

Aplicação da Metodologia “Medidor R&R” em processos de extrusão

Emerson Wruck, Lidiane J. Michelini, Pedro H. S. de Paula, Carlos A. S. Júnior, Danilo M. dos Santos & Ítalo L. Fernandes

O trabalho consistiu em avaliar a capacidade do sistema de medição de um processo de extrusão de tubos de PVC pela metodologia medidor R & R, apoiado pelas cartas do controle estatístico do processo. No experimento realizado, foi constado que grande parte da variabilidade total do processo estava associada à capacidade de medição dos operadores. Foram identificados através da metodologia quais os operadores apresentavam mais dificuldades, além de hábitos de medição inadequados. Dessa forma sugeriu-se um programa de treinamento em medição direcionado, aferição periódica de equipamentos e avaliação constante da capacidade de medição pela metodologia exposta, visando à redução da variabilidade, como consequência a diminuição das perdas.

Palavras-chave: *Sistemas de Medição, Medidor R&R, Cartas de Controle*

The paper consisted of evaluating the capacity of the system of measurement of a drawing process of pipes of PVC for measuring methodology R & R, supported for the charts of the statistical control of the process. In the carried through experiment, he was consisted that great part of the total variability of the process was associated with the capacity of measurement of the operators. The operators had been identified through the methodology which presented more difficulties, beyond inadequate habits of measurement. Of this form a program of training in directed measurement was suggested, periodic equipment gauging and constant evaluation of the capacity of measurement for the displayed methodology, aiming at to the reduction of the variability, as consequence the reduction of the losses.

Keywords: *Systems of Measurement, Measurer R&R, Control Charts.*

Introdução

O perfil mais seletivo e exigente dos clientes aliado a grande competitividade de mercado leva as empresas de diversos setores a investirem mais na qualidade de seus produtos de modo que possam sobressair em relação aos seus concorrentes.

Se um produto deve corresponder às exigências do cliente, deve, em geral, ser produzido por um processo que seja estável ou replicável. Mais precisamente, o processo deve ser capaz de operar com pequena variabilidade em torno das dimensões-alvo ou nominais das características do produto.

Sendo assim, para que uma empresa possa se destacar no mercado em termos de qualidade de seus produtos é necessário promover a melhoria dos processos produtivos. Essa melhoria pode ser obtida por meio da implementação do controle estatístico do processo (CEP), este consiste em uma poderosa coleção de ferramentas de resolução de problemas útil na obtenção da estabilidade do processo e na melhoria da capacidade através da redução da variabilidade¹.

Em alguns casos a maior parte da variabilidade total do processo é devida ao sistema de medição e, em tais circunstâncias, um programa para melhoria da qualidade fatalmente fracassará. Conhecer a magnitude dessas variações dentro do processo de produção é de fundamental importância para o controle mais efetivo da qualidade. Qualquer programa de melhoria de qualidade fica inviabilizado se a capacidade de medição for problemática. Além disso, a partir de estimativas confiáveis dos componentes de variância, ações poderão ser tomadas na construção do programa de controle de qualidade, visando maximizar recursos com treinamentos e compra de equipamentos mais apropriados, ou seja, redução dos custos da qualidade².

Neste contexto, o presente estudo visou avaliar a capacidade de medição da espessura de tubos PVC durante o processo de extrusão, pelos operadores de uma empresa desse segmento em Anápolis-GO, através de um experimento planejado do tipo medidor R&R, amparado por cartas de controle construídos no Software R3 e planejamento de medidor R&R. Analisados os resultados, terão condições de avaliar os efeitos do sistema de medidas na variação total do

processo com mais eficácia e sugerir um procedimento de avaliação constante do sistema de medição, no sentido de buscar um melhoramento contínuo do processo, como consequência a melhoria da qualidade dos produtos.

A METODOLOGIA MEDIDOR R&R

No setor industrial, qualquer problema que envolva mensuração, parte da variabilidade observada será devida ao produto, e parte decorrerá de erro de mensuração ou variabilidade do medidor¹. Ou seja,

$$\sigma_{\text{Total}}^2 = \sigma_{\text{produto}}^2 + \sigma_{\text{medidor}}^2 \quad (1)$$

onde σ_{Total}^2 é a variabilidade total observada, $\sigma_{\text{produto}}^2$ é a componente da variância devida ao produto, e $\sigma_{\text{medidor}}^2$ é a componente da variância devida a erro de mensuração.

Frequentemente ferramentas estatísticas como cartas de controle e o planejamento medidor R&R^{4,5} são utilizadas para avaliar a capacidade de sistemas de medição e estimar as componentes de variância.

