

Análise de processos multivariados: aplicada aos índices de desempenho

Débora Alves Coelho¹

Rogério Santana Peruchi³

Maíza Biazon de Oliveira²

Resumo: Mediante a necessidade de fornecer produtos com qualidade de acordo com as necessidades do cliente. Com intuito de garantir esta qualidade, faz-se necessário avaliar o desempenho dos processos. Diante desse cenário, existem métodos que quantificam o desempenho do processo, por meio de índices univariados e multivariados. Esta pesquisa teve como foco propor o método WPC e demonstrar a sua eficácia em comparação com abordagens multivariadas da literatura, utilizando os métodos de componentes principais e ponderados. Utilizando como critério de avaliação o intervalo de confiança univariado, impondo que os índices multivariados apresentem valores dentro dos limites deste IC para afirmar a validade dos métodos. Para as análises realizadas seguiu-se uma sequência de passos abordados no estudo, verificando-se, por meio dos resultados auferidos, a eficácia do método proposto e suas vantagens em relação aos demais.

Palavras-chave: Índices desempenho multivariados. Método de componentes principais ponderados. Intervalo de confiança.

Introdução

O mercado cada vez mais se preocupa em melhor atender aos requisitos, especificações dos clientes. O ideal para as empresas, consiste em atingir essas

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: debora-alves.8@hotmail.com. Bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do CNPq.

2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: maizabiazon@hotmail.com.

3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Laboratório de Metrologia. Contato: rogerioperuchi@ufg.br.

exigências, apresentando um nível mínimo de variabilidade dos produtos ou processos. Porém, sempre existe variações entre uma peça e outra, advindas de causas comuns ou causas especiais. Quando o processo atende a uma variabilidade mínima, considera-se a presença apenas de causas comuns (AIAG, 2005; MONTGOMERY e RUNGER, 2011).

Espera-se em um processo de fabricação, que haja a presença apenas causas comuns de variação. Assim, as saídas deste caracterizam-se em uma distribuição estável no tempo e previsível, pode-se então considerar que o produto ou processo estão sob controle estatístico. Para as causas especiais, devido a não estabilidade e repetitividade, o produto/processo encontram-se fora de controle estatístico, isto pode ser ocorrer devido a desajustes de máquinas, erros de operação, entre outros (AIAG, 2005).

Diante da importância de se manter o processo sob controle, as empresas estão sempre buscando por meios e técnicas para avaliar os resultados de seus processos e realizar previsões. Entre os sistemas utilizados, tem-se o Controle Estatístico do Processo (SPC), no qual, se avalia a qualidade por meio de técnicas estatísticas. A análise de capacidade do processo está entre as ferramentas do SPC. Com sua aplicação pode-se avaliar a capacidade do processo em produzir satisfazendo as especificações do consumidor, para que possam ser identificadas e minimizadas as variações. Auxiliando assim, na tomada de decisões sobre o processo, definindo ações até mesmo preventivas (AIAG, 2005; WANG, 2006; SHAHRIARI e ABDOLIAHZADEH, 2009).

A análise de capacidade do processo é quantificada por meio dos índices de capacidade de processos (ICPs) univariados. Estes estabelecem uma comparação entre o desempenho real e desejado do processo, utilizando uma única característica de qualidade. Vários índices vem sendo propostos para melhor se adaptar aos tipos de processos (CHEN, PEARN e LIN, 2003; DAS, 2009). Devido as especificações, sabe-se que as saídas dos processos, apresentam mais de uma característica de qualidade importante e que estas encontram-se correlacionadas. Portanto o meio industrial necessita de técnicas multivariadas, que abordem todas as especificações relevantes para serem analisadas, através dos índices de capacidade de processos multivariados (AIAG, 2005; WANG, 2006; AHMAD et al., 2009).

Neste cenário, em que se necessita o desenvolvimento da análise multivariada, o presente estudo busca abordar a análise de capacidade ou desempenho, com múltiplas variáveis correlacionadas, e sugerir um método alternativo, diferente das abordagens literárias. Realizando uma comparação entre os métodos de análise dos componentes principais (PCA), com o método dos componentes principais ponderados (WPC). A validação do método baseia-se, na avaliação dos índices calculados em relação aos intervalos de confiança, através da aplicação dos dados literários de Scagliarini (2011).

