

Nº 178135

Modelos paramétricos para estimativa de custos de tubulação no Brasil

Natalia Baretta Corona
Eduardo Luiz Machado

Artigo da Revista IPT, Tecnologia e Inovação, v.6, n.21, p.75-97, dez., 2022.

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, *apresentados em* eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. **Proibido reprodução**

Modelos paramétricos para estimativa de custos de tubulação no Brasil

Parametric models for conceptual cost estimation of industrial tanks and piping: a case study for Brazil

Natalia Beretta Del Corona^a, Eduardo Luiz Machado^{bc}

Resumo

A estimativa de custo de equipamentos por meio de equações paramétricas é uma ferramenta importante para a tomada de decisão do engenheiro durante o projeto de um processo produtivo. Os modelos paramétricos disponíveis hoje na literatura têm base em preços praticados nos Estados Unidos e não refletem custos de fabricantes brasileiros. O presente trabalho usa dados históricos de compra de uma empresa química para reavaliar os parâmetros propostos por Towler e Sinnott (2008) para tubulação, com base em preços praticados no Brasil. Foram gerados conjuntos de parâmetros para os materiais aço carbono e aço inox. A margem de erro do modelo foi medida segundo o Erro Percentual Absoluto Médio, cujo valor máximo buscado é de 40%, correspondente à fase FEL 1 de projeto.

Abstract

Equipment cost estimation using parametric equations is a useful tool for engineer's decision making throughout the process project. Cost models currently available in literature are mainly based on United States' costs and do not represent Brazilian suppliers' prices. This work uses historical data of purchase prices paid by a

^a Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Docente do Mestrado Profissional em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^c Diretor Técnico em Ensino Tecnológico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. São Paulo-SP, Brasil.

* E-mail: nataliabdc@hotmail.com

Palavras-chave: estimativa de custo; modelo paramétrico; equipamento industrial; tubulação; fabricante brasileiro.

Keywords: cost estimation; parametric model; piping; Brazilian price.

chemical company to reevaluate the parameters proposed by Towler and Sinnott (2008) for piping cost estimation. Two groups of parameters were generated on Minitab: one for carbon steel and one for stainless steel. The margin of error was measured by the Mean Absolute Percentage Error (MAPE), which maximum target value is 40%, corresponding to FEL 1 phase of project.

1 Introdução

O investimento envolvido e execução de um projeto são estimados desde a sua concepção e normalmente é reavaliado em mais de uma fase, de modo que a precisão da estimativa aumente à medida que as etapas avancem. Projetos cuja ordem de magnitude do investimento está muito acima do retorno esperado não justificam o recurso humano dispendido para seguir até o final do detalhamento. Nesse sentido, uma estimativa de custo eficaz deve equilibrar o grau de precisão requerida com o tempo necessário para elaborá-la: em geral quanto mais simplificada uma estimativa, maior a margem de erro devido à menor disponibilidade de informação.

Uma forma de estimar o custo de equipamentos com base nas informações preliminares de projeto é por meio de equações paramétricas disponíveis na literatura. Modelos que correlacionam o custo de um item com parâmetros simples de projeto – como diâmetro e altura do equipamento – são ferramentas eficientes para que o engenheiro seja capaz de avaliar os custos dos equipamentos projetados, e assim otimizá-los desde a concepção.

O modelo proposto por Towler e Sinnott (2008) para tubulação foi adotado neste trabalho, devido à sua simplicidade. Os parâmetros propostos pelos autores para o modelo estão baseados em preços praticados nos Estados Unidos, de modo que não refletem os custos brasileiros para os equipamentos fabricados nacionalmente.

Este trabalho propõe, para as equações disponíveis na literatura, parâmetros baseados em preços brasileiros de tubulações, item comum para o engenheiro de processo no projeto de qualquer planta química ou petroquímica. A margem de erro admitida para a estimativa de custos é de $\pm 40\%$, compatível com a fase 1 dos projetos que seguem a metodologia Front End Loading (FEL).

Para que esta equação seja útil nos próximos anos, é preciso fazer uma correção temporal dos resultados obtidos. Porém, apesar de a literatura americana definir muito bem o índice a ser usado para esta correção, não está claro na literatura brasileira qual a taxa a ser aplicada a equipamentos da indústria química e petroquímica no país. Nesse sentido, também foram analisados neste trabalho os índices de preços existentes e disponíveis para propor uma forma adequada de correção temporal.

2 Referencial teórico

O objetivo desta seção é apresentar os principais conceitos e metodologias utilizados neste trabalho.

2.1 Metodologia FEL

Uma prática comum de gerenciamento de projeto encontrada na indústria é o *Front End Loading* (FEL), metodologia idealizada pelo *Independent Project Analysis* (IPA) que divide a avaliação do investimento em *gates* (portões) de aprovação. A cada fase, avança-se no aprofundamento do projeto e a estimativa de investimento deve se tornar mais precisa, de modo que ao final da fase de detalhamento o orçamento proposto possa ser cumprido com o menor desvio possível.

O principal objetivo da metodologia é antecipar mudanças de escopo, que são mais custosas à medida que o projeto avança. O número e tamanho das alterações posteriores no projeto são reduzidos se a etapa de definição de escopo for bem caracterizada. Nesse sentido, a metodologia estabelece quais documentos de engenharia devem ser elaborados em cada fase (BARBOSA; PINHEIRO; JUNIOR, 2013). A **Tabela 1** apresenta os principais documentos.

Tabela 1 – Entregáveis de cada fase da metodologia FEL

Característica		Entregáveis
FEL 1	Identificação da oportunidade	Declaração de escopo Estudo de alternativas Estimativa de custos inicial
FEL 2	Engenharia conceitual	Análise de risco preliminar <i>Layout</i> Engenharia conceitual ¹ Estimativa de orçamento
FEL 3	Engenharia básica	Especificações de equipamentos Plano de execução e compras Documentos de engenharia básica ²

Fonte: adaptado de Barbosa *et al.* (2013)

1 Fluxogramas preliminares

2 Fluxogramas de engenharia, folhas de dados, descritivos de controle, entre outros.

Na **Tabela 2** estão indicadas as margens de erro admitidas para cada fase FEL do projeto, porém é importante considerar que estes números podem sofrer pequena variação a depender da empresa que o aplica (GREEN; PERRY, 2008).

