta P_{tub}$  (W)

$\mathcal{E}$  = razão entre o comprimento equivalente dos acidentes da tubulação e  $L$

$\rho_B$  = massa específica do líquido bombeado

$\mu_B$  = viscosidade absoluta do líquido bombeado

$\eta$  = eficiência da bomba correspondente a  $Q_B$

$\Delta P_{tub}$  = queda de pressão na tubulação cujo diâmetro objetiva-se determinar

$\theta$  = inclinação da tubulação em relação à horizontal ( $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ), positivo para escoamento ascendente

## 8 BIBLIOGRAFIA

1. Daubert, T. E.; Danner, R. P.; *API Technical Data Book – Petroleum Refining*, 6<sup>th</sup> edition, Washington D. C., American Petroleum Institute (1997).
2. Brill, J. P.; Beggs, H. D.: *Two Phase Flow in Pipes*, University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma (1991).
3. Brill, J. P.; Mukherjee, H.: *Multiphase Flow in Wells*, Society of Petroleum Engineers Inc., Richardson, Texas (1999).
4. Edmister, W. C.: *Applied Hydrocarbon Thermodynamics – Volume 2*, Gulf Publishing Company, 2<sup>a</sup> edição (1988).
5. Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.: *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos, 5<sup>a</sup> edição (2003).
6. Mattos, E. E.; Falco, R.: *Bombas Industriais*, Segunda Edição, Editora Interciência (1998).
7. Nolte, C. B.: *Optimum Pipe Size Selection*, Gulf Publishing Company (1979).
8. Peters, M. S.; Timmerhaus, K. D.; West, R. E.: *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Fifth Edition, McGraw Hill (2003).