Desta forma, para alcançar o objetivo proposto, a pesquisa foi estruturada da seguinte forma: a segunda seção refere-se a revisão bibliográfica de acordo com o tema abordado, a terceira seção aborda ao método utilizado nesse estudo, a quarta seção remete aos resultados obtidos e sua análise, e ao final são apresentadas as considerações finais do estudo.

As considerações e resultados abordadas no presente estudo, colaboram com os conhecimentos sobre análise multivariada, a fim de enriquecer a temática e estimular novas pesquisas acadêmicas na área. Para que o tema seja bem esclarecido, os métodos sejam validados, como no caso do método WPC, em que se mostrou a eficiência de sua aplicação, e assim, proporcionar bons resultados para os meios industriais e acadêmicos.

1 Referencial Teórico

1.1 Índices Univariados de Desempenho

Os índices univariados são aplicados na análise dos processos, visando mensurar a capacidade (ICP_s) e desempenho (IDP_s), para obtê-los exige-se a normalidade do processo. Diante de uma amostra de dados que não possui normalidade, existem diferentes técnicas de transformações que alteram um conjunto de dados não normal para normal. As principais técnicas estatísticas de transformação de dados propostas são a de potência de Box-Cox e de Johnson. A de Johnson, apresenta um sistema clássico de distribuições, assim como apresentado na Eq. (1).

$$z = \gamma + \eta\tau(x; \varepsilon, \lambda) = \delta g(x) \quad (1)$$

Onde Z, trata-se da variável que deve ser ajustada pela transformação, em relação as variáveis $\gamma, \eta, \varepsilon, e \lambda$ são obtidos por meios de estimativas, desde que, sigam as restrições: $\eta > 0, \lambda > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \varepsilon < \infty$. A função $g(x)$, dependendo do uso, pode assumir distribuições limitadas, não limitadas e lognormal. No que diz respeito a sua variável x, esta, é obtida pela expressão essa $x = g^{-1}\left(\frac{z-\gamma}{\eta}\right)$. (AIAG, 2005; MONTGOMERY e RUNGER, 2011; PEARN e KOTZ, 2006).

De acordo com Montgomery (2009), a Automotive Industry Action Group (AIAG) faz o uso dos índices P_p e P_{pk} para avaliar o processo, estando este, sob controle ou não. À vista disso, a AIAG (2005), estabelecem os índices P_p e P_{pk} conforme as Eqs. (2) e (3).

$$P_p = \frac{LES - LEI}{6\sigma_{LT}} \quad (2)$$

$$P_{pk} = \min \left\{ \frac{LES - \bar{X}}{3\sigma_{LT}}, \frac{\bar{X} - LEI}{3\sigma_{LT}} \right\} \quad (3)$$

Observa-se que, as especificações de engenharia, LES, LEI e T, referem-se respectivamente ao intervalo, superior, inferior e no alvo das características de qualidade. Enquanto a média e o desvio padrão global são simbolizados pelas variáveis \bar{X} e σ , respectivamente.

Pearn e Kotz (2006), afirmam que obtém-se os índices C_{pm}/P_{pm} por meio da Eqs. (4)

$$C_{pm}/P_{pm} = \frac{LES - LEI}{6\sqrt{\sigma_{LT}^2 + (\mu - T)^2}} \quad (4)$$

Sabe-se que, LES, LEI e T dizem respeito ao intervalo, superior, inferior e no alvo, de tolerância que se permite no processo. Enquanto as variáveis μ e σ fazem alusão a média e desvio padrão global do processo.

Conforme Montgomery e Runger (2011), utiliza-se os ICP_s, (C_p , C_{pk} , C_{pm} e C_{pmk}), mediante um processo sob controle e estável, com presença apenas de causas comuns de variação. Já os IDP_s, (P_p , P_{pk} , P_{pm} e P_{pmk}), mesuram tanto em condições de causas especiais quanto comuns, ou seja. Portanto, nota-se que a principal diferença entre eles refere-se a variação das características analisadas.