Tabela 2 – Classificação FEL das fases de estimativa de investimento

	FEL 1	FEL 2	FEL 3
Margem de erro da estimativa de custo	± 40%	± 25%	± 10%
Horas acumuladas de engenharia	1 – 5%	5 – 15%	15 – 30%
Contingência	15 – 20%	10 – 15%	8 – 12%

Fonte: Green e Perry (2008)

A estimativa do custo de equipamentos e materiais, que acontece desde FEL 1, pode basear-se em históricos de compra, referências externas ou equações paramétricas; nesta etapa as informações de projeto são insuficientes para realizar uma cotação no mercado.

2.2 Correção temporal do investimento

Se o custo de um ativo é conhecido em certo tempo, ele pode ser estimado em momento futuro usando um fator de multiplicação chamado Índice de Preço. Nos Estados Unidos, o índice mais utilizado é o *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CEPCI), publicado mensalmente na revista *Chemical Engineering* cujo histórico breve está exemplificado na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Histórico do índice americano Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)

	Jan/18 (preliminar)	Dez/17	Jan/17
Índice CE	576,4	572,9	553,1
Equipamento	567,5	691,8	664,2
Trocadores de calor e tanques	606,2	604,9	578,3
Maquinaria de processo	697,1	694,0	669,5
Tubulação, válvulas e acessórios	910,2	893,5	835,2
Instrumentos de processo	416,0	410,7	398,4
Bombas e compressores	1.001,0	996,4	971,3
Equipamentos elétricos	531,2	524,1	512,6
Estrutura e suporte	736,1	732,7	722,4
Mão de obra de montagem	328,4	330,4	324,3
Construções	570,4	567,4	550,2
Engenharia e supervisão	309,2	308,9	313,5

Fonte: Chemical Engineering (2018)

No Brasil, a revista Conjuntura Econômica da Fundação Getúlio Vargas (FGV) publica alguns índices de preços mensalmente. O Índice Geral de Preços (IGP) é calculado desde 1947 pela FGV e trata-se de uma média ponderada de três outros índices:

- a) Índice de Preços ao Produtor Amplo (IPA), usado para correção de preços de produtos agropecuários e industriais nos estágios de comercialização anteriores ao consumo final – peso 60%;
- b) Índice de Preços ao Consumidor (IPC), que serve como referência para avaliar o poder de compra do consumidor – peso 30%;
- c) Índice Nacional da Construção Civil (INCC), que reflete evolução dos custos de construções habitacionais – peso de 10%.

Por sua vez, o IPA é composição do preço de produtos relacionados à agropecuária – cujo peso é de 24% – e de produtos industriais (extração e transformação), que representa 76%. Dentro dos índices de produtos industriais, dois são particularmente interessantes para este trabalho. Estes índices estão relacionados e apresentam breve histórico na **Tabela 4**, na qual a hierarquia "grupo" é uma das partes componentes da "divisão", cujo peso é indicado na segunda coluna.

Apesar de serem pouco representativos dentro de suas divisões, estes são os índices abertos mais acessíveis para os grupos de tubos e tanques.

Tabela 4 – Índices de Preço FGV para Indústria de Transformação

Hierarquia	Peso	Classe de atividade e descrição dos produtos	Produto	Código DI	Valor Set/15	Valor Set/16
DIVISÃO	100%	Metalurgia básica	FGVDADOS	1420787	143,33	147,32
GRUPO	8,8%	Tubos de ferro e aço	PREMIUM	1420803	Não disp.	Não disp.
DIVISÃO	100%	Produtos de metal	FGVDADOS	1420817	150,361	162,667
GRUPO	2,1%	Tanques e reservatórios metálicos	PREMIUM	1420821	Não disp.	Não disp.

Fonte: adaptado de Instituto Brasileiro de Economia (2016) e Revista Conjuntura Econômica (2015 -2016)

2.3 Modelos paramétricos

Modelos paramétricos são recursos muito úteis para estimativas preliminares de custo no início de um projeto, quando poucas informações de engenharia estão disponíveis.

O desenvolvimento de um modelo paramétrico requer a definição clara do objeto de estudo e suas características (material, *range* de capacidade, etc.). O uso de dados da própria empresa, que reflitam suas práticas de engenharia, tecnologia e seu *vendor list*, pode resultar em modelos de melhor qualidade (ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF COST ENGINEERING, 2012).

Para cumprir a sua função, um modelo paramétrico deve estar baseado em variáveis - chave - que possam ser definidas desde o início do projeto - e devem permitir o escalonamento temporal do seu resultado.

Exemplos simples de equações paramétricas amplamente usadas são os fatores de capacidade e módulos de custo. A equação mais simples e amplamente utilizada para escalonamento de custo de equipamentos é descrita pela **Equação (1)**:

$$\frac{C_{e,1}}{C_{e,2}} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^n \quad (1)$$

onde $C_{e,i}$ é o custo do equipamento, S_i é o fator de capacidade do equipamento e n é o expoente de escala.

A primeira menção a esta relação de capacidade foi feita por Williams (1947), quando passou a ser conhecida como "regra dos seis décimos" (*six-tenths rule*), pois o valor sugerido de n era 0,6. Chilton (1950) mais tarde confirmou a aplicação da regra inclusive para unidades produtivas inteiras. Posteriormente o expoente de escala 0,6 foi questionado e Guthrie (1969) propôs expoentes diferentes para os principais equipamentos industriais.

