



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Oktober Fórum 2005 – PPGEQ



## ESTIMATIVA DE CUSTOS DE EQUIPAMENTOS

Luis Eduardo Brose Piotrowicz<sup>1</sup>, Argimiro R. Secchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Integração, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP)  
Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,  
E-MAIL: brose@enq.ufrgs.br

**Palavras Chaves:** Modelagem, custos, equipamentos.

**Resumo:**

Este trabalho consiste na modelagem de custos de equipamentos, utilizando métodos de estimativa disponíveis na literatura, para a construção de uma biblioteca de modelos a ser utilizada no desenvolvimento do simulador do Projeto ALSOC. O investimento de capital requerido em qualquer processo industrial, é parte importante e determinante de qualquer projeto de engenharia. O custo de compra de equipamentos é à base de diversos métodos de estimativa de custos de projetos preliminares. A estimativa de custos é feita em duas etapas: primeiro calculando o tamanho físico do equipamento e, segundo fazendo a estimação do custo propriamente dita. Aqui o tamanho do equipamento será utilizado para a determinação do seu valor capital e operacional utilizando os métodos de estimação. Na literatura, são mais explorados os métodos de estimação de custos até uma etapa preliminar de projeto, devido às peculiaridades de cada processo individualmente. Métodos gráficos para estimativa de custo de equipamentos são mais comumente encontrados, porém são limitados para determinados projetos específicos. Os modelos existentes para custos de equipamentos podem ser multiplamente usados para diferentes tipos de equipamentos, estando mais associados a sua construção e não a sua função. Um dos fatores a considerar nas estimativas de custos de equipamentos, além do tipo e tamanho, é a espessura da parede para resistir às condições operacionais. O tipo de material de construção é muito influente na hora da determinação do custo do equipamento. Os modelos utilizados seguem o método de Corripio (1982) para cálculos de custo capital de trocadores de calor, vasos de pressão, tanques de estocagem, torres de destilação e absorção, etc. Estes modelos são fundamentados no cálculo de um custo básico, corrigido por fatores de custos relativos a variações do equipamento, como pressão de trabalho e materiais de construção referidos no projeto. Para estimativa de custos operacionais é utilizado o método de Ulrich (1992), que considera o preço operacional do equipamento como sendo o preço das utilidades exigidas para o seu funcionamento. Neste modelo são computados preços de utilidade de dois parâmetros prontamente disponíveis: um índice de inflação importante e o preço do combustível utilizado. Com esta técnica, é possível localizar e prever o valor da utilidade com precisão, até mesmo em mercados voláteis. Com a implementação destes modelos no simulador, será possível formular problemas de otimização para a síntese de processos e melhoria de condições operacionais, tais como a redução do consumo energético e o melhor aproveitamento de utilidades.



# Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

## 1 INTRODUÇÃO

O investimento de capital requerido em qualquer processo industrial é parte importante e determinante de qualquer projeto de engenharia. São realizadas estimativas de custos importantes para uma variedade de propósitos. Estes incluem desde a medida de viabilidade econômica de projetos, avaliação de oportunidades e alternativas de investimento, seleção de prováveis alternativas de projeto de processo para torná-lo mais lucrativo, planejamento de apropriações importantes, orçamento e controle de despesas significativas, até a avaliação de ofertas competitivas para construir plantas novas ou remodelar a existente [9]. A precisão geralmente requerida de estimativas segue a ordem como apresentada neste parágrafo, onde é a menor precisão para o primeiro, a medida de viabilidade econômica de projetos, e a maior para o último, a avaliação de ofertas competitivas. Claro que, o propósito da estimativa determina a precisão requerida e, em troca, quanto tempo e dinheiro estão sendo gastos nisso.

O custo de compra de equipamentos é à base de diversos métodos de estimativa de custos de projetos preliminares. O estudo destes custos será o pilar de todo o trabalho desenvolvido, bem como seus custos operacionais. Este trabalho, no que se refere aos modelos de estimativa de custos de equipamentos, foi destinado à construção de um banco de dados e de fontes de informação contínua a respeito do assunto, abordando os seguintes tópicos para cada equipamento:

### Custo capital:

- Básico – Somente o equipamento;
- Acessórios;
- Instalação;
- Utilidades.

### Custo Operacional:

- Mão-de-obra;
- Energia consumida;
- Manutenção;
- Depreciação;

Estimativas de custo foram por muito tempo determinadas com uma variedade de nomes e classificações diferentes. Para unificar os nomes e designações numéricas, a *American Assn. of Cost Engineers* [9] preparou uma lista dos seguintes tipos de estimativa e precisões prováveis:

Estimativa por Ordem de Magnitude (também conhecido como Relação ou Viabilidade): Este tipo de estimativa confia em informação de custo tipicamente para um processo completo levado de plantas previamente construídas. Este valor é ajustado usando fatores de escala apropriados, para capacidade e para inflação, provendo o custo importante calculado.