Dentre os diferentes usos, o intervalo de confiança univariado julga a eficácia de métodos estatísticos relacionados a mensurações de processo. Este, é definido pela presença de limites superior e inferior. Conforme representado pela Eqs. (5) e (6).

$$LIIC = \bar{M} - t_{N-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

$$LSIC = \bar{M} + t_{N-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

Estas especificações, referem-se aos intervalos da média, onde s é do desvio padrão da amostra, \bar{M} trata-se da média de desempenho para características de qualidade, N relaciona-se ao tamanho da amostra e o termo $t_{N-1, \alpha}$ diz respeito $(1 - \alpha)100\%$ percentis com a presença de graus de liberdade. (PERUCHI *et al.*, 2012).

1.2 Índices multivariados de desempenho

A análise de componentes principais (PCA), proposta por Wang e Du (2000), é um método utilizado para descrever o desempenho de um processo em termos multivariados, onde os escores de componentes principais (PCis) devem estar restritos a normalidade. Além disso, esse método, possibilita a transformação de dados correlacionados em dados independentes. Este método pode ser descrito

pela Eq. (7) e suas especificações de engenharia, LEI_{PCi} , LES_{PCi} e T_{PCi} pelas Eqs (8), (9) e (10).

$$PC_{\text{escore}} = u'^T x \quad (7)$$

$$LEI_{PCi} = u'_i LEI \quad (8)$$

$$LES_{PCi} = u'_i LES \quad (9)$$

$$T_{PCi} = u'_i T \quad (10)$$

Sabe-se que, u'^T , refere-se a matriz transposta de autovetores, e x as variáveis originais do processo. Em relação as especificações, nota-se que, LEI , LES e T dizem respeito ao limite inferior, superior e no alvo das observações originais (x).

Para se obter os índices de desempenho de um processo, por meio do método PCA, faz-se indispensável estimar os índices univariados, referentes a cada PC analisado, e aglutina-los. Wang e Chen (1998) afirma, que para analisar o desempenho de um processo, os dados devem apresentar normalidade de distribuição. Os índices multivariados, então serão obtidos por intermédio da média geométrica entre os índices univariados dos PCs. Assim, de acordo com Wang e Chen (1998), método PCAM, obtêm-se os índices multivariados por meio da Eq. (11).

$$MP_p = \left(\prod_{i=1}^k P_{p;PCi} \right)^{1/k} \quad (11)$$

Ressaltando-se que, k refere-se ao número de PC considerado na análise e $P_{p;PCi}$ denota os índices univariados de cada PC, calculado com auxílio da Eq. (2).

Segundo Perakis e Xekalaki (2012), pode-se obter os índices, por meio de outro equacionamento, no qual utiliza-se a ponderação dos índices univariados relacionados aos PCs e média aritmética para aglutina-los. Com isso, são atribuídos pesos diferentes a cada $P_{p;PCi}$, sendo estes relativos aos autovalores (λ_i). Desta maneira, a Eq. (12), representa o método PCAX.

$$MXP_p = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i P_{p;PCi}}{\sum_{i=1}^k \lambda_i} \quad (12)$$

Nos estudos de Wang (2005), o mesmo desenvolveu um método de cálculo dos índices multivariados, buscando abordar os processos que apresentam produção com curto período. Diante disso, para definir os índices multivariados aplicou-se condições de não-normalidade, baseou-se na ponderação dos índices univariados e na utilização da média geométrica.

Para Scagliarini (2011), faz-se necessário a premissa de normalidade da distribuição para se utilizar os índices. Neste cenário, aplicou-se ao método a condição de dados normais e os renomeou. Obtêm-se os índices de desempenho multivariado, através do método PCAW, utilizando a Eq. (13).

$$MWP_p = \left(\prod_{i=1}^k P_{p;PC_i}^{\lambda_i} \right)^{1/\sum_{i=1}^k \lambda_i} \quad (13)$$

De acordo com as abordagens de Perakis e Xekalaki (2012) e Scagliarini (2011), para as medidas de desempenho, P_{pk} , P_{pm} , pode-se calcular seus índices multivariados utilizando o mesmo equacionamento supracitado. Ressaltando que para isso, deve-se substituir o cálculo de $P_{p;PC_i}$ por $P_{pk;PC_i}$ e $P_{pm;PC_i}$. Diferenciando apenas as equações relacionada aos índices univariados de cada PC.