O expoente n é determinado empiricamente com base em dados históricos de preços e teoricamente pode assumir qualquer valor real que explique a relação de custos de equipamentos de diferentes capacidades. Apesar de ser expresso como uma constante, o expoente n tende a ser maior com o aumento da capacidade da unidade/ equipamento. Por exemplo, n pode valer 0,70 entre as capacidades A e B, mas entre as capacidades C e D seu melhor valor seria de 0,75 (ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF COST ENGINEERING, 2012).

Ao longo dos anos, outros autores também sugeriram expoentes revisados para cada equipamento em particular. Na **Tabela 5** estão relacionados alguns valores de n indicados por Perry e Green (1997).

Tabela 5 – Coeficiente de capacidade para diferentes equipamentos

Tipo de equipamento	Range de correlação	Unidade de capacidade	n
Compressor recíproco movido a motor (< 1000 lbf/in ²)	0,75 - 1490	kW	0,84
Trocador de calor casco e tubo em AC	1,9 - 1860	m ²	0,59
Bomba centrífuga em AC, excluindo motor	30 - 300	kW	0,67
Tanque atmosférico vertical em AC	0,4 - 76	m ³	0,30
Ventilador centrífugo	0,24 - 71	N m ³ /s	0,60
Tubulação em AC (instalada: x 6 - 7)	1 - 24	pol	0,0093

Fonte: Perry e Green (1997)

A generalização da **Equação (1)** resulta no modelo (2).

$$C_e = bS^n \quad (1)$$

Assim como n , b é um parâmetro empírico do modelo, que representa a constante de regressão correspondente a $C_{e,2}/S_2^n$.

Ao longo dos anos alguns autores sugeriram o acréscimo de mais parâmetros ao modelo, mas hoje a **Equação (1)** ainda é amplamente usada para cálculos rápidos do custo de ativos devido à sua simplicidade.

Towler e Sinnott (2008) propuseram uma modificação simples à **Equação (1)**, acrescentaram mais um parâmetro a à correlação, resultando na **Equação (2)**.

$$C_e = a + bS^n \quad (2)$$

Particularmente para tubulação, Towler e Sinnott (2008) sugerem que $a = 0$ e o fator de capacidade $S =$ diâmetro D da tubulação. Os parâmetros b e n dependem do material e *schedule* (espessura) da tubulação. Por fim, o custo da tubulação instalada – incluindo acessórios e montagem –, segundo os autores, é calculado conforme **Equação (3)**.

$$C_{tub} = bD^n \quad (3)$$

Para diâmetro em polegadas, os parâmetros b e n sugeridos pelos autores constam na **Tabela 6**. Os resultados, em dólares por pé de tubulação, têm base na Costa do Golfo (Estados Unidos) em Janeiro de 2006, quando o CEPCI valia 478,6.

Tabela 6 – Parâmetros de custo de tubulação por Towler e Sinnott

Material	Range de diâmetro	b	n
Aço carbono A106	1 a 8"	17,4	0,74
	10 a 24"	1,03	1,73
Aço inox 304	1 a 8"	24,5	0,9
	10 a 24"	2,74	1,7

Fonte: Towler e Sinnott (2008)

Apesar de não apresentar nenhuma medida de precisão ou qualidade de ajuste do modelo, Towler e Sinnott (2008) pontuam que as equações propostas são simplificadas e devem ser aplicadas apenas em estimativas preliminares.

2.4 Itens de tubulação e montagem

Segundo Conforto e Spranger (2008), o item "Materiais" representa cerca de 20% do custo total de uma instalação industrial. Destes, aproximadamente 47% equivalem à disciplina de tubulação: os demais estão distribuídos entre instrumentação, eletricidade, estruturas metálicas, entre outras.

Entende-se como elementos de tubulação: tubos, flanges, válvulas, conexões, parafusos/porcas, juntas/ gaxetas e suportes.

As válvulas fazem o controle da circulação do fluido nas linhas e podem ser de diversos tipos, a depender de sua função: bloqueio ou regulação. As conexões compreendem curvas, reduções, tês, etc. Conforto e Spranger (2008) sugerem os percentuais de custo de conexões sobre o custo de tubos segundo **Tabela 7**

Tabela 7 – Percentual do custo de conexões sobre tubulação

Material	Diâmetro	% do custo dos tubos
Aço carbono	Até 2 1/2"	102,7
	De 3 a 6"	64,3
	De 8 a 14"	33,3
	De 16 a 20"	17,2
Aço-liga ou inox	Até 2 1/2"	45,4
	De 3 a 6"	36,1
	De 8 a 14"	5,4

Fonte: Conforto e Spranger (2008)

O recurso humano necessário para a pré-montagem, montagem e testes hidráulicos de tubos, válvulas, conexões e acessórios em aço carbono, segundo Conforto e Spranger (2008), pode ser calculado conforme **Tabela 8**.

Tabela 8 – Mão de obra direta para montagem de tubulação

Diâmetro	Índice
3/4"	6,7 hh/m
1"	7,2 hh/m
2"	8,7 hh/m
3"	10,1 hh/m
4"	12,5 hh/m
6"	16,2 hh/m
8"	16,8 hh/m

Fonte: Conforto e Spranger (2008)

A dificuldade em avaliar a complexidade de montagem e pré-fabricação dos itens de tubulação reflete na margem de erro das estimativas de custo de tubulação. Caddell *et al.* (1999) usaram um projeto conduzido segundo a metodologia FEL como um estudo de caso para comparar as técnicas de estimativa de custos disponíveis na literatura até então com aquelas efetivamente executadas por uma empresa em contrato *Engineering, Procurement and Construction* (EPC). Como resultado, os autores encontraram valores de homem-hora entre 39 – 62% inferior ao efetivamente realizado no projeto, concluindo que estas referências devem ser usadas com cautela. Segundo os autores, a montagem de tubulação representa uma parcela relevante de 30 – 45% do custo total de instalação de um projeto industrial de plantas petroquímicas.

