Índices de capacidade do processo: comparação entre índices tradicionais e índices para gráficos de controle de regressão

Fernanda Siqueira Souza (PPGEP/UFRGS) fe_ssouza@producao.ufrgs.br

Danilo Cuzzuol Pedrini (PPGEP/UFRGS) danilo@producao.ufrgs.br;

Carla Schwengber ten Caten (PPGEP/UFRGS) tencaten@producao.ufrgs.br

Resumo: O estudo da capacidade do processo é uma ferramenta essencial do controle estatístico da qualidade, pois verifica se o processo consegue atender às especificações de engenharia/projeto. Na literatura, os índices de capacidade tradicionais, ou seja, os índices aplicados aos gráficos de controle propostos por Shewhart, são os mais difundidos. Entretanto, os gráficos de controle baseados em modelos de regressão merecem destaque pela sua aplicabilidade, quando a variável de resposta monitorada varia em função de frequentes alterações na variável de controle, fato que ocorre principalmente em processos da índustria química. Neste contexto, este artigo têm por objetivos propor índices de capacidade para os gráficos de controle de regressão, além de compará-los com os índices de capacidade tradicionais da literatura. De forma a orientar a aplicação destas abordagens, apresenta-se um fluxograma orientativo.
Palavras-chave: Gráfico de controle; Regressão; Índices de capacidade tradicionais; Índices de capacidade para gráficos de controle de regressão.

1. Introdução

A concorrência e a competitividade entre as empresas exigem a melhoria contínua dos processos e, consequentemente, o aumento da qualidade dos produtos e serviços. Neste contexto, a utilização do Controle Estatístico do Processo (CEP) é uma alternativa eficiente que permite conhecer o processo, interpretá-lo, identificar ações de melhoria para mantê-lo estável e analisar a capacidade do mesmo. Em outras palavras, esta metodologia tem por objetivo detectar e facilitar a identificação de problemas para reduzir a variabilidade dos processos.

Segundo Montgomery (2004), os gráficos de controle são as ferramentas fundamentais para o monitoramento do processo, examinando a variabilidade dos dados ao longo do tempo. Estes gráficos foram elaborados por Shewhart, em 1924, marcando o início formal do controle estatístico da qualidade e, atualmente são utilizados com sucesso para o monitoramento do desempenho dos mais diversos processos industriais.

O uso dos gráficos de controle de Shewhart, também chamadas de gráficos de controle tradicionais, se destacam pela sua simplicidade e facilidade de elaboração, pois permitem um ajuste contínuo, além de oferecerem uma visão gráfica do processo ao longo do tempo (ALVES et al, 2003). Entretanto, são visíveis algumas limitações desta ferramenta, já que se deve assumir que os dados são identicamente distribuídos e independentes entre si.

De acordo com Pedrini (2009), estas suposições podem não ser satisfeitas quando há alterações no ajuste das variáveis de controle do processo, pois nesse caso, ocorre uma alteração na média e variabilidade dos dados, sendo necessário um gráfico de controle para cada ajuste. Este fato pode não ser possível devido ao baixo número de amostras a serem

analisadas para cada ajuste. Nesses casos, a característica de qualidade de um produto ou processo é melhor representada pelo seu relacionamento com as variáveis de controle do processo (JACOBI et al., 2002; SHU et al., 2004).

Para solucionar este problema, Mandel (1969) propôs o gráfico de controle de regressão, que consiste na combinação das técnicas de gráfico de controle e modelos de regressão linear. Em uma breve descrição, este procedimento contempla o ajuste de um modelo de regressão linear simples que relacione a característica de qualidade do processo a uma variável de controle e o monitoramento dos valores observados, em comparação aos valores ajustados pelo modelo.

De acordo com Mandel (1969), o gráfico de controle de regressão é utilizado em processos em que o efeito de uma variável de resposta (dependente) é uma função de uma variável de controle (independente), de forma a gerar um modelo que representa a relação existente entre as variáveis de interesse em um processo. Os gráficos de controle tradicionais não são capazes de realizar uma análise quando se tem um conjunto de variáveis correlacionadas ou dependentes entre si. Portanto, são utilizados os gráficos de controle de regressão, que são capazes de avaliar o efeito conjunto dessas variáveis (JACOBI et al, 2002).

Para a contrução dos dois tipos de gráficos há diferenças, porém, a metodologia de análise é a mesma. Se o processo não apresentar causas especiais, ou seja, não apresentar nenhum ponto fora dos limites de controle dos dados, este é considerado estável, previsível ao longo do tempo e sob controle estatístico. Caso contrário, deve-se tomar ações locais no sistema para melhoria.

