

Estudo RR - Comparação de um paquímetro analógico com outro digital

(<http://www.statistical.com.br/artigos.asp>)

Empresa Expandra

Adriano Rocco (adriano.rocco@expandra.com.br), Michal Kulpa (michal.kulpa@expandra.com.br), Nice Maria Furlan (Nice@expandra.com.br), Pedro Guilherme de Oliveira Santoro (pedro.santoro@expandra.com.br)



Empresa M. I. Domenech

(<http://www.statistical.com.br>)

A [Estratégia Seis Sigma](#) procura resolver os problemas chaves da empresa através de projetos coordenados por um [Black Belt](#). Se bem escolhidos e coordenados, a conclusão destes projetos traz retornos interessantes para as empresas. Muitas vezes o retorno pelos projetos Seis Sigma produz aumento nos lucros que supera os 20%.

A maioria das empresas no mundo que trabalha com Seis Sigma utiliza o ciclo DMAIC (Figura 1).

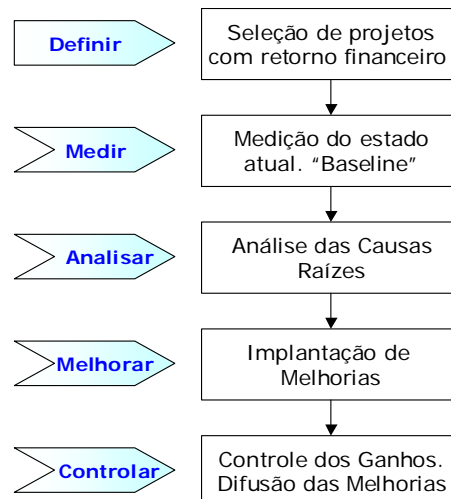


Figura 1 – Ciclo DMAIC de melhoria Seis Sigma

Na Figura 2 foi feita uma descrição mais abrangente do ciclo DMAIC com ênfase na etapa Medir. Pela experiência da M. I. Domenech, esta etapa é uma das mais críticas; a nossa estatística é que no geral, 50-70% dos Sistemas de Medição das empresas não são adequados. No artigo de Swayne¹, relata também que a etapa Medir é uma das etapas do DMAIC consideradas mais críticas pela maioria das empresas que trabalha com Seis Sigma.

¹ Swayne, Brian (Juran Institute, May, 2003). Where has all the magic gone? Six Sigma Forum Magazine, p. 22-27.