Para aplicação destas ferramentas, o experimento consiste em selecionar aleatoriamente um número m de peças, de um mesmo produto, que apresentam características de medida conforme e não conformes. Um número k de operadores responsáveis pelo processo de medição deverá realizar n medições em cada peça. A ordem de realização da medição, a peça medida e o operador devem ser selecionados de forma aleatória. O desenho experimental é ilustrado abaixo:

Tabela 1: Desenho do Experimento

Peças	Operador 1	Operador 2	...	Operador k
1	$x_{111}, x_{112}, \dots, x_{11n}$	$x_{121}, x_{122}, \dots, x_{12n}$...	$x_{1k1}, x_{1k2}, \dots, x_{1kn}$
2	$x_{211}, x_{212}, \dots, x_{21n}$	$x_{221}, x_{222}, \dots, x_{22n}$...	$x_{2k1}, x_{2k2}, \dots, x_{2kn}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
m	$x_{m11}, x_{m12}, \dots, x_{m1n}$	$x_{m21}, x_{m22}, \dots, x_{m2n}$...	$x_{mk1}, x_{mk2}, \dots, x_{mkn}$

Aqui x_{ihj} representa o valor da i -ésima peça, no h -ésimo operador e na j -ésima repetição, ($i = 1, 2, \dots, m$; $h = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, n$).

As estimativas para a construção das cartas de controle $\bar{x} - R$, para cada operador h são:

$$\bar{\bar{x}}_h = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{x}_{ih}}{m}, \text{ onde } X_{ih} \text{ é a média das medidas na peça } i, \text{ para o operador } h. \quad (2)$$

$$\bar{R}_h = \frac{\sum_{i=1}^m R_{ih}}{m}, \text{ onde } R_{ih} \text{ é a amplitude das medidas da peça } i, \text{ para o operador } h.$$

Sendo os limites de controle para a carta da média \bar{x} :

$$\begin{aligned} LSC &= \bar{\bar{x}}_h + A_2 \bar{R}_h \\ LC &= \bar{\bar{x}}_h \\ LIC &= \bar{\bar{x}}_h - A_2 \bar{R}_h \end{aligned} \quad (3)$$

onde, d_2 e $A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}}$, valores tabelados para n^1 , e para a carta da amplitude R ,

$$\begin{aligned} LSC &= D_4 \bar{R}_h \\ LC &= \bar{R}_h \\ LIC &= D_3 \bar{R}_h \end{aligned} \quad (4)$$

onde, D_3 e D_4 são constantes tabeladas para n^1 .

Neste contexto a interpretação dos gráficos difere do usual. Aqui, a carta de \bar{x} , mostra o poder discriminativo do instrumento, ou seja, a capacidade do medidor para distinguir entre unidades do produto. Já a carta de R mostra diretamente a magnitude do erro de medida, ou a capacidade do medidor. Se o sistema de medida é capaz, para cada operador deve-se esperar pontos fora do controle na carta de \bar{x} , referentes às peças não conformes e a carta de R sobre controle, indicando que o operador não está tendo dificuldades em fazer mensurações consistentes.

Uma estimativa do desvio de mensuração para cada operador, $\sigma_{(medidor\ h)}$, pode ser calculado por:

$$\hat{\sigma}_{medidor(h)} = \frac{\bar{R}_h}{d_2} \quad (5)$$

Como S_h^2 (variância amostral) estima a variabilidade total para cada operador, uma medida da capacidade do

medidor do respectivo operador ($CM_{(h)}$) pode ser obtida por:

$$CM_{(h)} = \frac{\hat{\sigma}_{medidor(h)}}{\hat{\sigma}_{produto}} * 100\% \quad (6)$$

onde $\hat{\sigma}_{produto}^2 = S_h^2 - \hat{\sigma}_{medidor(h)}^2$. Frequentemente, quando $CM_{(h)} \leq 10$ implica em uma capacidade adequada do medidor¹.

Considerando agora, o processo geral com todos os operadores, pode-se ainda avaliar dois componentes do erro de mensuração, comumente chamados repetitividade e reprodutividade do medidor, este tipo de experimento costuma ser chamado de estudo medidor R & R^{4,5,6,7}. Matematicamente temos:

$$\sigma_{erro\ de\ medição}^2 = \sigma_{medidor}^2 = \sigma_{repetitividade}^2 + \sigma_{reprodutividade}^2 \quad (7)$$

onde $\sigma_{reprodutividade}^2$: variabilidade devida ao fato de o medidor se utilizado em condições diferentes e $\sigma_{repetitividade}^2$: variabilidade que reflete a precisão básica inerente ao próprio medidor.

Considerando o desenho experimental da Tabela 1, a estimativa da repetitividade do medidor pode ser obtida a partir da média das amplitudes médias dos operadores, como segue:

$$\hat{\sigma}_{repetitividade} = \frac{\bar{\bar{R}}}{d_2} \quad (8)$$

onde, $\bar{\bar{R}} = \frac{\sum_{h=1}^k \bar{R}_h}{k}$ (aqui R_h média da amplitude do operador h) e o fator d_2 calculado para amostras de tamanho n , pois cada amplitude foi calculada com base em n repetições.

A reprodutividade do medidor é, em essência, variabilidade que resulta de diferenças entre operadores (operadores, turnos, equipamentos, etc.).

