

Estudo teórico e experimental sobre a influência do número de pontos na calibração de medidores de vazão

F O Costa¹, D A Garcia¹, J G Sanchez¹, S Araujo¹, M H Aquino¹, P C Gabriel¹, G M Rocha¹, I P Barros¹ e L O V Pereira²

¹ Divisão de Metrologia em Dinâmica de Fluidos, Dimci, Inmetro, Duque de Caxias, 25250-050, Brasil

² CENPES, Petrobras, Rio de Janeiro, 21941-915, Brasil

dinam@inmetro.gov.br

Resumo. A produção de petróleo e gás natural do Brasil, da ordem de mais de 500 bilhões de reais anuais, é contabilizada por meio de diferentes tipos de medidores de vazão ou tanques volumétricos, sendo de extrema importância que esses instrumentos possuam confiabilidade metrológica e passem pelo controle metrológico legal visando garantir o cumprimento dos requisitos metrológicos e obrigações impostas na regulamentação e normas em vigor. Portanto, a calibração de medidores de vazão é fundamental para garantir a confiabilidade das medições envolvidas na indústria de petróleo e gás natural. A quantidade do número de pontos de calibração é um fator importante a ser considerado, pois ele influencia diretamente na exatidão (quando utilizada uma curva de calibração) assim como no custo do serviço de calibração. A Divisão de Metrologia em Dinâmica de Fluidos (Dinam), do Inmetro, vem desenvolvendo pesquisas para apoiar tecnicamente a melhoria da regulamentação vigente, especialmente quanto às condições e requisitos de calibração especificados no Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural (RTM), aplicável aos medidores de vazão utilizados nas operações de medição fiscal, transferência de custódia e apropriação de petróleo e gás natural. O presente artigo apresenta um estudo experimental para adequação da definição de pontos nominais para calibração de medidores de vazão em operação na indústria de petróleo e gás.

1. Introdução

O Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural (RTM), conforme aprovado pela Resolução Conjunta ANP/Inmetro nº 001/2013 [1], desempenha um papel fundamental ao estabelecer diretrizes que asseguram a rastreabilidade metrológica nas medições de petróleo e gás natural. A rastreabilidade assume um papel preponderante na garantia da confiabilidade das medições, consistindo na habilidade de estabelecer uma relação inequívoca entre as medições efetuadas e os padrões de referência internacionalmente reconhecidos.

O RTM delinea, com rigor, os procedimentos e critérios necessários para a condução de medições em todas as etapas da produção de petróleo e gás natural, abrangendo desde a fase de exploração até a comercialização. Além disso, ele estabelece requisitos técnicos para os instrumentos de medição, metodologias de medição, procedimentos de calibração e verificação, e também define as responsabilidades de todos os intervenientes no processo de medição, incluindo a Petrobras e outras empresas operadoras, prestadores de serviços, agências reguladoras e laboratórios de calibração.

Um ponto de calibração de um instrumento de medição constitui uma das informações cruciais exigidas pelos laboratórios para a efetiva calibração de um instrumento, juntamente com parâmetros como o tipo de fluido, temperatura, pressão, entre outros. Em consonância com o RTM, a seleção dos pontos de calibração requer a escolha criteriosa de três ou mais pontos que se enquadrem na faixa de medição do instrumento. É de suma importância optar por pontos que abranjam a totalidade da faixa de operação do instrumento ou, pelo menos, a faixa em que o medidor será utilizado. O número de pontos de calibração pode variar de acordo com o princípio de funcionamento do instrumento, sua linearidade, bem como a precisão e incerteza desejadas. As condições de calibração precisam ser representativas das condições operacionais do instrumento. O padrão de referência pode ser representado por um volume conhecido, como um tanque reservatório com volume calibrado, ou um cilindro calibrado de um provador, ou ainda por um equipamento de medição de vazão calibrado com rastreabilidade a padrões nacionais ou internacionais, operando com um fluido devidamente conhecido e caracterizado, sob condições de estabilidade.