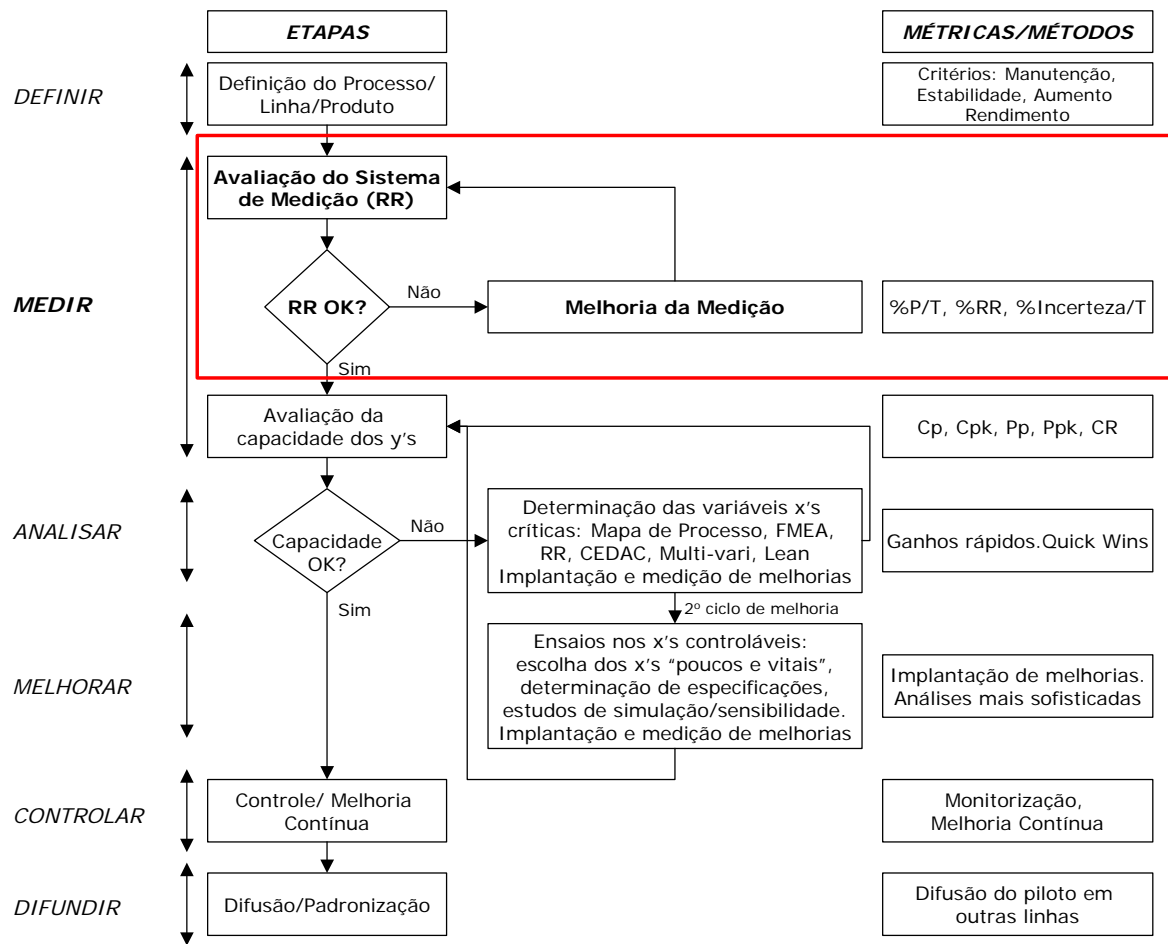


Figura 2 – Descrição sucinta das etapas do ciclo DMAIC. A medição é crítica para o sucesso dos projetos

Na Figura 3 apresenta-se a formulação do [estudo RR](#) (repetibilidade e reprodutibilidade) realizado para avaliar a precisão de um Sistema de Medição. A medição se relaciona com o comprimento de uma peça. Na Figura 3 destacamos o ciclo de raciocínio considerado para a resolução deste caso:

- Em primeiro lugar são formulados os objetivos práticos do problema
- Estes objetivos são traduzidos em linguagem estatística
- A partir da formulação estatística do problema se seleciona um esquema de amostragem adequado
- Após realizar os ensaios, se realiza análise estatística dos dados
- Extraem-se as conclusões estatísticas
- Extraem-se as conclusões práticas/de negócio para tomada de decisões

Veremos ao longo do trabalho como avançamos no fluxograma.

