

## 4

### Métodos Experimentais

#### 4.1.

##### Circuito e Procedimento de Calibração

Foram calibrados com água, em laboratório de calibração da RBC, três medidores ultrassônicos de 3 canais. As calibrações tiveram como objetivo comparar o desempenho dos medidores em instalações com e sem degrau a montante.

A calibração foi realizada em circuito aberto, como indicado no esquema da Figura 4-1.

A calibração de medidores de vazão consiste em passar uma vazão média ou uma quantidade (volume ou massa) pelo medidor e pelo padrão e comparar os valores indicados pelo medidor com os valores do padrão.

O padrão do circuito de calibração é a balança, mas o serviço realizado na calibração foi totalização de volume, e a massa indicada pela balança era convertida em volume.

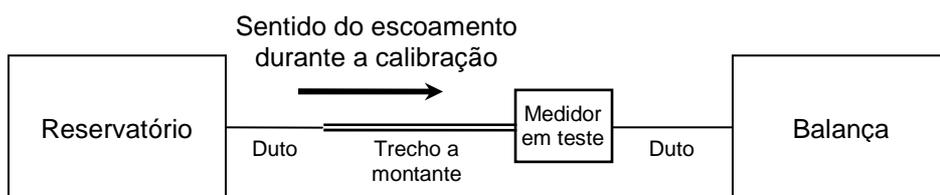


Figura 4-1: Esquema das instalações de calibração.

Cada um dos três medidores foi submetido a duas calibrações e a diferença entre elas foi a troca do trecho reto a montante do medido: em uma calibração, o diâmetro interno do trecho reto e do medidor eram iguais; e na outra, o diâmetro interno do trecho reto era maior 0,36% do que o diâmetro interno do medidor.

A incerteza de expandida, indicada nos certificados de calibração é 0,15% (com nível da confiança de aproximadamente 95% e fator de abrangência igual a

2,0). De acordo com a EA-4/02, o certificado deve indicar a incerteza de medição da calibração.

As calibrações foram realizadas nas vazões de 134 m<sup>3</sup>/h até 1180 m<sup>3</sup>/h. Essas vazões foram definidas em função da faixa do medidor e da faixa de operação do Terminal.

Para que a dispersão dos resultados da calibração reflita a dispersão do medidor, é recomendável que o volume do padrão se mantenha constante. Entretanto, o circuito utilizado (Figura 4-1) não permite fixar o volume do padrão em cada medição.

Os medidores foram calibrados nas seguintes vazões:

- FT-01 (sem degrau): 134 m<sup>3</sup>/h, 300 m<sup>3</sup>/h, 400 m<sup>3</sup>/h, 700 m<sup>3</sup>/h e 1150 m<sup>3</sup>/h;
- FT-01 (com degrau): 134 m<sup>3</sup>/h, 300 m<sup>3</sup>/h, 400 m<sup>3</sup>/h, 700 m<sup>3</sup>/h e 1180 m<sup>3</sup>/h;
- FT-02 (sem degrau): 134 m<sup>3</sup>/h, 350 m<sup>3</sup>/h, 700 m<sup>3</sup>/h e 1200 m<sup>3</sup>/h;
- FT-02 (com degrau): 134 m<sup>3</sup>/h, 350 m<sup>3</sup>/h, 700 m<sup>3</sup>/h e 1174 m<sup>3</sup>/h;
- FT-03 (sem degrau): 134 m<sup>3</sup>/h, 350 m<sup>3</sup>/h, 700 m<sup>3</sup>/h e 1150 m<sup>3</sup>/h;
- FT-03 (com degrau): 134 m<sup>3</sup>/h, 350 m<sup>3</sup>/h, 700 m<sup>3</sup>/h e 1150 m<sup>3</sup>/h.

A proposta foi calibrar os medidores nas mesmas vazões para facilitar a comparação dos resultados. Na calibração do FT-01, foram incluídas duas vazões relativamente próximas, 300 m<sup>3</sup>/h e 400 m<sup>3</sup>/h, por corresponder à faixa de operação usual desse medidor. Na calibração do FT-02 e do FT-03, ao invés dessas duas vazões, apenas a vazão de 350 m<sup>3</sup>/h foi utilizada.

Os medidores foram calibrados com e sem degrau nas mesmas vazões, dentro de variações que não foram significativas para a presente análise.