Estando o processo sob controle, é possível estudar sua capacidade, ou seja, verificar se a média e a variabilidade do processo estão de acordo com o alvo e os limites de especificação de engenharia (MIRANDA, 2005). Este estudo é realizado através de índices de capacidade, sendo que os mais utilizados na índustria são o C_p (índice de capacidade potendial) e o C_{pk} (índice de capacidade efetiva).

Existem variações de cálculo para estes índices quando se utiliza gráficos de controle tradicionais ou gráficos de controle de regressão, porém, os índices de capacidade para os gráficos de regressão são pouco difundidos. Portanto, o objetivo deste artigo é propor índices de capacidade (C_p e C_{pk}) para gráficos de regressão e comparar com os índices para os gráficos tradicionais.

A segunda seção apresenta um referencial teórico abordando gráficos de controle tradicionais, gráficos de regressão e capacidade do processo. A seção três apresenta a proposta de índices de capacidade para os gráficos de regressão. A seção quatro apresenta um fluxograma orientativo. A seção cinco apresenta a comparação dos índices propostos com os índices para os gráficos tradicionais. A seção seis resume as principais conclusões deste estudo.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Gráficos de controle tradicionais

Os gráficos de controle propostos por Shewhart são classificados em: variáveis e atributos. Uma característica de qualidade que é medida em uma escala numérica é chamada de variável, enquanto que uma classificação de produtos não-conformes ou não-conformidades é chamada de atributos. A escolha do gráfico adequado, de acordo com o conjunto de dados estudados, é muito importante para não obter conclusões errôneas sobre o processo.

Montgomery (2004) define um gráfico de controle tradicional como sendo uma representação gráfica de uma variável de resposta em função do número da amostra (ou tempo). A Figura 1 exemplifica um gráfico de controle, que possui uma linha central (LC) paralela ao eixo x que representa o valor médio da variável de resposta, e duas linhas horizontais paralelas à linha central, chamadas de limite superior de controle (LSC) e limite inferior de controle (LIC).

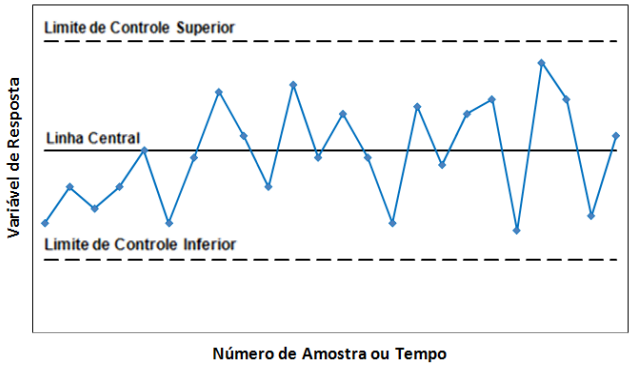

FIGURA 1 – Gráfico de controle tradicional. Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2003).

Os limites de controle representam a variabilidade associada às causas comuns de variação, aquelas inerentes ao processo e que existem mesmo sem nenhuma falha operacional. Caso algum ponto se localizar acima do limite superior de controle ou abaixo do limite inferior, o processo apresentou uma causa especial (falha) e não está sob controle estatístico, ou seja, não é estável e previsível. Quando o processo apresentar uma causa especial, é necessário investigar os possíveis problemas ocorridos e realizar ações corretivas.

Dentre os estudos da literatura, destacam-se os trabalhos de Box et al (1997), Woodall (1997), Schissatti (1998) e Fiterman et al (2004).

2.2 Gráficos de controle de regressão

As variáveis envolvidas em um processo produtivo são, muitas vezes, correlacionadas e o controle individual dessas variáveis não é o mais indicado. Nesse caso, a qualidade depende do efeito de cada variável separadamente (JACOBI et al, 2002).

Neste contexto, a análise de regressão é uma técnica estatística para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis, desde que exista uma relação de causa e efeito entre uma característica de qualidade e as variáveis de controle do processo. Segundo Montgomery e Runger (2003), para o gráfico de controle de regressão, a relação funcional entre a variável de resposta e as variáveis de controle é dada por uma equação linear representada pela equação (1).

$$\widehat{Y}_j = \widehat{\beta}_o + \widehat{\beta}_1 x_{1j} + \widehat{\beta}_2 x_{2j} + \ldots + \widehat{\beta}_k x_{kj} \qquad (1)$$

Onde *k* representa o número de variáveis e j o número de amostras. O coeficiente β_0 é chamado de coeficiente de intercepto (valor de *Y* quando todas as variáveis de controle são iguais a zero) e os coeficientes β_1, ..., β_k são chamados de coeficientes de regressão parcial. Quando o número de observações (n) for maior que o número de variáveis controladas (*k*), o método utilizado para estimar a equação de regressão é o método de mínimos quadrados ordinários, que tem por objetivo, minimizar as somas quadráticas dos resíduos da regressão (MONTGOMERY E RUNGER, 2003).

