

RESUMO DO ASSISTENTE DO MINITAB

Este artigo é parte de uma série de artigos que explicam a pesquisa conduzida pelos estatísticos do Minitab para desenvolver os métodos e verificações de dados usados no Assistente no Minitab Statistical Software.

Estudo de sistema de medição (gage) R&R (cruzado)

Visão geral

Os estudos do sistema de medição são realizados em praticamente cada tipo de indústria de manufatura para monitorar e aprimorar adequadamente um processo de produção. Em um estudo do sistema de medição típico, uma medição é usada para obter medições repetidas nas partes selecionadas por diversos operadores. Dois componentes da variabilidade do sistema de medição são frequentemente gerados nesses estudos: repetibilidade e reprodutibilidade. A repetibilidade representa a variabilidade quando a medição é usada para medir a mesma parte pelo mesmo operador. A reprodutibilidade se refere à variabilidade de diferentes operadores medindo a mesma parte. Desta forma, os estudos do sistema de medição são frequentemente mencionados como estudos de repetibilidade e reprodutibilidade de medição ou estudos de medição R&R.

O propósito principal de um estudo de medição é determinar quanta variação nos dados é devida ao sistema de medição, e se o sistema de medição é capaz de avaliar o desempenho do processo. Para discussões detalhadas sobre os estudos do sistema de medição, consulte o manual MSA (2003), Montgomery and Runger (1993), e Burdick, Borror, and Montgomery (2005).

O comando do Estudo de medição R&R (cruzado) no Assistente foi projetado para analisar dados de estudos de sistemas de medição típicos. Ele adota a abordagem mais comum de ajustar os dados de medição com um modelo ANOVA e estima as diferentes fontes de variação no sistema de medição usando os componentes de variância do modelo.

Se você usar as diretrizes típicas para a quantidade de dados a ser coletada para estudos de medição R&R, os componentes da variância podem não ser precisamente estimados (Montgomery and Runger, 1993a, 1993b; Vardeman and VanValkenburg, 1999). O assistente indica se o número de partes e o número de operadores são menores do que determinados

valores, que podem afetar a precisão das estimativas de variação parte a parte e de operador. Conduzimos simulações para identificar o número de partes, operadores e réplicas que são necessários para obter estimativas precisas.

Usando nossos resultados da simulação e práticas amplamente aceitas na análise do sistema de medição, desenvolvemos as seguintes verificações de dados para o Estudo de medição R&R (cruzado). O assistente automaticamente realiza essas verificações de dados e relata os achados no Cartão de relatório.

- Quantidade de dados
 - Variação do processo
 - Variação de medição

Neste artigo, investigamos como essas verificações de dados se referem à análise do sistema de medição na prática e descrevemos como estabelecemos as diretrizes para cada verificação de dados.

Verificações dos dados

Quantidade de dados

Tipicamente, as diretrizes para estudos de medição R&R recomendam o uso de 10 partes, 2 ou 3 operadores, e 2 ou 3 réplicas (AIAG, 2003; Raffaldi and Ramsier, 2000; Tsai, 1988). Contudo, o tamanho amostral recomendado não é grande o suficiente para estimar a variação parte a parte com boa precisão e, portanto, pode não fornecer uma boa base para avaliar se deve-se ou não usar uma determinada medição (Montgomery and Runger, 1993a, 1993b; Vardeman and VanValkenburg, 1999).

Para estabelecer diretrizes para a quantidade de dados apropriada, focamos em quantas partes devem ser avaliadas para obter estimativas de variação parte a parte com diferentes níveis de precisão. Também avaliamos quantos operadores deve ser usados para obter uma estimativa precisa da variação da medição. Por fim, investigamos o número de observações necessárias para obter estimativas de repetibilidade de medição com diferentes precisões.

Número de partes para estimar a variação parte a parte com diferentes níveis de precisão

Objetivo

Queríamos determinar quantas partes devem ser avaliadas para obter estimativas de variação parte a parte com diferentes níveis de precisão.

Método

Realizamos um estudo de simulação usando 5.000 amostras. Para todas as amostras, estimamos o desvio padrão das partes e calculamos a relação do desvio padrão estimado para o desvio padrão real. Ordenamos as razões de baixa a alta e usamos as razões 125^a e 4.875^a para definir o intervalo de confiança de 95%; e as razões 250^a e 4.750^a para definir o intervalo de confiança de 90%. Usando esses intervalos de confiança, identificamos quantas partes são necessárias para estimar a variação parte a parte com diferentes níveis de precisão.

Resultados

Com base no estudo de simulação, concluímos o seguinte:

- Usando-se 10 partes, 3 operadores e 2 réplicas, a razão do intervalo de confiança de 90% sobre o desvio padrão real é de cerca de (0,61, 1,37) com 35% a 40% de margem de erro. Com confiança de 95%, o intervalo é de cerca de (0,55, 1,45) com 45% de margem de erro. Portanto, 10 partes não são suficientes para produzir uma estimativa precisa para o componente de variação parte a parte.
- Você precisa de aproximadamente 35 partes para ter uma confiança de 90% ao estimar a variação parte a parte dentro de 20% do valor real.