Liao (2005), propôs o método dos componentes principais ponderados (WPC), com intuito de suprir as limitações encontradas no método PCA. Para isso, utiliza-se a ponderação dos componentes principais. Uma das formas de definir o WPC, baseia-se no percentual de explicação relacionado a cada componente principal. Representado pela Eq. (14).

$$WPC = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} (PC_i) \right] \quad (14)$$

Onde k representa o número de escores significativos no cálculo, PC_i refere-se ao escore de componente principal, obtido por meio da Eq. (7), sendo esta compartilhada com o método PCA e λ_i evidencia os autovalores.

A utilização do método WPC exige que novos limites de especificação, inferior (LEI_{WPC}), superior (LES_{WPC}) e alvo (T_{WPC}), sejam determinados, para isso faz-se necessário utilizar as Eqs. (15), (16) e (17). No qual, as variáveis LEI , LES e T representam os limites padronizados por meio das Eqs. (8), (9) e (10), também compartilhados pelo método PCA. Em relação a variável U esta denota a matriz de autovetor e λ os autovalores. Soma-se ao fato, o cálculo do desvio padrão global ($\hat{\sigma}_{LT}$).

$$LEI_{WPC_S} = LEI'U\lambda \quad (15)$$

$$LES_{WPC_S} = LES'U\lambda \quad (16)$$

$$T_{WPC_S} = T'U\lambda \quad (17)$$

$$\hat{\sigma}_{LT} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (18)$$

Após determinado os parâmetros do método WPC, pode-se estimar os índices de desempenho multivariados, P_p , P_{pk} e P_{pm} , com o auxílio das Eqs. (19), (20) e (21), respectivamente.

$$WPCP_p = \frac{LES_{WPC} - LEI_{WPC}}{6\sigma_{LT;WPC}} \quad (19)$$

$$WPCP_{pk} = \min \left\{ \frac{LES_{WPC} - \bar{Y}_{WPC}}{3\sigma_{LT;WPC}}, \frac{\bar{Y}_{WPC} - LEI_{WPC}}{3\sigma_{LT;WPC}} \right\} \quad (20)$$

$$WPCP_{pm} = \frac{LES_{WPC} - LEI_{WPC}}{6\sqrt{\sigma_{LT;WPC}^2 + (\bar{Y}_{WPC} - T_{WPC})^2}} \quad (21)$$

2 Metodologia

As análises realizadas na pesquisa encontram-se embasadas em uma metodologia, estruturada em uma sequência de passos, que podem ser executados, por ambos os métodos abordados, com a finalidade de determinar os índices multivariados do processo. Esta sequência está dividida em sete passos, em que apenas no sexto passo ocorre a diferenciação dos métodos. Esses passos são apresentados abaixo.

- Passo 1: Selecionar as características de qualidade a serem analisadas;
- Passo 2: Adquirir os dados, referentes às características;
- Passo 3: Obter os escores dos componentes: principais e ponderados;
- Passo 4: Realizar a análise dos componentes para obter autovalores, matriz autovetor e percentual de explicação;
- Passo 5: Determinar o desvio padrão e os limites de especificação;
- Passo 6: Determinar os índices de desempenho;
- Passo 7: Determinar o intervalo de confiança.

O desenvolvimento deste estudo começa com o passo1, no qual realiza-se a seleção das características de qualidade que se deseja avaliar, sendo estas de maior relevância para o processo e para o produto final. Em seguida, realiza-se o passo 2, este consiste nas medições necessárias, referentes as características definidas no passo anterior. Juntamente com essa coleta de dados são obtidos os valores limites das especificações de engenharia, estes se relacionam aos valores que se esperam obter de cada variável, para que a qualidade seja adequada.

No passo3, por meio da aplicação das equações, obtêm-se os escores dos componentes referentes a cada método. Portanto são determinados os escores de componentes principais, estes destinados ao método PCA, e os escores dos componentes principais ponderados, necessários para realizar a avaliação através do método

WPC. Aplicando-se a análise dos componentes com o auxílio da matriz de variância-covariância, têm-se assim, o passo 4. No qual gera-se os autovalores, a matriz autovetor e o percentual de explicação, parâmetros relacionados as variações.