Precisão: Alcance<sup>1</sup> +40% a -20%

Estimativa Estudada (também conhecido como de Equipamento Principal): Este tipo de estimativa utiliza uma lista do equipamento principal a ser usado no processo. Isto inclui todas as bombas, compressores e turbinas, colunas e vasos, refervedores e trocadores de calor. Cada pedaço de equipamento é aproximadamente calculado e o custo determinado. O custo total de equipamento é determinado pela soma dos componentes para dar o custo importante calculado.

Precisão: Alcance +30% a -20%

Estimativa de Projeto Preliminar (também conhecido como Âmbito): Este tipo de estimativa requer uma classificação segundo o tamanho mais preciso do equipamento usado na estimativa estudada. Além disso, um plano aproximado do equipamento é feito junto com estimativas de custos de transporte, instrumentação e exigências elétricas. Nesta etapa são calculadas as utilidades.

Precisão: Alcance +25% a -15%

Estimativa Definitiva (também conhecido como Controle de Projeto): Este tipo de estimativa requer especificações preliminares para todo o equipamento, utilidades, instrumentação, elétrico, e instalações no local.

Precisão: Alcance +15% a -7%

Estimativa Detalhada (também conhecido como Firmada ou Contratante): Este tipo de estimativa requer engenharia completa do processo e todos os *offsets* relacionados e utilidades. Vendedor para todos os artigos caros terá sido obtido. Ao término de uma estimativa detalhada a planta está pronta para ir para a fase de construção.

---

<sup>1</sup> O alcance de precisão indica que pode ser esperado que a estimativa de custo importante valha entre os limites mostrados. Por exemplo, a ordem de estimativa de magnitude mostra um alcance de precisão entre +40% a -20%. O custo atual pode ser esperado que uma planta química valha entre 40% mais alto e 20% abaixo que a estimativa predita.



# Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

Precisão: Alcance +6% a -4%.

A estimativa mais precisa do custo de compra de um equipamento principal é provida por uma citação de preço atual de um vendedor satisfatório (vendedor de equipamento). A próxima melhor alternativa usará valores dados em um equipamento previamente comprado do mesmo tipo. Outra técnica, suficientemente precisa para estudo e estimativa de custos preliminares, utiliza métodos de estimativas de custos diversos e gráficos sumários disponíveis para vários tipos de equipamento comum. Esta última técnica é usada para estimativas de estudo enfatizadas neste texto e será discutida em detalhes. Os métodos gráficos de estimativa de custos são mais comumente encontrados na literatura, porém são limitados para determinados projetos específicos.

A estimativa de custos é feita em duas etapas. Primeiro classificando segundo o tamanho físico do equipamento, o que inclui cálculos de atributos físicos (capacidade, altura, área de seção reta, pressão e temperatura de operação, material de construção, etc). Segundo fazendo a estimativa do custo, aqui o tamanho do equipamento será utilizado para a determinação do seu valor capital e operacional utilizando os métodos de estimativa.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem por finalidade a construção de uma biblioteca de modelos de estimativa de custos de equipamentos, estando associado a um projeto maior que utiliza o Simulador de processos EMSO e sua linguagem de programação orientada a objetos (Projeto ALSOC). O simulador EMSO tem uma linguagem de programação que permite para o usuário escrever modelos matemáticos quase como eles apareceriam no documento impresso. Em adição, o idioma é completamente objeto-orientado, o que facilita ao usuário no desenvolvimento de modelos complexos compondo-os com pequenos modelos existentes, ou desenvolvendo modelos específicos a partir de modelos pré-existentes.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão mostrados alguns modelos para estimativa de custo, capital e operacional, retirados da literatura e que estão sendo implementados no simulador para obter os primeiros resultados e avaliar a eficiência destes modelos.

### Custo de Trocadores de Calor

Este modelo segue o Método de Corripio [1] para cálculos de custo capital de trocadores de calor de casco e tubo. Ele é fundamentado no cálculo de um custo básico, corrigido por fatores de custos relativos a variações de modelos, pressão de trabalho e material de construção, referidos no projeto destes equipamentos.

O custo básico ( $C_B$ ) é calculado para trocadores de calor de casco e tubo de cabeça flutuante feito de aço carbono e projetado para uma pressão  $700kPa$ , tendo como parâmetro a área de troca térmica. Correlações de fator de custo para o tipo de equipamento ( $F_D$ ), para a pressão de projeto ( $F_P$ ) e para materiais de construção ( $F_M$ ) são determinadas tendo a área de troca térmica como parâmetro. A área de troca térmica é dada em metros quadrados ( $m^2$ ), entre os limites de 14 e  $1100m^2$ . Neste modelo são correlacionados custos de trocadores de calor de casco e tubo apenas com a área de transferência de calor. Isto contrasta com outros procedimentos de estimativa de custo que levam em conta o diâmetro do casco, número e comprimento dos tubos, tipos de cabeças e outros detalhes de construção. Para esta precisão de correlação simples de custo, a área de troca térmica é suficiente para estimativas de custo preliminares.