3 Metodologia

Foram usados dados históricos de compras e cotações como entradas dos modelos paramétricos. Os dados referem-se a custos orçados por fornecedores brasileiros (ou com produção no Brasil) para uma empresa multinacional química com atuação global.

A entrada do modelo foi o preço de tubo por metro (apenas a peça, sem acessórios), fornecido para fábricas localizadas nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil entre 2010 e 2016. Valores considerados *outliers*, provenientes de negociações na compra de grande quantidade de material, foram excluídos da amostra.

Cada dado coletado refere-se a uma ordem de compra: um total de 1.011 pontos foram analisados, dos quais 544 referem-se a tubos de aço carbono (representando 33.284 metros) e 467 a tubos de aço inox (representando 20.403 metros).

Um comparativo entre os custos de tubos e o custo total de material de tubulação (incluindo válvulas, conexões e acessórios) foi realizado para 11 projetos implementados analisando apenas itens em aço carbono e 9 outros projetos analisando apenas itens em aço inox, entre os anos de 2007 e 2015. Dentro de cada projeto, filtraram-se os materiais de tubulação referentes a cada material (todos os diâmetros) e comparou-se a parcela de custos referentes exclusivamente a tubos com o custo total da disciplina tubulação. Entende-se como conexões e acessórios: tês, redução/ expansão, *nipples*, juntas, flanges, curvas, válvulas e luvas. Foram excluídos da amostra mangotes, *tubings*, filtros e outros itens especiais. O custo de válvulas, conexões e acessórios foi tratado como um fator multiplicativo ao resultado da **Equação (3)**. O fator multiplicativo será denotado pela letra grega γ .

A **Equação (3)** expressa o custo total de tubulação instalada representando apenas o preço de compra de tubos em função do diâmetro nominal em polegadas (D) do mesmo, sem instalação.

Os parâmetros b e n do modelo serão definidos após a linearização da **Equação (3)**, conforme rearranjo indicado na **Equação (4)**:

$$\ln(C_{tub}) = \ln b + n \ln D \quad (4)$$

O método dos mínimos quadrados foi aplicado à **Equação (4)** obtendo-se os parâmetros a e b que são aqueles que minimizam a função objetivo indicada na **Equação (5)**.

$$\varphi = \sum_1^k \{[\ln(C_{tub})] - \ln b + n \ln D\}^2 \quad (5)$$

O ajuste do modelo exponencial e a qualidade dos parâmetros b e n foi validada conforme métodos da análise de regressão, com nível de confiança de 95% e p -valor $< 0,05$, derivando-se desta forma parte do custo pelo modelo paramétrico a seguir:

$$C_{tub} = bD^n \quad (3)$$

Os demais custos desta disciplina, bem como o de montagem, são adicionados ao modelo na forma de fatores aditivos e multiplicativos. O custo de válvulas, conexões e acessórios foi tratado como um fator multiplicativo ao resultado da **equação (3)**. O fator multiplicativo será denotado pela letra grega γ .

O custo de montagem foi adicionado ao modelo paramétrico através de uma reta de regressão linear a qual se baseou na média dos orçamentos de 6 empresas diferentes, realizados no ano de 2017 para projetos nos estados de São Paulo e Bahia. Os preços, cotados em R\$/kg, foram convertidos em custos médios por metro de tubulação, considerando as médias das espessuras mais comuns de tubos, equivalentes aos schedules 40 e 80. Esta componente do custo total é adicionada ao modelo paramétrico a partir da equação linear

$$f_{p1} + f_{p2}$$

A correção temporal dos dados foi realizada com o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), disponível na literatura aberta. O desempenho deste índice foi comparado com o índice Metalurgia Básica (código DI 1420787) elaborado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) pertencente ao subgrupo "Indústria de Transformação", componente do grupo "Produtos Industriais" do Índice de Preços ao Produtor Amplo – Disponibilidade Interna (IPA – DI). Todos os custos foram corrigidos para Julho de 2017 usando o IPCA.

A margem de erro ao se estimar uma componente do custo pela reta da regressão foi medida com base no Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), representado pela **Equação (7)**.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \quad (7)$$

onde y_i = valor medido C_{tub} e \hat{y}_i = valor ajustado do Custo pela regressão.

O modelo paramétrico final (equação 10 a seguir), composição de vários custos, será considerado válido para estimativas em FEL 1 se a margem de erro total for $\leq 40\%$.

$$C_{tub} = f_{p1} + f_{p2}D + \gamma bD^n$$

A margem de erro total resulta das simplificações adotadas na FEL 1 que propagam erros nos resultados das estimativas de custo final. As fontes de erros consideradas estão listadas na **Tabela 15** com as respectivas contribuições na margem de erro total.

4 Resultados

A fim de definir o índice de preço utilizado, 83 compras do mesmo tipo de tubo (em aço carbono, schedule 40, diâmetro 2", sem costura) foram ordenadas da mais antiga para a mais recente. Cada ponto foi comparado com o predito pela correção do imediatamente anterior via índice de preço. Os dois índices de preço comparados foram o índice Metalurgia Básica e o IPCA, divulgado mensalmente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017). Os erros relativos ao preço real de compra estão indicados na **Tabela 9**.