Assim, cada medidor foi calibrado, nas instalações com e sem degrau, nas vazões indicadas acima. E, para cada vazão, foram realizadas três medições consecutivas de volume.

Para cada uma dessas medições, foram registrados o volume do padrão ( $V_P$ ) e volume do medidor ( $V_M$ ). O medidor tem saída (de pulsos) que indica o volume totalizado, que é corrigido para a condição de referência do laboratório. O padrão é a balança e a massa indicada é corrigida para volume na condição de referência do laboratório. O certificado de calibração indicou os desvios relativos de cada corrida e os desvios relativos médios para cada vazão.

## 4.2.

### Resultados da Calibração

Os medidores calibrados têm especificação do fabricante de erro máximo admissível de  $\pm 0,5\%$  na faixa de 0,5 a 20m/s. A repetitividade especificada pelo fabricante é de  $\pm 0,2\%$ .

Pela RTM-64, um medidor de vazão com esse desempenho poderia estar na classe de exatidão 1.0 ou 1.5, mas não teria desempenho para estar nas classes 0.3 ou 0.5.

A Figura 4-2, Figura 4-3 e Figura 4-4 apresentam os desvios em percentual obtidos na calibração para o FT-01, FT-02 e FT-03, respectivamente.

Nas instalações sem degrau, os desvios encontrados foram de  $-0,48\%$  a  $0,20\%$  para o FT-01, de  $-0,47\%$  a  $0,46\%$  para o FT-02 e  $-0,49\%$  a  $0,18\%$  para o FT-03. Com degrau, os desvios foram de  $-0,10\%$  a  $0,32\%$  para o FT-01, de  $-0,18\%$  a  $0,23\%$  para o FT-02 e de  $-0,18\%$  a  $0,40\%$  para o FT-03.

Esses valores obtidos experimentalmente mostram que os medidores tiveram resultados dentro da faixa de erro máximo indicada pelo fabricante, tanto na instalação com degrau como na instalação sem degrau.

Nas calibrações sem degrau, a maior repetitividade (calculada de acordo com o procedimento da RTM-64) foi de  $0,23\%$  para o FT-01,  $0,52\%$  para o FT-02,  $0,61\%$  para o FT-03. Com degrau, a maior repetitividade para esses medidores foi de  $0,28\%$ ,  $0,35\%$  e  $0,25\%$ , respectivamente.

A repetitividade indicada pelo fabricante inclui o símbolo de  $\pm$  em sua especificação, então a faixa total da repetitividade é de  $0,4\%$ . Sendo assim, os resultados experimentais indicam que, o FT-01 atendeu à especificação do fabricante. Entretanto, o FT-02 não atendeu na instalação sem degrau e o FT-03 não atendeu em ambas as instalações.

O cálculo do desvio padrão, que é necessário no cálculo da incerteza de medição, é aproximadamente a metade do valor de repetitividade. Essa proporção é esperada, pois o desvio padrão indica uma faixa para mais ou para menos.

Os valores de linearidade encontrados na instalação sem degrau foram  $0,42\%$  para o FT-01,  $0,75\%$  para o FT-02,  $0,29\%$  para o FT-03. Na instalação com degrau foram  $0,18\%$  para o FT-1,  $0,16\%$  para o FT-02 e  $0,48\%$  para o FT-03.

Esses medidores operam sem correção da linearidade. Assim, seria recomendável que a linearidade ficasse abaixo de 0,5%.

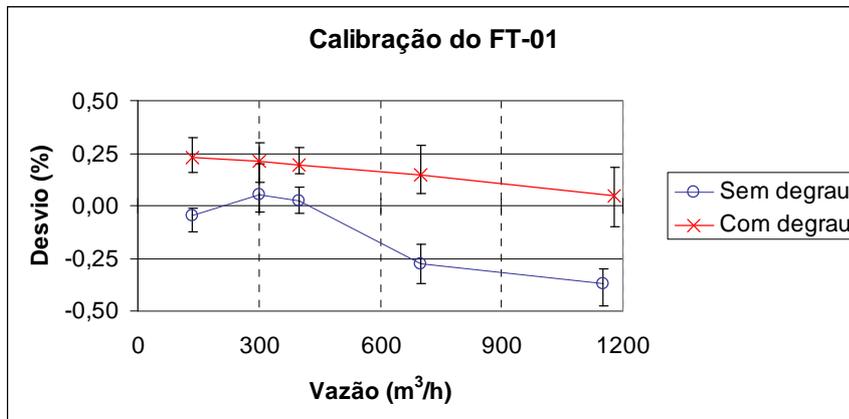


Figura 4-2: Desvios encontrados na calibração do FT-01 em instalação com e sem degrau.