Uma vez estimado o modelo, deve-se construir o gráfico de controle de regressão. Nota-se algumas diferenças em relação ao gráfico de controle tradicional, de acordo com a Figura 2. A linha central é inclinada em relação ao eixo horizontal e os limites de controle superior e inferior são paralelos à linha central. Outra diferença significativa é que o eixo horizontal nos gráficos de controle de regressão, propostos por Mandel (1969), representa a variável de controle e não uma sequência de amostras como nos gráficos de controle tradicionais.

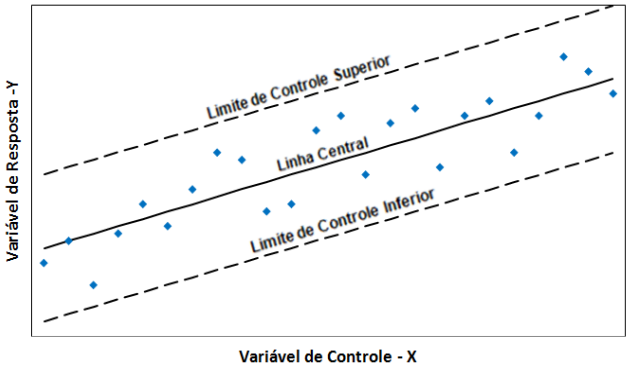

FIGURA 2 – Gráfico de controle de regressão. Fonte: Adaptado de Mandel (1969).

O limite de controle superior, a linha central e o limite de controle inferior do gráfico de controle de regressão são dados pelas equações (2), (3) e (4), respectivamente (JACOBI et al., 2002; PEDRINI, 2009):

$$LSC_i = \hat{Y}_i + k\hat{\sigma}_e \tag{2}$$

$$LC_i = \hat{Y}_i \tag{3}$$

$$LIC_i = \hat{Y}_i - k\hat{\sigma}_e \tag{4}$$

O desvio-padrão (σ_e) utilizado nestes limites de controle é obtido através da raiz quadrada do quadrado médio dos resíduos, calculado através da equação (5) (MANDEL, 1969):

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{\boldsymbol{e}'\boldsymbol{e}}{n-p} = \frac{SQR}{n-p} = QMR \tag{5}$$

onde $e = y - \hat{y}$

Haworth (1996) modificou o gráfico de controle de regressão proposto por Mandel (1969), plotando um gráfico com os resíduos do modelo de regressão ao invés do monitoramento da característica de qualidade diretamente, tornando possível monitorar processos com mais de uma variável de controle. Loredo et al. (2002) aplicou o gráfico de medidas individuais para os resíduos de um modelo de regressão linear múltipla e Shu et al. (2004) propôs o gráfico EWMAREG, que consiste basicamente no monitoramento dos resíduos padronizados do modelo de regressão com um gráfico de controle EWMA.

De acordo com Pedrini e Caten (2008), os gráficos de controle propostos por Haworth (1996), Loredo et al. (2002) e Shu et al. (2004) apresentam a vantagem adicional de preservar a ordem temporal dos dados, o que facilita a aplicação destes procedimentos e a interpretação dos resultados, em relação ao método apresentado por Mandel (1969). Revisões sobre o gráfico de controle de regressão podem ser encontradas em Shu et al. (2007) e Pedrini (2009).

2.3 Índices de capacidade dos processos

Os gráficos de controle são de grande utilidade para verificar a variabilidade do processo e indicar causas especiais fora dos limites de controle do processo. No entanto, é de extrema importância analisar a variabilidade inerente ao processo (causas comuns) e compará-la com as especificações de um processo ou produto, logo os índices de capacidade são ferramentas estatísticas utilizadas para este propósito. Observa-se que um processo pode estar sob controle estatístico, mas caso apresente variabilidade maior do que a amplitude das especificações, será considerado como não capaz (FERREIRA, 2008).