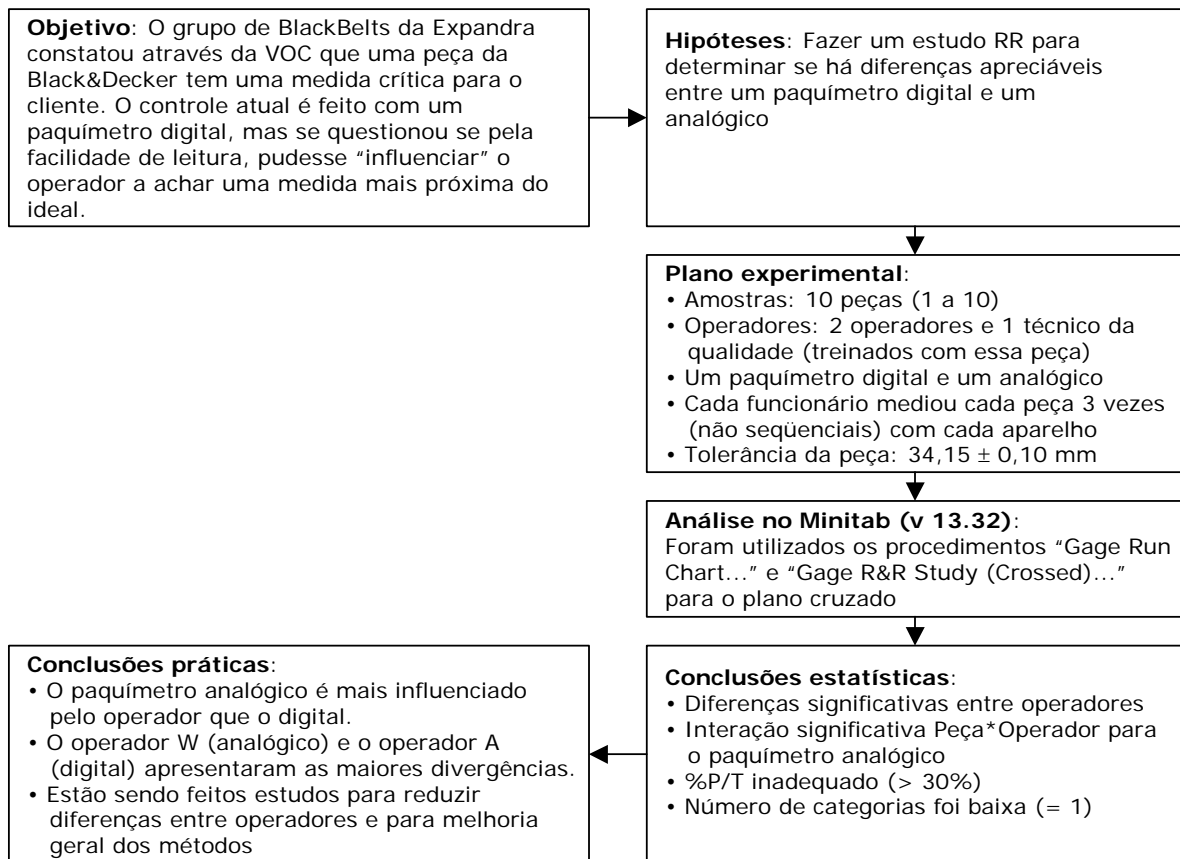


Figura 3 – Fluxograma para a comparação dos paquímetros analógico e digital

A seguir descreve-se de forma resumida os passos realizados para resolver este problema.

Objetivo/Hipótese:

Deseja-se comparar as medidas realizadas por dois paquímetros (digital e analógico). Para isto será feito um estudo RR.

Plano experimental:

Como as mesmas peças podem ser medidas várias vezes, será utilizado o plano cruzado representado na Figura 4. Três funcionários mediram 3 vezes, cada uma de 10 peças, utilizando um paquímetro digital e um analógico. As leituras foram realizadas de forma aleatória pelos operadores. Os resultados observados estão no Apêndice. Para diminuir o espaço do Apêndice A as medições foram colocadas em colunas separadas para cada analista. Para analisar estes dados no Minitab os dados dos três analistas têm que ficar um embaixo do outro.

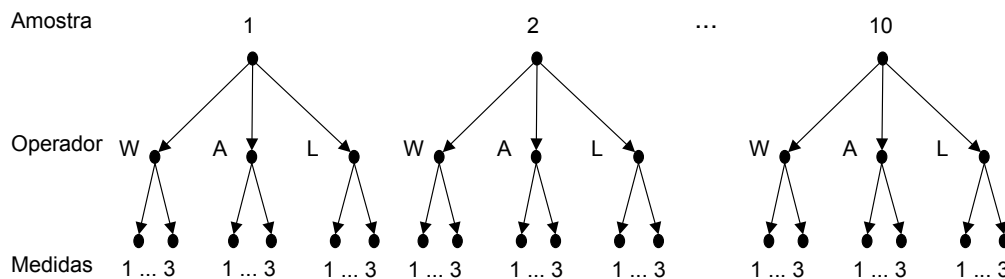


Figura 4 – Plano experimental cruzado para o estudo RR

Análise no Minitab:

Foram utilizados dois procedimentos para a análise dos dados (Minitab Versão 13.32):

- Stat\Quality Tools\Gage Run Chart...
- Stat\Quality Tools\Gage R&R Study (Crossed)...

No menu do procedimento "Gage Run Chart" ingressamos com as colunas contendo a informação da peça, operador e aquela com as medições de comprimento (analógico e digital). Os resultados observados para os dados do paquímetro analógico e digital estão nas Figuras 5 e 6.