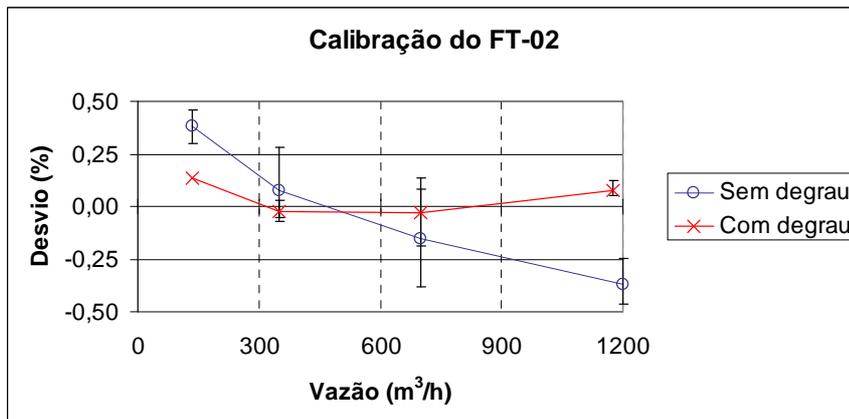


Figura 4-3: Desvios encontrados na calibração do FT-02 em instalação com e sem degrau.

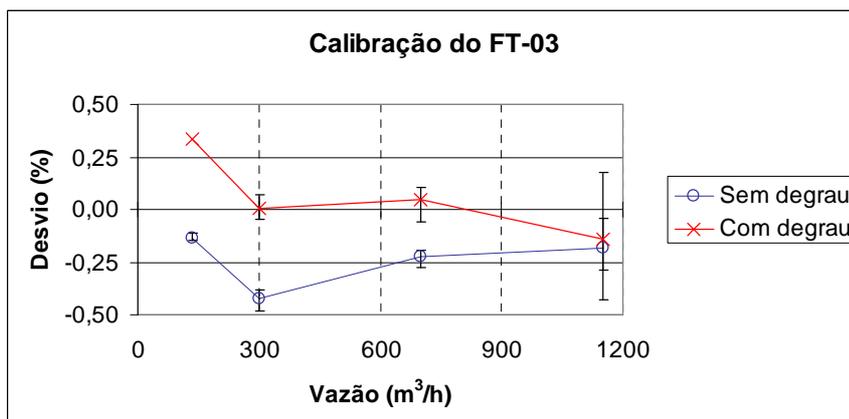


Figura 4-4: Desvios encontrados na calibração do FT-03 em instalação com e sem degrau.

O FT-01 apresentou melhor repetitividade na instalação sem degrau, mas a linearidade ficou significativamente melhor com degrau. O FT-02 apresentou melhor repetitividade e melhor linearidade com a instalação com degrau. E o FT-

03 apresentou melhor repetitividade com degrau e melhor linearidade sem degrau. Assim, não houve um padrão quanto a instalação influir positivamente ou negativamente nos resultados das medições quanto à linearidade e repetitividade.

A Figura 4-5 reúne os resultados dos três medidores, mantendo a discriminação das instalações com e sem degrau. Nas vazões mais elevadas, há uma indicação de mudança de desempenho em função do degrau.

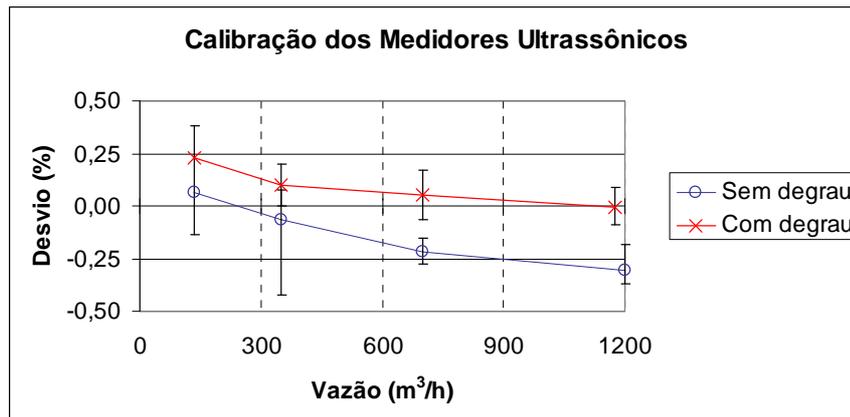


Figura 4-5: Desvios encontrados com os resultados de FT-01, FT-02 e FT-03 em conjunto, em instalação com e sem degrau.