- Você precisa de aproximadamente 135 partes para ter uma confiança de 90% ao estimar a variação parte a parte dentro de 10% do valor real.

Determinamos também que esses resultados se aplicam a medições aceitáveis, marginais e inaceitáveis.

Consulte o Apêndice A para obter uma explicação detalhada da simulação e de seus resultados.

Número de operadores para estimar a variação parte a parte com diferentes níveis de precisão

Objetivo

Queríamos determinar quantos operadores devem avaliar partes para obter estimativas de variação de operador com diferentes níveis de precisão.

Método

O desvio padrão das partes e o desvio padrão de operadores são ambos estimados usando-se o modelo ANOVA. Portanto, o método usado na simulação para o número de partes para estimar a variação parte a parte, também se aplica ao número de operadores para estimar a variação entre operadores.

Resultados

Dois ou três operadores não são suficientes para fornecer uma estimativa precisa para reprodutibilidade. Contudo, o problema é menos crítico se a magnitude da variação de parte a parte é muito maior do que a variação entre operadores, que é um cenário provável para diversas aplicações.

Consulte o Apêndice A para obter uma explicação detalhada da simulação e de seus resultados.

Número de observações para estimar a repetibilidade com diferentes níveis de precisão

Objetivo

Queríamos determinar como o número de observações afeta a estimativa da repetibilidade e se 10 partes, 3 operadores e 2 réplicas podem fornecer uma estimativa razoavelmente precisa para variação de repetibilidade.

Método

A razão do desvio padrão de repetibilidade estimada sobre seu valor real segue uma distribuição qui-quadrado. Para determinar o número de observações necessário para obter uma estimativa razoavelmente precisa da repetibilidade, calculamos os limites inferior e

superior da razão associada com a probabilidade de 90% e representamos graficamente os resultados.

Resultados

Em um estudo de medição típico (por exemplo, número de partes = 10, número de operadores = 3 e número de réplicas = 2), os graus de liberdade para erro correspondem a 30, o que permite que você tenha cerca de 90% de confiança ao estimar a repetibilidade dentro de 20% do valor real. Sob configurações típicas, a estimativa para repetibilidade é razoavelmente precisa. Consulte o Apêndice B para obter mais detalhes.

Resultados gerais

Nossos estudos indicam claramente que as configurações típicas usadas em um estudo de medição não são boas o bastante para fornecer estimativas precisas para variação parte a parte e variação de reprodutibilidade, que afetam a razão da variação da medição sobre a variação do processo total e, por fim, a decisão sobre se a medição é aceitável. Tipicamente, a variação parte a parte é maior do que a variação da reprodutibilidade e, portanto, sua precisão tem um impacto maior sobre a aceitação ou não de uma medição. Contudo em diversas aplicações, pode não ser factível selecionar 35 ou mais partes e fazer com que múltiplos operadores as meçam duas vezes.

Considerando-se as configurações típicas de medição R&R usadas na prática e em nossos resultados de simulação, o assistente usa as seguintes abordagens para encorajar os usuários a obter estimativas precisas para os componentes de variação:

1. Forneça uma opção na caixa de diálogo para permitir que os usuários insiram uma estimativa da variação do processo obtida a partir de um amplo conjunto de dados históricos. Na maioria dos casos, a estimativa de um amplo conjunto de dados históricos tem melhor precisão do que a estimativa dos dados amostrais.
2. Se a estimativa do histórico não estiver disponível, e o número de partes for pequeno, exibiremos uma mensagem para lembrar aos usuários para selecionar mais de 10 partes para obter estimativas mais precisas.

Com base na quantidade de dados, o Cartão de relatórios do Assistente exibe informações sobre variação do processo e variação da medição. Por exemplo, se você usa 10 partes e 3 operadores e especifica um desvio padrão histórico, a seguinte verificação de dados é exibida no Cartão de relatório:

Status	Condição
	<p>Para determinar se um sistema de medição é capaz de avaliar o desempenho do processo, você precisa de boas estimativas da variação do processo e da variação da medição.</p> <p>Varição do processo: composto de variação da medição e parte a parte. Ela pode ser estimada a partir de uma grande amostra de dados históricos, ou de partes do estudo. Você inseriu um desvio padrão histórico, por tanto, ambas as estimativas estão disponíveis. Você pode compará-las para ver quão bem elas concordam. Apesar de o número de partes deste estudo (10) satisfazer o requisito típico de 10, o valor histórico deve fornecer uma estimativa mais precisa da variação do processo.</p> <p>Varição de medição: estimada das partes, ela é dividida em Reprodutibilidade e Repetibilidade. O número de partes (10) e operadores (3) atende o requisito típico de 10 partes e 3 operadores. Isso é normalmente adequado para estimar a repetibilidade, mas a estimativa de reprodutibilidade é menos precisa. Se a estimativa de % de processo para reprodutibilidade for grande, você deve examinar as diferenças entre operadores e determinar se essas diferenças são prováveis de se estenderem para outros operadores.</p>

A seguir estão todas as mensagens para diversas configurações de partes, operadores e réplicas.