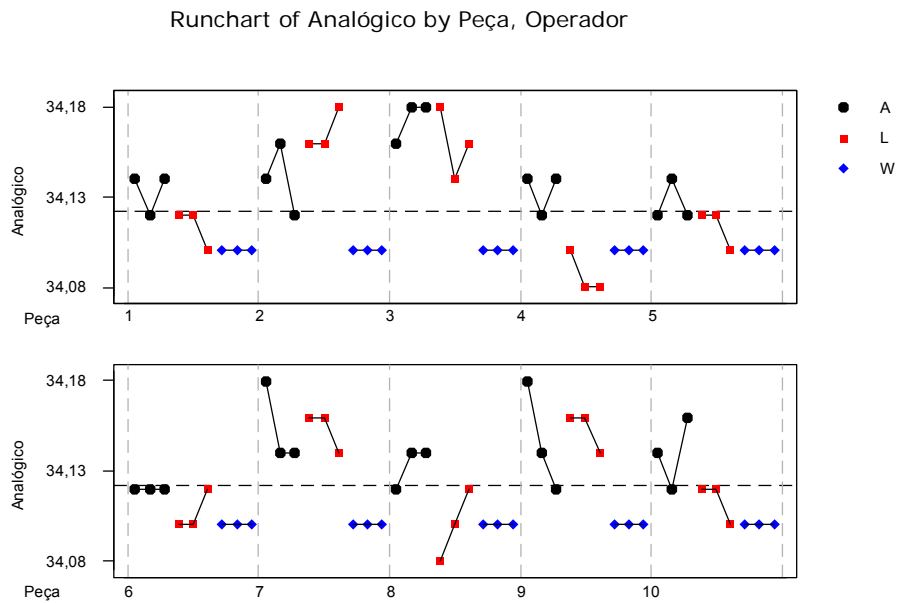


Figura 5 – Resultados do paquímetro analógico

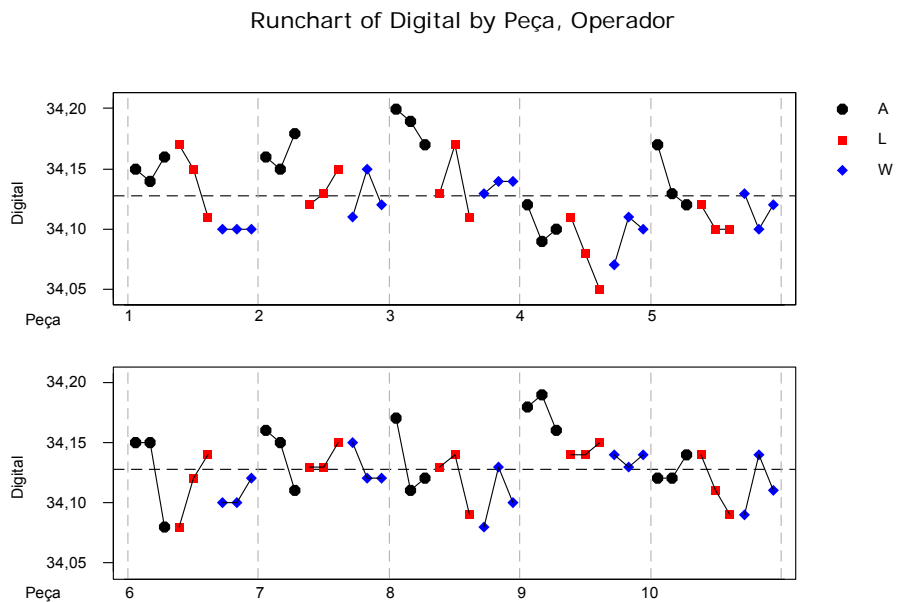


Figura 5 – Resultados do paquímetro digital

Conclusões das Figuras 5 e 6:

- O paquímetro analógico se mostrou bastante sensível às destrezas de cada operador. Exemplo: o operador W obteve com ele medidas idênticas para todas as peças (isto não aconteceu com o digital). Observa-se também que as medidas do operador W foram em geral mais baixas que as dos outros operadores.
- Na Figura 7 ilustra-se isto com um gráfico de interação. Em cada gráfico foram representadas as médias obtidas pelos três operadores para cada uma das 10 peças. Novamente observa-se que paquímetro digital é superior ao analógico.
- Mesmo para o paquímetro digital, o operador A aparentemente apresenta resultados superiores aos resultados obtidos pelos operadores L e W.

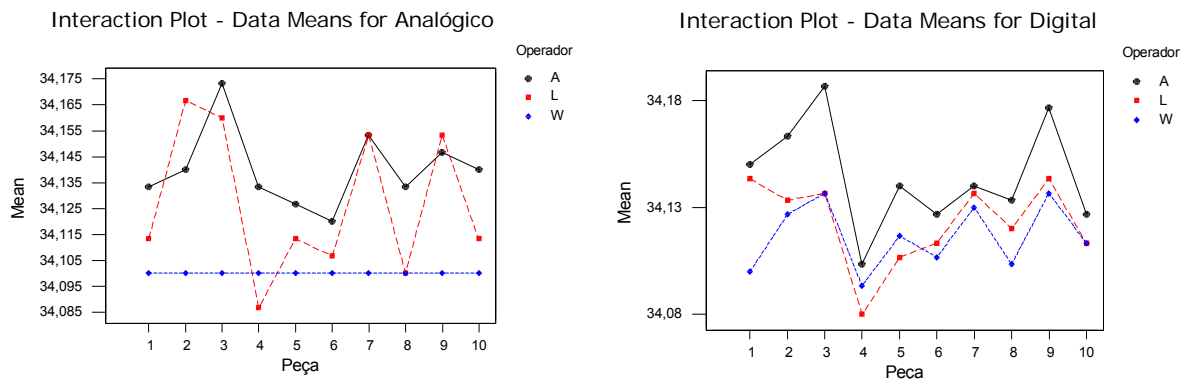


Figura 7 – Gráficos de interação Operador * Peça para os paquímetros analógico e digital

No menu “Gage R&R Study (Crossed)” ingressamos com as colunas contendo a informação da peça, operador e aquela com as medições de comprimento (analógico e digital). No botão “Options” entramos com a largura da especificação (Process tolerance = 0,20, ver Figura 3). Os resultados obtidos para os dois paquímetros estão na Tabela 1. Os gráficos resultantes estão nas Figuras 8 e 9.