Para utilização dos métodos, faz-se necessário obter novos limites de especificação, portanto o passo 5, consiste em determinar estes limites e o desvio padrão global. Que serão utilizados em análises posteriores. Para o método PCA, realiza-se apenas a padronização dos dados aplicando as equações descritas. Em relação ao WPC, os limites são calculados por meio da utilização destes dados de limites padronizados para PCA.

No passo 6, faz-se possível obter os índices multivariados, já que determinou-se os parâmetros necessários. Neste passo, os métodos se diferem, devido à necessidade de se calcular os índices univariados para estimar os multivariados baseados no método PCA. No método WPC não são exigidos obter os índices univariados, pois os parâmetros são ponderadas de forma a definir as estimativas multivariadas.

Após definidos os índices multivariados, realiza-se o passo 7, calculando-se o intervalo de confiança univariado segundo o equacionamento de Peruchi *et al* (2012), a fim de garantir que estes índices multivariados obtidos representem adequadamente as variações do processo.

3 Discussão e Resultados

Para desenvolver o estudo da análise multivariadas utilizou-se como base os dados da literatura de Scagliarini (2011) referente à 30 medições das características de qualidade profundidade (Y_1), comprimento (Y_2) e largura (Y_3), referentes aos dados de). Os dados coletados encontram-se na Tab. 1.

Tabela 14.1 Dados de 30 medições de profundidade, comprimento e largura

N	Y_1	Y_2	Y_3	N	Y_1	Y_2	Y_3
1	2,196	304,728	304,799	16	2,169	304,681	304,764
2	2,184	304,704	304,747	17	2,122	304,655	304,711
3	2,136	304,713	304,680	18	2,202	304,790	304,810
4	2,141	304,721	304,720	19	2,210	304,719	304,721
5	2,120	304,725	304,768	20	2,237	304,842	304,820
6	2,163	304,670	304,792	21	2,195	304,707	304,775
7	2,145	304,699	304,753	22	2,171	304,704	304,737

Continua

Tabela 14.1 Dados de 30 medições de profundidade, comprimento e largura (*Continuação*)

N	Y_1	Y_2	Y_3	N	Y_1	Y_2	Y_3
8	2,210	304,792	304,816	23	2,116	304,663	304,649
9	2,227	304,738	304,755	24	2,169	304,739	304,765
10	2,278	304,860	304,822	25	2,151	304,761	304,783
11	2,193	304,710	304,755	26	2,183	304,699	304,778
12	2,195	304,719	304,753	27	2,120	304,652	304,739
13	2,115	304,706	304,709	28	2,193	304,779	304,809
14	2,151	304,734	304,760	29	2,237	304,764	304,736
15	2,127	304,720	304,753	30	2,244	304,861	304,805

Fonte: Scagliarini, 2011

Tomando como base os dados das Tab. 1, calculou-se os escores dos componentes principais e ponderados. Através da Eqs. (7) e (14). Além disso, para realizar as posteriores análises, fez-se necessário utilizar as especificações de engenharia referentes aos limites, inferior (LEI), alvo (T) e superior (LES), das características exploradas do estudo de Scagliarini (2011). A Tab.2 apresenta essas especificações.

Tabela 14.2 Especificações de profundidade, comprimento e largura

Variáveis	LEI	T	LES
Y₁	2,1	2,2	2,3
Y₂	304,5	304,8	305,1
Y₃	304,5	304,8	305,1

Fonte: Elaborado pelos autores

3.1 Análise por meio do método WPC

Através da aplicação da análise de componentes principais utilizando a matriz de variância-covariância (S), obteve-se os dados da Tab. 3, referentes

aos autovalores, autovetores e percentual de explicação para cada componente principal.

Tabela 14.3 Análise dos componentes principais para Y1, Y2, Y3

		PC₂	PC₃
Autovalores	0,0053	0,0007	0,0006
%PC	0,801	0,111	0,088
%Explic. A.	0,801	0,912	1,000
Variáveis	Autovetores		
Y₁	0,523	-0,256	-0,813
Y₂	0,712	-0,393	0,582
Y₃	0,469	0,883	0,023

Fonte: Elaborado pelos autores

A utilização do método WPC requer que novos limites de especificação sejam estimados, tornando-se indispensável a padronização das especificações originais de engenharia, presente no estudo de Scagliarini (2011), por meio das equações (8), (9), (10). Com isso, faz-se possível o cálculo dos parâmetros de processo, em termos multivariados, conforme as Eqs. (15), (16) e (17). Ainda seguindo o método proposto, obteve-se o desvio padrão global com auxílio da Eq. (18). Os referentes dados encontram-se na Tab.4.