VARIAÇÃO DO PROCESSO

Desvio padrão histórico (partes < 10)

- Variação do processo: composto de variação da medição e parte a parte. Ela pode ser estimada a partir de uma grande amostra de dados históricos, ou de partes do estudo. Você inseriu um desvio padrão histórico, por tanto, ambas as estimativas estão disponíveis. Você pode compará-las para ver quão bem elas concordam. Como o número de partes deste estudo é pequeno, o valor histórico deve fornecer uma estimativa mais precisa da variação do processo.

Desvio padrão histórico (partes ≥ 10, ≤ 15)

- Variação do processo: composto de variação da medição e parte a parte. Ela pode ser estimada a partir de uma grande amostra de dados históricos, ou de partes do estudo. Você inseriu um desvio padrão histórico, por tanto, ambas as estimativas estão disponíveis. Você pode compará-las para ver quão bem elas concordam. Apesar de o número de partes deste estudo satisfazer o requisito típico de 10, o valor histórico deve fornecer uma estimativa mais precisa da variação do processo.

Desvio padrão histórico (partes > 15, < 35)

- Variação do processo: composto de variação da medição e parte a parte. Ela pode ser estimada a partir de uma grande amostra de dados históricos, ou de partes do estudo. Você inseriu um desvio padrão histórico, por tanto, ambas as estimativas estão disponíveis. Você pode compará-las para ver quão bem elas concordam. O número de partes neste estudo é muito maior do que o requisito típico de 10. Se as

partes selecionadas representam a variabilidade típica do processo, essa estimativa da variação do processo deve ser muito melhor do que se você tivesse usado 10 partes.

Desvio padrão histórico (partes ≥ 35)

- Variação do processo: composto de variação da medição e parte a parte. Ela pode ser estimada a partir de uma grande amostra de dados históricos, ou de partes do estudo. Você inseriu um desvio padrão histórico, por tanto, ambas as estimativas estão disponíveis. Você pode compará-las para ver quão bem elas concordam. O número de partes neste estudo é muito maior do que o requisito típico de 10. Se as partes selecionadas representam a variabilidade típica do processo, essa estimativa da variação do processo deve ser adequada.

Nenhum desvio padrão histórico (partes < 10)

- Variação do processo: composto de variação da medição e parte a parte. Ela pode ser estimada a partir de uma grande amostra de dados históricos, ou de partes do estudo. Você escolhe estimar das partes, mas tem menos do que o requisito típico de 10. A precisão desta estimativa pode não ser adequada. Se as partes selecionadas não representam a variabilidade típica do processo, considere inserir uma estimativa histórica ou usar mais partes.

Nenhum desvio padrão histórico (partes $\geq 10, \leq 15$)

- Variação do processo: composto de variação da medição e parte a parte. Ela pode ser estimada a partir de uma grande amostra de dados históricos, ou de partes do estudo. Você escolhe estimar das partes. Apesar de o número de partes deste estudo satisfazer o requisito típico de 10, a estimativa pode não ser precisa. Se as partes selecionadas não representarem a variabilidade típica do processo, considere inserir uma estimativa histórica ou usar mais partes.

Nenhum desvio padrão histórico (partes $> 15, < 35$)

- Variação do processo: composto de variação da medição e parte a parte. Ela pode ser estimada a partir de uma grande amostra de dados históricos, ou de partes do estudo. Você escolhe estimar das partes. O número de partes neste estudo é muito maior do que o requisito típico de 10. Se as partes selecionadas representam a variabilidade típica do processo, essa estimativa da variação do processo deve ser muito melhor do que se você tivesse usado 10.

No historical standard deviation (parts ≥ 35)

- Variação do processo: composto de variação da medição e parte a parte. Ela pode ser estimada a partir de uma grande amostra de dados históricos, ou de partes do estudo. Você escolhe estimar das partes. O número de partes neste estudo é muito maior do que o requisito típico de 10. Se as partes selecionadas representam a variabilidade típica do processo, essa estimativa da variação do processo deve ser adequada.