Tabela 9 – Erro relativo absoluto dos índices IPCA e Metalurgia Básica para correção de preços de tubos

Erro relativo (83 pontos)	IPCA	Metalurgia Básica
Média do erro (ε)	11,50 %	11,61 %
Desvio padrão do erro	17,98 %	17,92 %
1º quartil	1,32 %	1,55 %

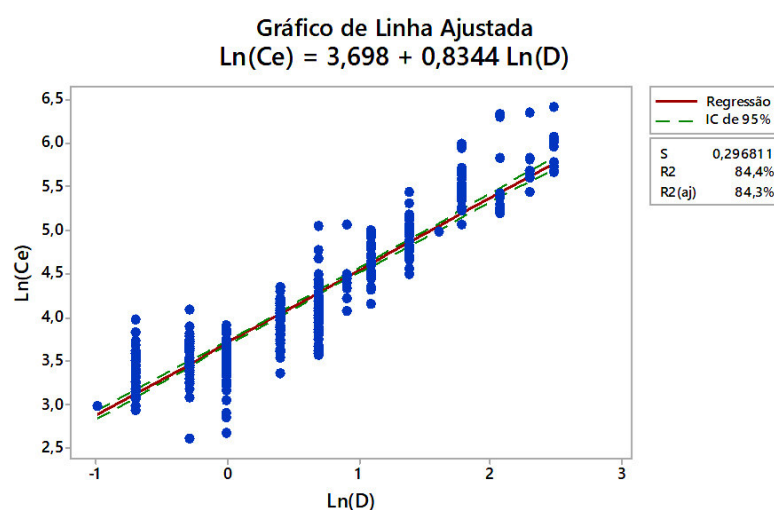
Fonte: elaborado pelos autores

Nota-se que a assertividade dos dois índices é equivalente, de modo que o IPCA será usado como base para correção de custos neste trabalho por ser um índice mais acessível para consulta futura.

4.1 Estimativa dos parâmetros do modelo Brasil

Como entrada da **Equação (4)**, foram usados dados de compra de tubos corrigidos para o período de referência (Julho de 2017). A primeira linearização realizada foi para tubos de aço carbono (AC), um total de 544 dados (pedidos). Dessa amostra, os *schedules* representados por menos de 10 pontos foram excluídos da análise, por se tratarem de itens incomuns e distorcerem o custo unitário médio. Assim, foram excluídos os *schedules* (SCH) 10, 30, 100 e 160. O Gráfico 1 contém os dados restantes – no total de 532 –, sem fazer distinção entre o schedule (20, 40 e 80) do tubo.

Gráfico 1 – Linearização de custos de tubos em AC

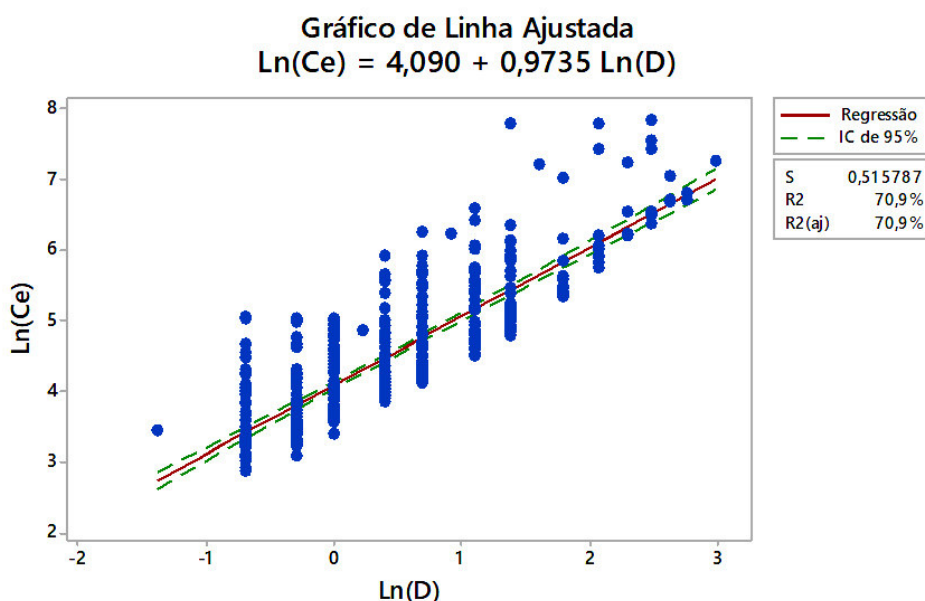


Fonte: elaborado pelos autores

A mesma regressão foi realizada para tubos de aço inox (AI), um total de 462 pontos – considera-se aqui como aço inox: AI 304, 304L, 316 e 316L. Analogamente ao exercício anterior, os dados referentes a SCH 5S foram excluídos por serem poucos representativos (< 10 pontos) para a amostra. O **Gráfico 2** apresenta o resultado da linearização para os SCH 10S, 40S e 80S.

Gráfico 2 - Linearização de custos de tubos em AI

Gráfico 2 - Linearização de custos de tubos em AI



Fonte: elaborado pelos autores

O R^2 ajustado (71%) indica que o modelo é menos preciso para o aço inox do que para o aço carbono. Na **Tabela 10** apresentam-se os parâmetros regredidos para o custo de tubos de aço carbono e inox.

Tabela 10 - Parâmetros de regressão para o modelo de tubos

Validade	b	n
Aço carbono $20 \leq \text{SCH} \leq 80$ $3/8'' \leq D \leq 12''$	40,3	0,83
Aço inox SCH 10S, 40S e 80S $1/4'' \leq D \leq 16''$	59,7	0,97

Fonte: elaborado pelos autores

O Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) mede o erro decorrente do ajuste dos dados à reta de regressão, e seus resultados constam na **Tabela 11**

Tabela 11 – MAPE do modelo de regressão de tubo

Material	MAPE
AC	6,0 %
Al	8,9 %

Fonte: elaborado pelos autores

O p-valor calculado para os parâmetros b e n foi < 0,001, significando que para ambos os modelos (aço carbono e aço inox) o risco de se cometer um erro ao afirmar que os parâmetros estimados são verdadeiros é muito pequeno, para o nível de confiança adotado de 95%. Isto é, considera-se que os parâmetros foram estimados com qualidade.