Em conformidade com o estipulado no RTM, a vazão de calibração dos medidores em operação deve cobrir, dentro do critério de variação permitida de 10%, todas as vazões efetivamente encontradas em um dado sistema de medição. Portanto, a seleção adequada tanto do número de pontos de calibração quanto de sua distribuição ao longo da faixa de operação do medidor assume importância crítica na garantia da linearidade do instrumento. A linearidade, neste contexto, refere-se à quão precisas são as medições do instrumento ao longo da amplitude esperada das medições, assegurando que a tendência ou a diferença entre a média das repetidas indicações do instrumento (medições) e um valor de referência não seja significativamente diferente de zero, nem ultrapasse o erro máximo admissível estabelecido para o processo de calibração do dispositivo de medição. O erro máximo é definido como o valor extremo do erro de medição, em relação a um valor de referência conhecido, conforme especificações ou regulamentos para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição, como definido no Vocabulário Internacional de Metrologia Legal [2]. O erro estabelecido para uma medição será, portanto, o valor médio das repetições da calibração para cada ponto (vazão) da curva de calibração.

Este artigo apresenta uma análise da influência do número de pontos de calibração na incerteza associada ao ajuste linear do comportamento de um instrumento de medição de vazão, com o intuito de fornecer um embasamento técnico sólido para a determinação do número de pontos necessários a uma calibração eficaz de medidores de vazão [7]. Com base nesse conhecimento, é possível estabelecer um equilíbrio adequado entre o custo da calibração e a confiabilidade alcançada no processo.

2. Metodologia

2.1. Influência teórica do número de pontos (predição)

Inicialmente, conduziu-se uma investigação teórica empregando modelos estatísticos para avaliar o impacto do número de pontos nas calibrações. Nesse contexto, procedeu-se a análises conceituais fundamentadas na técnica de regressão linear, utilizando o método dos mínimos quadrados. Esta abordagem estatística é empregada para derivar a estimativa mais precisa de uma grandeza mensurável quando se realizam múltiplas medições idênticas, considerando condições de repetibilidade.

De acordo com esta técnica, quando se observa uma tendência evidente no comportamento do medidor em relação à vazão, é aconselhável empregar polinômios ou funções matemáticas apropriadas. A análise de variância é então realizada com base na metodologia de regressão aplicada.

A análise de variância proporciona informações essenciais sobre a incerteza associada à curva ajustada e se apoia em algumas suposições fundamentais. Considerando a expressão $y = \beta_0 + \beta_1 x$, onde y representa a resposta (variável dependente), x é a variável independente (variável explicativa), e β_0 e β_1 representam os parâmetros, as seguintes premissas são aplicáveis:

1. Ausência de erros na variável independente.
2. Linearidade: a resposta média da variável dependente é uma combinação linear dos parâmetros de regressão e da variável independente.

- Distribuição normal e homocedástica dos erros: a distribuição dos erros ao longo da curva é homogênea e segue uma distribuição normal, além de serem independentes (não correlacionados).

2.2. Influência do número de pontos (predição)

A fim de compreender a influência do número de pontos utilizados na regressão linear, calculamos a razão entre o desvio padrão do estimador de \hat{y}_0 com n pontos e com um número infinito de pontos. Definindo p como a posição relativa de x , onde $x_0 = x_1 + p(x_n - x_1)$, com p variando de 0 a 1:

$$\frac{\sigma_{\hat{y}_0}}{(\sigma_{\hat{y}_0})} = \frac{t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}}{t_{\frac{\alpha}{2}, \infty}} \sqrt{\frac{12p(p-1)(n-1) + n(4+r(n+1)) - 2}{nr(1+n)}} \quad (1)$$

Para graus de liberdade infinitos, temos $t_{\frac{\alpha}{2}, \infty} = 2$.

A Equação 1 revela que, em caso de uma distribuição uniforme dos pontos de calibração, a incerteza depende unicamente da posição de predição e não é afetada pela faixa de calibração. A menor incerteza ocorre quando $\frac{\partial \sigma_{\hat{y}_0}}{\partial p} = 0$, o que acontece quando $p = 1/2$.

A Figura 1 ilustra a variação relativa da banda de confiança do intervalo de predição em relação ao número de pontos medidos, considerando uma distribuição uniforme dos pontos. Conforme o esperado, visto que a função de ajuste é otimizada em torno do ponto médio $\{x, y\}$, a incerteza da predição diminui à medida que nos aproximamos do centro da reta ($p = 50\%$).