O custo capital de um trocador de calor ( $C_E$ ) é calculado da seguinte forma.

$$C_E = C_B F_D F_P F_M$$

O custo básico ( $C_B$ ) é calculado com a expressão abaixo, e tem como referência trocadores de calor de casco e tubo com cabeça flutuante, feito em aço carbono e projetado para uma pressão de  $700kPa$ .

$$C_B = \exp [8,202 + 0,01506(\ln A) + 0,06811 (\ln A)^2]$$

Fatores de custo para tipos de trocadores:

$$\text{Fixed-head: } F_D = \exp [-0,9003 + 0,0906 (\ln A)]$$

$$\text{Kettle reboiler: } F_D = 1,35$$

$$\text{U-tube: } F_D = \exp [-0,7844 + 0,0830 (\ln A)]$$

Fatores de custos para pressão de projeto:

$$700 \text{ a } 2100 \text{ kPa: } F_P = 0,8955 + 0,04981 (\ln A)$$

$$2100 \text{ a } 4200 \text{ kPa: } F_P = 1,2002 + 0,07140 (\ln A)$$

$$4200 \text{ a } 6200 \text{ kPa: } F_P = 1,4272 + 0,12088 (\ln A)$$



# Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

As correlações para os fatores de material de construção ( $F_M$ ) são listadas na Tabela 1 para nove tipos de materiais de construção, e seus fatores são relacionados pela equação abaixo.

$$F_M = g_1 + g_2 (\ln A)$$

**Tabela 1.** Fator de custo para diferentes materiais de construção de trocadores de calor.

| Material           | $g_1$  | $g_2$   |
|--------------------|--------|---------|
| Aço inoxidável 316 | 0,8608 | 0,23296 |
| Aço inoxidável 304 | 0,8193 | 0,15984 |
| Aço inoxidável 347 | 0,6116 | 0,22186 |
| Níquel 200         | 1,5092 | 0,60859 |
| Monel 400          | 1,2989 | 0,43377 |
| Inconel 600        | 1,2040 | 0,50764 |
| Incoloy 825        | 1,1854 | 0,49706 |
| Titânio            | 1,5420 | 0,42913 |
| Hastelloy          | 0,1549 | 1,51774 |

### Custos de Tanques de Estocagem

Este modelo segue o método de Corripio [1] para cálculos de custo capital de tanques de estocagem. Ele é fundamentado no cálculo de um custo básico, corrigido por um fator de custo relativo à variação do material de construção deste equipamento.

O custo básico ( $C_B$ ) é calculado para tanques de estocagem fabricados em aço carbono com cobertura cônica e o fundo plano, utilizando duas correlações: uma para o tanque comprado pronto, e outra para o fabricado no local da instalação da planta industrial. O método de cálculo de custo destes equipamentos tem como parâmetro a capacidade (volume) de estocagem. O fator material de construção ( $F_M$ ) para quatorze materiais diferentes é mostrado na Tabela 2. O custo dos tanques fabricados na planta incluiu o custo de plataformas, escadas e corrimão, mas não das fundações e outros materiais de instalação, (instrumentação, elétrico, etc.). O custo de tanques comprados prontos, não incluiu nenhum dos materiais de instalação. O volume deve ser especificado em metros cúbicos ( $m^3$ ), com os limites para o tanque comprado pronto de 5 a  $80m^3$ , e para os tanques fabricados na planta de 80 a  $45000m^3$ . São correlacionados custos de tanques de armazenamento utilizando os volumes totais, que são calculados com o tempo de residência, tendo um limite de sobra de capacidade de 20% e taxa de fluxo volumétrico. O último é determinado dos cálculos de balanço material e de energia. Neste modelo é omitido do procedimento de estimação do

custo, o número e o tamanho de bocais e flanges e outros detalhes de projeto. Estes detalhes causam variações em custo que normalmente estão dentro da precisão de estimativas preliminares. Estes acessórios podem ser calculados separadamente por métodos gráficos.

O custo capital de um tanque de estocagem ( $C_E$ ) é calculado da seguinte forma.

$$C_E = C_B F_M$$

O custo básico ( $C_B$ ) é calculado com as expressões abaixo, e tem como padrão tanques de estocagem fabricados em aço carbono com cobertura cônica e fundo chato.

Para tanques comprados prontos.

$$C_B = \exp[7,994 + 0,6637 (\ln V) - 0,063088(\ln V)^2]$$

Para tanques fabricados na planta.

$$C_B = \exp[9,369 - 0,1045(\ln V) + 0,045355(\ln V)^2]$$

**Tabela 2.** Fatores de custo de diversos materiais de construção para tanques de estocagem.

| Material de construção              | Fator de custo $F_M$ |
|-------------------------------------|----------------------|
| Aço inoxidável 316                  | 2,7                  |
| Aço inoxidável 304                  | 2,4                  |
| Aço inoxidável 347                  | 3,0                  |
| Níquel                              | 3,5                  |
| Monel                               | 3,3                  |
| Inconel                             | 3,8                  |
| Zircônio                            | 11,0                 |
| Titânio                             | 11,0                 |
| Tijolo e borracha ou tijolo e       | 2,75                 |
| Poliéster com aço                   |                      |
| Aço e borracha                      | 1,9                  |
| Poliéster, fibra de vidro-reforçado | 0,32                 |
| Alumínio                            | 2,7                  |
| Cobre                               | 2,3                  |
| Concreto                            | 0,55                 |

### Custo de Vasos de Pressão

O custo de vasos de pressão inclui custos para o casco do recipiente, bocais, flanges, saias e sela.