VARIAÇÃO DE MEDIÇÃO

Operadores ≤ 2 ou Partes < 10

- Variação de medição: estimada das partes, ela é dividida em Reprodutibilidade e Repetibilidade. O número de partes e operadores não atende o requisito típico de 10 partes e 3 operadores. As estimativas de variação de

Operadores ≥ 3 e ≤ 5 e partes ≥ 10

- Variação de medição: estimada das partes, ela é dividida em Reprodutibilidade e Repetibilidade. O número de partes e operadores não atende o requisito típico de 10 partes e 3 operadores. Isso é normalmente adequado para estimar a repetibilidade, mas a estimativa de reprodutibilidade é menos precisa. Se a estimativa de % de processo para reprodutibilidade for grande, você deve examinar as diferenças entre operadores e determinar se essas diferenças são prováveis de se estenderem para outros operadores.

Operadores > 5 e partes ≥ 10

- Variação de medição: estimada das partes, ela é dividida em Reprodutibilidade e Repetibilidade. O número de partes e operadores atende o requisito típico de 10 partes e 3 operadores. e é normalmente adequado para estimar a repetibilidade. O operador adicional melhora a precisão da estimativa de reprodutibilidade.

Referências

Burdick, R.K., Borror, C. M., and Montgomery, D.C. (2005). *Design and analysis of gauge R&R studies: Making decisions with confidence intervals in random and mixed ANOVA models*. Philadelphia, PA: Society for Industrial Applied Mathematics (SIAM).

Automotive Industry Action Group (AIAG) (2003). *Measurement systems analysis (MSA) manual (3rd edition)*. Southfield, MI: Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force.

Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. New York, NY: Wiley.

Montgomery, D.C., and Runger, G.C. (1993 a). Gage capability and designed experiments. Part I: Basic methods. *Quality Engineering*, 6 (1993/1994), 115 – 135.

Montgomery, D.C., and Runger, G.C. (1993 b). Gage capability analysis and designed experiments. Part II: Experimental design models and variance component estimation. *Quality Engineering*, 6 (1993/1994), 289-305.

Raffaldi, J. and Ramsier, S. (2000). 5 ways to verify your gages. *Quality Magazine*, 39 (3), 38-42.

Tsai, P. (1988). Variable gage repeatability and reproducibility study using the analysis of variance method. *Quality Engineering*, 1(1), 107-115.

Vardeman, S.B. and VanValkenburg, E.S. (1999). Two-way random-effects analyses and gage R&R studies. *Technometrics*, 41 (3), 202-211.

Apêndice A: Avaliação do efeito das partes na variação parte a parte

Como não existe uma fórmula exata para calcular o intervalo de confiança para o desvio padrão parte a parte, realizamos uma simulação para estimar o intervalo. Para focar a simulação em como o número de partes afeta a precisão da variação estimada parte a parte, examinamos a razão do intervalo de confiança estimado para o desvio padrão das partes sobre o desvio padrão real das partes. Conforme o número de partes aumenta, o intervalo torna-se mais estreito. Depois, identificamos o número de partes de forma que a margem de erro para a razão seja de 10% ou 20%. O intervalo da margem de erro de 10% é (0,9, 1,1) e da margem de erro de 20% é (0,8, 1,2).

Configuração da simulação

O estudo de medição R&R supõe que a medição $k^{\text{ésima}}$ da parte $i^{\text{ésima}}$ pelo operador $j^{\text{ésimo}}$, definido como Y_{ijk} , se ajusta ao modelo a seguir:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Em que

$$i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, K, \text{ e}$$

$\alpha_i, \beta_j, \gamma_{ij}$ e ε_{ijk} são distribuídos, normalmente, independentemente, com média 0 e variâncias de $\sigma_p^2, \sigma_0^2, \sigma_{OP}^2$ e σ_e^2 . Aqui $\alpha_i, \beta_j, \gamma_{ij}$ e ε_{ijk} representam partes, operadores, partes x operadores e termos de erro.

Permita que r seja a razão do desvio padrão da medição total sobre o desvio padrão do total do processo. Então,

$$r = \frac{\sqrt{\text{Variância da repetibilidade} + \text{Variância da reprodutibilidade}}}{\sqrt{\text{Variância das partes} + \text{Variância a repetibilidade} + \text{Variância da reprodutibilidades}}}$$
$$= \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_0^2 + \sigma_{PO}^2}}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_e^2 + \sigma_0^2 + \sigma_{PO}^2}}$$

Tipicamente, a regra a seguir é usada para determinar se o sistema de medição é aceitável:

$r \leq 0,1$ (10%): aceitável

$0,1 < r \leq 0,3$: marginal

$0,3 < r$: inaceitável

Escolhemos $r = 0,1$ (aceitável), $r = 0,25$ (marginal) e $r = 0,35$ (inaceitável) para definir as três regiões. Para o propósito da simulação, assumimos que a variância de repetibilidade é igual a variância de reprodutibilidade, que dá:

$$\frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_e^2}}{\sqrt{\sigma_p^2 + 2\sigma_e^2}} = r \Rightarrow \sigma_p = \frac{\sqrt{(2 - 2r^2)}}{r} \sigma_e$$

Usamos $\sigma_e=0,001$ e 1 , $\sigma_0^2 = \sigma_{p0}^2 = 0,5\sigma_e^2$ e $\sigma_p = \frac{\sqrt{(2-2r^2)}}{r} \sigma_e$ para gerar as observações e assumir que 3 operadores medem cada parte duas vezes para avaliar como o número de partes afetam o desvio padrão das partes.