Como, $\bar{\bar{x}}_h = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{x}_{ih}}{m}$, é a média das médias para o operador h , se os valores \bar{x}_h diferem, a razão será o viés do operador, pois todos os operadores medem as mesmas peças. Portanto, para estimar a reprodutividade do medidor, utilizam-se as seguintes medidas: $\bar{\bar{x}}_{máx} = \max(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_k)$

$\bar{\bar{x}}_1, \dots, \bar{\bar{x}}_k$), e $\bar{\bar{x}}_{\min}, \min(\bar{\bar{x}}_1, \bar{\bar{x}}_2, \dots, \bar{\bar{x}}_k)$ e $R_{\bar{\bar{x}}} = \bar{\bar{x}}_{\max} - \bar{\bar{x}}_{\min}$, portanto a estimativa da variabilidade é dada por:

$$\hat{\sigma}_{\text{reprodutividade}} = \frac{R_{\bar{\bar{x}}}}{d_2} \quad (9)$$

aqui o fator d_2 é calculado para amostras de tamanho k . Sendo S^2 , a variância amostral geral, que estima a variabilidade total do processo, então da mesma forma que em (6) pode-se obter um estimador geral da capacidade de medição por:

$$CM = \frac{\hat{\sigma}_{\text{medidor}}}{\hat{\sigma}_{\text{produto}}} * 100\% \quad (10)$$

onde, $\hat{\sigma}_{\text{produto}}^2 = S^2 - \hat{\sigma}_{\text{medidor}}^2$, com $\hat{\sigma}_{\text{medidor}}^2 = \hat{\sigma}_{\text{repetitividade}}^2 + \hat{\sigma}_{\text{reprodutividade}}^2$

Metodologia

O experimento foi realizado com um turno, analisando-se a capacidade de medição de cinco operadores responsáveis pelas medições de espessura dos tubos.

Para a obtenção dos dados, foi selecionada uma amostra de treze tubos com características de conforme e não-conforme e determinado que cada operador realizasse três medidas em cada tubo aleatoriamente ($n=3$). Para garantir a confiabilidade e representatividade do método, um sorteio aleatório da ordem de medição de cada operador, em cada uma das três repetições, foi realizado com apoio computacional do Software R.

As anotações dos dados foram feitas em tabelas ordenadas de acordo com o sorteio aleatório, obtendo os resultados das medidas de espessura máxima e de espessura mínima em cada uma das amostras. Nestas condições, foram realizadas 195 medições para espessura máxima e espessura mínima. Para o trabalho foram ilustrados os resultados para medições de espessuras máximas. Tomou-se como referência medições de espessura máxima realizada nos menos tubos por técnico de órgão regulador.

Durante a coleta de dados, foram observadas algumas dificuldades como a conciliação dos horários e tempo que

cada operador destinava às medições nas amostras e suas obrigações referentes às suas funções nos processos de produção. Outro problema encontrado foi a desconfiança por parte de alguns dos operadores, em relação ao objetivo e motivo da realização do experimento e coleta dos dados. Uma causa de diferenciação entre os operadores foi a maneira de cada um realizar as medições, usando ou não usando o apoio que auxilia na fixação da posição do tubo sobre a bancada. A condição do instrumento de medida e o desgaste dos tubos durante o período de realização do trabalho também são fatores relevantes que podem ter influenciado nos resultados das medições. Aconselha-se a ter um maior controle desses fatores para realização de experimentos semelhantes.

Para análise dos dados obtidos foram desenvolvidos procedimentos de cálculo para as estimativas do planejamento medidor R&R no Software R, também se utilizou o pacote “qcc” do mesmo software para construção das cartas de controle para média e para amplitude, além dos gráficos “plot” e “coplot” disponíveis no mesmo software.

Resultados

A Figura 1 ilustra os valores das medições máximas por tubo.

Pela Figura 1, percebe-se grande variabilidade nas medições por tubo e também é destacada a diferença existente entre os tubos. Percebe-se ainda, que para alguns tubos as medições se afastam de forma considerável do valor de referência.

Na Tabela 2, tem-se um resumo geral das estimativas dos componentes de variância e da capacidade de medição obtida pelo planejamento medidor R&R.

Tabela 2: Resumo geral das estimativas.

Medida	$\hat{\sigma}_{\text{Repetitividade}}$	$\hat{\sigma}_{\text{Reprodutividade}}$	$\hat{\sigma}_{\text{Medidor}}$	$\hat{\sigma}_{\text{Produto}}$	CM(%)
Máximo	0,01427	0,01091	0,01796	0,01994	90,06

Como visto, para medidas máximas, foi constatado uma alta variabilidade devida ao sistema de medição, 90,06%. Para esta alta variabilidade, destaca-se uma maior influência do componente “Repetitividade”, que pode estar associado à imprecisão do operador. Um

estudo segmentado da capacidade de medição de cada operador se mostra necessário.

A Figura 2 ilustra as medições dos operadores por tubo. Percebe-se como destaque que o operador 3 apresenta uma configuração de medições diferente das demais. Esse operador parece não conseguir distinguir a diferença entre os tubos (ajuste próximo de uma reta paralela ao eixo) e também apresenta grandes discrepâncias de medição, como por exemplo as medições no tubo 8.A Tabela 3 apresenta um resumo da capacidade de medição de cada operador.