A Figura 4-6 apresenta a diferença entre os desvios obtidos com o degrau e sem o degrau para cada medidor e para os três de medidores. Não há uma correlação clara entre a amplitude das diferenças com a vazão.

Na maioria dos pontos, os volumes obtidos com a instalação com degrau foram maiores do que os volumes obtidos com a instalação sem degrau. A linha indicando os valores médios (em marrom) mostra que a média das diferenças fica entre 0,18% e 0,30%.

Pelo teste de hipótese (com probabilidade de aproximadamente 95%), os resultados dos experimentos para as vazões acima dos 500m³/h (incluindo as vazões 700m³/h até 1200m³/h) indicam que as medições realizadas com degrau são significativamente diferentes dos resultados obtidos sem degrau.

Analisando os resultados por medidor, com a mesma probabilidade, verifica-se que os resultados são diferentes, no FT-01, em 134m³/h, 700m³/h e 1150m³/h; no FT-02, em 134m³/h e 1200m³/h; e no FT-03, em 134m³/h, 300m³/h e 700m³/h.

A dispersão dos resultados da calibração dos três medidores foi acima do esperado e não houve dois medidores com o mesmo padrão de resposta.

Quanto ao degrau, considera-se que a diferença entre a operação com e sem degrau fica entre 0,18% e 0,30%

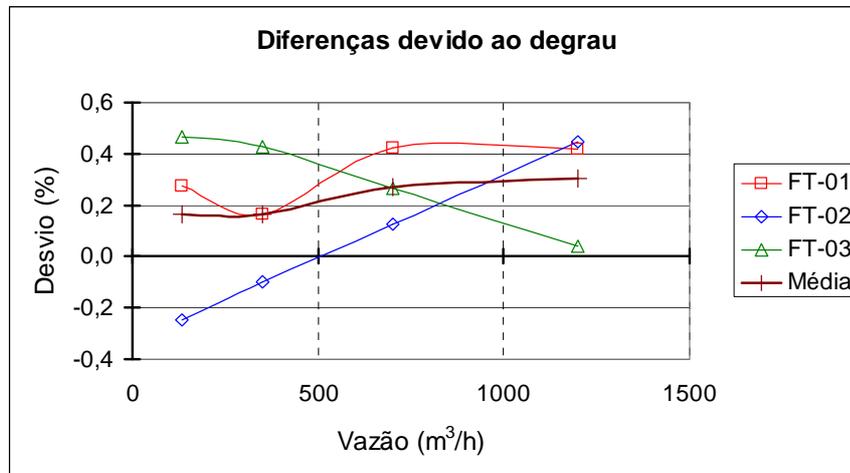


Figura 4-6: Diferença nos resultados da calibração dos medidores em instalação com degrau com relação aos resultados sem degrau.

### 4.3.

#### Incertezas relacionadas à Calibração

O objetivo aqui é avaliar o quanto o resultado da calibração pode influenciar no resultado do medidor.

Entretanto, a calibração identifica os erros sistemáticos que supostamente são corrigidos, com ajustes no próprio medidor ou utilizando correções ou fatores de correção.

Na indústria, nem sempre essa correção é factível e, nesses casos, tem que ser considerada a incerteza devido ao erro sistemático, que não foi corrigido. É avaliado ainda que, mesmo quando o erro sistemático é corrigido, há a incerteza devido à correção dos erros sistemáticos.

#### 4.3.1.

##### Incerteza de Medição da Calibração

Na calibração, são realizadas medições em  $m$  vazões. Para cada vazão, são registrados  $n$  valores de volume, para o medidor e para o padrão. Está sendo considerado aqui que a calibração é feita com base no volume para ficar coerente com o experimento descrito nos itens 4.1 e 4.2.