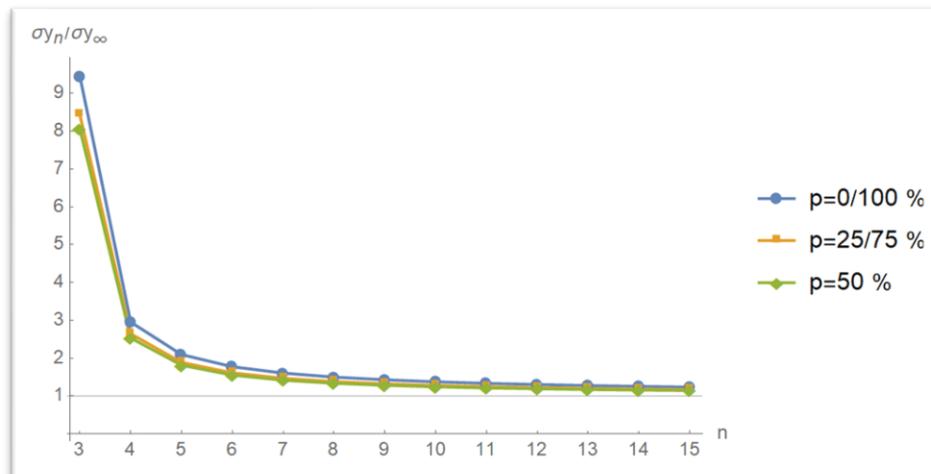


Figura 1. Evolução relativa da banda de confiança do intervalo de predição em função do número de pontos medidos.

3. Estudo experimental e resultados

Com o propósito de avaliar experimentalmente o impacto do número de pontos de calibração, conduzimos a calibração de três medidores Coriolis utilizando água em várias configurações. Utilizamos um sistema gravimétrico dinâmico do NIST como nosso padrão de referência [3].

O sistema gravimétrico consiste em um circuito fechado completamente automatizado, composto por três componentes principais: 1) um sistema de geração e controle de vazão, 2) um sistema de pesagem dinâmica e 3) uma seção de testes.

Realizamos duas séries de testes e os dados experimentais resultantes estão detalhados no Anexo 1. Usamos dois medidores Coriolis em série, ambos com um diâmetro nominal de 2" e geometria em forma de "U", para uma das rodadas, e um medidor Coriolis de 1/2" com geometria em forma de "ômega" para

a outra. Em todas as calibrações, realizamos 5 repetições, com um tempo de medição de 90 segundos. Configuramos os medidores para realizar compensação automática de temperatura, e as correções de pressão foram aplicadas manualmente [4].

Para manter a vazão constante e evitar a ocorrência de cavitação no sistema, ajustamos a pressão na tubulação conforme a vazão desejada e o diâmetro do medidor. Nos testes realizados, variamos as vazões de 1 kg/s (correspondendo a 7,5% da vazão nominal do medidor) até 9,5 kg/s, mantendo a pressão a 20 psi, e de 9,5 kg/s até 12,5 kg/s (95% da vazão nominal do medidor) com a pressão ajustada para 32 psi.

Para comparar as curvas de Fatores do Medidor obtidas com diferentes números de pontos de calibração, realizamos calibrações com variação de 3 a 10 pontos. Mantivemos todas as configurações idênticas em todos os experimentos. A Figura 2 apresenta os resultados normalizados em relação a $M=1$, obtidos para a incerteza da curva ajustada a $Q=6,5$ L/s para os medidores de 2" e $Q=1,0$ L/s para o medidor de 1/2".