Essas são etapas de simulação que seguimos para cada número de partes, r e σ_e :

1. Gerar 5.000 amostras usando o modelo acima.
2. Estimar desvio padrão da parte e calcular a razão do desvio padrão estimado sobre o desvio padrão verdadeiro para todas as 5.000 amostras.
3. Ordene as 5.000 razões em ordem crescente. Das 5.000 razões ordenadas, as razões 125^a e 4.875^a representam os limites inferior e superior do intervalo no nível de confiança de 95%, e as razões 250^a e 4.750^a representam os limites inferior e superior do intervalo no nível de confiança de 90%.
4. Examine os intervalos para identificar o número de partes, de tal forma, que a margem de erro seja de 10% ou 20%. O intervalo da margem de erro de 10% é (0,9, 1,1). O intervalo da margem de erro de 20% é (0,8, 1,2).

Resultados da simulação

Os resultados nas Tabelas 1-6 mostram os resultados da simulação em cada nível de confiança para diferentes números de partes, com cada tabela correspondendo a uma combinação específica de valores para r e σ_e . No geral, esses resultados mostram que/:

- Usando-se 10 partes, 3 operadores e 2 réplicas, a razão do intervalo de confiança de 90% sobre o desvio padrão real é de cerca de (0,61, 1,37) com 35% a 40% de margem de erro. No nível de confiança de 95%, o intervalo é de cerca de (0,55, 1,45), com margem de erro de 45%. Portanto, 10 partes não são suficientes para produzir uma estimativa precisa para o componente de variação parte a parte.
- Você precisa de aproximadamente 35 partes para ter uma confiança de 90% ao estimar a variação parte a parte dentro de 20% do valor real.
- Você precisa de aproximadamente 135 partes para ter uma confiança de 90% ao estimar a variação parte a parte dentro de 10% do valor real.

Observe que este resumo dos resultados não é específico de uma determinada combinação de r e de σ_e . As linhas correspondentes aos resultados com marcações acima, são realçadas nas Tabelas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 a seguir.

Tabela 1 Medição aceitável ($r = 0,1$), $\sigma_e = 0,001$, desvpad da parte real = 0,014071247

Número de partes	Razão do intervalo de confiança estimado para desvpad da parte/desvpad da parte real	
	Confiança de 95%	Confiança de 90%
3	(0,15295, 1,93755)	(0,22195, 1,73365)
5	(0,34415, 1,67035)	(0,41861, 1,53873)
10	(0,55003, 1,44244)	(0,60944, 1,36992)

	Razão do intervalo de confiança estimado para desvpad da parte/desvpad da parte real	
Número de partes	Confiança de 95%	Confiança de 90%
15	(0,63295, 1,36927)	(0,68721, 1,30294)
20	(0,68532, 1,31187)	(0,7295, 1,25701)
25	(0,7123, 1,27621)	(0,75578, 1,23251)
30	(0,74135, 1,24229)	(0,77645, 1,20841)
35	(0,76543, 1,23033)	(0,80066, 1,19706)
50	(0,79544, 1,20337)	(0,82636, 1,16595)
100	(0,85528, 1,13696)	(0,88063, 1,11635)
135	(0,87686, 1,12093)	(0,89448, 1,09760)
140	(0,88241, 1,11884)	(0,90130, 1,09974)

Tabela 2 Medição aceitável ($r = 0,1$), $\sigma_e = 1$, desvpad de parte real = 14,071247

	Razão do intervalo de confiança estimado para desvpad da parte/desvpad da parte real	
Número de partes	Confiança de 95%	Confiança de 90%
5	(0,34656, 1,68211)	(0,42315, 1,5588)
10	(0,55496, 1,45382)	(0,61319, 1,38233)
15	(0,63484, 1,36949)	(0,68767, 1,30505)
35	(0,76233, 1,23513)	(0,79749, 1,19623)
40	(0,77256, 1,21518)	(0,81224, 1,18121)
135	(0,88017, 1,12345)	(0,89883, 1,10249)
140	(0,88004, 1,11725)	(0,89787, 1,09713)
145	(0,88281, 1,11886)	(0,89966, 1,09583)
150	(0,88302, 1,11132)	(0,90096, 1,09296)

Tabela 3 Medição marginal ($r = 0,25$), $\sigma_e = 0,001$, desvpad parte real = 0,005477225575