Tabela 3: Resumo geral das análises das medidas de espessura máxima por operador.

Operador	$\hat{\sigma}_{\text{Produto}}$	$\hat{\sigma}_{\text{Medidor}}$	$\hat{\sigma}_{\text{Total}}$	$\hat{\sigma}_{\text{Produto}}$	$\hat{\sigma}_{\text{Medidor}}$	CM (%)
O1	88,733	11,267	0,0244	0,023	0,0082	35,6338
O2	71,5156	28,4844	0,0264	0,0223	0,0141	63,1107
O3	32,1652	67,8348	0,0215	0,0122	0,0177	145,222
O4	63,5367	36,4633	0,0286	0,0228	0,0173	75,7557
O5	70,2533	29,7467	0,0258	0,0216	0,0141	65,0707

Analizando-se a Tabela 3, verifica-se que todos os operadores apresentaram um valor para a capacidade de medição maior que 10%, o que implica em uma capacidade inadequada do medidor, ou seja, os operadores estão tendo dificuldades em fazer mensurações consistentes para a

espessura máxima dos tubos. Percebem-se três grupos distintos quanto à capacidade de medição: o operador 1, com uma melhor capacidade (35,63%), os operadores 2,4 e 5 (63,11% a 75,75%) e o operador 3 (145,22%).

Comparando-se a capacidade de medição geral para a espessura máxima (CM= 90,06%) apresentada na Tabela 2 com a capacidade de medição de cada um dos operadores apresentada na Tabela 3, pode-se concluir que boa parte da variabilidade relacionada aos erros de mensuração das espessuras máximas dos tubos neste turno está relacionada ao operador 3 cuja variabilidade foi muito acima dos demais. Já o operador 1 apresentou o melhor desempenho considerando o valor da capacidade geral de medição do turno. Pelas cartas de controle pode-se ter uma melhor idéia da capacidade de cada operador.

Analizando-se a Tabela 3, verifica-se que todos os operadores apresentaram um valor para a capacidade de medição maior que 10%, o que implica em uma capacidade inadequada do medidor, ou seja, os operadores estão tendo dificuldades em fazer mensurações consistentes para a espessura máxima dos tubos. Percebem-se três grupos distintos quanto à capacidade de medição: o operador 1, com uma melhor capacidade (35,63%), os operadores 2,4 e 5 (63,11% a 75,75%) e o operador 3 (145,22%).

Comparando-se a capacidade de medição geral para

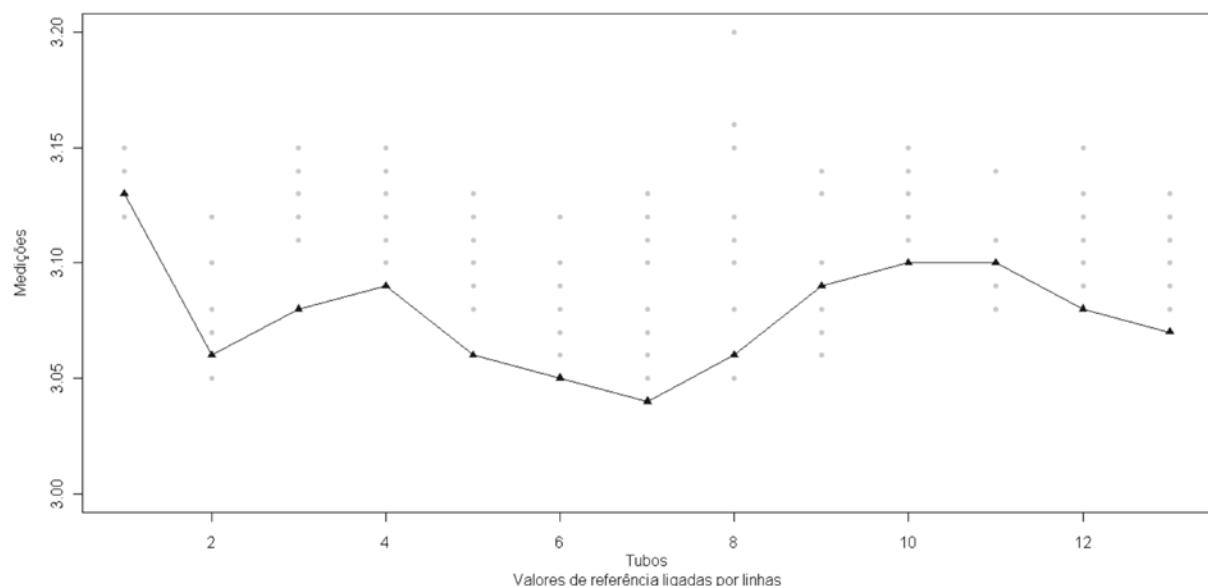


Figura 1: Medições Máximas por Tubo.

a espessura máxima ($CM = 90,06\%$) apresentada na Tabela 2 com a capacidade de medição de cada um dos operadores apresentada na Tabela 3, pode-se concluir que boa parte da variabilidade relacionada aos erros de mensuração das espessuras máximas dos tubos neste

turno está relacionada ao operador 3 cuja variabilidade foi muito acima dos demais. Já o operador 1 apresentou o melhor desempenho considerando o valor da capacidade geral de medição do turno. Pelas cartas de controle pode-se ter uma melhor idéia da capacidade de cada operador.