Para cada vazão, os  $n$  volumes do padrão devem ser iguais, para minimizar a repetitividade. Com base nos  $n$  valores de volume indicados pelo medidor, é calculada a média dos  $n$  volumes do medidor ( $\bar{V}_M$ ), o desvio padrão ( $s(V_M)$ ), e a incerteza padrão ( $u(V_M)$ ):

$$u(V_M) = s(V_M) \quad (4-1)$$

A incerteza do laboratório  $u(V_P)$  deve incluir todos os fatores que podem contribuir na incerteza de medição da calibração, desde a incerteza de medição da calibração do padrão ( $u_{cal}(V_P)$ ), procedimento de correção de pressão e temperatura, e até fatores ambientais.

Apresentando de forma simplificada, a incerteza dos resultados da calibração do medidor, ou seja, dos valores indicados no certificado de calibração, é calculada a partir da equação:

$$u_{cal}(V_M) = \sqrt{u^2(V_M) + u^2(V_P)} \quad (4-2)$$

No caso de as  $n$  medições de  $V_M$  puderem ser consideradas independentes, então, a incerteza do resultado da calibração pode utilizar a incerteza padrão da média das  $n$  medições de  $V_M$ :

$$u(\bar{V}_M) = \frac{u(V_M)}{\sqrt{n}} \quad (4-3)$$

De acordo com o GUIA e a EA-4/02, no cálculo da incerteza combinada da calibração de um medidor, o que inclui o uso de planilha de incerteza, quando o valor do mensurando for calculado utilizando  $n$  medições de  $V_M$ , então deve ser utilizada a eq. (4-3) para chegar à  $u(\bar{V}_M)$ . E, o GUIA e a EA-4/02 mantêm os valores de incerteza referentes a outras fontes. Assim, a incerteza de medição da calibração do medidor, é calculada por:

$$u_{cal}(V_M) = \sqrt{u^2(\bar{V}_M) + u^2(V_P)} \quad (4-4)$$

A EA-4/02 indica que a incerteza expandida de medição da calibração ( $u_{cal}(V_M)$ ) deve ser indicada no certificado de calibração.

Quando esse medidor estiver na indústria, o usuário terá que contabilizar a incerteza de medição da calibração do medidor, além das incertezas devido a todas as outras fontes identificadas.

### 4.3.2.

#### Incerteza devido a Erros Sistemáticos Conhecidos

##### 4.3.2.1.

##### Sem Correção

A Figura 4-7 ilustra um caso em que os erros sistemáticos encontrados estão na faixa do erro máximo admissível (EMA). O gráfico mostra o desvio relativo, pois o erro máximo admissível associado às classes de exatidão dos medidores de vazão é apresentado como um desvio relativo.

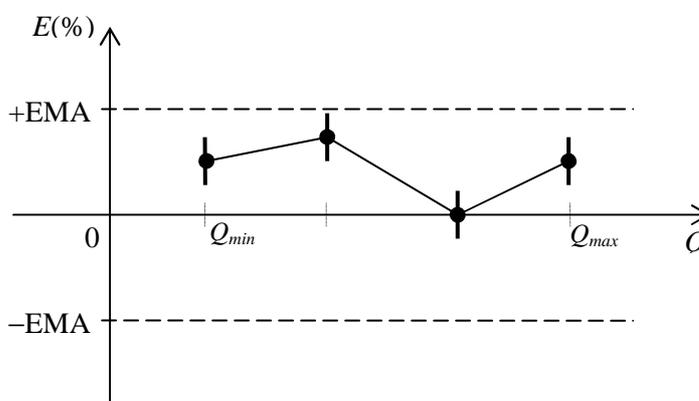


Figura 4-7: Exemplo de curva de calibração (de  $Q_{min}$  a  $Q_{max}$ ) sem correção de erros sistemáticos.

O GUIA recomenda que sejam corrigidos os erros sistemáticos conhecidos. Entretanto, no item F.2.4.5, o GUIA reconhece que nem sempre é factível a correção dos erros sistemáticos, e apresenta procedimentos para estimar a incerteza de medição no caso dos erros sistemáticos conhecidos não terem sido corrigidos.

Uma indicação do GUIA é a substituição da incerteza expandida  $U$  por  $U + b$ , onde  $b$  é a correção conhecida e  $U$  é a incerteza expandida obtida sob a suposição de  $b = 0$ .