Tabela 14.4 Parâmetros do processo, utilizando WPC

LEI_{WPC}	T_{WPC}	LES_{WPC}	$\sigma_{LT,WPC}$
321,449	321,797	322,145	0,05818

Fonte: Elaborado pelos autores

Estimou-se os índices multivariados do método WPC, baseados nos dados da Tab. 4 e nas Eqs. (19), (20) e (21), referentes aos índices de desempenho P_p , P_{pk} e P_{pm} . Conforme apresentado na Tab. 5.

Tabela 14.5 Estimativas de desempenho multivariadas

P_p	P_{pk}	P_{pm}
1,99	1,61	1,30

Fonte: Elaborado pelos autores

A Fig. 14.1, representa a avaliação das características de qualidade, juntamente com os índices multivariados, por meio do método WPC.

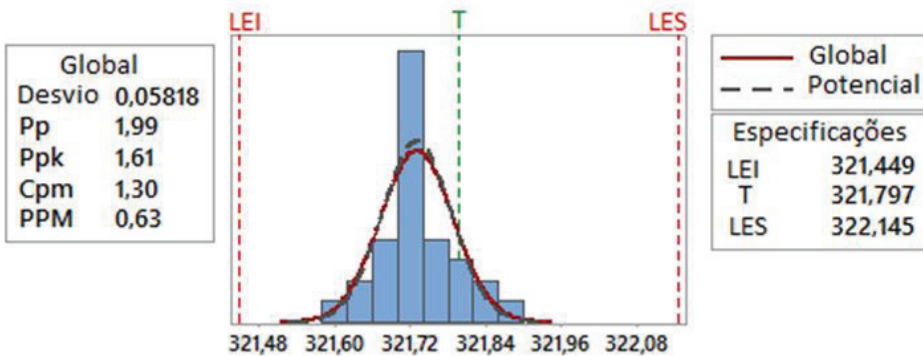


Figura 14.1 Análise de desempenho do WPC

Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 Análise de desempenho utilizando o método PCA

Similar a análise de componentes principais ponderados, o desenvolvimento do método PCA compartilhou da mesma metodologia, obtendo-se também os parâmetros de especificação de engenharia padronizados, inferior (LEI_{PCA}), alvo (T_{PCA}) e superior (LES_{PCA}) o desvio padrão global ($\sigma_{LT;PCA}$) para cada componente principal. Assim como também, calculou-se os índices de desempenho univariado e multivariado, por meio do PCA. Esses métodos diferem-se devido ao fato do PCA levar em consideração os componentes principais que apresentam um percentual de explicação significativo. No entanto para esta pesquisa optou-se pelo uso de todos os componentes principais.

À vista disso, alcançou-se, os parâmetros do método PCA encontram-se presentes na Tab. 6 por meio da aplicação das Eqs (8), (9), (10) e (18).

Tabela 14.6 Parâmetros do processo utilizando PCA

LEI_{PCA}	T_{PCA}	LES_{PCA}	$\sigma_{LT;PCA}$
360,672	361,078	361,485	0,072

361,078	148,801	148,922	0,027
182,361	182,461	182,561	0,024

Fonte: Elaborado pelos autores

Assim como exposto na Tab. 7, calculou-se os índices supracitados, sendo eles P_p , P_{pk} e P_{pm} , através das Eqs. (2), (3) e (4) para cada componente principal.

Tabela 14.7 Estimativas dos índices univariados referentes aos escores PCs

	P_p	P_{pk}	P_{pm}
PC1	1,869	1,502	1,245
PC2	1,500	1,463	1,491
PC3	1,389	1,090	1,025

Fonte: Elaborado pelos autores

As análises referentes a cada PCs, através do método PCA, encontram-se na Fig. 14.2.