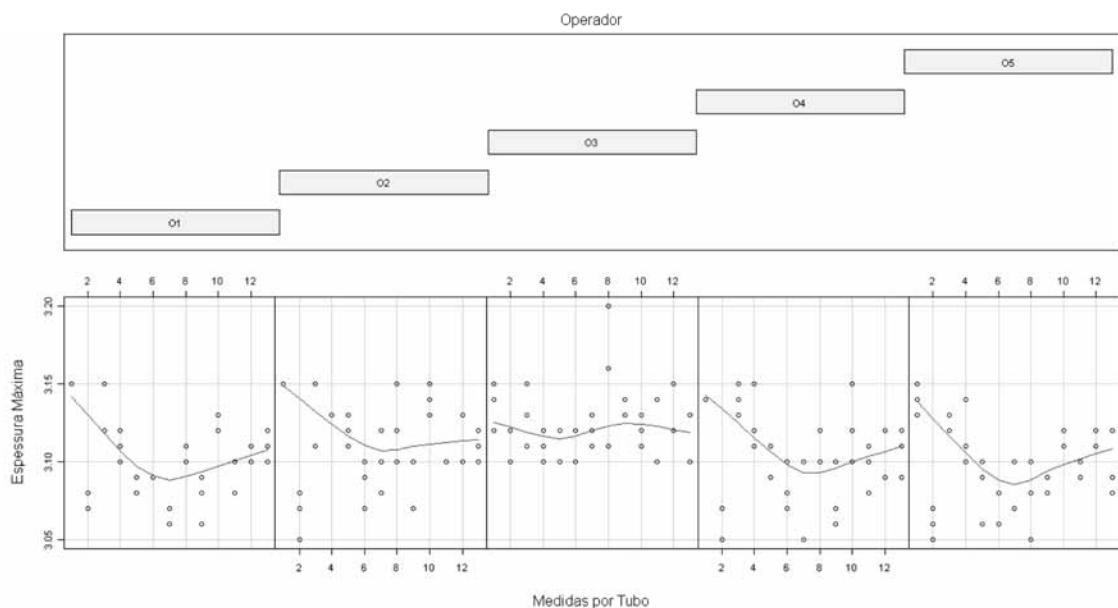


Figura 2: Medições Máximas por Tubo e por Operador.

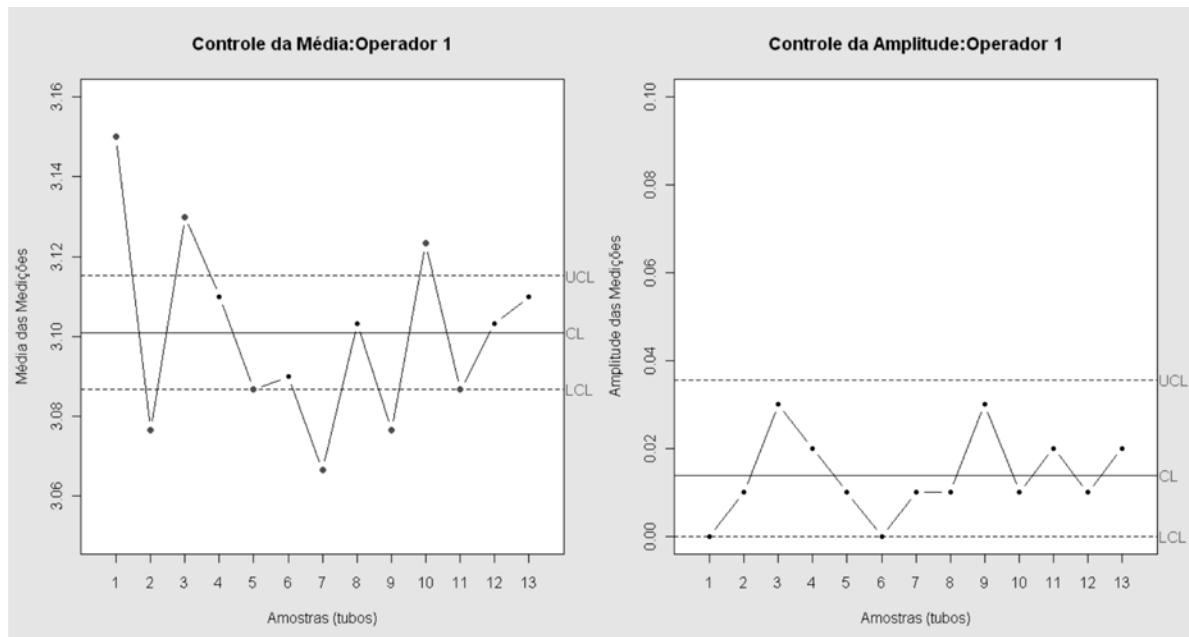


Figura 3: Cartas de controle – Operador 1.