Número de partes	Razão do intervalo de confiança estimado para desvpad da parte/desvpad da parte real	
	Confiança de 95%	Confiança de 90%
30	(0,73879, 1,25294)	(0,77982, 1,21041)
35	(0,75881, 1,24383)	(0,79848, 1,20068)
40	(0,77281, 1,22813)	(0,80369, 1,18788)
135	(0,87588, 1,1191)	(0,89556, 1,10093)
140	(0,87998, 1,12001)	(0,89917, 1,09717)
145	(0,881, 1,11812)	(0,89852, 1,09710)
150	(0,88373, 1,11563)	(0,90345, 1,09706)

Tabela 4 Medição marginal ($r = 0,25$), $\sigma_e = 1$, desvpad parte real = 5,477225575

Número de partes	Razão do intervalo de confiança estimado para desvpad da parte/desvpad da parte real	
	Confiança de 95%	Confiança de 90%
30	(0,74292, 1,25306)	(0,78159, 1,20872)
35	(0,76441, 1,24391)	(0,79802, 1,20135)
40	(0,77525, 1,21339)	(0,80786, 1,17908)
135	(0,87501, 1,11711)	(0,89512, 1,09758)
140	(0,87934, 1,11756)	(0,89881, 1,09862)
145	(0,88308, 1,1153)	(0,90056, 1,09806)

Tabela 5 Medição inaceitável ($r = 0,35$), $\sigma_e = 0,001$, desvpad parte real = 0,00378504

Número de partes	Razão do intervalo de confiança estimado para desvpad da parte/desvpad da parte real	
	Confiança de 95%	Confiança de 90%
30	(0,74313, 1,25135)	(0,77427, 1,20568)
35	r(0,75409, 1,24332)	(0,79444, 1,19855)
40	(0,76582, 1,22289)	(0,80599, 1,18615)
135	(0,87641, 1,12043)	(0,89507, 1,09820)

Número de partes	Razão do intervalo de confiança estimado para desvpad da parte/desvpad da parte real	
	Confiança de 95%	Confiança de 90%
140	(0,87635, 1,11539)	(0,89651, 1,09368)
145	(0,88339, 1,11815)	(0,89772, 1,09591)

Tabela 6 Medição inaceitável ($r = 0,35$), $\sigma_e = 1$, desvpad parte real = 3,78504

Número de partes	Razão do intervalo de confiança estimado para desvpad da parte/desvpad da parte real	
	Confiança de 95%	Confiança de 90%
30	(0,7375, 1,261)	(0,77218, 1,21285)
35	(0,74987, 1,23085)	(0,79067, 1,1886)
40	(0,77187, 1,2227)	(0,80648, 1,18329)
135	(0,87572, 1,11877)	(0,89409, 1,09827)
140	(0,87798, 1,11634)	(0,8959, 1,09695)
145	(0,87998, 1,11513)	(0,89683, 1,09534)

Número de operadores

O desvio padrão das partes e o desvio padrão de operadores são estimados identicamente, usando-se o modelo ANOVA. Portanto, os resultados da simulação em partes também se aplicam à variação de reprodutibilidade. Dois ou três operadores não são suficientes para fornecer uma estimativa precisa para reprodutibilidade. Contudo, o problema é menos crítico para operadores, se a magnitude da variação de parte a parte for muito maior do que a variação de operador, que é um cenário provável para diversas aplicações.

Por exemplo, suponha que o desvio padrão parte a parte é 20 vezes o desvio padrão do operador. O desvio padrão da parte é 20, e o desvio padrão do operador é 1. Supondo-se que a repetibilidade seja a mesma que a reprodutibilidade, a razão real da variação do sistema de medição sobre a variação total do processo é:

$$\sqrt{\frac{1 + 1}{400 + 1 + 1}} = 0,0705$$

Agora, suponha que a margem de erro para estimativa do desvio padrão do operador é 40% (alta). Isto é, o desvio padrão do operador estimado poderia ser 1,4. Portanto, a razão do sistema de medição geral, o total torna-se:

$$\sqrt{\frac{1,4^2 + 1,4^2}{400 + 1,4^2 + 1,4^2}} = 0,0985$$

Como esse valor é menor do que 0,10, uma grande variação de reprodutibilidade não afeta a aceitação de medição se 10% for o valor de corte.

Se a variação do operador for praticamente a mesma que a variação da parte, você precisará de um grande número de operadores para representar o sistema de medição e para avaliar a medição com exatidão.

Apêndice B: Estimando a repetibilidade

Configuração do cálculo

Diferente dos intervalos de confiança para o desvio padrão parte a parte, que são baseados em uma aproximação, a razão do desvio padrão estimado da repetibilidade sobre seu valor real segue uma distribuição qui-quadrado. Portanto, podemos calcular os limites inferior e superior da razão associada com a probabilidade de 90%, e depois avaliar como ambos os limites se aproximam de 1 conforme o número de partes, o número de operadores e o número de réplicas aumentam.