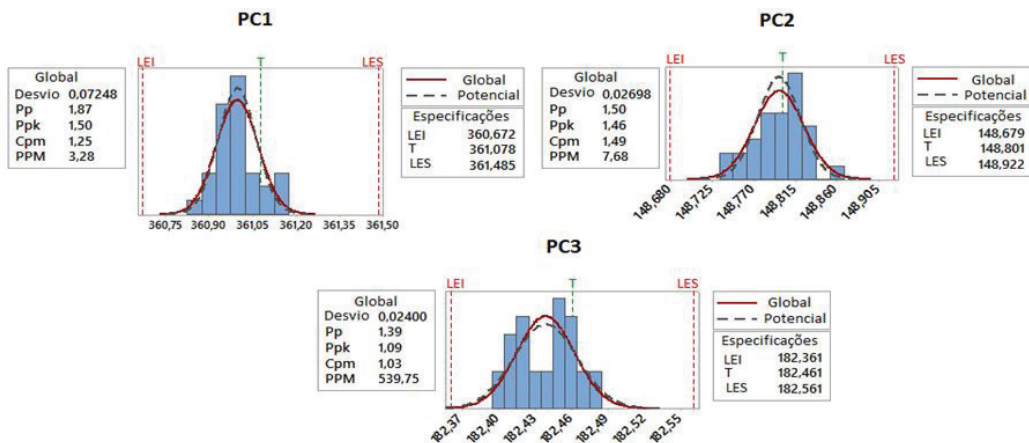


Figura 14.2 Análise de desempenho do PCA

Fonte: Elaborado pelos autores

Com o propósito de auferir os índices multivariados, embasados em formulações da literatura, utilizou-se as Eqs. (11), (12), (13), referentes aos métodos PCAM, PCAX, PCAW respectivamente. Os valores encontrados apresentam-se na Tab. 8.

Tabela 14.8 Índices multivariados de acordo com a literatura

	PCAM	PCAX	PCAW
P_p	1,573	1,786	1,777
P_{pk}	1,338	1,462	1,456
P_{pm}	1,239	1,253	1,249

Fonte: Elaborado pelos autores

3.3 Intervalos de Confiança

Com o intuito de avaliar a eficácia dos métodos multivariados, garantindo-se que o índice represente apropriadamente o desempenho do processo, efetuou-se os cálculos do intervalo de confiança univariado, com auxílio das Eqs. (5) e (6). Para validação do método, torna-se imprescindível que as estimativas dos índices em termos multivariados, permaneçam dentro dos limites especificados.

Em relação a característica comprimento Y2, fez-se necessário a transformação de Jonhson obtendo a normalidade dos dados deste parâmetro, mediante a Eq. (1). Os resultados auferidos estão presentes na Tab. 9, juntamente com os índices de desempenho calculados anteriormente.

Tabela 14.9 Índices Univariados e Multivariados e Intervalo de Confiança

	IC Univariado			Índices Multivariados			
	Mediana	LEI	LES	WPC	PCAM	PCAX	PACAW
P_p	0,842	0,772	2,410	1,990	1,573	1,786	1,777
P_{pk}	0,792	0,592	2,085	1,610	1,338	1,462	1,456
P_{pm}	0,676	0,220	1,710	1,300	1,239	1,253	1,249

Fonte: Elaborado pelos autores

Com os dados resultantes dos cálculos, presentes na Tab. 9, notou-se que os limites do IC foram respeitados por todos os índices multivariados. Como pode-se observar nos índices $P_{p_{wpc}} = 1,990$ estando dentro do $IC_{Pp} = [0,772; 2,410]$ e

$P_{pk_{wpc}} = 1,610$ sendo $IC_{P_{pk}} = [0,592; 2,085]$, constatando-se que para os demais métodos também se obteve resultados satisfatórios. Confirmando assim, a validade do desempenho do método dos componentes principais ponderados e os da literatura.

Portanto recomenda-se a aplicação do método WPC, para avaliação de processos que contenham múltiplas características de qualidade, devido a exigência de apenas uma avaliação de normalidade destas características. Enquanto os demais métodos abordados requerem mais avaliações, necessitando que todos os PCs sejam normalizados.

