

# UMA ABORDAGEM SEIS SIGMA PARA OTIMIZAR A CAPABILIDADE DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO

**Rogério Santana Peruchi (UNIFEI)**

rogerioperuchi@unifei.edu.br

**DIOGO NUNES DALOSTO (UNIFEI)**

diogodalosto@gmail.com

**Pedro Paulo Balestrassi (UNIFEI)**

ppbalestrassi@gmail.com

**Taynara Incerti de Paula (UNIFEI)**

tayincerti@hotmail.com



*Este artigo pretende aplicar um roadmap Seis Sigma para otimizar o sistema de medição (SM) de um processo de soldagem para revestimento. A principal contribuição desta pesquisa envolve a aplicação de uma metodologia estruturada (DMAIC - Definir, Medir, Analisar, Melhorar (Improve), Controlar) capaz de identificar, analisar e reduzir a variação do SM através de análise estatística univariada e multivariada. A fase definir apresenta o problema do processo que, neste caso, trata da soldagem de revestimento do aço carbono ABNT 1020 usando arames tubulares de aço inoxidável ABNT 316L. Na fase medir foi determinado a capacidade inicial do software analisador de imagens através de análise de componentes principais e estudos de repetitividade e reprodutividade. Após identificar a capacidade do SM através de índices de avaliação do SM, análise de variância e análises gráficas foram executadas para identificar as*

*causas específicas de variação no decorrer da fase analisar do projeto Seis Sigma. Já na fase melhorar, planejamento e implementação de ajustes ao processo de medição foram aplicados com objetivo de melhorar a precisão e exatidão do SM. Ajustes ao procedimento de medição e sistemas de controle durante a fase controlar do projeto foram propostos para sustentar as melhorias do processo de medição.*

*Palavras-chaves: Seis Sigma, DMAIC, Análise de Componentes Principais, Repetitividade e Reprodutividade, soldagem*

## 1. Introdução

Em qualquer pesquisa que usa o método experimental para atingir a objetivos pré-estabelecidos, recomenda-se analisar a variabilidade do processo de medição. Esta etapa é importante para o pesquisador poder afirmar com maior convicção se os resultados obtidos no estudo, realmente são efeitos das alterações dos níveis dos fatores do experimento ou são apenas variações do sistema de medição (SM). Particularmente, em projetos de melhoria da qualidade, como o Seis Sigma, antes de analisar a capacidade do processo deve-se avaliar a capacidade do SM. Uma estratégia bastante difundida para selecionar a característica mais crítica é através da priorização de uma variável dentre várias possíveis. Esta característica é uma variável de resposta que tem uma importância crítica para o cliente, logo, as futuras ações de melhoria devem ser tomadas com objetivo de otimizar esta característica da qualidade. No caso em que se deseja avaliar um SM que mede múltiplas variáveis, a estratégia de priorização da característica da qualidade e utilização de métodos univariados pode não ser satisfatória. Nestes casos, as características geralmente apresentam uma estrutura de correlação que deve ser considerada na análise, logo, devem ser utilizados métodos multivariados para análise deste SM (Peruchi *et al.*, 2013).

O objetivo desta pesquisa é aplicar uma abordagem Seis Sigma multivariada para otimizar o SM de um processo de soldagem para revestimento. O processo envolvido trata-se da soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando arames tubulares de aço inoxidável ABNT 316L. Os parâmetros geométricos do cordão de solda R (reforço), P (penetração), L (largura), AR (área de reforço), AP (área de penetração) e AT (área total) foram medidos através do software analisador de imagens, Analysis Doc®. Análise de componentes principais com estudos de repetitividade e reprodutividade foram as técnicas estatísticas selecionadas para avaliar o SM multivariado. O roadmap DMAIC foi o método utilizado para direcionar o analista no processo de redução da variação devido ao SM. Os resultados desta pesquisa mostraram que o treinamento dos operadores foi eficiente ao reduzir em 50% a variação do estudo GR&R (*Gage Repeatability and Reproducibility*) devido ao SM.

## 2. Revisão da literatura

### 2.1. Seis Sigma

Bill Smith, um engenheiro da Motorola, desenvolveu o programa Seis Sigma como uma forma de atender as necessidades de melhoria da qualidade e redução de defeitos em seus produtos. Bob Galvin, CEO da Motorola, ficou impressionado com os resultados de sucesso desta metodologia e decidiu aplicar o Seis Sigma com foco nos processos de manufatura. Entre 1987 e 1994 foi alcançada uma redução de 94% dos defeitos em semicondutores (Montgomery e Woodall, 2008). Empresas como a Allied Signal, IBM e General Electric adotaram o Seis Sigma como requisito corporativo para as operações estratégicas e táticas para produzir resultados de alto nível, melhorar processos de trabalho, ampliar as competências dos trabalhadores e promover mudança cultural (Aboelmaged, 2010).

De acordo com Montgomery e Woodall (2008), os projetos Seis Sigma, geralmente, têm duração de 4-6 meses e são selecionados de acordo com o potencial impacto nos negócios. Melhoria da qualidade e do negócio via projetos tiveram sua origem com Joseph Juran, que sempre estimulou a abordagem projeto-a-projeto para melhorar a qualidade (Juran, 1998). O impacto do projeto deve ser avaliado, pelo departamento financeiro da empresa, em termos de seus benefícios financeiros para o negócio. Obviamente, projetos com grandes potenciais de impacto são mais desejáveis. Esta integração dos sistemas financeiros é uma prática padrão do Seis Sigma e deve ser parte do projeto DMAIC. Neste artigo será adotado o roadmap DMAIC genérico proposto no artigo de De Koning e De Mast (2006).

### 2.2. Análise de componentes principais

Análise de componentes principais é uma das ferramentas aplicadas mais amplamente usadas para resumir os padrões comuns de variação entre variáveis. É algebricamente uma combinação linear  $\phi$  de  $q$  variáveis aleatórias  $CTQ_1, CTQ_2, \dots, CTQ_q$ . Geometricamente essas combinações representam um novo sistema de coordenadas obtidas durante a rotação de um sistema original (Johnson e Wichern, 2007; Rencher, 2002; Paiva *et al.*, 2009; Mukherjee e Ray, 2008). As coordenadas dos eixos têm agora as variáveis  $CTQ_1, CTQ_2, \dots, CTQ_q$  e representam a direção de máximo. As componentes principais são não correlacionadas e

dependem somente da matriz de covariância  $\Sigma$  (ou da matriz de correlação  $\rho$ ) das variáveis CTQ1, CTQ2,..., CTQq e seu desenvolvimento não requer a suposição de normalidade multivariada.