Segundo Miranda (2005), o primeiro estudo publicado foi feito por Juran, em 1974, onde se considerou um relacionamento entre a variabilidade do processo e as especificações do cliente. Após este primeiro estudo, surgiram os primeiros índices de capacidade, chamados de 1ª geração: C_p, C_{pk}, C_{pki} e C_{pks}. A 2ª geração foi desenvolvida por Taguchi, quando ele propôs o conceito de função de perda, em 1985, sendo que o primeiro índice desta geração é o C_{pm}, onde se tem uma penalização por estar longe do alvo de especificação. A 3ª geração é composta pelos índices que surgiram após C_{pm}, como, por exemplo, o índice de capacidade C_{pc}.

Estudos sobre índices de capacidade continuam sendo realizados, sendo um dos principais motivos, a importância deste assunto nos processos, analisando e direcionando ações de melhoria para um aumento no controle de qualidade (KOTZ E JOHNSON, 2002). Segundo Montgomery (2004), para a aplicação dos índices de capacidade, é necessário que o processo esteja sob controle estatístico.

Os índices de capacidade mais usuais e difundidos são o C_p (índice de capacidade potencial) e o C_{pk} (índice de capacidade efetiva). O C_p mede a variabilidade do processo em comparação com as tolerâncias admitidas nas especificações do projeto ou exigências de clientes, mas não avalia se o processo está ou não centrado, ou seja, indica a capacidade potencial do processo em atingir as especificações. Caso o C_p não seja adequado ($C_p<1$), será necessário reduzir as causas comuns inerentes ao processo para tornar o processo capaz. O C_{pk} leva em consideração a localização da média do processo e, por este motivo, é mais utilizado que o índice C_p. Ele indica a capacidade efetiva do processo considerando a sua situação atual (MONTGOMERY, 2004).

Para maiores detalhes sobre os índices de capacidade tradicionais, sugere-se: Kotz e Jonhson (2002), Wang et al (2000), Ramos e Ho (2003) e Stoumbos (2002).

2.3.1 Fórmula dos índices tradicionais

Segundo Kotz e Johnson (2002), para que os índices de capacidade da 1ª geração possam ser utilizados corretamente, algumas condições devem ser satisfeitas: o processo deve estar sob controle estatístico, ou seja, ser estável; os dados devem ser independentes e seguir distribuição normal.

O índice C_p e o índice C_{pk} para características do tipo nominal-é-melhor, são obtidos através das equações (6) e (7), respectivamente (MOTGOMERY, 2004).

$$\hat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}} \tag{6}$$

$$\hat{C}_{pk} = min(C_{pki}, C_{pks}) = \min\left(\frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3\hat{\sigma}}, \frac{LSE - \bar{\bar{X}}}{3\hat{\sigma}}\right) \tag{7}$$

Portanto, estes índices somente deverão ser usados para as suposições mencionadas

anteriormente e para processos monitorados com gráficos de controle tradicionais, ou seja, os gráficos de Shewhart.

3. Índice de capacidade para os gráficos de regressão

Observa-se que o valor alvo do processo (T) nos gráficos de controle de regressão, não é mais um valor constante como nos gráficos de controle tradicionais, mas sim, um valor definido de acordo com os valores das variáveis de controle, conforme equação (8). Similarmente para o limite superior de especificação (LSE) e para o limite inferior de especificação (LIE), que são dadas pelas equações (9) e (10).

$$T_j = b_{0T} + b_{1T}x_{1j} + b_{2T}x_{2j} + \cdots + b_{kT}x_{kj} \tag{8}$$

$$LSE_j = b_{0S} + b_{1S}x_{1j} + b_{2S}x_{2j} + \cdots + b_{kS}x_{kj} \tag{9}$$

$$LIE_j = b_{0I} + b_{1I}x_{1j} + b_{2I}x_{2j} + \cdots + b_{kI}x_{kj} \tag{10}$$

Na maioria dos casos, admite-se que o T, LSE e LIE são paralelos, logo, $b_{kT} = b_{kI} = b_{kS} = b_k$. Observa-se que a única diferença entre T, LSE e LIE é dada pelas constantes de intercepto, onde: $b_{oI} < b_{oT} < b_{oS}$. De acordo com estas informações e com as equações (8), (9) e (10), foram desenvolvidos os índices C_p e C_{pk} para os gráficos de regressão.