Os parâmetros da **Tabela 11** foram calculados apenas com o custo de compra dos tubos. Os custos dos demais componentes da tubulação (válvulas, acessórios e conexões) e o custo de instalação e montagem serão acrescentados como fatores multiplicativos para compor o custo total dessa disciplina. Entende-se como conexões e acessórios: tês, redução/ expansão, juntas, *niple*, flanges, curvas, válvulas e luvas. Estão excluídos: purgadores, parafusos, filtros, entre outros itens.

O custo de acessórios será aqui denominado de fator γ , a ser acrescentado à **Equação (3)**, resultando na **Equação (9)**.

$$C_{tub} = \gamma b D^n \quad (9)$$

Os valores médios dos fatores de custo sobre acessórios, válvulas e conexões estão listados na **Tabela 12**.

Tabela 11 – MAPE do modelo de regressão de tubo

Material	Nº projetos analisados	Valor médio de γ	Erro absoluto médio (Z)
AC	11	3,45	18,3%
Al	9	3,39	31,6%

Fonte: elaborado pelos autores

Um dos principais fatores contribuintes ao valor de γ é o layout do projeto: em áreas mais "congestionadas", as tubulações tendem a apresentar mais acidentes e menos trechos retos, incorrendo um valor mais alto de conexões.

O custo de montagem de tubulação geralmente é apresentado em função do peso da tubulação, o que dificulta o uso pelo engenheiro de processo. Os custos de montagem, em R\$/kg, foram convertidos em custos médios por metro de tubulação. A fim de ganhar simplicidade no cálculo, a conversão de peso para comprimento de tubulação considerou as médias das espessuras mais comuns de tubos, equivalentes aos SCH 40 e 80. Esta generalização de um custo médio independente da espessura do tubo também agrega uma margem de erro, conforme pode ser constatado na **Tabela 13**.

Tabela 13 – Peso por metro de tubulação

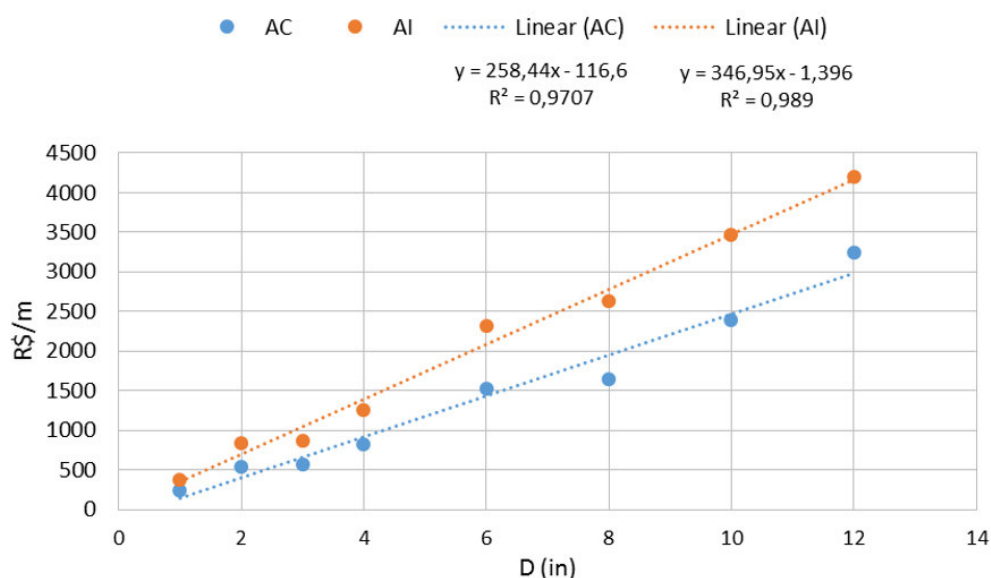
D (in)	SCH	Peso por metro (kg/m)		Peso médio (kg/m)		Erro Padrão Y	
		AC	AI	AC	AI	AC	AI
1	40	2,5	2,55	2,865	2,925	15%	15%
	80	3,23	3,3				
2	40	5,43	5,54	6,45	6,585	19%	19%
	80	7,47	7,63				
3	40	11,3	11,51	13,3	13,54	18%	18%
	80	15,3	15,57				
4	40	16,1	16,38	19,2	19,565	19%	19%
	80	22,3	22,75				
6	40	28,2	28,8	35,35	36,085	25%	25%
	80	42,5	43,37				
8	40	42,5	43,36	53,55	54,615	26%	26%
	80	64,6	65,87				
10	40	60,2	61,46	78	72,28	30%	18%
	80	95,8	83,1				
12	40	79,7	75,28	105,85	87,29745	33%	16%
	80	132,0	99,31				
Média						23%	19%

Fonte: elaborado pelos autores

A relação linear entre os custos de montagem e o diâmetro da tubulação está ilustrada no **Gráfico 3**. Assim, o custo de instalação, em R\$/m, será representado por uma reta, acrescentando os coeficientes f_{p1} e f_{p2} ao modelo, resultando na **Equação (10)**.

$$C_{tub} = f_{p1} + f_{p2}D + \gamma bD^n \quad (10)$$

Gráfico 3 – Custo de montagem de tubulação



Fonte: elaborado pelos autores

A relação dos coeficientes f_p e a margem de erro da reta constam na **Tabela 14**.

Tabela 14 – Coeficientes para composição do custo de montagem de tubulação

Material	Nº empresas cotadas	f_{p1}	f_{p2}	Erro absoluto médio da reta (ER)
AC	6	-116,6	258,44	16,1%
AI	6	-1,396	346,95	8,8%

Fonte: elaborado pelos autores

É importante notar que o custo de montagem apresenta maiores variações que o custo de material, pois cada projeto apresenta particularidades de layout, principalmente com relação a montagem em altura e necessidade de suportes. Além disso, a remuneração em cada região do país é significativamente diferente o que contribui para a grande variação dos valores levantados.