As informações necessárias para obtenção dos escores do primeiro componente principal (PC1), segundo a definição de Johnson e Wichern (2007), vem da combinação linear maximizar a variância, de acordo com a Eq.(1).

$$\begin{aligned} \text{Maximizar : } & \text{Var}[\mathbf{e}'_1 \text{CTQ}] \\ \text{Subjeito a : } & \mathbf{e}'_1 \mathbf{e}_1 = 1 \end{aligned} \quad (1)$$

No problema de otimização acima, o produto das variáveis de decisão são limitadas ao comprimento unitário, para eliminar indeterminação da solução, visto que  $\mathbf{e}_1$  pode ser multiplicado por qualquer escalar. Para obter os escores do segundo componente principal (PC2), o problema (1) é alterado, de acordo com a Eq.(2), para garantir a ortogonalidade entre PC1 e PC2.

$$\begin{aligned} \text{Maximizar : } & \text{Var}[\mathbf{e}'_2 \text{CTQ}] \\ \text{Subjeito a : } & \mathbf{e}'_2 \mathbf{e}_2 = 1 \\ & \text{Cov}[\mathbf{e}'_1 \text{CTQ}, \mathbf{e}'_2 \text{CTQ}] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Desta forma geral, o  $i$ -ésimo componente principal será a solução para a combinação linear  $\mathbf{e}'_i \text{CTQ}$  que maximiza:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar : } & \text{Var}[\mathbf{e}'_i \text{CTQ}] \\ \text{Subjeito a : } & \mathbf{e}'_i \mathbf{e}_i = 1 \\ & \text{Cov}[\mathbf{e}'_i \text{CTQ}, \mathbf{e}'_k \text{CTQ}] = 0 \quad \text{para } k < i \end{aligned} \quad (3)$$

O resultado do problema de otimização lexicográfica descrito acima determina como solução da função objetivo os autovalores  $\lambda_i$  e a solução ótima das variáveis de decisão, os autovetores de cada componente principal. De posse dos pares de autovalores e autovetores de cada componente principal,  $(\lambda_1, \mathbf{e}_1)$ ,  $(\lambda_2, \mathbf{e}_2)$ , ...,  $(\lambda_q, \mathbf{e}_q)$  onde  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_q \geq 0$ , os escores de componentes principais podem ser calculados através da combinação linear abaixo

$$\text{PC}_i = \mathbf{e}'_i \text{CTQ} = \mathbf{e}_{1i} \text{CTQ}_1 + \mathbf{e}_{2i} \text{CTQ}_2 + \dots + \mathbf{e}_{qi} \text{CTQ}_q \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (4)$$

assim como, o percentual de explicação da  $i$ -ésima componente principal usando

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^q \lambda_j} \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (5)$$

### 2.2.1 Análise de sistemas de medição baseado em PCA

Wang e Chien (2010) compararam o método PCA com mais dois outros métodos para a análise do SM. No entanto, estes autores realizaram a análise individualmente para cada componente principal. Esta metodologia pode não ser adequada, pois a análise individual de cada uma das componentes pode proporcionar interpretações distintas. Quando as respostas apresentam correlações muito altas (%PC1>95%), a análise da primeira componente principal explica razoavelmente bem a variabilidade do SM. No entanto, quando as correlações entre as respostas não são muito altas, há a necessidade de analisar mais de uma componente principal, pois apenas a primeira componente principal não é capaz de explicar todo o conjunto de dados. Assim, neste artigo será adotado um novo método de estudo GR&R multivariado, proposto por Peruchi *et al.* (2013), que usa ponderação das componentes principais. Neste caso, o modelo tem como resposta as componentes principais ponderadas através de seus respectivos autovalores e é dado por:

$$WPC = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \forall i = 1, 2, \dots, p \quad j = 1, 2, \dots, p \quad k = 1, 2, \dots, r \quad (6)$$

onde:

$$WPC = \sum_{i=1}^q \lambda_i [(PC_i)] = \lambda_1 PC_1 + \lambda_2 PC_2 + \dots + \lambda_q PC_q \quad (7)$$

a resposta usada no modelo (6) é o resultado de uma ponderação das componentes principais por seus respectivos autovalores, de acordo com a Eq.(7). A variável  $\mu$  é uma constante e  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$ ,  $(\alpha\beta)_{ij}$ , são variáveis aleatórias normais independentes com média zero e variância  $\sigma_{\alpha}^2$ ,  $\sigma_{\beta}^2$ ,  $\sigma_{(\alpha\beta)}$  e  $\sigma_{\varepsilon}^2$ , respectivamente.

Em Johnson e Wichern (2007), verifica-se que há uma variedade de regras para estimar o número adequado de eixos de componentes principais não triviais que podem ser adotadas para representar o conjunto de dados. No entanto, devido à ponderação das componentes

principais por seus respectivos autovalores, todas componentes principais podem ser incluídas no modelo. As componentes com maior autovalor terão maior importância no modelo ponderado e, apesar disso, nenhuma informação deixará de ser incluída no estudo.

As componentes de variância do modelo (6) podem ser estimadas usando o método ANOVA (ver detalhes em Peruchi *et al.*, 2013) e são traduzidos em notação GR&R tal como:

$$\begin{aligned}\sigma_p^2 &= \sigma_\alpha^2, & \sigma_{\text{repetitividade}}^2 &= \sigma_\varepsilon^2, & \sigma_{\text{reprodutividade}}^2 &= \sigma_\beta^2 + \sigma_{\alpha\beta}^2 \\ \sigma_{sm}^2 &= \sigma_{\text{repetitividade}}^2 + \sigma_{\text{reprodutividade}}^2 & \sigma_t^2 &= \sigma_p^2 + \sigma_{sm}^2\end{aligned}\quad (8)$$

Um índice comum em estudos GR&R usado para determinar a aceitação do SM recomenda dimensionar a variância do SM com a variância total do processo observado. A estatística, denominada porcentagem R&R, é definida como:

$$\%R \& R_{wpc} = \frac{\sigma_{sm}^2}{\sigma_t^2}\quad (9)$$

Se  $\%R \& R_{wpc}$  indicar que o SM é menor que 1% o SM é considerado aceitável. Se o valor do índice estiver em uma região marginal entre 1% e 9%, indica que o SM pode ser considerado aceitável dependendo da aplicação, custo do dispositivo de medição, custo de reparo ou outros fatores. Além disso, o SM é considerado inaceitável se o valor do índice exceder 9% e deverá ser melhorado.