3.1 Desenvolvimento do índice C_p

Para um alvo e limites de especificação constantes, o índice C_p é definido pela equação (6). Entretanto, considerando que os limites de especificação variem de acordo com o valor das variáveis de controle e admitindo que LSE_j e LIE_j podem ser representados pelas equações (9) e (10), o numerador da equação (6) é reescrito, como mostra a equação (11)

$$LSE - LIE = \sum_{j=1}^{n} \frac{LSE_j - LIE_j}{n} \tag{11}$$

Para simplificação, assume-se que estes limites de especificação são paralelos, resultando na equação (12).

$$LSE_j - LIE_j = b_{0s} - b_{0I} \tag{12}$$

Assim, de acordo com a equação (12), a diferença entre LSE_j e LIE_j é sempre um valor constante. Utilizando este resultado e a propriedade de somatório de constantes, a equação (11) é reescrita conforme a equação (13).

$$\sum_{j=1}^{n} \frac{LSE_j - LIE_j}{n} = \frac{n(b_{0s} - b_{0I})}{n} = b_{0s} - b_{0I} \tag{13}$$

Por fim, é necessário estimar o desvio padrão para substituição na equação (6). Para o gráfico de controle de regressão, utiliza-se o desvio padrão como sendo s_e, ou seja, o desvio padrão dos resíduos da fase I (fase de ajuste do modelo de regressão e construção do gráfico de controle). Para a fase de monitoramento do processo, utiliza-se uma forma adaptada, representada pela equação (14).

$$s_e = \sqrt{\frac{\Sigma(Y_j - \hat{Y}_j)^2}{n}} \tag{14}$$

Utilizando os resultados das equações (13) e (14) e substituindo na equação (6), o índice de capacidade C_p adaptado para os gráficos de controle de regressão é apresentado na

equação (15).

$$\hat{C}_p = \frac{b_{0s} - b_{0I}}{6.\sqrt{\frac{\sum(Y_j - \hat{Y}_j)^2}{n}}} \tag{15}$$

3.2 Desenvolvimento do índice C_{pk}

O índice C_{pk} é definido pela equação (7). Para a adaptação para os gráficos de controle de regressão, é necessário reescrever o numerador do índice de capacidade inferior (C_{pki}) e o numerador do índice de capacidade superior (C_{pks}) representados na equação (7). Estas adaptações são mostradas nas equações (16) e (17).

$$\bar{Y} - LIE = \frac{\sum y_j}{n} - \frac{\sum LIE_j}{n} = \frac{\sum\left(y_j - LIE_j\right)}{n} \tag{16}$$

$$LSE - \bar{Y} = \frac{\sum LSE_j}{n} - \frac{\sum y_j}{n} = \frac{\sum\left(LSE_j - y_j\right)}{n} \tag{17}$$

Substitui-se os resultado da equação (16) e da equação (17) nos índices C_{pki} e C_{pks}, respectivamente. Assim, os índices C_{pki} e C_{pks} adaptados para os gráficos de controle de regressão são apresentados nas equações (18) e (19), respectivamente.

$$\hat{C}_{pki} = \frac{\sum\left(y_j - LIE_j\right)}{3\sqrt{\sum(Y_j - \hat{Y}_j)^2 n}} \tag{18}$$

$$\hat{C}_{pks} = \frac{\sum\left(LSE_j - y_j\right)}{3\sqrt{\sum(Y_j - \hat{Y}_j)^2 n}} \tag{19}$$

Substituindo estes resultados na equação (7), tem-se o índice C_{pk} adaptado para os gráficos de regressão, mostrado na equação (20).

$$C_{pk} = min\left(\frac{\sum\left(y_j - LIE_j\right)}{3\sqrt{\sum(Y_j - \hat{Y}_j)^2 n}}, \frac{\sum\left(LSE_j - y_j\right)}{3\sqrt{\sum(Y_j - \hat{Y}_j)^2 n}}\right) \tag{20}$$

4. Fluxograma orientativo

Um índice de capacidade mal empregado no processo, gera conclusões errôneas, mascarando possíveis e importantes melhorias para otimização do mesmo. Assim, visando direcionar o uso correto dos índices de capacidade, este artigo propõe um fluxograma orientativo, conforme pode ser visto na Figura 3.

Este fluxograma é simplificado, pois engloba somente os índices de capacidade para processos monitorados com gráficos de controle tradicionais e os processos monitorados com gráficos de regressão, não envolvendo outros índices da 2ª e 3ª gerações desenvolvidos na literatura.