Quando só um valor de incerteza for utilizado, a incerteza expandida terá que ser igual a:  $U_{max} + b_{max}$ .

#### 4.3.2.2.

##### Correção com apenas um Fator

Na indústria é usual a correção dos erros sistemáticos utilizando apenas um fator do medidor ao longo de toda a faixa calibrada. A utilização de apenas um fator corresponde a alterar o nível da curva de calibração, como aparece na Figura 4-8, cuja curva de calibração corresponde à curva da Figura 4-7, mas o nível foi alterado.

A linearidade do medidor indica a diferença entre o desvio mais positivo e o desvio mais negativo. Se a linearidade do medidor for significativa, a utilização de apenas um fator pode não melhorar muito os erros sistemáticos.

Para uso de um fator que corresponda a deslocar a curva em uma parcela  $c$ , a incerteza expandida  $U$  é substituída por  $U + b - c$ .

No caso em que é utilizado só um valor de incerteza, a incerteza expandida é expressa como:  $U_{max} + b_{max} - c$ .

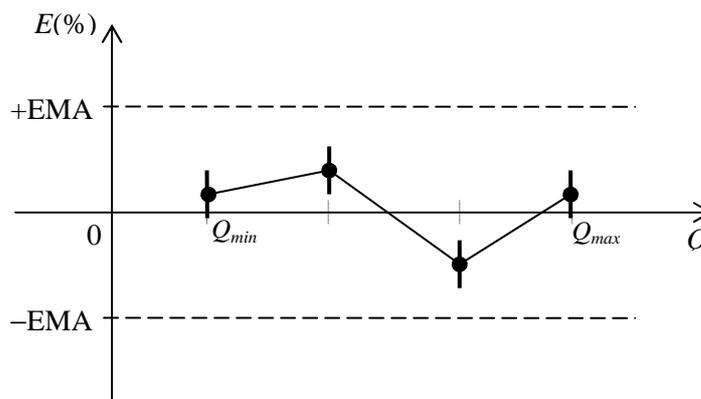


Figura 4-8: Exemplo de curva de calibração (de  $Q_{min}$  a  $Q_{max}$ ) com uso de um MF para toda a faixa calibrada.

#### 4.3.2.3.

##### Correção com Vários Fatores ou com Curva de Ajuste

Sempre que o medidor for calibrado (seja no laboratório ou no local de operação) a recomendação é aplicar a correção dos erros sistemáticos identificados. Essa correção pode ser realizada, por exemplo, com a utilização de curva de ajuste, ou um fator para cada vazão calibrada.

Idealmente, com erros sistemáticos corrigidos, o medidor ficaria com erro zero e com apenas a dispersão dos resultados contabilizada pelo desvio padrão, como representado na Figura 4-9.

Mas o GUIA indica que sempre haverá algumas vazões em que a correção não será feita de forma completa.

Dessa forma, a incerteza da correção deve ser avaliada, como incerteza devido ao ajuste ou incerteza devido à correção com múltiplos fatores. Estas incertezas serão menores do que as incertezas devido a não-correção dos erros sistemáticos ou devido à utilização de um único fator, mas elas existem e só podem ser desprezadas depois de avaliadas.

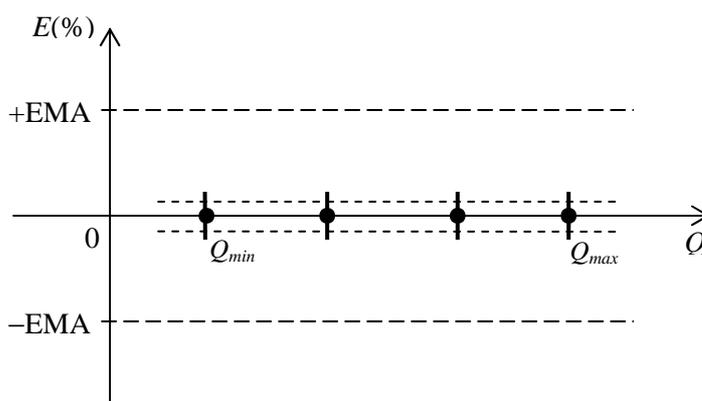


Figura 4-9: Exemplo de curva de calibração (de  $Q_{min}$  a  $Q_{max}$ ), com a indicação da incerteza da correção.