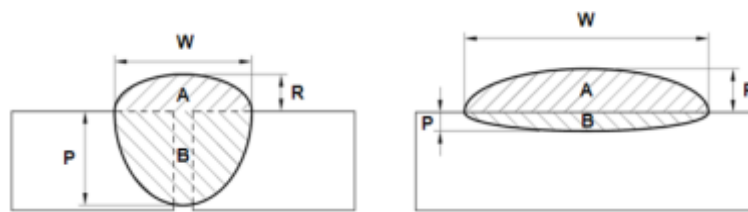
### 3. Aplicação do método

#### 3.1. Etapa Definir

De acordo com De Koning e De Mast (2006), a etapa definir de um projeto Seis Sigma/DMAIC consiste basicamente em selecionar o problema a ser resolvido, avaliar seu impacto no consumidor e potenciais benefícios que o projeto pode proporcionar. A principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem diz respeito à geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações convencionais, em que é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada (Figura 1a), na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R) e baixas penetrações (P) (Figura 1b). A obtenção deste perfil

geométrico característico é importante para que o processo permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo. Assim, um dos maiores desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado dos parâmetros do processo para que o material depositado adquira a geometria desejada. O processo envolvido trata-se da soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando arames tubulares de aço inoxidável ABNT 316L. A importância de que os cordões de revestimento apresentem a geometria definida pela Figura 1 já vem sendo destacada por autores como Kannan e Murugan (2006).

Figura 1- Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada (aplicações convencionais);  
b) soldagem de revestimento de Gomes et al. (2013).



(a) (b)

Fonte: Autores

Quanto às propriedades dos revestimentos de aços inoxidáveis, as características desejadas do material depositado, segundo Kannan e Murugan (2006b), se resumem a uma resistência razoável, boa soldabilidade com o metal base e boas propriedades de resistência à corrosão geral e à corrosão localizada. Para Ferriere et al. (2006), os revestimentos de aços inoxidáveis sobre aços carbono se mostram como uma boa solução para os problemas de elaboração de materiais que combinem altos níveis de propriedades mecânicas com boa resistência à corrosão.

Gomes et al. (2010) revisou as principais pesquisas sobre as características da qualidade das operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis empregando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular. As características podem ser divididas em três categorias: características geométricas, respostas de produtividade e propriedades finais dos revestimentos. As características geométricas envolvem penetração, reforço, largura do cordão e diluição; as respostas de produtividade são a taxa de fusão, taxa de deposição e



rendimento do processo; as propriedades do revestimento compreendem a dureza, composição química, microestrutura e resistência à corrosão.

### 3.2. Etapa Medir

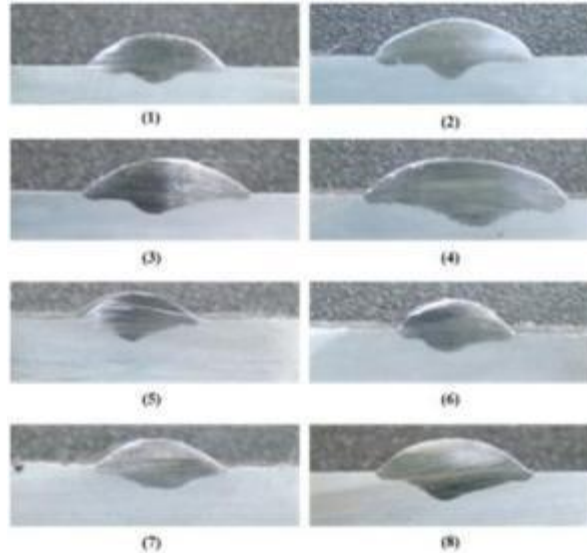
Foram avaliados seis parâmetros geométricos de um cordão de solda R (reforço), P (penetração), L (largura), AR (área de reforço), AP (área de penetração) e AT (área total). Os parâmetros geométricos do cordão de solda foram medidos através do software analisador de imagens Analysis Doc®. A Figura 2 descreve o procedimento utilizado para a medição da geometria do cordão de revestimento, cujas foram realizadas em quatro pontos distintos dos cordões. Os corpos de prova foram cortados e suas seções transversais devidamente preparadas e atacadas com nital 4%. Em seguida, foram tiradas fotografias dos corpos de prova a partir de um mesmo ponto referencial, para evitar presença de erro sistemático. Para o estudo GR&R foram selecionados os corpos de prova obtidos pelas seções transversais denominadas “Medição 2”, de acordo com a Figura 2. Com o objetivo de selecionar uma quantidade de peças que representasse bem a amplitude de operação para as características em análise, a Figura 3 mostra as peças escolhidas para este estudo GR&R multivariado.

Figura 2 - Procedimento para medição da geometria do cordão de solda.



Fonte: Autores

Figura 3 - Cordões selecionados para o estudo GR&R multivariado.