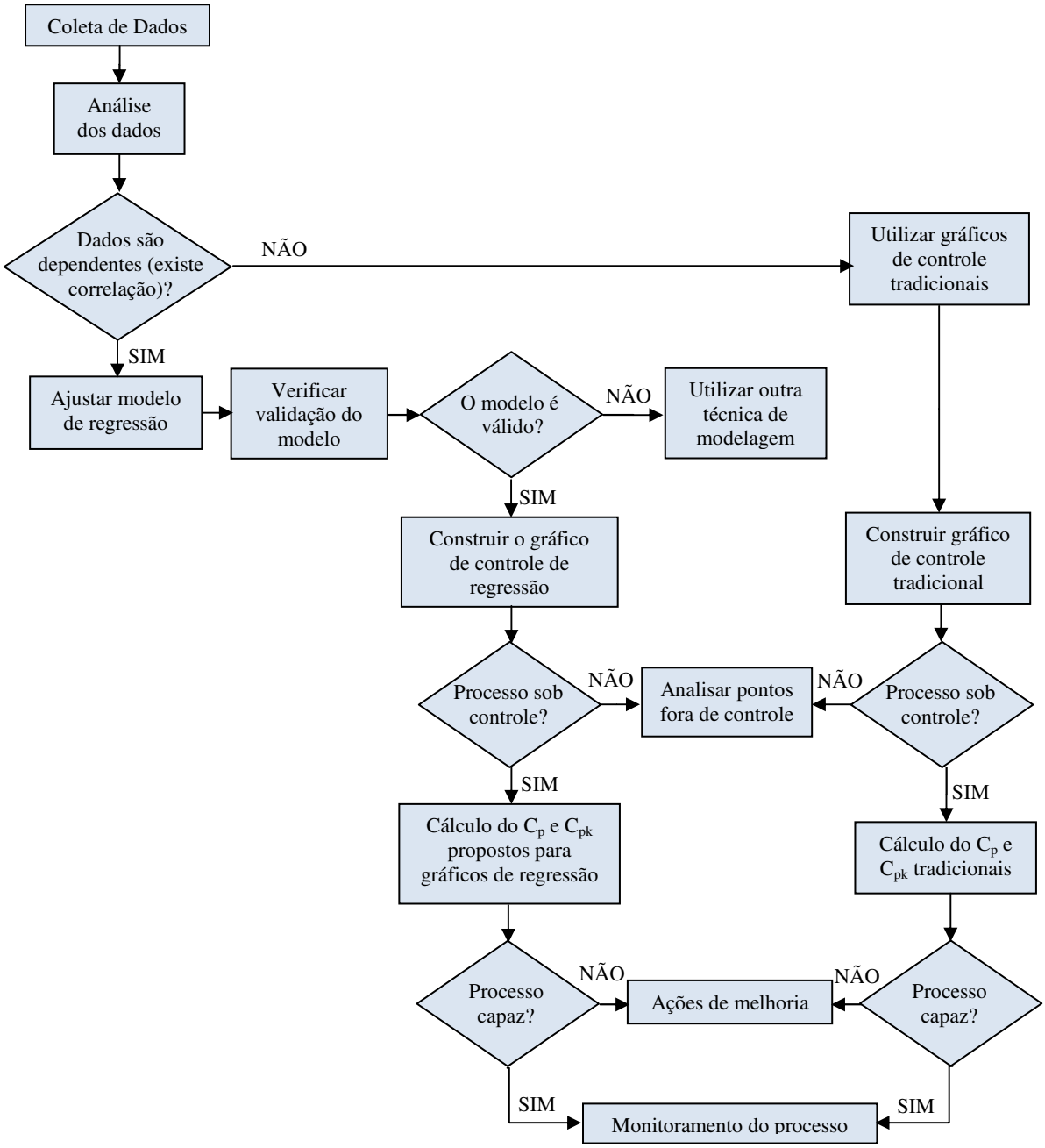

FIGURA 3 – Fluxograma Orientativo.

De acordo com a Figura 3, após uma análise dos dados coletados, deve-se verificar a relação de dependência entre a variável de resposta e as variáveis de controle. Caso exista, deve-se ajustar um modelo de regressão que seja válido para o conjunto de dados estudados, construir o gráfico de controle de regressão (mostrado na Figura 2) e verificar a estabilidade do processo. Se o processo estiver sob controle, deve-se analisar sua capacidade de acordo com as equações propostas neste artigo (equações 15 e 20).

Caso não exista relação de dependência e os dados não sejam correlacionados, utilizam-se os gráficos de controle tradicionais, optando entre os gráficos por variáveis ou atributos, conforme o conjunto de dados. Após a construção do gráfico tradicional, verifica-se a estabilidade e, se o processo estiver sob controle estatístico, analisa-se a capacidade através dos índices existentes na literatura (equações 6 e 7).

5. Índices tradicionais x Índices para os gráficos de regressão

Os dados utilizados para a comparação das equações de índices de capacidade tradicionais e os propostos para os gráficos de controle de regressão são compostos por 58 amostras simuladas. O processo é composto por uma variável de resposta e quatro variáveis de controle (x_1, x_2, x_3 e x_4) e monitorado por gráficos de controle de regressão. As fases de implementação e monitoramento do processo foram baseadas no trabalho de Pedrini (2009), sendo que somente o gráfico de controle da Fase II será incluído neste artigo.