Pikulik e Diaz [6] apresentaram um método de estimação de custo que envolve a especificação do número e tamanhos de bocais e flanges, e da saia para recipientes verticais ou os de sela para



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Oktober Fórum 2005 – PPGEQ



recipientes horizontais. Neste modelo, que segue o método de Corripio [2] para cálculo de custos de vasos de pressão, tais especificações detalhadas para cada recipiente não são necessárias. O custo do recipiente foi correlacionado em termos dos parâmetros que dependeram mais de variáveis do escoamento (taxas de fluxos, densidades, tempo de residência, velocidades de separação vapor-líquido, etc.) do que em detalhes de construção. Isto é possível porque os dados de custo para recipientes incluíram o número padrão e tamanhos de bocais, flanges, saia e sela recomendados pelo Código da ASME. Estes variaram com o diâmetro, comprimento e taxa de pressão do recipiente. O custo das plataformas e escada de mão foi correlacionado separadamente do custo do recipiente. O custo de recipiente para equipamento comprado pronto, inclui o custo de bocais, flanges, apoios e pintura principal de fábrica.

Da análise de correlação de dados de custo para 58 recipientes horizontais e 12 recipientes verticais, este modelo de custo de vasos de pressão correlaciona igualmente bem com o peso do recipiente (inclusive acessórios) e com o peso de concha dos recipientes. Este peso pode ser calculado diretamente do diâmetro, comprimento tangente a tangente, e pressão de projeto do vaso de pressão. O custo de recipiente é correlacionado contra o peso do casco calculado. O custo das plataformas, escadas e corrimãos são correlacionados com o diâmetro para recipientes horizontais e com o diâmetro e o comprimento para recipientes verticais.

O custo básico ( $C_B$ ) é calculado para vasos de pressão construídos em aço carbono, tendo como parâmetro o peso total do equipamento ( $W_S$ ). O peso do vaso de pressão é determinado em quilos ( $kg$ ), respeitando os limites para vasos horizontais de 369 a 415000 $kg$  e para vasos verticais de 2210 a 103000 $kg$ . Os custos para escadas, plataformas e corrimão ( $C_A$ ), são calculados tendo como parâmetro o diâmetro interno para vasos horizontais e o diâmetro interno e o comprimento total para os vasos verticais. O diâmetro interno ( $D_i$ ) é determinado em metros ( $m$ ) com um limite de 0,92 a 3,66 $m$  para vasos horizontais e de 1,83 a 3,05 $m$  para vasos verticais. O comprimento ( $T_L$ ) é determinado em metros ( $m$ ) com um limite de 3,66 a 6,10 $m$  apenas em vasos verticais. A espessura ( $T_S$ ) é determinada em milímetros ( $mm$ ) e não existe limite inferior nem superior. É utilizado também um fator de custo para o material de construção do

equipamento.

O custo capital de um vaso de pressão ( $C_E$ ) é calculado da seguinte forma.

$$C_E = C_B F_M + C_A$$

Custo básico ( $C_B$ ) para vasos de pressão horizontais :

$$C_B = \exp[8,114 - 0,16449(\ln W_S) + 0,04333(\ln W_S)^2]$$

Custo básico ( $C_B$ ) para vasos de pressão verticais :

$$C_B = \exp[8,600 - 0,21651(\ln W_S) + 0,04576(\ln W_S)^2]$$

Custo para escadas, plataformas e corrimão ( $C_A$ ), para vasos horizontais :

$$C_A = 1288,3 D_i^{0,20294}$$

Custo para escadas, plataformas e corrimão ( $C_A$ ), para vasos verticais :

$$C_A = 1017,0 D_i^{0,73960} T_L^{0,70684}$$

O peso do equipamento é calculado da seguinte maneira.

$$W_S = p D_i (T_L + 0,8116 D_i) T_S$$

As correlações para os fatores de material de construção ( $F_M$ ) são listadas na Tabela 3 para oito tipos de materiais de construção.