Fonte: Autores

A Figura 2 mostra o software Analysis Doc® realizando as medições unidimensionais e bidimensionais dos parâmetros geométricos do cordão de solda (1) da Figura 3. A unidade de medida fornecida pelo software é o pixel, logo, as medições unidimensionais foram convertidas para mm usando a Eq.(10) e as medições bidimensionais foram convertidas em mm<sup>2</sup> usando a Eq.(11).

$$CTQ_{real} = \frac{CTQ_{observado} \times Espessura_{real}}{Espessura_{observado}} \quad (10)$$

$$CTQ_{real} = \frac{CTQ_{observado} \times Espessura_{real}^2}{Espessura_{observado}^2} \quad (11)$$

onde  $CTQ_{real}$  é o valor real em mm para cada CTQ;  $CTQ_{observado}$  é o valor observado em pixels para cada CTQ;  $Espessura_{real}$  é o valor real constante das espessuras das chapas de 6,35 mm e;  $Espessura_{observado}$  é o valor observado da espessura das chapas em pixels. Os valores reais para os parâmetros geométricos do cordão de solda do estudo GR&R multivariado estão apresentados abaixo:

Tabela 1 - Medições das CTQs para o estudo GR&R multivariado.

| i | k | j=1 |     |      |      |      |      | j=2 |     |      |      |      |      | j=3 |     |      |      |      |      |
|---|---|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|
|   |   | R   | P   | L    | AP   | AR   | AT   | R   | P   | L    | AP   | AR   | AT   | R   | P   | L    | AP   | AR   | AT   |
| 1 | 1 | 2,5 | 1,5 | 11,0 | 7,7  | 20,8 | 28,7 | 2,7 | 1,5 | 11,4 | 8,5  | 22,5 | 30,2 | 2,7 | 1,5 | 11,3 | 8,4  | 20,8 | 29,0 |
| 1 | 2 | 2,6 | 1,5 | 11,2 | 8,1  | 20,5 | 29,0 | 2,7 | 1,4 | 11,4 | 8,4  | 22,2 | 29,9 | 2,7 | 1,5 | 11,4 | 8,6  | 21,8 | 30,1 |
| 1 | 3 | 2,7 | 1,5 | 11,4 | 8,1  | 21,7 | 30,1 | 2,7 | 1,4 | 11,8 | 8,7  | 23,5 | 31,1 | 2,7 | 1,4 | 11,3 | 8,2  | 21,5 | 29,6 |
| 2 | 1 | 3,0 | 1,9 | 12,6 | 10,0 | 27,9 | 38,0 | 3,1 | 1,9 | 13,0 | 10,8 | 29,7 | 39,9 | 3,2 | 1,9 | 13,0 | 10,5 | 29,2 | 39,2 |
| 2 | 2 | 3,0 | 1,8 | 12,7 | 10,5 | 28,4 | 38,9 | 3,2 | 1,8 | 13,0 | 9,9  | 30,1 | 39,4 | 3,2 | 1,8 | 13,0 | 10,8 | 29,1 | 39,4 |
| 2 | 3 | 3,1 | 1,9 | 13,0 | 11,3 | 28,9 | 40,4 | 3,3 | 1,8 | 13,2 | 10,5 | 30,9 | 40,5 | 3,3 | 1,8 | 13,1 | 10,6 | 29,7 | 39,5 |
| 3 | 1 | 2,5 | 1,6 | 12,4 | 10,5 | 20,9 | 30,3 | 2,6 | 1,5 | 12,8 | 9,8  | 23,0 | 32,3 | 2,5 | 1,6 | 12,5 | 9,8  | 21,1 | 30,6 |
| 3 | 2 | 2,5 | 1,5 | 12,6 | 10,1 | 21,6 | 31,5 | 2,6 | 1,6 | 12,7 | 9,8  | 22,6 | 31,9 | 2,5 | 1,5 | 12,5 | 9,8  | 21,4 | 30,7 |
| 3 | 3 | 2,6 | 1,6 | 12,9 | 10,6 | 22,6 | 32,6 | 2,5 | 1,6 | 12,7 | 10,2 | 22,4 | 31,8 | 2,6 | 1,5 | 12,6 | 9,9  | 21,4 | 31,1 |
| 4 | 1 | 2,6 | 2,2 | 14,5 | 15,5 | 26,3 | 42,2 | 2,8 | 2,2 | 15,0 | 17,5 | 31,3 | 47,9 | 3,0 | 2,1 | 15,2 | 16,6 | 32,4 | 48,7 |
| 4 | 2 | 2,6 | 2,1 | 14,8 | 16,2 | 28,5 | 44,2 | 2,9 | 2,0 | 15,0 | 15,4 | 32,8 | 47,2 | 3,0 | 2,1 | 15,2 | 15,8 | 33,3 | 48,6 |
| 4 | 3 | 2,8 | 2,1 | 15,4 | 16,1 | 31,3 | 47,3 | 3,0 | 2,2 | 15,4 | 16,5 | 34,7 | 50,1 | 3,0 | 2,1 | 15,1 | 15,4 | 33,4 | 48,4 |
| 5 | 1 | 1,9 | 1,6 | 8,8  | 7,1  | 11,9 | 18,5 | 2,1 | 1,5 | 9,3  | 7,6  | 13,1 | 20,2 | 2,1 | 1,6 | 9,2  | 7,7  | 12,6 | 19,7 |
| 5 | 2 | 2,1 | 1,5 | 8,9  | 6,7  | 12,5 | 19,2 | 2,0 | 1,6 | 9,2  | 7,8  | 12,4 | 20,0 | 2,1 | 1,6 | 9,2  | 7,5  | 12,7 | 19,9 |
| 5 | 3 | 2,1 | 1,6 | 9,3  | 7,5  | 12,6 | 20,5 | 2,0 | 1,6 | 9,2  | 8,0  | 12,7 | 20,4 | 2,1 | 1,6 | 9,2  | 7,2  | 12,7 | 19,7 |
| 6 | 1 | 2,7 | 1,7 | 9,8  | 9,9  | 18,0 | 27,9 | 2,8 | 1,6 | 10,2 | 9,6  | 20,4 | 29,8 | 2,8 | 1,7 | 10,1 | 9,9  | 19,1 | 28,7 |
| 6 | 2 | 2,8 | 1,6 | 9,9  | 9,4  | 19,7 | 28,9 | 3,0 | 1,6 | 10,4 | 9,3  | 21,9 | 31,1 | 2,8 | 1,7 | 10,1 | 10,0 | 19,1 | 28,5 |
| 6 | 3 | 2,8 | 1,8 | 10,2 | 10,1 | 19,4 | 29,2 | 2,9 | 1,7 | 10,2 | 9,5  | 20,1 | 29,5 | 2,8 | 1,7 | 10,2 | 10,2 | 19,3 | 29,2 |
| 7 | 1 | 2,0 | 1,5 | 9,5  | 8,4  | 12,8 | 21,3 | 2,0 | 1,4 | 9,6  | 8,3  | 13,6 | 21,4 | 2,0 | 1,5 | 9,5  | 8,7  | 12,5 | 20,8 |
| 7 | 2 | 1,9 | 1,6 | 9,3  | 8,6  | 12,1 | 20,6 | 2,1 | 1,4 | 9,8  | 7,9  | 14,0 | 21,8 | 2,1 | 1,5 | 9,7  | 8,5  | 13,0 | 21,1 |
| 7 | 3 | 2,1 | 1,5 | 9,5  | 8,5  | 13,2 | 21,4 | 2,0 | 1,5 | 9,6  | 8,7  | 13,0 | 21,3 | 2,1 | 1,5 | 9,7  | 8,5  | 12,8 | 21,0 |
| 8 | 1 | 2,3 | 2,0 | 11,3 | 11,6 | 18,3 | 29,9 | 2,5 | 2,0 | 11,6 | 11,5 | 20,4 | 31,3 | 2,4 | 2,0 | 11,4 | 11,9 | 18,6 | 30,5 |
| 8 | 2 | 2,5 | 2,0 | 11,6 | 11,9 | 19,9 | 31,8 | 2,5 | 2,0 | 11,6 | 11,9 | 20,1 | 31,4 | 2,5 | 2,0 | 11,5 | 11,9 | 19,1 | 30,5 |
| 8 | 3 | 2,4 | 2,0 | 11,5 | 12,0 | 19,3 | 31,7 | 2,5 | 2,0 | 11,6 | 12,0 | 19,6 | 31,0 | 2,4 | 2,0 | 11,5 | 12,1 | 18,7 | 30,8 |