Os parâmetros das **Tabelas 10, 12 e 14** têm como referência o mês de julho de 2017. O custo total por metro de tubulação pode ser calculado conforme **Equação (10)** e corrigido temporalmente pelo IPCA segundo **Equação (11)**.

$$C_{tub_{futuro}} = C_{tub_{Jul/17}} \times \frac{IPCA}{4843,87} \quad (11)$$

4.2 Margem de erro do modelo

A margem de erro total do modelo é uma composição de diversas fontes, conforme descrito na **Tabela 15**.

Tabela 15 – Margem de erro composta do modelo de tubulação

	Fonte do erro	AC	AI
MAPE	- Ajuste dos dados de tubos à reta de regressão	6,0	8,9
ϵ	- Pouca representatividade da variação de preços do item "tubos" à composição do índice de preços IPCA - Diversidade de fornecedores e localidades envolvidos nos dados (compras) analisados	11,5	11,5
z	- Generalização do fator γ (válvula, conexões e acessórios), que é fortemente dependente do layout do projeto	18,3	31,6
Y	- Uso de um peso médio para cada diâmetro da tubulação	23,0	19,4
E_R	- Ajuste dos custos médios de montagem de tubulação a uma reta de regressão	16,1	8,8

Fonte: elaborado pelos autores

Assim, a composição de incertezas das fontes associadas (U) será o resultado da **Equação (12)**.

$$U = \sqrt{MAPE^2 + \epsilon^2 + z^2 + Y^2 + E_R^2} \quad (12)$$

Os resultados finais de margem de erro do modelo proposto encontram-se na **Tabela 16**.

Tabela 16 – Incerteza composta do modelo de tubulação

	AC	AI
U	35,9%	40,8%

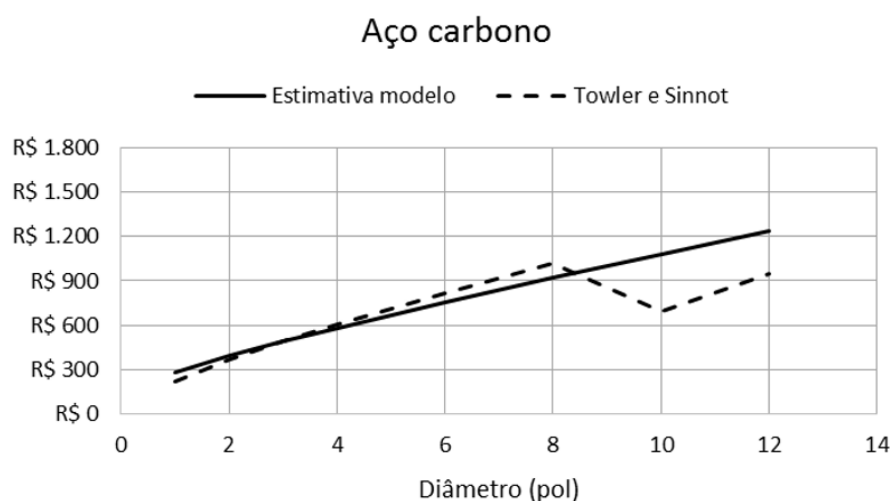
Fonte: elaborado pelos autores

Pela análise da **Tabela 15** pode-se concluir que em ambos os casos (AC e AI), a maior contribuição para os erros tem origem no fator γ , no uso do peso médio para cada diâmetro da tubulação e no ajuste dos custos médios de montagem somando 87% de contribuição a margem de erro. O resultado indica que a margem de erro do modelo proposto para tubulação está satisfatoriamente de acordo com a margem de erro admitida para uma estimativa FEL 1 ($\leq 40\%$). Assim, com o resultado encontrado recomenda-se o prosseguimento do projeto, uma vez que foi validado o alinhamento estratégico e a análise de mercado.

4.3 Comparativo com a literatura

O comparativo do modelo deste trabalho com o de Towler e Sinnott (2008) para tubulações de aço carbono e aço inox encontra-se no **Gráfico 4** e **Gráfico 5**. Percebe-se que os dois modelos mostram boa aderência entre os diâmetros 2 e 8" (discrepância entre 1 e 23%), apresentando diferenças maiores na inflexão entre 8 e 10" (23 – 36%).

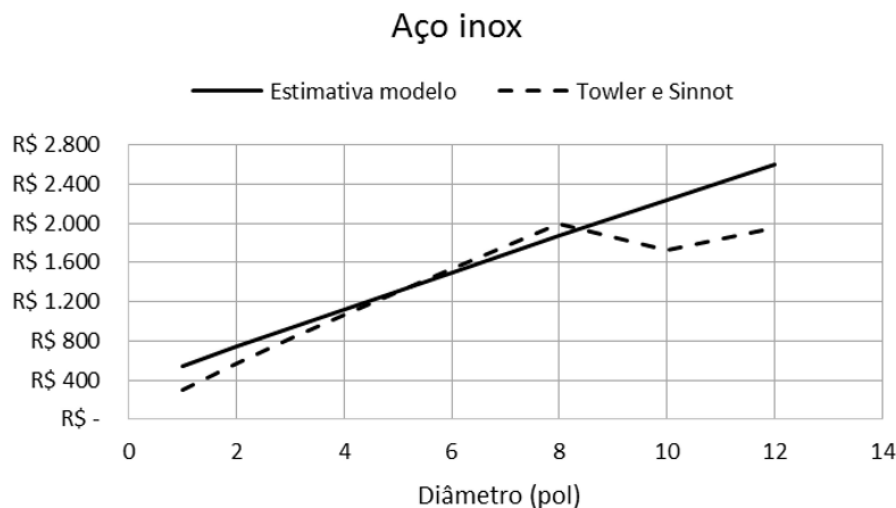
Gráfico 4 – Comparativo entre o modelo de tubulação AC e o de Towler e Sinnott, em R\$/m³



Fonte: elaborado pelos autores

3 O custo de Towler e Sinnott foi corrigido de 2008 para 2017 utilizando o Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI).