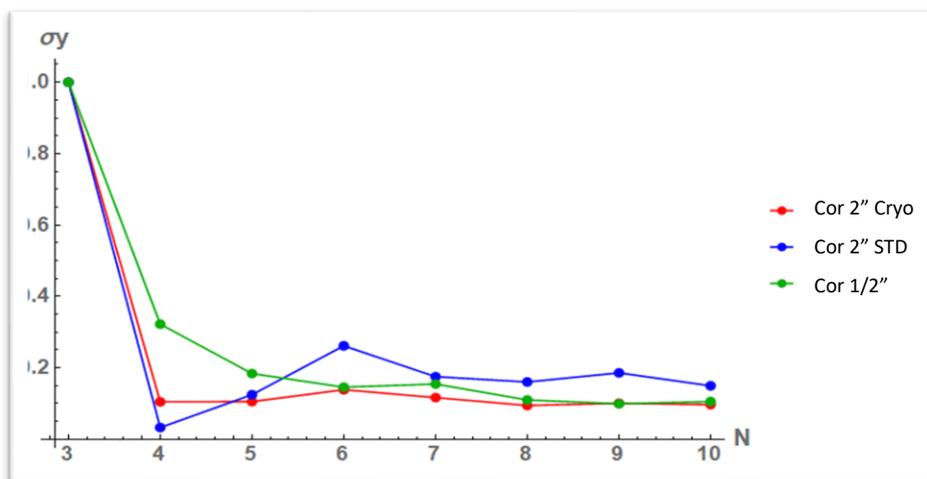


Figura 2. Incerteza para curva ajustada

A análise da Figura 2 revela que conseguimos reproduzir experimentalmente o comportamento teórico previamente discutido, especialmente no caso do medidor Coriolis de 1/2", devido à sua notável repetibilidade e linearidade.

4. Conclusão

A distribuição dos pontos de calibração desempenha um papel de importância fundamental, não apenas na obtenção de parâmetros com a menor variância possível, mas também na avaliação do comportamento do medidor, em particular sua linearidade e repetibilidade ao longo da faixa de medição.

Com base nas investigações realizadas e nos dados apresentados neste artigo técnico, conclui-se que a utilização de 5 a 7 pontos de vazão em calibrações de medidores proporciona uma ótima relação entre o número de pontos de calibração e a incerteza da regressão linear. É importante notar que várias recomendações e normas internacionais, incluindo o RTM anexado à Portaria INMETRO nº 291 de 2021, que regulamenta sistemas de medição de líquidos de petróleo [5], e o documento da OIML R117 [6], adotam valores semelhantes em suas diretrizes.

É crucial observar, no entanto, que as conclusões apresentadas neste estudo são aplicáveis como ferramentas estatísticas e se baseiam nas premissas estabelecidas. Medidores cujo comportamento se desvia dessas premissas devem ser analisados caso a caso. Além disso, é relevante destacar que os testes experimentais foram conduzidos com fluidos líquidos, e é necessária a realização de testes adicionais com gases para avaliar sua aplicabilidade a esse tipo de fluido, considerando suas características específicas, como pressões elevadas, que podem afetar a calibração.

Referências

- [1] Inmetro/ANP, “Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural (RTM) número 001/2013,” [Online]. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002399.pdf>. [Acesso em 21 12 2021].
- [2] Inmetro, “Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012),” Rio de Janeiro, 2012.
- [2] “Portaria INMETRO / ME - número 150- de 29/03/2016,” [Online]. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002399.pdf>. [Acesso em 21 12 2020].
- [3] J. G. Pope, . A. N. Johnson, J. B. Filla, J. T. Boyd, C. J. Crowley e V. E. Bean,, “NIST’s Fully Dynamic Gravimetric Liquid Flowmeter Standard,” 2015.
- [4] F. O. Costa, J. G. Pope e K. A. Gillis, “Modeling temperature effects on a Coriolis mass flowmeter,” Gaithersburg, MD: Flow Measurement and Instrumentation., 2020.
- [5] Inmetro Dimel “Regulamento Técnico Metrológico anexo á Portaria nº291/2021 , [on line] Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002800.pdf>
- [6] Organização Internacional de Metrologia Legal, OIML, “Recommendation R117: Dynamic measuring systems for liquids other than water,” França, 2007.
- [7] F O Costa et al, R-0185/2021, Relatório Técnico sobre Número de Pontos de Calibração em Medidores de Vazão, DIMCI/INMETRO, Reservado, 2021.