Fonte: Autores

A Tabela 2 apresenta a avaliação do SM segundo o método WPC. A Tabela 3 mostra que as correlações entre as CTQs são significativas e estas variáveis são medidas pelo mesmo instrumento de medição, caracterizando-se a necessidade de usar técnicas estatísticas multivariadas para avaliar este SM. O método WPC pode ser utilizado para resumir o comportamento das CTQs e proporcionar uma classificação geral para o SM. Inicialmente, foi feita a análise das componentes principais das respostas R, P, L, AR, AP e AT usando a matriz de correlação dos dados (Tabela 4). A resposta do modelo da Eq.(6) foi obtida pela ponderação das componentes principais usando a Eq.(7):

$$WPC = \sum_{i=1}^6 [\lambda_i(PC_i)] = 4,868PC_1 + 0,799PC_2 + 0,271PC_3 + 0,047PC_4 + 0,015PC_5 + 0,001PC_6 \quad (12)$$

Tabela 2 - Classificação do sistema de medição usando o método WPC.

| Fonte           | Variância | %Contribuição |
|-----------------|-----------|---------------|
| GR&R            | 1.446     | 1.11          |
| Repetitividade  | 0.973     | 0.75          |
| Reprodutividade | 0.473     | 0.36          |
| Operador        | 0.260     | 0.20          |
| Peça*Operador   | 0.214     | 0.16          |
| Peça            | 129.044   | 98.89         |
| Varição Total   | 130.490   | 100.00        |

Fonte: Autores

Os resultados da Eq.(12) foram ajustados para uma análise de variância two-way, de acordo com a Eq.(6). O vetor WPC representa o conjunto original das respostas R, P, L, AR, AP e AT. Usando os resultados da Eq.(8) foram estimadas as variâncias para processo (peça-a-peça), repetitividade, reprodutividade, SM e variação total. Em seguida, as variâncias e, com a Eq.(9), o índice  $\%R\&R_{wpc}$  é mostrado na Tabela 2. O método WPC classifica o SM como marginal,  $\%R\&R_{wpc}=1,11\%$ . Um SM classificado como marginal pode ser considerado aceitável dependendo da aplicação, no entanto, ainda há um potencial de melhoria que deve ser analisado. Logo, o objetivo deste projeto envolve a redução da variação devida ao SM a nível inferior a 1%.

Tabela 3 - Estrutura de correlação entre as CTQs.

|    | R       | P     | L     | AP    | AR    |
|----|---------|-------|-------|-------|-------|
| P  | 0,435*  |       |       |       |       |
|    | 0,000** |       |       |       |       |
| L  | 0,691   | 0,645 |       |       |       |
|    | 0,000   | 0,000 |       |       |       |
| AP | 0,488   | 0,884 | 0,842 |       |       |
|    | 0,000   | 0,000 | 0,000 |       |       |
| AR | 0,888   | 0,607 | 0,930 | 0,743 |       |
|    | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000 |       |
| AT | 0,817   | 0,732 | 0,955 | 0,864 | 0,978 |
|    | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Fonte: Autores

Nota: \*Correlação de Pearson

\*\*P-value

Tabela 4 - Análise de componentes principais para as CTQs.

|            | PC1         | PC2    | PC3    | PC4    | PC5    | PC6    |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Autovalor  | 4,868       | 0,799  | 0,271  | 0,047  | 0,015  | 0,001  |
| Proporção  | 0,811       | 0,133  | 0,045  | 0,008  | 0,002  | 0,000  |
| Cumulativo | 0,811       | 0,944  | 0,990  | 0,997  | 1,000  | 1,000  |
| Variável   | Autovetores |        |        |        |        |        |
| R          | 0,363       | -0,584 | -0,547 | -0,273 | 0,393  | -0,003 |
| P          | 0,358       | 0,592  | -0,561 | 0,447  | 0,079  | -0,021 |
| L          | 0,429       | -0,046 | 0,586  | 0,346  | 0,592  | -0,007 |
| AP         | 0,405       | 0,459  | 0,162  | -0,742 | 0,014  | -0,219 |
| AR         | 0,434       | -0,300 | 0,088  | 0,233  | -0,567 | -0,582 |
| AT         | 0,451       | -0,081 | 0,099  | -0,021 | -0,409 | 0,783  |

Fonte: Autores

### 3.3. Etapa Analisar

Uma abordagem que consiste em análise de variância e análise gráfica foi utilizada para identificar as causas específicas de variação do SM. As cartas de controle da amplitude das medições dos operadores em cada peça mostra a presença de erro sistemático durante o procedimento de medição. A análise de variância identifica as fontes significativas de variação. Já a análise gráfica dos efeitos principais identifica a diferença estatisticamente significativa para a média das medições dos operadores. Por fim, a análise gráfica das interações mostra com mais detalhes as causas específicas de variação das medições dos operadores em cada peça.