Conclusões da Tabela 1:

- Na tabela ANOVA é possível avaliar: Diferenças significativas entre peças, entre operadores e interação Operador*Peças. Nas análises dos dois paquímetros foram observadas diferenças significativas entre operadores (valor de $P < 0,01$); lembre das observações a) e c) das Figuras 5 e 6. Na análise do paquímetro analógico foi possível detectar interação significativa Operador*Peça ($P < 0,01$), enquanto que isto não foi observado para o paquímetro digital ($P > 0,05$); isto último confirma o observado na Figura 7 (observação b, acima).
- No paquímetro digital a reprodutibilidade correspondeu a 69% da variância total da medição, enquanto que para o paquímetro analógico este valor foi 22%. Isto mostra a menor influência do operador no paquímetro digital. A variância devida à repetibilidade do paquímetro analógico (0,00016) foi menos da metade da correspondente ao paquímetro digital (0,00043), mas esta comparação não é correta devido a que o operador “W” apresentou todas as medidas idênticas com o paquímetro analógico, diminuindo em consequência a variância da repe.
- Uma medida muito importante quando se usa a medição para classificar a peça como dentro ou fora da especificação é a %P/T (um índice de capacidade do sistema de medição). Considera-se aceitável quando este índice for menor que 30%. Neste caso nenhum dos aparelhos mostrou-se adequado (%P/T > 65% para os dois paquímetros), indicando que **devem ser feitas melhorias nesta medida**.
- Finalmente um outro índice que mostra se a medida consegue ou não discriminar peças diferentes é o “Number of Distinct Categories”. Este valor deveria ser maior que 4. Novamente observa-se que a precisão da medida deveria ser melhorada.

Tabela 1 – Resultados do RR (crossed) para os paquímetros analógico e digital

Gage R&R Study - ANOVA Method - Analógico					
Two-Way ANOVA Table With Interaction					
Source	DF	SS	MS	F	P
Peça	9	0,0149333	0,0016593	2,2400	0,06945
Operador	2	0,0248889	0,0124444	16,8000	0,00008 **
Operador*Peça	18	0,0133333	0,0007407	4,6296	0,00000 **
Repeatability	60	0,0096000	0,0001600		
Total	89	0,0627556			

Gage R&R		
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	7,44E-04	87,93
Repeatability	1,60E-04	18,92
Reproducibility	5,84E-04	69,02
Operator	3,90E-04	46,13
Operator*Peça	1,94E-04	22,89
Part-To-Part	1,02E-04	12,07
Total Variation	8,46E-04	100,00

Source	StdDev (SD)	Study Var (5,15*SD)	%Study Var (%RR)	%Tolerance (%P/T)
Total Gage R&R	2,73E-02	0,140445	93,77	70,22
Repeatability	1,26E-02	0,065143	43,49	32,57
Reproducibility	2,42E-02	0,124424	83,08	62,21
Operator	1,98E-02	0,101720	67,92	50,86
Operator*Peça	1,39E-02	0,071654	47,84	35,83
Part-To-Part	1,01E-02	0,052027	34,74	26,01
Total Variation	2,91E-02	0,149772	100,00	74,89

Number of Distinct Categories = 1

Gage R&R Study - ANOVA Method - Digital					
Two-Way ANOVA Table With Interaction					
Source	DF	SS	MS	F	P
Peça	9	0,0282322	0,0031369	9,0135	0,00005
Operador	2	0,0132689	0,0066344	19,0631	0,00004 **
Operador*Peça	18	0,0062644	0,0003480	0,7640	0,73150 NS
Repeatability	60	0,0273333	0,0004556		
Total	89	0,0750989			

Two-Way ANOVA Table Without Interaction					
Source	DF	SS	MS	F	P
Peça	9	0,0282322	0,0031369	7,2826	0,00000
Operador	2	0,0132689	0,0066344	15,4024	0,00000
Repeatability	78	0,0335978	0,0004307		
Total	89	0,0750989			