O modelo de regressão estimado é mostrado na equação (21), com um desvio padrão dos resíduos de 9,17 e um coeficiente de determinação de 85,2%. Neste modelo, as interações não foram incluídas, já que apresentaram valores-p menores que o nível de significância adotado (5%).

$$\hat{Y} = 89{,}84 + 9{,}49x_1 - 5{,}13x_2 - 6{,}48x_3 + 12{,}59x_4 - 7{,}94x_1^2 \qquad (21)$$

A Figura 4 mostra o gráfico de monitoramento do processo, que foi considerado sob controle estatístico, já que o gráfico de controle de regressão proposto não indicou amostras fora da região definida pelos limites de controle. Assim, pode-se analisar a capacidade do processo.

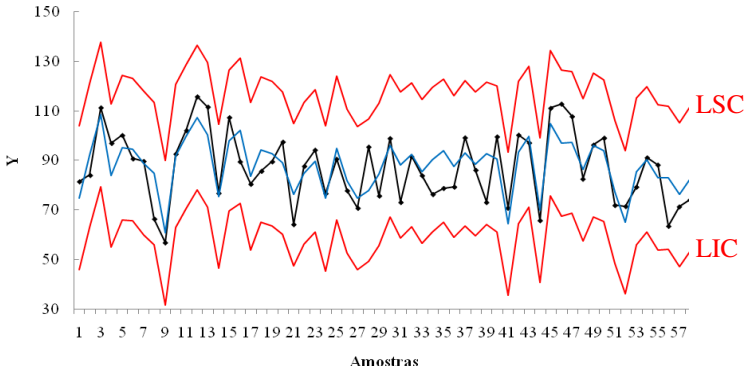

FIGURA 4 – Gráfico de controle de regressão para o monitoramento do processo.

Para a análise de capacidade, definiu-se que para os cálculos dos índices tradicionais, LSE e LIE valem, respectivamente, 119,5 e 59,5. Para os cálculos dos índices para os gráficos de regressão, os limites de especificação seguem as equações (22) e (23).

$$LSE = 120 + 9x_1 - 5x_2 - 6x_3 + 12x_4 \qquad (22)$$

$$LIE = 60 + 9x_1 - 5x_2 - 6x_3 + 12x_4 \qquad (23)$$

Para o cálculo, utilizou-se as equações (6) e (7) para os gráficos tradicionais que foram comparadas com as equações (15) e (20) propostas para os gráficos de regressão. A Tabela 1 apresenta a comparação dos índices.

TABELA 1 – Coparação entre os índices tradicionais e os índices propostos para gráficos de regressão.

	Tradicionais	Regressão
C_p	0,75	1,15
C_{pki}	0,69	1,06
C_{pks}	0,81	1,24
C_{pk}	0,69	1,06

Através da análise da Tabela 1, observa-se que os índices tradicionais empregados em processos monitorados com gráficos de controle de regressão induziram a conclusões

errôneas, pois os os índices C_p e C_{pk} são menores que 1, ou seja, conclui-se que o processo não é capaz de atender às especificações. No entanto, utilizando os índices propostos neste trabalho, obtém-se índices C_p e C_{pk} de 1,15 e 1,06, respectivamente, o que leva à conclusão de que o processo é capaz. Neste contexto, ressalta-se a importância de se aplicar corretamente os índices de capacidade de acordo com o controle realizado pelo processo.

6. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo propor índices de capacidade para processos monitorados com gráficos de controle de regressão, comparando-os com os índices de capacidade tradicionais.

Supondo limites de especificação que variem de acordo com os valores das variáveis de controle do processo, adaptou-se os índices de capacidade de 1ª geração C_p, C_{pki}, C_{pks} e C_{pk} para serem aplicados em processos monitorados por gráficos de controle de regressão. De forma a facilitar a utilização dos índices de capacidade, também foi proposto um fluxograma orientativo incluindo dois tipos de índices: (i) índices de capacidade para gráficos tradicionais; (ii) índices de capacidade para os gráficos de regressão.

O entendimento e a análise da capacidade do processo é de extrema importância para a otimização do mesmo, pois visa a ação de melhorias para que os produtos atendam às especificações e estejam o mais próximo do valor alvo com a menor variabilidade possível em torno do mesmo. A utilização de índices mal empregados gera conclusões errôneas, comprometendo o estudo e análise do processo, prejudicando o atendimento de exigências gerenciais ou de clientes externos.