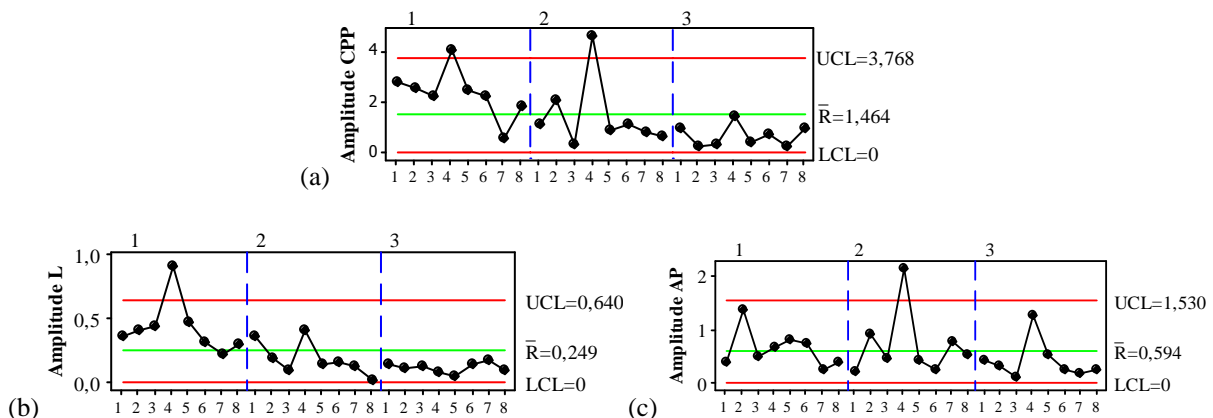
A Figura 4 apresenta cartas de controle para a amplitude das medições observadas de cada operador para as CTQs. A análise da amplitude das medições dos operadores usando o método WPC é observada na Figura 4a. O operador 3 foi o especialista responsável pelo treinamento dos outros operadores para o procedimento de medição dos parâmetros geométricos do cordão de solda. O gráfico da Figura 4a evidencia que a variação das medições do operador 3 foi menor em relação aos outros operadores. Logo, as medições do operador 3 foram tratadas como referência. Padrões similares a Figura 4a foram observados

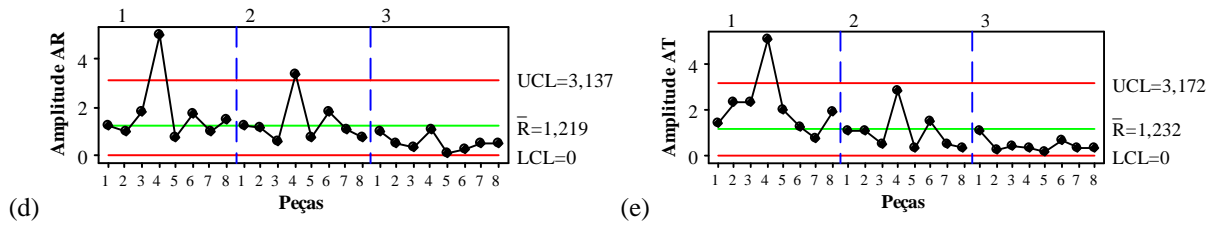
em Figura. 4b-4e, sugerindo que medições da peça 4 realizada pelo operador 1 de L, AR e AT, assim como, pelo operador 2 de AP e AR devem ser refeitas.

Para esta aplicação, usando o método WPC, a diferença entre a média das medições obtidas pelos operadores foi significativa, como observado na Tabela 5. Visto que o efeito combinado de diferentes interações “peça\*operador”, observado para as variáveis originais, pode determinar o efeito de diferença entre a média das medições dos “operadores” no vetor WPC, além do efeito “operador”, será também observado o efeito “peça\*operador” nas variáveis originais. A Tabela 5 apresenta um resumo da análise de variância para as CTQs. Para AP apenas o fator peça foi significativo. Enquanto que para P e L os fatores peça e operador foram significativos. Já R, AR e AT, além dos fatores peça e operador, o termo de interação também foi significativo.

A análise de variância de WPC apresentou diferença significativa das medições dos operadores. Adicionalmente, o gráfico de efeitos principais da Figura 5a determina que a média das medições obtidas pelo operador 1 foi menor que dos operadores 2 e 3. Com base nesta informação, os gráficos das Figuras (5b-5f) e (6a-6c) foram investigados para os CTQs do projeto. Observa-se nas Figuras (5b) e (5d-5f) o mesmo que foi observado na Figura (5a), ou seja, a média das medições obtidas pelo operador 1 foi menor que dos operadores 2 e 3. Uma análise um pouco mais detalhista, através da Figura 6, mostra que a média das medições da peça 4 para as CTQs R, AR e AT realizadas pelo operador 1 foi menor em relação a média das mesmas medições para os operadores 2 e 3.

Figura 4 - Cartas de controle para a amplitude das medições dos operadores em cada peça.