A Figura 4-9 foi incluída aqui, apenas para ilustrar a questão da correção dos erros sistemáticos. Não é interessante disponibilizar, em certificado de calibração, gráficos ou tabelas indicando como a curva de calibração supostamente ficaria após a eliminação dos erros sistemáticos sem comprovação. Para mostrar como os erros sistemáticos ficam após um ajuste (mecânico ou eletrônico), o medidor tem que passar por nova calibração.

#### 4.3.2.4.

##### **Determinação da Incerteza devido ao Erro Sistemático Conhecido**

Os medidores calibrados são operacionais, não trabalham com transferência de custódia, e os erros sistemáticos são conhecidos, mas não há possibilidade nas instalações atuais de esses erros sistemáticos serem corrigidos. Assim, a correção  $b_{max}$  terá que ser acrescentada à incerteza expandida  $U_{max}$ .

Nas calibrações realizadas na instalação sem degrau, a correção  $b_{max}$  ficou em 0,37% para o FT-01; 0,38% para o FT-02, e 0,42% para o FT-03. Na

instalação com degrau,  $b_{max}$  ficou em 0,23%, 0,13%, e 0,33%, para o FT-01, FT-02 e FT-03, respectivamente.

Observa-se que  $b_{max}$  só entrará nos cálculos após a incerteza combinada ter sido multiplicada pelo fator de abrangência.

### 4.3.3.

#### **Incerteza Calculada com base no EMA**

O medidor em operação deve estar com a calibração em dia e a análise da incerteza de medição desse medidor e de seu sistema de medição, deve utilizar os resultados descritos no certificado de calibração.

Entretanto, pode ser necessário avaliar a incerteza de medição de um sistema e o medidor não ter sido calibrado. Isso ocorre, por exemplo, em um projeto básico ou de detalhamento, quando o medidor ainda está sendo especificado. Ocorre também quando a estimativa da incerteza tem por objetivo uma análise genérica e não há o interesse ou a possibilidade de se incluir um medidor específico e um certificado de calibração específico.

Essa situação corresponde ao caso do item 3.3.2.c da EA-4/02, em que somente os limites superior ( $a_+$ ) e inferior ( $a_-$ ) são conhecidos. A recomendação para o cálculo da média e da incerteza padrão dos resultados do medidor é utilizar o EMA ( $u_{EMA}$ ), nesse caso, inclui determinar:

$$m\acute{e}dia = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (4-5)$$

$$u_{EMA} = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{3}} \quad (4-6)$$

Os medidores descritos nos itens 4.1 e 4.2 apresentam, pelo catálogo do fabricante, os limites:  $a_+ = 0,5\%$  e  $a_- = -0,5\%$ . E, assim, chega-se a incerteza  $u_{EMA} = 0,29\%$ .

### 4.3.4.

#### **Incerteza devido a Diferenças entre Calibração e Operação**

O assunto do presente capítulo é calibração de medidores ultrassônicos. Entretanto, o foco do presente trabalho é o medidor em operação, sendo influenciada pela presença de acidentes a montante e, também, da calibração.

As incertezas padrão indicadas até aqui não consideram as diferenças entre calibração e operação, ou seja, pressupõem que as condições e instalações de operação serão idênticas à condição e instalação de calibração. Essa igualdade em geral não ocorre. Portanto, a análise da incerteza devido às diferenças entre a calibração e a operação precisa também ser feita.

Mesmo os dados de catálogo do fabricante são determinados para condições controladas.

No caso de o medidor ter sido calibrado em laboratório, devem ser avaliadas as diferenças entre:

- Condições de operação com relação à condição de calibração, incluindo: Número de Reynolds do escoamento; Propriedades do Produto; Pressão; Temperatura; Faixa de vazão.
- Instalação: Trechos retos (comprimento, rugosidade); Retificador ou condicionador de escoamento; Degraus; Curvas; Válvulas; Bombas ou compressores próximos.
- Configuração do medidor.
- Procedimentos de operação.
- Procedimentos de manutenção.

No caso de utilizar medidor de vazão como padrão, os itens acima listados devem ser verificados comparando as condições do laboratório onde o medidor padrão tenha sido calibrado e as condições do medidor padrão na calibração do medidor em operação.

Para o medidor que é calibrado no local de operação, deve ser comparada a situação do medidor em calibração e em suas condições usuais de operação.