**Tabela 3.** Fator de custo para diferentes materiais de construção de vasos de pressão.

| Material           | Fator de custo ( $F_M$ ) |
|--------------------|--------------------------|
| Aço inoxidável 304 | 1,7                      |
| Aço inoxidável 316 | 2,1                      |
| Carpenter 20CB-3   | 3,2                      |
| Níquel 200         | 5,4                      |
| Monel 400          | 3,6                      |
| Inconel 600        | 3,9                      |
| Incoloy 825        | 3,7                      |
| Titânio            | 7,7                      |

### Custo de Torres de Destilação e Absorção

O custo de torres de destilação e absorção inclui custos para o casco do recipiente, bocais, flanges, plataformas, escadas e internos. Neste modelo, que



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Oktober Fórum 2005 – PPGEQ



segue o método de Corripio [3] foram comparadas correlações entre 200 torres de destilação, com divergências de 10,63% para o casco e 3,35% para plataformas e escadas. Para a correlação de 200 torres de absorção as divergências padrões são de 9,88% para casco e de 8,88% para plataformas e escadas. O modelo baseia-se no cálculo do custo do casco das torres tendo como parâmetro o peso corrigido por um fator de custo para o material de construção conforme apresentado na Tabela 4. O custo das plataformas, escadas e corrimões são calculados tendo como parâmetro o diâmetro do casco das torres.

O custo básico ( $C_b$ ) é calculado para o casco construído em aço carbono, tendo como parâmetro o peso total do equipamento ( $W_s$ ) para torres de destilação e absorção separadamente. O peso do casco das torres vaso de pressão é determinado em quilos (kg), respeitando os limites para torres de destilação de 4090 a 247000kg e para torres de absorção de 1930 a 445000kg. O custo para escadas, plataformas e corrimão ( $C_{pl}$ ), é calculado tendo como parâmetro o diâmetro interno ( $D_i$ ) e a altura ( $L_t$ ) do casco, ambos dados em metros (m) para as torres. O diâmetro interno das colunas está sujeito a um intervalo de 0,91 a 7,32m para torres de destilação e de 0,91 a 6,40m para torres de absorção. A altura do casco também esta sujeita a limites de 17,57 a 51,82m para torres de destilação e de 8,23 a 12,19m para torres de absorção. No cálculo do custo base do casco das torres de destilação é acrescentado mais um termo devido à pressão que estará sujeito o equipamento. Este termo tem como parâmetro a espessura do fundo ( $T_b$ ) e a espessura da parede ( $T_p$ ) para resistir à pressão de projeto.

O custo total do casco das torres é calculado da seguinte forma.

$$C_s = C_b F_M$$

Custo base para o casco de torres de destilação tendo como referência torres construídas em aço carbono:

$$C_b = \exp[6.950 + 0.1808(\ln W_s) + 0.02468(\ln W_s)^2 + 0.01580(L_t/D_i) \ln(T_b/T_p)]$$

Custo de plataformas e escadas:

$$C_{pl} = 834.86 D_i^{0.63316} L_t^{0.80161}$$

Custo base para o casco de torres de destilação tendo como referência torres construídas em aço carbono:

$$C_b = \exp[6.448 + 0.21887(\ln W_s) + 0.02297(\ln W_s)^2]$$

Custo de plataformas e escadas:

$$C_{pl} = 1017.0 D_i^{0.73960} L_t^{0.70684}$$

#### Custo de Torres de Pratos.

Correlações para o custo básico de pratos valvulados construídos em aço carbono ( $C_{bt}$ ) são calculadas como funções de diâmetro da torre ( $D$ ), e corrigidas com vários fatores de custo, sendo um para material de construção, um para a variação do tipo de prato, como apresentado na Tabela 4, e um para a variação de números de pratos da coluna. O diâmetro da torre é dado em metros (m) respeitando os limites de 0,6 a 4,8m.

$$C_{bt} = 278.38 \exp(0.1739 D)$$

Fator de custo para material de construção ( $F_{TM}$ ) para quatro tipos de materiais utilizados para confecção de pratos valvulados.

$$304 \text{ stainless steel } F_{TM} = 1.189 + 0.1894 D$$

$$316 \text{ stainless steel } F_{TM} = 1.401 + 0.2376 D$$

$$\text{Carpenter 20CB-3 } F_{TM} = 1.525 + 0.2585 D$$

$$\text{Monel } F_{TM} = 2.306 + 0.3674 D$$

Se o projeto de uma torre de destilação contempla uma torre com menos de vinte pratos, o fator de custo para o número de pratos ( $F_{NT}$ ) recomendado por Enyedy [7] deve ser aplicado. Este fator tem como parâmetro o número de pratos da torre ( $N_T$ ).

$$F_{NT} = 2.25 / (1.0414)^{N_T}$$

**Tabela 4.** Fator de custo para o tipo de prato.

| Tipo de prato             | Fator ( $F_{TT}$ ) |
|---------------------------|--------------------|
| Valvulado                 | 1.00               |
| Grade                     | 0.80               |
| Bubble cap                | 1.59               |
| Perfurado (com downcomer) | 0.85               |

O custo total de uma torre de pratos é calculado conforme a equação apresentada a seguir.