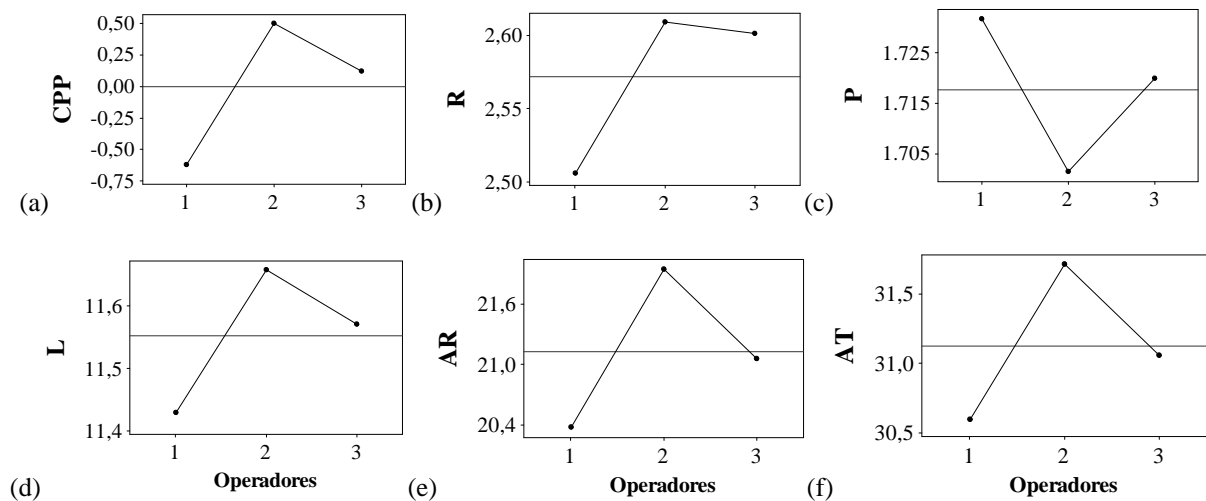
Fonte: Autores

Tabela 5 - Análise de variância para os escores ponderados das PCs e para as CTQs.

| Fonte         | Multivariado | Univariado |       |       |       |       |       |
|---------------|--------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | WPC          | R          | P     | L     | AP    | AR    | AT    |
| Peça          | 0,000        | 0,000      | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Operador      | 0,025        | 0,002      | 0,042 | 0,000 | 0,820 | 0,007 | 0,042 |
| Peça*Operador | 0,097        | 0,041      | -     | -     | 0,140 | 0,001 | 0,007 |

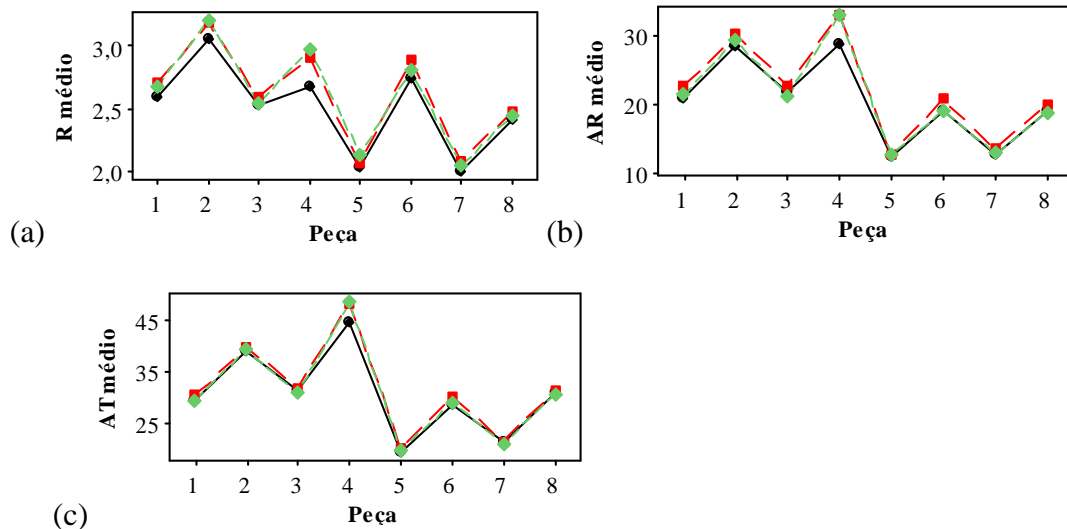
Fonte: Autores

Figura 5. Efeitos principais das médias das medições dos operadores.



Fonte: Autores

Figura 6. Gráfico das interações entre as médias das medições dos operadores em cada peça.



Fonte: Autores

### 3.4. Etapa Melhorar

A etapa analisar utilizou análise gráfica e de variância para identificar as causas de variação do SM. De acordo com os gráficos das Figuras (4a)-(4e), variação devido à causa especial deverá ser removida em:

- Medições de L, AR e AT pelo operador 1 para a peça 4 (identificar qual das três réplicas é o outlier);
- Medições de AP e AR pelo operador 2 para a peça 4 (identificar qual das três réplicas é o outlier).

O procedimento para identificar os outliers responsáveis pela variação especial deste SM consiste nos seguintes passos:

- Ajustar o mesmo conjunto de dados para um arranjo fatorial completo geral de dois fatores com oito (peças) e três (operadores) níveis;
- Estimar resíduos padronizados para as combinações de fatores que determinaram os outliers observados na etapa analisar;
- Refazer medições nas quais os módulos dos resíduos padronizados são maiores que 2;

A análise de variância na Tabela 5 e os gráficos das Figuras. (5b-5f) e (6a-6c) determinam



remover causa comum de variação para:

- Medições de R, AR e AP pelo operador 1 para a peça 4 (refazer medição das três réplicas);

Com base na análise de causa comum e especial de variação descrita acima, os operadores 2 e, principalmente, 1 foram treinados e algumas medições foram executadas novamente. Os resultados dos cálculos de resíduos padronizados foram obtidos de acordo com o procedimento descrito acima e as novas leituras estão apresentadas na Tabela 6. Uma nova análise multivariada do SM foi realizada e os resultados são demonstrados na próxima seção deste artigo.

Tabela 6. Resíduos padronizados e novas leituras para as CTQs com problemas de medição.

| Peça | Operador | Resíduos padronizados |          |          |          | Novas leituras |       |       |       |       |
|------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|----------------|-------|-------|-------|-------|
|      |          | L                     | AP       | AR       | AT       | R              | L     | AP    | AR    | AT    |
| 4    | 1        | -3,16548              | -1,31026 | -3,65582 | -3,4333  | 2,95           | 14,91 | 15,52 | 32,70 | 48,60 |
| 4    | 1        | -0,5207               | 0,867521 | -0,26489 | -0,53285 | 2,91           |       | 16,20 | 32,52 |       |
| 4    | 1        | 3,686181              | 0,442738 | 3,920708 | 3,966147 | 3,07           | 14,92 | 16,07 | 32,72 | 48,61 |
| 4    | 2        | -1,0395               | 3,397524 | -2,44304 | -0,73086 |                |       | 16,47 | 31,32 |       |
| 4    | 2        | -1,0395               | -3,54778 | -0,20607 | -1,66936 |                |       | 16,46 |       |       |
| 4    | 2        | 2,078998              | 0,150258 | 2,649117 | 2,400218 |                |       |       | 32,93 |       |