Gage R&R		
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	6,38E-04	67,95
Repeatability	4,31E-04	45,91
Reproducibility	2,07E-04	22,04
Operator	2,07E-04	22,04
Part-To-Part	3,01E-04	32,05
Total Variation	9,38E-04	100,00

Source	StdDev (SD)	Study Var (5,15*SD)	%Study Var (%RR)	%Tolerance (%P/T)
Total Gage R&R	2,52E-02	0,130034	82,43	65,02
Repeatability	2,08E-02	0,106885	67,76	53,44
Reproducibility	1,44E-02	0,074058	46,95	37,03
Operator	1,44E-02	0,074058	46,95	37,03
Part-To-Part	1,73E-02	0,089303	56,61	44,65
Total Variation	3,06E-02	0,157746	100,00	78,87

Number of Distinct Categories = 1

Conclusões das Figuras 8 e 9:

- 1 Este gráfico mostra as diferenças entre as medidas máxima e mínima realizadas por cada operador para cada peça. Quanto menor este valor, melhor (menor dispersão entre valores). O operador W apresentou valores iguais a zero para todas as peças (paquímetro analógico). No caso do paquímetro digital todos os operadores apresentaram variabilidades parecidas.
- 2 Este gráfico mostra as médias das medidas realizadas por cada operador para cada peças. Idealmente este gráfico deveria mostrar o mesmo comportamento para os três operadores e limites de controle (linhas vermelhas) bem fechados (com quase todos os pontos fora dos limites). Quase todos os pontos deveriam ficar fora dos limites porque a variabilidade utilizada para construir este gráfico é o desvio padrão da repe. Se muitos valores ficam dentro é um indício que "Number of Distinct Categories" será pequeno e que a medição não é adequada (como neste caso).
- 3 Este gráfico deveria mostrar a linha vermelha na horizontal, indicando que não há diferenças apreciáveis entre as médias dos três operadores. No caso do paquímetro analógico o operador W mostrou uma média menor e no caso do digital o operador A mostrou uma média maior (lembre que pelo teste ANOVA, estas diferenças foram significativas).
- 4 Este gráfico é equivalente ao gráfico da Figura 7. Idealmente as curvas dos três operadores deveriam ser paralelas, indicando que se comportam da mesma forma quando medem todas as peças. O paquímetro analógico, como já foi mencionado, mostrou uma interação grande Peça*Operador.