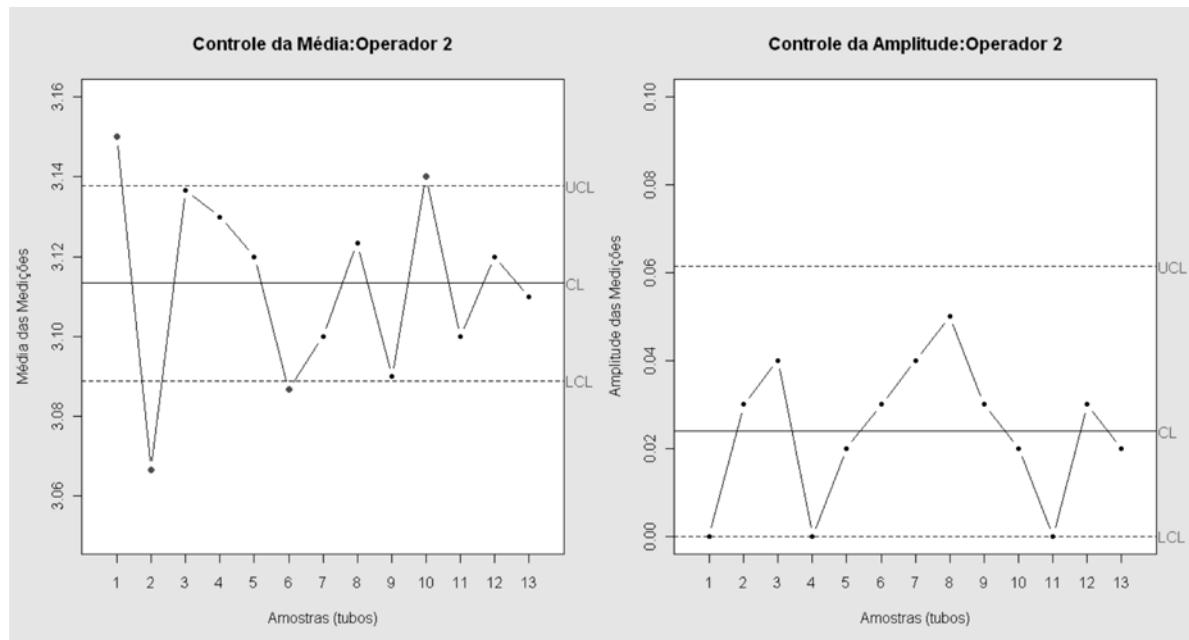


Figura 4: Cartas de controle – Operador 2.