Fonte: Autores

### 3.5. Etapa Controlar

Finalmente, a etapa controlar ajusta o gerenciamento do processo e sistema de controle para que as melhorias alcançadas sejam mantidas. Nesta etapa do projeto, destaca-se o resultado otimizado do SM que pode ser observado na Tabela 7. Com as alterações propostas na fase de melhoria do projeto, foi observado redução da variação devido ao SM em 50% (de  $\%R\&R_{wpc}=1,11\%$  para  $\%R\&R_{wpc}=0,55\%$ ). A variação devido à repetitividade foi reduzida de 0,75% para 0,49%, enquanto que a reprodutividade foi reduzida de 0,36% para 0,06%. Logo, o treinamento dos operadores mostrou ser efetivo devido à redução significativa da variação das medições, principalmente, entre operadores e entre peças\*operadores (reprodutividade). O procedimento de medição foi padronizado e documentado para realização de futuras medições em novos projetos.

Tabela 7. Comparação da capacidade do sistema de medição antes e depois da otimização.

| Fonte           | Antes     |                | Depois    |                |
|-----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
|                 | Variância | % Contribuição | Variância | % Contribuição |
| GR&R            | 1.446     | 1.11           | 0,758     | 0,55           |
| Repetitividade  | 0.973     | 0.75           | 0,675     | 0,49           |
| Reprodutividade | 0.473     | 0.36           | 0,083     | 0,06           |
| Operador        | 0.260     | 0.20           | 0,083     | 0,06           |
| Peça*Operador   | 0.214     | 0.16           | -         | -              |
| Peça            | 129.044   | 98.89          | 136,201   | 99,45          |
| Varição Total   | 130.490   | 100.00         | 136,958   | 100,00         |

Fonte: Autores

#### 4. Conclusão

Este artigo aplicou uma abordagem Seis Sigma para otimizar um SM multivariado de um processo de soldagem de revestimento. Análise de componentes principais, estudos GR&R com análises de variância e gráfica foram as ferramentas utilizadas em um roadmap DMAIC para reduzir a variação do SM. A fase definir apresentou o processo de soldagem de revestimento do aço carbono ABNT 1020 usando arames tubulares de aço inoxidável ABNT 316L e as características da qualidade crítica para o processo. O principal resultado da fase medir foi a classificação do SM, neste caso, marginal com  $\%R\&R_{wpc}=1,11\%$ . A fase analisar mostrou como extrair informações específicas e significativas de causas especiais e comuns de variação do estudo. As discussões geradas pela fase analisar foram adotadas para gerar o plano de ação da fase melhorar do projeto e direcionar o analista para quais medições deveriam ser refeitas. A fase de controle comparou o procedimento de medição antes e após o treinamento dos operadores. O projeto mostrou ser eficiente com a redução significativa de 50% de variação do estudo devido ao SM.

#### 5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPEMIG, CAPES e CNPq pelo apoio à esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Box, G.E.P. "Teaching engineers experimental design with a paper helicopter", *Quality Engineering*, 1992.
- De Koning, De Mast, H. J. "A rational reconstruction of six-sigma's breakthrough cookbook", *International Journal of Quality and Reliability Management*, 2006.
- De Koning, H. De Mast, J. "Grounding of Six-Sigma's breakthrough cookbook: how to research a methodology?", *International Journal of Six-Sigma and Competitive Advantage*, 2005.
- De Mast, J. "A methodological comparison of three strategies for quality improvement", *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2004.
- De Mast, J. Lokkerbol, J. "An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving", *International Journal of Production Economics*, 2012.
- De Mast, J. W. Schippers, A.J. Does, R.J. Van Den Heuvel, E.R. "Steps and strategies in process improvement", *International Journal of Quality and Reliability Engineering*, 2000.
- Ferriere, A. C. Bautista, G.P. Rodriguez, S. Vazquez A.J., "Corrosion resistance of stainless steel coatings elaborated by solar cladding process", *Solar Energy*, 2006.
- Gomes, J.H.F. Paiva, A.P. Costa, S.C. Balestrassi, P.P. Paiva, E.J. "Weighted Multivariate Mean Square Error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings", *European Journal of Operational Research*, 2013.
- Johnson, J.A. Widener, S. Gitlow, H. Popovich, E.A. "Six Sigma Black Belt Case Study: G.E.P. Box's Paper Helicopter Experiment", *Quality Engineering*, 2006.
- Johnson, R.A. Wichern, D. "Applied Multivariate Statistical Analysis", 6 ed. Prentice-Hall, New Jersey, 2007.
- Juran, J.M. "Juran on Planning for Quality", New York: Free Press, 1988.
- Kannan, T. Murugan, N. "Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality", *Journal of Materials Processing Technology*, 2006.
- Linderman, K. Schroeder, R. Zaheer, S. Choo, A. "Six sigma: a goal theoretic perspective", *Journal of Operations Management*, 2003.
- Montgomery, D.C. Woodall, W.H. "An Overview of Six Sigma", *International Statistical Review*, 2008.
- Mukherjee, I. Ray, P.K. "A systematic solution methodology for inferential multivariate modeling of industrial grinding process", *Journal of Materials Processing Technology*, 2008.
- Murugan, N. Parmar, R.S. "Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 1994.
- Paiva, A.P. Paiva, E.J. Ferreira, J.R. Balestrassi, P.P. Costa, S.C. "A multivariate mean square error optimization of AISI hardened steel turning", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008.
- Peruchi, R.S. Balestrassi, P.P. Paiva, A.P. Ferreira, J.R. Carmelossi, M.S. "New multivariate Gage R&R method for correlated characteristics", *International Journal of Production Economic*, 2013.
- Rencher, A.C. "Methods of multivariate analysis", 2 ed. John Wiley & Sons, New York, 2002.
- Wang, F.K. Chien, T.W. "Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study", *Computers and*



Curitiba, PR, Brasil, 07 a 10 de outubro de 2014.

Industrial Engineering, 2010.