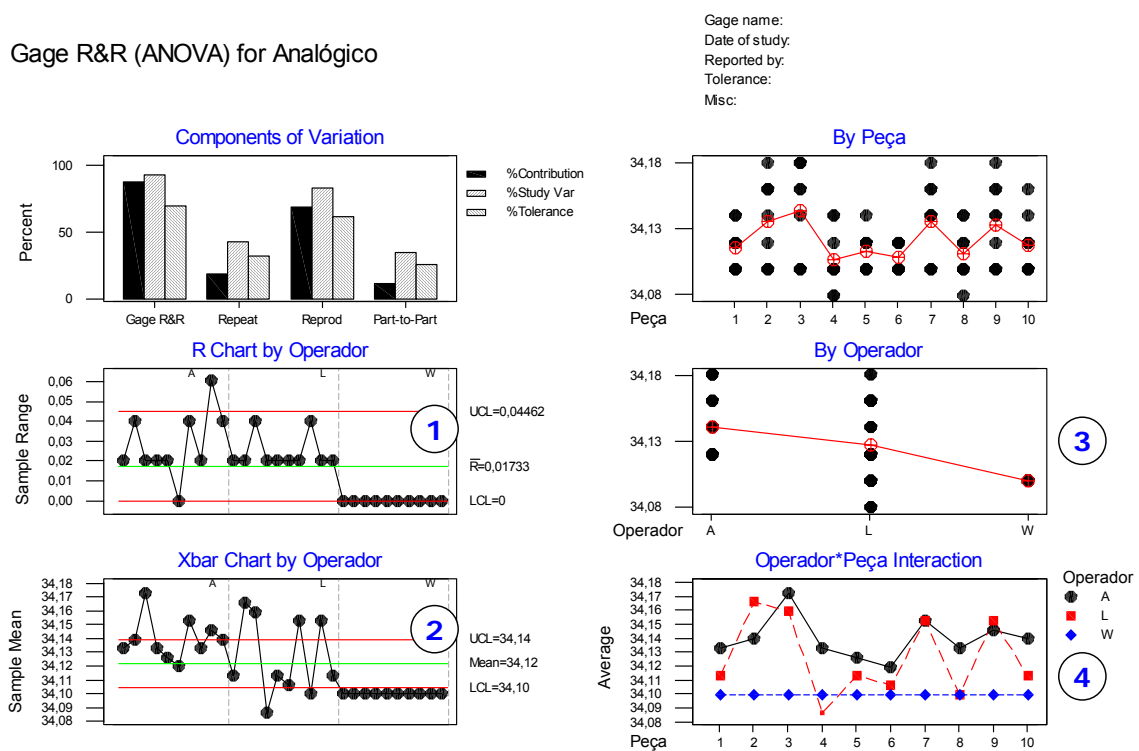
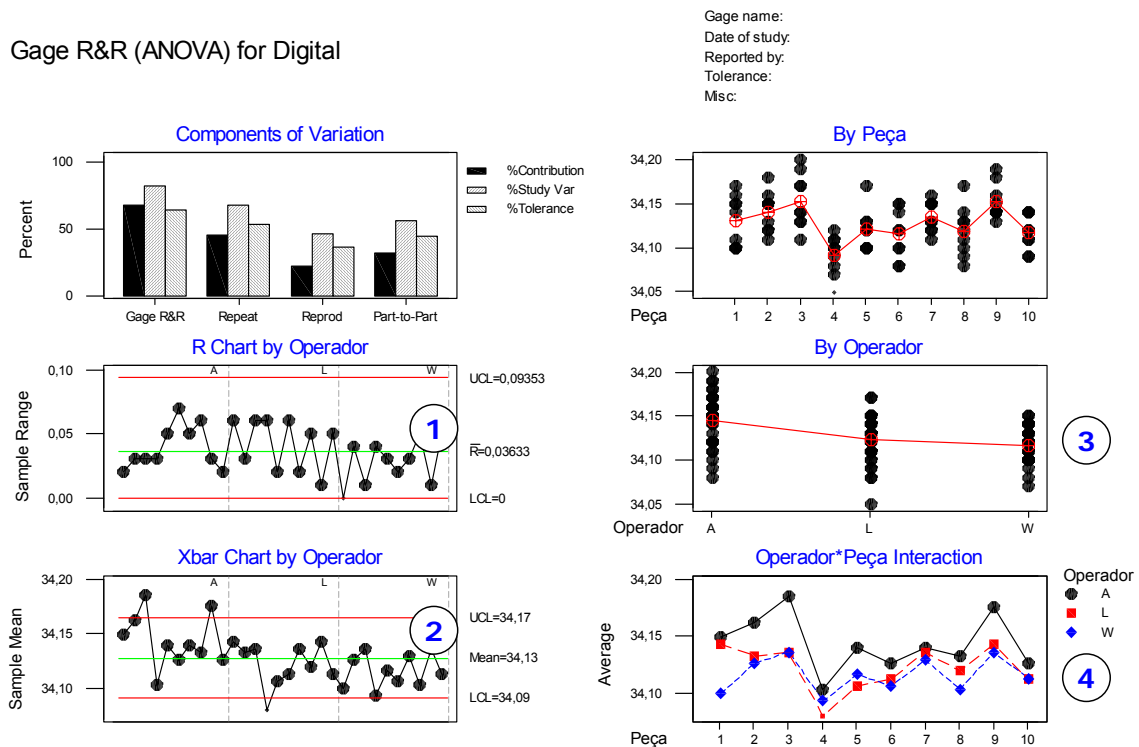


Figura 8 – Gráficos da análise RR para o paquímetro ANALÓGICO

Gage R&R (ANOVA) for Digital

Figura 9 – Gráficos da análise RR para o paquímetro **DIGITAL****Conclusões estatísticas do trabalho:**

- Foram encontradas diferenças estatisticamente significantes entre operadores e interação significativa Peça*Operador para o paquímetro analógico.
- A %P/T foi inadequada para os dois paquímetros (> 65%)
- O número de categorias foi muito baixo para os dois paquímetros (= 1)

Conclusões práticas do trabalho:

- O paquímetro analógico mostrou-se mais influenciado pelo operador que o paquímetro digital.
- O operador W no paquímetro analógico e o operador A no digital foram os que mostraram as maiores divergências. Estão sendo feitos estudos para descobrir as diferenças entre operadores e uniformizar o método de trabalho.
- Estão sendo estudos para melhoria dos dois métodos. Estes estudos poderão incluir melhorias técnicas e operacionais nos métodos de medição, assim como melhoria estatística da medida (medição repetida da mesma peça e obtenção da média destas medidas, Apêndice B).