Usando a mesma notação definida no Apêndice A, a variância de repetibilidade é estimada por

$$S^2 = \sum (Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij.})^2 / IJ(K - 1)$$

Desta forma, $\frac{IJ(K-1)S^2}{\sigma_e^2}$ segue uma distribuição qui-quadrado com $IJ(K-1)$ graus de liberdade (gl), onde I é o número de partes, J é o número de operadores, e K é o número de réplicas.

Com base neste resultado, a razão do desvio padrão estimado sobre seu valor real satisfaz a seguinte equação de probabilidade:

$$\text{Probabilidade} \left(\sqrt{\frac{\chi_{gl, \alpha/2}^2}{gl}} \leq \frac{S}{\sigma_e} \leq \sqrt{\frac{\chi_{gl, 1-(\alpha/2)}^2}{gl}} \right) = 1 - \alpha$$

em que $gl = IJ(K-1) =$ número de partes * número de operadores * (número de réplicas - 1). Se o número de réplicas for igual a 2, os graus de liberdade serão iguais ao número de partes vezes o número de operadores.

Ao usar esta fórmula, para cada valor dado dos graus de liberdade, calculamos os limites inferior e superior da razão $\frac{S}{\sigma_e}$ a uma probabilidade de 90%. Depois, identificamos os graus de liberdade de forma que o desvio padrão estimado esteja dentro de 10% e 20% de seu valor real. O intervalo correspondente é (0,9, 1,1) para a margem de erro de 10% e (0,8, 1,2) para a margem de erro de 20%.

Resultados dos cálculos

O gráfico da Figura 1 mostra os limites inferior e superior da razão $\frac{S}{\sigma_e}$ a uma probabilidade de 90% versus os graus de liberdade, com os graus de liberdade variando de 1 a 200.

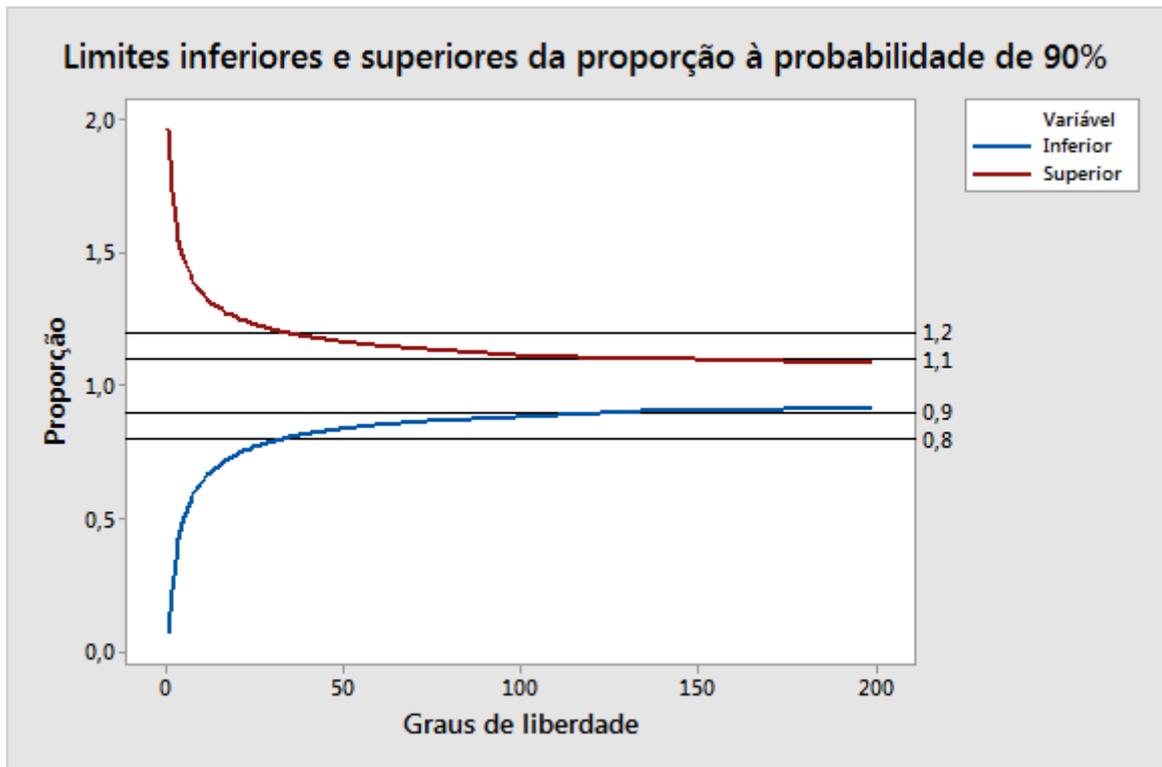


Figura 1 Limites inferior e superior de $\frac{s}{\sigma_e}$ a uma probabilidade de 90% versus graus de liberdade (1 a 200)

Observe que o intervalo formado pelos limites inferior e superior diminui conforme os graus de liberdade aumentam. A largura do intervalo diminui dramaticamente conforme os graus de liberdade aumentam de 1 para 50. Podemos ver isso mais claramente no gráfico ampliado, mostrado na Figura 2, que exibe os resultados de graus de liberdade de 1 a 50.