Conclusões ou considerações finais

Este estudo propôs apresentar uma comparação de índices multivariados por meio de diversas abordagens, sendo elas referente ao método WPC e aos métodos de literatura fundamentados no método PCA. Afim de se avaliar a eficácia dos métodos multivariados, efetuou-se o cálculo do intervalo de confiança univariados. Notou-se nesta pesquisa, que os valores obtidos nas estimativas multivariadas dos índices atenderam as limitações impostas pelo intervalo de confiança. Assim como, foi percebido para os índices de cada método multivariado, $P_{pm;WPC} = (1,990)$, $P_{pm;PCAM} = (1,573)$, $P_{pm;PCAX} = (1,786)$ e $P_{pm;PCAW} = (1,777)$, a permanência dos mesmos dentro do $IC_{P_{pm}} = [0,220; 1,710]$.

Diante do atendimento dos métodos multivariados ao intervalo de confiança, alcançou-se o objetivo do estudo. Posto que, o mesmo consistia em demonstrar a eficácia do método WPC diante da avaliação do intervalo de confiança univariado, utilizado, neste caso, como critério de julgamento. À vista disso, validou-se o método de componentes principais ponderados. Com isso, indica-se o uso do método WPC para análise multivariadas, devido apresentar como vantagem uma única avaliação de normalidade.

Por meio da temática abordada e dos resultados auferidos, este estudo apresentou contribuições na área acadêmica, assim como, no setor industrial. Uma vez que, em relação a primeira contribuição, o estudo atua como fonte de subsídios da abordagem multivariada, além de, incentivo para pesquisas futuras. No que tange o âmbito industrial, proporciona-se o esclarecimento de uma técnica de análise multivariada, de forma a impactar no processo, possibilitando inferências de reduções de custo e conseqüentemente melhoria do mesmo.

Referências

AHMAD, S.; ABDOLLAHIAN, M.; ZEEPHONGSEKUL, P.; ABBASI, B. Multivariate nonnormal process capability analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 44, n. 7-8, p. 757-765, 11 fev. 2009.

- AIAG. **Statistical process control spc**. Second edition. Troy, michigan: [s.n.]. P. 143. 2005
- CHEN, K. S.; PEARN, W. L.; LIN, P. C. Capability measures for processes with multiple characteristics. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 19, n. 2, p. 101-110, mar. 2003.
- DAS, S.. **Process capability indices for non normal distributions**. 2009. Tese de Doutorado. NORTHERN ILLINOIS UNIVERSITY. p. 37.
- LIAO, Hung-Chang. Multi-response optimization using weighted principal component. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, n. 7-8, p. 720-725, 23 fev. 2005.
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009. p. 363.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 5th ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., p. 792, 2011.
- PEARN, W. L.; KOTZ, S. **Encyclopedia and handbook of process capability indices: a comprehensive exposition of quality control measures (Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics)**. World Scientific Publishing Co., Inc., 2006. v. 12p. 391.
- PERAKIS, M.; XEKALAKI, E. On the implementation of the principal component analysis - based approach in measuring process capability. **Quality and Reliability Engineering International**, p. 467-480, 2012.
- PERUCHI, R. S.; PAIVA, P. A.; BALESTRASSI, P. P.; DIAZ, G. A. Simulated analysis for multivariate gr&r study. In: **International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**. 2012, 12 p.
- SCAGLIARINI, M. Multivariate process capability using principal component analysis in the presence of measurement errors. **AStA Advances in Statistical Analysis**, v. 95, n. 2, p. 113-128, 4 mar. 2011.
- SHAHRIARI, H.; ABDOLLAHZADEH, M. A new multivariate process capability vector. **Quality Engineering**, v. 21, n. 3, p. 290-299, 12 jun. 2009.

- WANG, Chung-Ho. Constructing multivariate process capability indices for short-run production. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, n. 11-12, p. 1306-1311, 2005.
- WANG, F. K. Quality evaluation of a manufactured product with multiple characteristics. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 22, n. 2, p. 225-236, mar. 2006.
- WANG, F. K.; CHEN, J. C. Capability index using principal components analysis. **Quality Engineering**, v. 11, n. 1, p. 21-27, set. 1998.
- WANG, F. K.; DU, T. C. T. Using principle component analysis in process performance for multivariate data. **Omega**, v. 28, n. 2, p. 185-194, 2000.