Gráfico 5 – Comparativo entre o modelo de tubulação AI e o de Towler e Sinnott, em R\$/m



Fonte: elaborado pelos autores

A inflexão no modelo dos autores reflete a mudança de parâmetros entre as duas faixas de diâmetros (1" – 8" e 10"- 24"). O uso deste artifício se fez necessário por Towler e Sinnott (2008) para cobrir todo o range de abrangência do modelo. Apesar da vantagem de incluir diâmetros maiores (> 12"), o modelo da literatura apresenta a desvantagem, em comparação ao deste trabalho, de apresentar esta anomalia entre 8" e 10", uma vez que na realidade os custos continuam aumentando de um diâmetro para o outro.

A discrepância apresentada entre as curvas, apesar de pequena, é esperada devido às particularidades de custos de material e montagem no Brasil e nos Estados Unidos. Estas diferenças motivaram o presente estudo, para que se dispusesse de parâmetros representativos de preços brasileiros.

5 Conclusões

Os resultados da linearização indicam que o modelo da **Equação (3)** representa adequadamente a relação entre custo e diâmetro da tubulação. O R^2 ajustado da regressão (R^2 ajustado = 84% para AC; R^2 ajustado = 71% para AI) mostra que os dados se ajustam bem à reta da **Equação (4)**.

Como resultado da reavaliação dos parâmetros do modelo por regressão linear foram gerados dois conjuntos de parâmetros: um para tubos de aço carbono e um para tubos em aço inox. Para

compor os demais custos de tubulação, foram sugeridos coeficientes que contabilizem os custos de acessórios, conexões e válvulas sobre tubos. O custo de montagem foi computado na forma de uma relação linear entre o diâmetro da tubulação e seu custo linear total.

O modelo final proposto segue a forma da **Equação (10)**, corrigido pelo Índice de Preços IPCA e os parâmetros regredidos encontram-se na **Tabela 10, 12 e 14**.

A margem de erro do modelo proposto (35,9 para aço carbono e 40,8% para aço inox) atendeu o critério requerido em FEL 1 ($\leq 40\%$) para estimativa custo de tubulação no Brasil, conforme objetivo deste trabalho. A margem de erro do modelo, composta de diversas fontes de incerteza, está caracterizada na **Tabela 15**.

A comparação do custo total da disciplina de tubulação com os resultados convertidos do modelo de Towler e Sinnott (2008) mostrou que o modelo disponível na literatura não representa adequadamente os custos nacionais para tubos entre 8 e 10", onde foram observadas diferenças de 23 – 36% para o modelo proposto.

Alguns pontos de atenção discutido ao longo do trabalho devem ser ressaltados:

- Um fator importante na estimativa de custos no Brasil é a região onde o projeto está sendo realizado: devido à heterogeneidade do país, o impacto das diferenças de remuneração pode ser significativo no custo de montagem;
- O poder de compra da empresa e o tamanho do projeto têm papel relevante no custo final: grandes volumes de compra tendem a conferir poder de negociação ao comprador e reduzir o preço de material/ montagem;
- Uma generalização feita neste trabalho refere-se à unificação de materiais de nobrezas diferentes (A1 304/304 L/316/316 L) dentro de uma mesma categoria "aço inox". Isso foi feito com objetivo de ganhar simplicidade e representatividade do modelo, porém sabe-se que há pequenas diferenças no custo de cada um destes aços;
- Por último, sabe-se que os modelos de custo devem ser reavaliados eventualmente, mesmo que corrigidos por índices adequados, uma vez que mudanças tecnológicas, novos métodos de fabricação ou leis trabalhistas do setor podem afetar demasiadamente a precisão dos resultados.

Conclui-se que o objetivo deste trabalho foi atingido: obter modelos simples e de rápida aplicação para estimativa de custos de tubulação no Brasil, que usasse apenas fatores de capacidade familiares ao engenheiro de processo, com precisão coerente com a fase FEL 1 de projeto.

6 Referências

ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF COST ENGINEERING-AACE. **Skills & knowledge of cost engineering**. 5. ed. Morgantown: AACE International, 2012.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxas de câmbio**. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp>. Acesso em: 02 set. 2017.

BARBOSA, P. T.; PINHEIRO, N. P. M.; SANTOS JUNIOR, W L. Metodologia FEL: sua importância na avaliação de riscos e redução de impactos em escopo, tempo e custo de projetos complexos de engenharia. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 33, 2013, Salvador. **Anais...** Salvador: ENGEPE, 2013. p. 1 - 17.

CHEMICAL ENGINEERING: **essentials for the CPI professional**. Albany: Elsevier, Apr. 2018.

CHILTON, C. H. Six-tenths Factor Applies to Complete Plant Costs. **Chemical Engineering**, v. 57, p. 112-114, Apr. 1950.

CONFORTO, S; SPRANGER, M. **Estimativas de custos de investimentos para empreendimentos industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2008. 332p.

CONJUNTURA ECONÔMICA. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2015 - 2016. (Mensal).

GREEN, D. W.; PERRY, R. H. **Perry's chemical engineers' handbook**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

GUTHRIE, K M. Capital cost estimating. **Chemical Engineering**, [s.l.], v. 76, n. 6, p.114-142, Mar. 1969.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA. Fundação Getúlio Vargas. **IGP**. Disponível em: <http://portalibre.fgv.br/main.jsp?lumChannelId=402880811D8E34B9011D92B6B6420E96>. Acesso em: 05 nov. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Série histórica do IPCA**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultseriesHist.shtm. Acesso em: 24 abr.2017.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

TOWLER, G.; SINNOTT, R. **Chemical engineering design: principles, practices and economics of plant and process design**. Burlington:[s.n.] , 2008. 1237 p.

WILLIAMS, R. Six-tenths factor aids in approximating costs. **Chemical Engineering**, [s.l.], v. 54, p.124-125, Dec. 1947

xx.xxxxx/xxxx-xxxx-xxxx-x