ANEXO 1

Tabela 1: Dados brutos da calibração de medidores de vazão do tipo Coriolis (MUT1 e MUT2)

| N° Pontos | M Slope [kg/s] | MUT1 Mean | Nist/MU T1 | σ Nist/MU T1 | MUT2 Mean | Nist/MU T2 | σ Nist/MU T2 | T [°C] | P [Psi] |
|-----------|----------------|-----------|------------|---------------------|-----------|------------|---------------------|--------|---------|
| 3 | 12,4893 | 12,4842 | 0,999395 | 0,00016 | 12,4968 | 1,00041 | 0,0002 | 35,813 | 31,954 |
| | 6,74426 | 6,74417 | 0,999158 | 0,000187 | 6,74994 | 1,00001 | 0,000208 | 36,462 | 19,948 |
| | 0,99964 | 0,99861 | 0,999935 | 0,000108 | 0,9997 | 1,00103 | 0,000182 | 36,44 | 20,001 |
| 4 | 12,4865 | 12,4826 | 0,999351 | 0,00027 | 12,4946 | 1,00031 | 0,000162 | 35,739 | 31,963 |
| | 8,65938 | 8,65659 | 0,99933 | 0,000152 | 8,66518 | 1,00032 | 0,000209 | 36,433 | 19,944 |
| | 4,82744 | 4,82694 | 0,999375 | 0,000206 | 4,83046 | 1,0001 | 0,000081 | 36,504 | 19,968 |
| | 0,99937 | 0,99857 | 0,999621 | 0,000136 | 0,99975 | 1,0008 | 0,000118 | 36,414 | 20,001 |
| 5 | 12,492 | 12,4867 | 0,999401 | 0,000128 | 12,4995 | 1,00042 | 0,000296 | 36,669 | 31,953 |
| | 9,61753 | 9,61448 | 0,999333 | 0,000342 | 9,62395 | 1,00032 | 0,000318 | 37,445 | 19,945 |
| | 6,74109 | 6,73998 | 0,999201 | 0,000191 | 6,74648 | 1,00016 | 0,000179 | 37,631 | 19,954 |
| | 3,87091 | 3,87076 | 0,999125 | 0,00017 | 3,8743 | 1,00004 | 0,0001 | 37,619 | 19,974 |
| | 0,99944 | 0,99858 | 0,999721 | 0,00011 | 0,99972 | 1,00087 | 0,000061 | 37,522 | 19,999 |
| 6 | 12,487 | 12,4826 | 0,99952 | 0,000243 | 12,493 | 1,00035 | 0,000157 | 37,725 | 31,949 |
| | 10,1878 | 10,1843 | 0,999198 | 0,000189 | 10,196 | 1,00034 | 0,000198 | 38,698 | 31,96 |
| | 7,89246 | 7,89191 | 0,999076 | 0,000098 | 7,89977 | 1,00007 | 0,000208 | 39,065 | 19,954 |
| | 5,59213 | 5,59347 | 0,998858 | 0,000245 | 5,59852 | 0,99976 | 0,000178 | 39,094 | 19,963 |
| | 3,29729 | 3,29638 | 0,999266 | 0,000362 | 3,29971 | 1,00028 | 0,000269 | 38,982 | 19,978 |
| | 0,9994 | 0,99853 | 0,99973 | 0,00014 | 0,99967 | 1,00086 | 0,000162 | 38,788 | 20,002 |
| 7 | 12,489 | 12,4851 | 0,999374 | 0,000226 | 12,4968 | 1,00032 | 0,000158 | 34,777 | 31,952 |
| | 10,5652 | 10,5614 | 0,999226 | 0,00027 | 10,5734 | 1,00037 | 0,000209 | 35,917 | 31,938 |
| | 8,6591 | 8,65856 | 0,99918 | 0,000166 | 8,66621 | 1,00006 | 0,000217 | 36,468 | 19,944 |