$$C_t = C_b F_M + N_T C_{bt} F_{TM} F_{TT} F_{NT} + C_{pl}$$



# Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

## Custo de Torres de Recheio.

Estimativas do custo de torres recheadas estão baseadas no volume do recheio requerido e seu custo por unidade de volume ( $C_p$ ), apresentados na Tabela 5. Para isso deve ter conhecimento da altura total necessária do recheio dentro da torre ( $H_p$ ). O custo total de uma torre de recheio, considerando o custo do casco, do recheio e das escadas e plataformas, é determinado pela equação a seguir.

$$C_t = C_b F_M + (p D_i^2 / 4) H_p C_p + C_{pl}$$

**Tabela 5.** Custo do recheio por unidade de volume.

| Tipo de recheio                     | \$/m <sup>3</sup> |
|-------------------------------------|-------------------|
| Anéis de Rasching de cerâmica, 1 in | 510               |
| Anéis de Rasching de metal, 1 in    | 840               |
| Selas Intalox, 1in                  | 510               |
| Anéis de Rasching de cerâmica, 2 in | 360               |
| Anéis de Rasching de metal, 2 in    | 600               |
| Anéis de Pall de metal, 1 in        | 840               |
| Selas Intalox, 2 in                 | 360               |
| Anéis de Pall de metal, 2 in        | 600               |

## Custo de Utilidades

Este modelo segue o método de Ulrich [4] para calcular custos de utilidade como vapor, água de resfriamento, ar comprimido e outros. Ele considera o preço operacional do equipamento como sendo o preço das utilidades exigidas para o seu funcionamento. Neste modelo são computados preços de utilidade de dois parâmetros prontamente disponíveis; um índice de inflação importante e o preço do combustível utilizado. Com esta técnica, é possível localizar e prever o valor da utilidade com precisão, até mesmo em mercados voláteis.

Ao calcular custos importantes, os economistas de processo figuram no custo de inflação usando índices familiares, como o *Chemical Engineering Plant Cost Index (CE)*, o *Marshall & Swift Equipment Cost Index*, o *Engineering News-Record Index* e o *Nelson Refinery Index* [4]. Os dois primeiros são informados mensalmente na última página da Revista *Chemical Engineering* junto com vários outros indicadores econômicos. Em uma planta que usa energia elétrica de um fornecedor externo, por exemplo, é possível fixar custos de utilidades que usam dados históricos com bastante precisão, multiplicado por um destes índices. Calcular o preço de eletricidade produzida com combustível fóssil, porém, não é tão fácil, porque o custo do combustível e frequentemente instável. Perturbações políticas e outros desastres artificiais

ou naturais alteram o preço dos combustíveis, que variam como uma função do tempo e local nos quais interferem no valor do combustível comprado. Este modelo apresenta uma solução para este problema de volatilidade de preço da energia dividindo custos de utilidade em duas partes; uma dependente de índices inflacionários convencionais, e a outra dependente do preço de combustível.

O preço unitário da utilidade ( $C_u$ ) é expresso na unidade da utilidade que se quer calcular, \$/kWh de eletricidade, \$/m<sup>3</sup> de água de resfriamento, ou \$/kJ de capacidade refrescante, etc, por exemplo. O preço do combustível ( $C_f$ ) é expresso em dólares por gigajoule (GJ),  $a$  e  $b$  representam os coeficientes de custo para cada utilidade. São apresentados coeficientes de custo para várias utilidades convencionais nas Tabelas 6 e na Tabela 7. Eles incluem: eletricidade, ar comprimido, ar de instrumento, água refrescante, desmineralização da água, água potável, refrigerantes, e outros. Embora não é considerado que desperdício e o tratamento de efluentes sejam utilidades convencionais, mas os seus custos são avaliados freqüentemente da mesma maneira, assim são incluídos coeficientes para eles. Para esta precisão de correlação simples de custo, os parâmetros apresentados são suficientes para estimativas de custo preliminares.

O custo capital de uma utilidade ( $C_u$ ) é calculado da seguinte forma.

$$C_u = [a (CE Plant Cost Index)] + [b C_f]$$

A correlação para os coeficientes de utilidades é apresentada nas Tabelas 6 e na Tabela 7. Alguns coeficientes apresentam limites superiores e inferiores para os parâmetros relacionados, nos quais são comprovadas as validades do modelo. Tais limites estão expressos juntamente nas tabelas mencionada, com a sua utilidade de referência.

## 4 CONCLUSÕES

Todos os modelos apresentados são de fácil utilização e compreensão, sendo estes de grande utilidade para a estimativa de custos até uma estimativa de projeto preliminar, com uma margem de erro em torno de 10% para estimativas de custo de equipamentos. Esse valor tende a se elevar para estimativas de custo para processos ou instalações industriais se forem utilizados os métodos apresentados por Timmerhaus [8], que estima



# Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

10 Anos

valores para projetos conceituais e por ordem de magnitude, todos baseados nos custos de compra dos equipamentos principais do empreendimento.

Todos os modelos apresentados neste trabalho serão disponibilizados no simulador EMSO para utilização dos usuários junto ao projeto ALSOC.