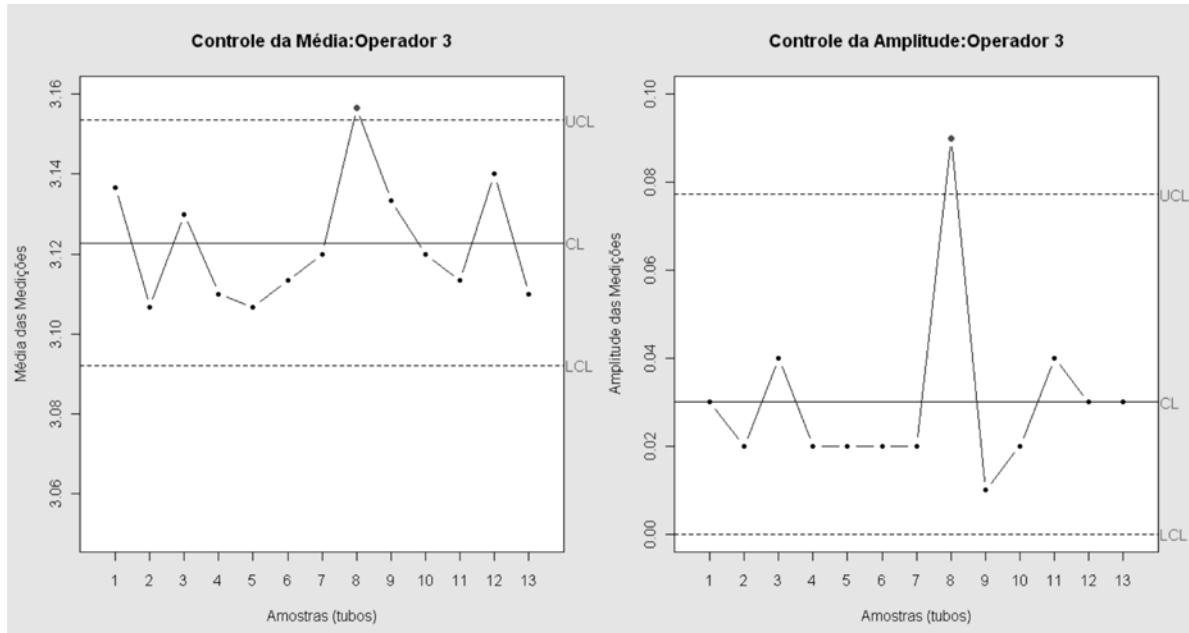
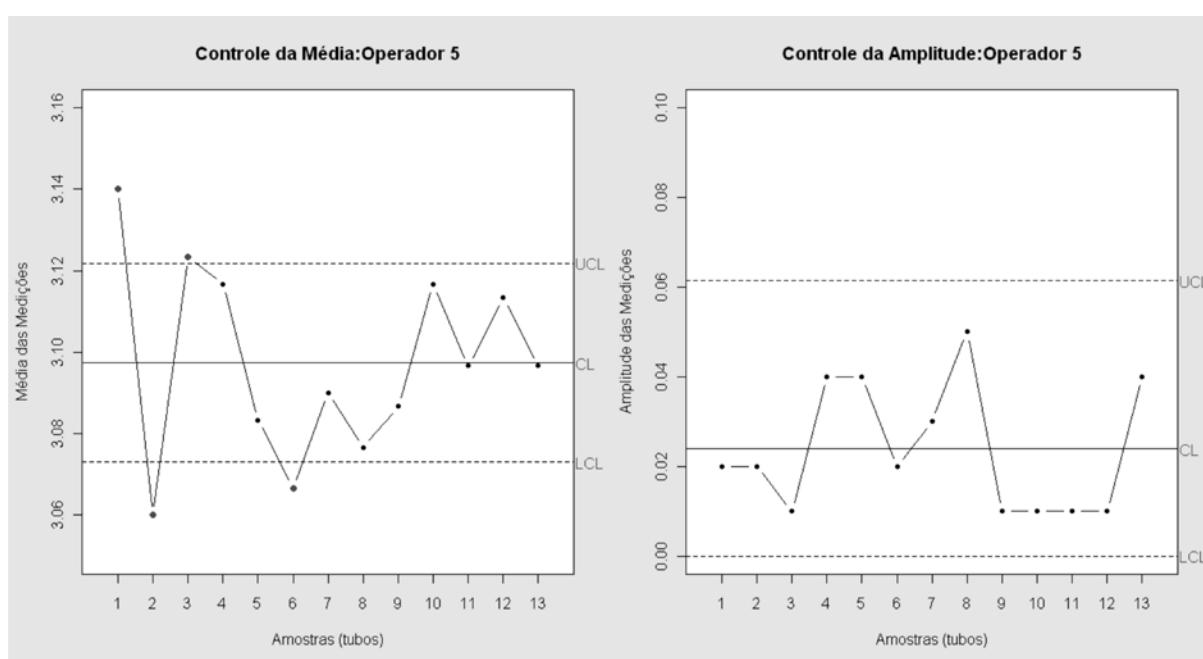
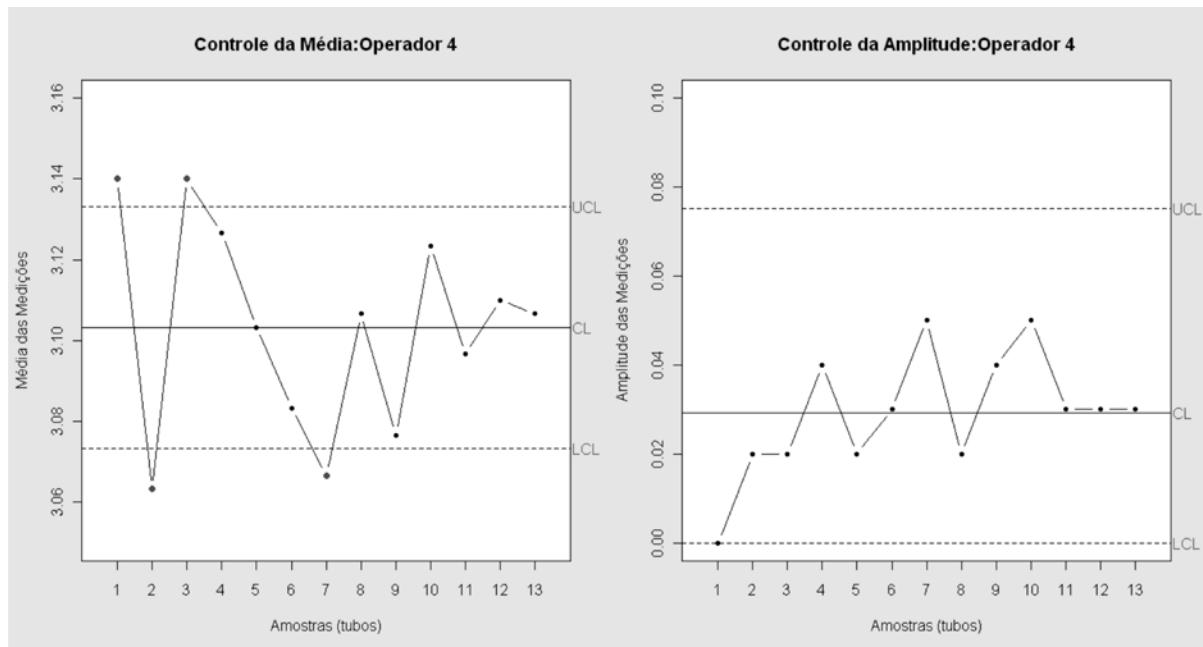


Figura 5: Cartas de controle – Operador 3.