| | | | | | | | | | |
|-----------|---------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|--------|--------|
| | 6,74249 | 6,7417 | 0,999243 | 0,000213 | 6,74759 | 1,00012 | 0,000062 | 36,647 | 19,958 |
| | 4,82609 | 4,82733 | 0,998678 | 0,000288 | 4,83248 | 0,999742 | 0,000121 | 36,678 | 19,967 |
| | 2,91484 | 2,91323 | 0,999534 | 0,000272 | 2,9162 | 1,00055 | 0,000083 | 36,601 | 19,98 |
| | 0,99948 | 0,99864 | 0,999696 | 0,000218 | 0,99978 | 1,00084 | 0,000146 | 36,478 | 19,999 |
| | 12,4873 | 12,4836 | 0,999212 | 0,000281 | 12,4972 | 1,00029 | 0,000204 | 38,758 | 31,968 |
| | 10,8506 | 10,846 | 0,99953 | 0,000238 | 10,8557 | 1,00043 | 0,000238 | 39,804 | 31,94 |
| | 9,20625 | 9,20487 | 0,999198 | 0,000244 | 9,21363 | 1,00015 | 0,000172 | 40,292 | 19,939 |
| 8 | 7,56083 | 7,55999 | 0,999203 | 0,000161 | 7,56687 | 1,00011 | 0,000127 | 40,428 | 19,954 |
| | 5,9215 | 5,92219 | 0,999059 | 0,000422 | 5,92708 | 0,999883 | 0,000275 | 40,421 | 19,966 |
| | 4,28085 | 4,28012 | 0,999016 | 0,00018 | 4,28506 | 1,00017 | 0,000119 | 40,308 | 19,97 |
| | 2,64112 | 2,63994 | 0,999564 | 0,000089 | 2,64227 | 1,00045 | 0,000139 | 40,098 | 19,987 |
| | 0,99943 | 0,99867 | 0,999559 | 0,000154 | 0,99987 | 1,00076 | 0,000183 | 39,826 | 19,998 |
| | 12,4888 | 12,4823 | 0,999531 | 0,000184 | 12,4947 | 1,00052 | 0,000156 | 36,52 | 31,948 |
| | 11,0586 | 11,0539 | 0,999639 | 0,000424 | 11,0626 | 1,00042 | 0,000251 | 37,666 | 31,949 |
| | 9,6118 | 9,60898 | 0,999354 | 0,000097 | 9,61801 | 1,00029 | 0,000131 | 38,452 | 31,948 |
| | 8,18165 | 8,17975 | 0,99934 | 0,000272 | 8,18705 | 1,00023 | 0,000262 | 38,834 | 19,949 |
| 9 | 6,74368 | 6,74364 | 0,998988 | 0,000267 | 6,75051 | 1,00000 | 0,000156 | 38,937 | 19,958 |
| | 5,30625 | 5,30644 | 0,998904 | 0,000216 | 5,31207 | 0,999964 | 0,000171 | 38,933 | 19,968 |
| | 3,87146 | 3,87036 | 0,999124 | 0,000423 | 3,87485 | 1,00028 | 0,000246 | 38,845 | 19,971 |
| | 2,43587 | 2,43412 | 0,999564 | 0,000188 | 2,43693 | 1,00072 | 0,000114 | 38,678 | 19,986 |
| | 0,9995 | 0,99868 | 0,999703 | 0,000113 | 0,9998 | 1,00082 | 0,000103 | 38,466 | 19,998 |
| | 12,4928 | 12,4878 | 0,99937 | 0,000214 | 12,5007 | 1,0004 | 0,000184 | 32,006 | 31,949 |
| | 11,2098 | 11,2054 | 0,999457 | 0,000222 | 11,2158 | 1,00039 | 0,000167 | 33,312 | 31,938 |
| | 9,93296 | 9,92971 | 0,999197 | 0,000125 | 9,94095 | 1,00033 | 0,000153 | 34,077 | 19,953 |
| | 8,65923 | 8,65807 | 0,999255 | 0,000234 | 8,66569 | 1,00013 | 0,000124 | 34,481 | 19,941 |
| | 7,38359 | 7,38199 | 0,999203 | 0,000114 | 7,38948 | 1,00022 | 0,000103 | 34,734 | 19,949 |
| 10 | 6,10308 | 6,10468 | 0,998885 | 0,00011 | 6,10989 | 0,999738 | 0,000102 | 34,878 | 19,962 |
| | 4,82776 | 4,82764 | 0,998816 | 0,000404 | 4,83349 | 1,00002 | 0,000147 | 34,937 | 19,966 |
| | 3,5526 | 3,55186 | 0,999321 | 0,000331 | 3,55502 | 1,00021 | 0,000236 | 34,926 | 19,977 |
| | 2,2765 | 2,27525 | 0,999614 | 0,00015 | 2,27738 | 1,00055 | 0,000107 | 34,851 | 19,987 |
| | 0,99987 | 0,99867 | 0,999952 | 0,000316 | 0,99992 | 1,0012 | 0,00019 | 34,761 | 20,000 |