Apêndice A: [Dados do Estudo RRT](#) correspondentes ao plano da Figura 4

Peça	Operador W		Operador A		Operador L	
	Analógico	Digital	Analógico	Digital	Analógico	Digital
1	34,10	34,10	34,14	34,15	34,12	34,17
2	34,10	34,11	34,14	34,16	34,16	34,12
3	34,10	34,13	34,16	34,20	34,18	34,13
4	34,10	34,07	34,14	34,12	34,10	34,11
5	34,10	34,13	34,12	34,17	34,12	34,12
6	34,10	34,10	34,12	34,15	34,10	34,08
7	34,10	34,15	34,18	34,16	34,16	34,13
8	34,10	34,08	34,12	34,17	34,08	34,13
9	34,10	34,14	34,18	34,18	34,16	34,14
10	34,10	34,09	34,14	34,12	34,12	34,14
1	34,10	34,10	34,12	34,14	34,12	34,15
2	34,10	34,15	34,16	34,15	34,16	34,13
3	34,10	34,14	34,18	34,19	34,14	34,17
4	34,10	34,11	34,12	34,09	34,08	34,08
5	34,10	34,10	34,14	34,13	34,12	34,10
6	34,10	34,10	34,12	34,15	34,10	34,12
7	34,10	34,12	34,14	34,15	34,16	34,13
8	34,10	34,13	34,14	34,11	34,10	34,14
9	34,10	34,13	34,14	34,19	34,16	34,14
10	34,10	34,14	34,12	34,12	34,12	34,11
1	34,10	34,10	34,14	34,16	34,10	34,11
2	34,10	34,12	34,12	34,18	34,18	34,15
3	34,10	34,14	34,18	34,17	34,16	34,11
4	34,10	34,10	34,14	34,10	34,08	34,05
5	34,10	34,12	34,12	34,12	34,10	34,10
6	34,10	34,12	34,12	34,08	34,12	34,14
7	34,10	34,12	34,14	34,11	34,14	34,15
8	34,10	34,10	34,14	34,12	34,12	34,09
9	34,10	34,14	34,12	34,16	34,14	34,15
10	34,10	34,11	34,16	34,14	34,10	34,09

Apêndice B – Uso da repetição das medidas para melhorar a precisão das medidas

Um “método” muito utilizado para melhorar a precisão da medida consiste em emitir a análise como uma média de n determinações, onde este n pode ser calculado utilizando gráficos parecidos ao da Figura b1.

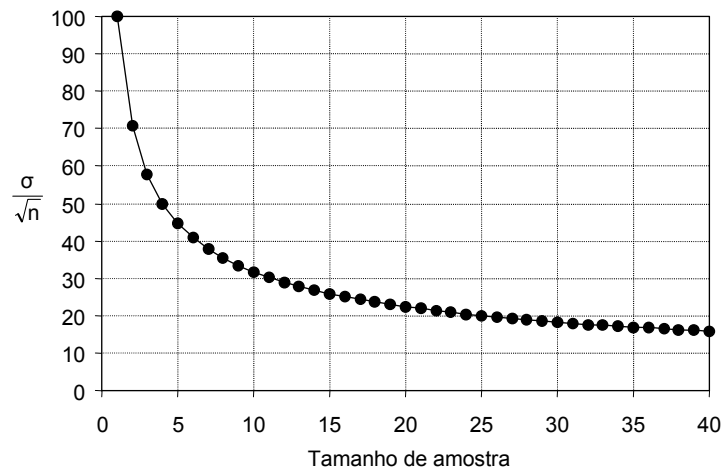


Figura b1 – Efeito do tamanho da amostra sobre a precisão da média

Exemplo: considere a análise de comprimento da peça no estudo considerado previamente, com especificação $34,15 \pm 0,10$ mm. O desvio padrão da análise com o paquímetro digital foi (Tabela 1) $S_{MS} = 0,025$ mm. O quociente $P/T = (5,15 \times 0,0252)/0,20 = 0,65$. O número de vezes que cada peça deveria ser analisada para se obter $P/T < 0.3$ vem dado pela equação²:

$$n > \left(\frac{5,15 \times S_{MS}}{0.3T} \right)^2 \Rightarrow n = \left(\frac{5,15 \times 0,0252}{0.3 \times 0,20} \right)^2 \cong 5$$

Ou seja que, se não forem feitas melhorias técnicas da medição, poderia ser feita uma “melhoria estatística”, repetindo a medição de cada peça 5 vezes e emitindo o resultado como a média de 5 leituras. Observe que esta melhoria não é de graça; o custo da análise é incrementado em função do aumento do número de leituras.

² Usando o conceito que para amostras independentes a variância da média é de n leituras é igual a σ^2/n