Pelas cartas de controle fica evidente um padrão bastante irregular de medição por parte do operador 3 se comparado com os demais. Pela carta da média, é verificado que o mesmo não conseguiu detectar a diferença mais gritante do processo que é entre os tubos 1 e 2, que foi identificado por todos os demais, também neste gráfico o mesmo operador aponta medida fora do controle no tubo 8 quando não deveria ser. O mesmo operador ainda é o único a apresentar ponto fora de controle na carta de amplitude, sugerindo incapacidade de medição. Por outro lado, o operador 1 se mostra o mais preparado, conseguindo identificar a diferença entre tubos (variabilidade do processo) e apresentar uma boa capacidade de medição, com nenhum ponto fora dos limites na carta da amplitude, sendo seus limites de controle bem mais rígidos (pequena amplitude) que os demais, sinalizando um melhor controle do processo de medição.

Conclusão

Analisou-se a capacidade de medição dos operadores através de dois focos: a perspicácia em identificar as diferenças inerentes de cada tubo e a precisão na medição dos tubos, visto que eles mediram o mesmo tubo mais de uma vez. No geral pode-se afirmar que a capacidade de medição no sistema avaliado está deficitário, com operadores despreparados para atuar neste processo, além das condições de equipamentos e manuseio inadequadas.

Vale ressaltar que no experimento, o próprio processo de medição para a coleta de dados foi passível de alta variabilidade. Há a imprecisão do equipamento de medição, a permutação de equipamentos de medição entre os operadores e mesmo o desgaste dos tubos no decorrer do tempo de coleta dos dados. Sugere-se para os próximos experimentos a utilização de equipamentos de uso pessoal e uma maior agilidade no recolhimento dos dados, utilizando-se, por exemplo, um menor número de tubos para as medições.

Com relação ao processo, sugerem-se como alternativas para a redução dessa variabilidade a aferição periódica dos equipamentos de medição, a ênfase de que os equipamentos de medição são de uso pessoal, treinamento

e seleção dos melhores medidores e uma periódica análise dessa capacidade de medição. Lembrando que, para maior transparência de resultados, essa avaliação deverá ser realizada por uma equipe independente que não trará consigo a propensão à interferência no processo.

Deve-se analisar a possibilidade de se utilizar somente os melhores medidores para as tarefas chaves, como de regulagem da extrusora e inspeção de qualidade, buscando dessa forma maior padronização com consequência redução de variabilidade. Considerando, como exemplo, que somente o operador 1 fosse o responsável pelas medições, neste caso os dados coletados no experimento indicam que a variabilidade do processo devida ao sistema de medição teria uma redução aproximada de cerca de 61%, chegando a níveis bem mais próximos do ideal. O fato é que ter muitos medidores representa uma alta fonte de variabilidade, gastos mais excessivos com treinamento e com material.

BIBLIOGRAFIA

1. Montgomery, D.C.; *Introdução ao Controle Estatístico de Qualidade*, 4º ed. LTC: Rio de Janeiro, 2004.
2. Werkema, M.C.; *Ferramentas Estatísticas Básicas para o Gerenciamento de Processos*. 1 ed., FCO: Belo Horizonte, 1995.
3. Venables, W.N.; Smith, D. M. *An Introduction to R: Notes on R: A programing Environment for data analysis and grafics*, 2005. Site <http://www.r-project.org>. Acessado em junho de 2009.
4. Montgomery, D.C., Runger G.C.; *Gauge Capability and Designed Experiments: Part I: Básic Methods*, *Quality Engineering*, 6, 1993a.
5. Montgomery, D.C., Runger G.C.; *Gauge Capability and Designed Experiments: Part II: Experimental Design Models and Variance Component Estimation*, *Quality Engineering*, 6, 1993b.
6. Werkema, M. C. *Avaliação da Qualidade de Medidas*, 1 ed., FCO: Belo Horizonte, 1996.
7. Kume, H. *Métodos Estatísticos para Melhoria da Qualidade*, 1 ed., Editora Gente: São Paulo, 1993.

**Emerson Wruck^{1,2*}, Lidiane
J. Michelini¹, Pedro H. S. de
Paula¹, Carlos A. S. Júnior¹,
Danilo M. dos Santos¹ &
Ítalo L. Fernandes¹.**

¹ Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas – UEG, CEP 75000-000, Anápolis, GO, Brasil.

² Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange, CEP 75113-630, Anápolis, GO, Brasil.

*e-mail: wruck.senai@sistemasieg.org.br