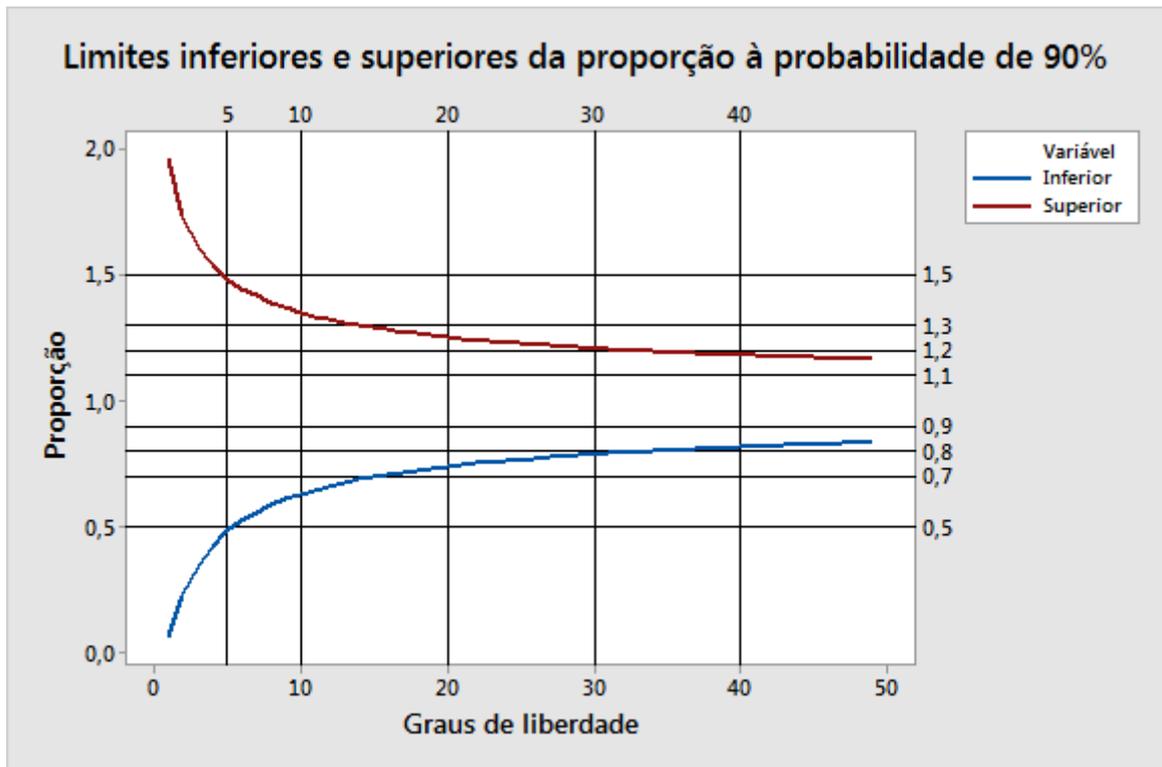


Figura 2 Limites inferior e superior de $\frac{S}{\sigma_e}$ a uma probabilidade de 90% versus graus de liberdade (1 a 50)

Conforme mostrado na Figura 2, quando os graus de liberdade são menos de 10, o intervalo é maior do que (0,63, 1,35). Conforme os graus de liberdade aumentam, o intervalo torna-se mais estreito, conforme indicado pelos valores na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 Graus de liberdade e limites inferior e superior a uma probabilidade de 90%

Graus de liberdade	Intervalo formado pelos limites inferior e superior
5	(0,48, 1,49)
10	(0,63, 1,35)
15	(0,70, 1,29)
20	(0,74, 1,25)
25	(0,76, 1,23)
30	(0,79, 1,21)
35	(0,80, 1,19)
40	(0,81, 1,18)

Portanto, a uma probabilidade de 90%, você precisa de cerca de 35 graus de liberdade para obter uma margem de erro de 20% para a estimativa de desvio padrão de repetibilidade.

Lembre-se de que os graus de liberdade são iguais ao Número de partes * Número de operadores * (Número de réplicas – 1). Portanto, a recomendação típica de 10 partes, 3 operadores e 2 réplicas fornece os graus de liberdade (30) que estão perto deste requisito. Para obter uma margem de erro de 10% a uma probabilidade de 90%, você precisa de cerca de 135 graus de liberdade (consulte a Figura 1).

© 2020 Minitab, LLC. All rights reserved. Minitab®, Minitab Workspace™, Companion by Minitab®, Salford Predictive Modeler®, SPM®, and the Minitab® logo are all registered trademarks of Minitab, LLC, in the United States and other countries. Additional trademarks of Minitab, LLC can be found at www.minitab.com. All other marks referenced remain the property of their respective owners.