**Tabela 6.** Coeficientes de custo para diferentes utilidades com seus limites dos parâmetros relacionados.

| Coeficientes de custos  |  |   |
|---|--|---|
|   | <i>a</i>   | <i>b</i>  |
| <b>Água de resfriamento</b> (\$/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>                     | 0,01 < <i>q</i> < 1,0 m <sup>3</sup> /s  |   |
| Modulo de processo  | 0,0001+(3,0*10 <sup>-5</sup> / <i>q</i> )  | 0,0056  |
| Dentro da planta  | 0,00007+(2,5*10 <sup>-5</sup> / <i>q</i> )   | 0,0056  |
| <b>Água desmineralizada</b> (\$/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>                     | 0,001 < <i>q</i> < 1,0 m <sup>3</sup> /s   |   |
| (Alimentação de caldeira)   |  |   |
| Modulo de processo  | 0,007 + (1,3*10 <sup>-5</sup> / <i>q</i> )   | 0,0022  |
| Dentro da planta  | 0,00035 + (1,2*10 <sup>-5</sup> / <i>q</i> )   | 0,0022  |
| <b>Água potável</b> (\$/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>                             | 0,01 < <i>q</i> < 1,0 m <sup>3</sup> /s  |   |
| Modulo de processo  | 0,0007 + (2,0*10 <sup>-6</sup> / <i>q</i> )  | 0,003   |
| Dentro da planta  | 0,00035 + (2,0*10 <sup>-6</sup> / <i>q</i> )   | 0,003   |
| <b>Água natural, bombeada e filtrada</b>  | 0,001 < <i>q</i> < 1,0 m <sup>3</sup> /s   |   |
| Modulo de processo  | 1*10 <sup>-4</sup> + (2*10 <sup>-7</sup> / <i>q</i> )                                  | 0,002   |
| Dentro da planta  | 5*10 <sup>-5</sup> + (2*10 <sup>-7</sup> / <i>q</i> )                                  | 0,002   |
| <b>Tratamento de efluente</b> (\$/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>                   | 0,01 < <i>q</i> < 1,0 m <sup>3</sup> /s  |   |
| Tratamento primário (Filtração)   |  |   |
| Modulo de processo  | 7*10 <sup>-4</sup> + (2*10 <sup>-7</sup> / <i>q</i> )                                  | 0,002   |
| Dentro da planta  | 5*10 <sup>-5</sup> + (2*10 <sup>-7</sup> / <i>q</i> )                                  | 0,002   |
| Tratamento secundário<br>(Filtração e processo com lodo ativado)                  |  |   |
| Modulo de processo  | 7*10 <sup>-4</sup> + (2*10 <sup>-6</sup> / <i>q</i> )                                  | 0,003   |
| Dentro da planta  | 3,5*10 <sup>-5</sup> + (2*10 <sup>-6</sup> / <i>q</i> )                                | 0,003   |
| Tratamento terciário<br>(Filtração, processo com lodo ativado e processo químico) |  |   |
| Modulo de processo  | 1*10 <sup>-4</sup> + (3*10 <sup>-5</sup> / <i>q</i> )                                  | 0,005   |
| Dentro da planta  | 5*10 <sup>-5</sup> + (3*10 <sup>-5</sup> / <i>q</i> )                                  | 0,005   |
| <b>Água quente, óleo quente ou transferência de calor médio</b>                   | 350 < <i>T</i> < 850K  |   |
| (\$/kJ ou capacidade de aquecimento) <sup>b</sup>                                 | 1000 < <i>Q<sub>H</sub></i> < 20000 kJ/s   |   |
| Modulo de processo  | (7*10 <sup>-7</sup> ) ( <i>T</i> <sup>0,5</sup> )/ <i>Q<sub>H</sub></i> <sup>0,9</sup> | (6,0*10 <sup>-8</sup> ) <i>T</i> <sup>0,5</sup> |
| Dentro da planta  | (6*10 <sup>-7</sup> ) ( <i>T</i> <sup>0,5</sup> )/ <i>Q<sub>H</sub></i> <sup>0,9</sup> | (6,0*10 <sup>-8</sup> ) <i>T</i> <sup>0,5</sup> |

<sup>a</sup> *q* é a capacidade de água auxiliar total em m<sup>3</sup>/s.

<sup>b</sup> *Q<sub>H</sub>* é a capacidade de aquecimento auxiliar total em kJ/s.



# Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

10 anos

**Tabela 7.** Coeficientes de custo para diferentes utilidades com seus limites dos parâmetros relacionados.

|   | Coeficientes de custos   |                              |
|---|--|------------------------------|
|   | <i>a</i>   | <i>b</i>                     |
| <b>Eletricidade (\$/kWh)</b>  |  |                              |
| Comprada de fora da planta  | $1,3 \cdot 10^{-4}$  | 0,010                        |
| Produzida no local e carregada a um modulo de processo                | $1,4 \cdot 10^{-4}$  | 0,011                        |
| Produzida no local e carregada para dentro da planta                  | $4,0 \cdot 10^{-5}$  | 0,011                        |
| <b>Ar comprimido e de secagem (\$/std. m<sup>3</sup>)<sup>a</sup></b> |  |                              |
|   | $0,1 < q < 100 \text{ std. m}^3/\text{s}; 1 < p < 35 \text{ barg}$ |                              |
| Modulo de processo  | $(5,0 \cdot 10^{-5})(q^{-0,30})(\ln p)$                            | $(9,0 \cdot 10^{-4})(\ln p)$ |
| Dentro da planta  | $(4,5 \cdot 10^{-5})(q^{-0,30})(\ln p)$                            | $(9,0 \cdot 10^{-4})(\ln p)$ |
| <b>Ar para instrumentação (\$/std. m<sup>3</sup>)<sup>a</sup></b>     |  |                              |
| Modulo de processo  | $1,25 \cdot 10^{-4}$   | $1,25 \cdot 10^{-3}$         |
| Dentro da planta  | $1,10 \cdot 10^{-4}$   | $1,25 \cdot 10^{-3}$         |
| <b>Vapor de processo (\$/kg)<sup>b</sup></b>                          |  |                              |
|   | $1 < p < 46 \text{ barg}; 0,06 < m_s < 40 \text{ kg/s}$            |                              |
| Modulo de processo  | $2,7 \cdot 10^{-5} / m_s^{0,9}$                                    | $0,0034 (p^{0,05})$          |
| Dentro da planta  | $2,3 \cdot 10^{-5} / m_s^{0,9}$                                    | $0,0034 (p^{0,05})$          |
| <b>Desperdício disponível (\$/kg)</b>                                 |  |                              |
| Desperdícios convencionais sólidos e líquidos                         |  |                              |
| Modulo de processo  | $1 \cdot 10^{-4}$  | --                           |
| Dentro da planta  | $0,5 \cdot 10^{-4}$  | --                           |
| Desperdícios tóxicos e perigosos sólidos e líquidos                   |  |                              |
| Modulo de processo  | $4 \cdot 10^{-4}$  | --                           |
| Dentro da planta  | $3 \cdot 10^{-4}$  | --                           |
| <b>Refrigeração (\$/kJ ou capacidade de refrigeração)<sup>c</sup></b> |  |                              |
|   | $200 < T < 300 \text{ K}; 1 < Q_c < 1000 \text{ kJ/s}$             |                              |
| Modulo de processo  | $6,0 \cdot 10^6 / Q_c (0,7)T^5$                                    | $1,1 \cdot 10^6 / T^5$       |
| Dentro da planta  | $180 / Q_c (0,9)T^3$   | $1,1 \cdot 10^6 / T^5$       |

<sup>a</sup> Os coeficientes aplicam-se aos alcances de *q* e *p* indicados, onde *q* é a capacidade de planta de ar auxiliar total em std. m<sup>3</sup> e *p* é a pressão entregue de ar em bara ou barg.  
<sup>b</sup> *m<sub>s</sub>* é a capacidade auxiliar total da caldeira a vapor em kJ/s.  
<sup>c</sup> *Q<sub>c</sub>* é a capacidade auxiliar total de refrigeração em kJ/s.

## 5 AGRADECIMENTOS

À FINEP e as empresas patrocinadoras do Projeto ALSOC.

## REFERÊNCIAS

- [1] Corripio, Armando B.; Chrien, Katherine S.; Evans, Lawrence B.. "Estimate costs of heat exchangers and storage tanks via correlations", Chem. Eng. (January) (1995) 125–127.
- [2] Mulet, Antonio; Corripio, Armando B.; Evans, Lawrence B.. "Estimate Costs of Pressure Vessels

Via Correlations", Chem. Eng., p.145 (Oct. 5, 1981).

[3] Vatavuk, William M.. "A potpourri of equipment prices", Chem. Eng. (August) (1995) 68–73.

[4] Ulrich, Gael D.. "How to calculate utility costs", Chem. Eng., Feb. 1992, 110-113

[5] Taal, Marcel et al. "Cost estimation and energy price forecasts for economic evaluation of retrofit projects", Applied Thermal Engineering, Volume 23, Issue 14, October 2003, Pages 1819-1835.



# Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

*10 anos*

- [6] Pikukik, Arkadie; Diaz, Hector E. **“Cost estimating for process equipment”**, Chem. Eng. (October) (1977) 106–122.
- [7] Enyedy, G. **“A Computer Based Cost Estimation Service”**, PDQ\$, Inc., Gates Mills, Ohio, 1979.
- [8] Peters, M. S. And K. D. Timmerhaus, **“Plant Design and economics for Chemical Engineers”**, 4<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, New York, 1990.
- [9] Turton, Richard et al. **“Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes”**, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [10] Guthrie, Kenneth M. **“Capital and Operating Costs for 54 Chemical Processes”**, Chem. Eng., 77(13):140 (June 15, 1970).