Através de um exemplo, ficaram evidenciadas as diferenças entre a utilização dos índices de capacidade tradicionais e os índices propostos neste trabalho, já que o uso dos índices tradicionais apontaram o processo como não sendo capaz de atender às especificações exigidas e os índices propostos mostraram que o processo é capaz.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se o desenvolvimento de outros índices de capacidade para os gráficos de regressão, além do C_p e do C_{pk}. Outra sugestão é a aplicação dos índices propostos com dados reais de um processo, incluindo também as etapas de estimação do gráfico de controle de regressão e o monitoramento de processos de algum método encontrado na literatura.

Referências

ALVES, P.H.B.F.; NEUMANN, C.S.R.; RIBEIRO, J.L.D. *Etapas para implantação de controle estatístico do processo: um estudo aplicado.* ENEGEP, 2003, Ouro Preto, MG.

BOX, G.E.P.; COLEMAN, D.E.; BAXLEY, R.V. *A Comparison of Statistical Process Control and Engineering Process Control.* Journal of Quality Technology. v.29, p. 128-30, 1997.

FERREIRA, F.J.H. *Índices de Capacidade em Processos Monitorados Via Gráficos de Controle de Regressão (Clássica e Funcional).* UFPA (2008). Dissertação de mestrado em Estatística. Universidade Federal do Pará, 2008.

FITERMAN, M.; CATEN, C.S.; BATTESINI, M.; LIMA, L.L. *CEP por atributos: uma abordagem de implantação.* ENEGEP, 2004, Florianópolis, SC.

HAWORTH, D. A. *Regression control charts to manage software maintenance.* Software Maintenance: Research and Practice, v. 8, n. 1, p 35-48, 1996.

JACOBI, L.F.; SOUZA, A.M.; PEREIRA, J.E.S. *Gráfico de Controle de Regressão Aplicado na Monitoração de Processos.* Revista Produção, v. 12, n. 1, pág. 46-59, 2002.

KOTZ, S.; JOHNSON, N.L. et al. *Process capability indices – a review, 1992-2000 / Discussion / Response.* Journal of Quality Technology, v. 34, n. 1, p. 2-51, 2002.

LOREDO, E. N.; JERKPAPORN, D.; BORROR, C. M. *Model-based Control Chart for Autoregressive and Correlated Data.* Quality and Reliability Engineering International, v. 18, n. 6, p. 489-496, 2002.

MANDEL, B.J. *The Regression Control Chart. Journal of Quality Technology*. v.1, n.1, p. 1-9, 1969.

MIRANDA, R.G. *Um modelo para a análise da capacidade de processos com ênfase na transformação de dados.* UFSC (2005). Dissertação de mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.* 2. Ed., Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003, 463 p.

MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 513 p, 2004.

PEDRINI, D. C.; CATEN, C. S. ten. *Comparação entre gráficos de controle para residuos de modelos*. Bauru: XV Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), 2008.

PEDRINI, D.C. *Proposta de um Método para Aplicação de Gráficos de Controle de Regressão no Monitoramento de Processos.* UFRGS (2009). Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

RAMOS A.W.; HO, L.L. *Procedimentos inferenciais em índices de capacidade para dados autocorrelacionados via bootstrap.* Revista Produção. v. 13, n. 3, p. 50-62, 2003

SCHISSATTI, M.L. *Uma metodologia de implantação de cartas de Shewarth para o controle de processos.* UFSC (1998). Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

SHU, L; TSUI, K. L.; TSUNG, F. *A review of regression control charts*. In: Ruggeri, F.; Faltin, F.; Kenett, R. Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability New York: John Wiley & Sons, p. 1569-1573, 2007.

SHU, L; TSUNG, F; TSUI, K. L. *Run-length Perfomance of Regression Control Charts with Estimated Parameters.* Journal of Quality Technology, v. 36, n. 3, p. 280-292, 2004.

STOUMBOS, Z.G. *Process Capability Indices: Overview and Extensions.* Nonlinear Analysis: Real World Applications. n.3, p.191-210, 2002.

WANG, F.K.; HUBELE, N.F.; LAWRENCE, F.P.; MISKULIN, J.D.; SHAHRIARI, H. *Comparison of Three Multivariate Process Capability Indices.* Journal of Quality Technology. v.32, n.3, p. 263-275, 2000.

WOODALL, W.H. *Control Charts Based on Attribute Data: Bibliography and Review.* Journal of Quality Technology. v.29, p. 172-83, 1997.