

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ÍNDICES DE CAPACIDADE PARA GRÁFICOS DE
CONTROLE BASEADOS EM MODELOS DE
REGRESSÃO**

FERNANDA SIQUEIRA SOUZA

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Índices de Capacidade para Gráficos de Controle
baseados em Modelos de Regressão**

Fernanda Siqueira Souza

Orientador: Carla Schwengber ten Caten, Dr^a

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Porto Alegre

2010

FERNANDA SIQUEIRA SOUZA

Índices de Capacidade para Gráficos de Controle baseados em Modelos de Regressão

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Carla Schwengber ten Caten, Dr^a.

Orientadora PPGEP/UFRGS

Prof. Carla Schwengber ten Caten, Dr^a.

Coordenadora PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Danilo Marcondes Filho, Dr. (Depto. Estatística/UFRGS)

Professora Liane Werner, Dr^a. (PPGEP/UFRGS)

Professor Flávio Sanson Fogliatto, *Ph.D.* (PPGEP/UFRGS)

“Aventura não é dependurar-se em uma montanha amarrado em uma corda. Aventura é uma atitude que devemos aplicar nos obstáculos do dia-a-dia em nossa vida – encarando novos desafios, buscando novas oportunidades, testando nossos conhecimentos contra o desconhecido e, nesse processo, descobrir nosso próprio potencial.”

John Amatt

Dedico este trabalho à minha família, em especial a meus pais, Wilson Souza Filho e Ana Maria Siqueira Souza.

AGRADECIMENTOS

Manifesto meus sinceros agradecimentos:

Primeiramente à Deus pela vida, saúde e perseverança;

À professora e orientadora Carla Schwengber ten Caten, pela grande orientação e valiosas sugestões ao longo de quase dois anos de mestrado.

Aos funcionários e professores do PPGEP – UFRGS, por suas contribuições, em especial ao professor José Luis Duarte Ribeiro pelo auxílio e sugestões.

Aos membros da banca examinadora – professores Danilo Marcondes Filho, Liane Werner e Flávio Sanson Fogliatto – por suas valiosas contribuições e críticas que melhoraram significativamente esta dissertação.

Aos colegas pelo apoio e incentivo, em especial ao Danilo Cuzzuol Pedrini e Franciéli Costa Borba que contribuíram com o desenvolvimento desta dissertação.

À minha família pela ajuda, dedicação e amor incondicional.

Ao Rafael Barcellos pela confiança e companheirismo em todos os momentos.

Finalmente, a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

SOUZA, F.S. *Índices de Capacidade para Gráficos de Controle baseados em Modelos de Regressão*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RESUMO

Índices de capacidade mal empregados geram conclusões errôneas, comprometendo o estudo e análise do processo, prejudicando o atendimento de exigências gerenciais ou de clientes externos. Assim, o objetivo do presente trabalho é propor índices de capacidade para processos monitorados com gráficos de controle baseado em modelos de regressão contemplando limites simétricos e assimétricos. Realizou-se um mapeamento dos artigos publicados em nove periódicos no período de 2000 a 2009, visando identificar as abordagens pesquisadas sobre capacidade de processos. Um fluxograma orientativo é apresentado, com a finalidade de direcionar a escolha do tipo de gráfico de controle e índices de capacidade para processos com variáveis de resposta: (i) não correlacionadas, (ii) correlacionadas dependentes da variável de controle e (iii) autocorrelacionadas. O uso do fluxograma foi ilustrado através da aplicação do mesmo em um processo de torneamento de uma empresa de máquinas agrícolas.

Palavras-chave: Controle estatístico de processos; Índices de capacidade tradicionais; Índices de capacidade para gráficos de controle baseados em modelos de regressão.

SOUZA, F.S. *Capability Indices to Control Charts based on Regression Models*. 2010.
Master's work – Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

ABSTRACT

Capability indices wrongly appointed generate erroneous conclusions, compromising the study and analysis of the process, jeopardizing the fulfillment of the requirements management or external customers. Therefore, the objective of this study is to propose capability indices for processes monitored with control charts based on regression models considering symmetric and asymmetric limits. A mapping of the articles published in nine journals, during the period of 2000 to 2009, was conducted to identify the different approaches surveyed on process capability. A flowchart is presented to direct the choice of control chart and capability indices for processes with response variables: *(i)* noncorrelated, *(ii)* correlated dependent control variables and *(iii)* autocorrelated. The use of the flowchart was illustrated by applying it to the hard turning process of an agricultural machinery company.

Keywords: Statistical Process Control; Tradicional capability indices; Capability indices to control charts based on regression models.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARIMA – Modelo autoregressivo integrado de média móvel

CEP – Controle estatístico do processo

EWMA – Gráfico de média móvel exponencialmente ponderada

GR – Gráfico de regressão

i.n.i.d. – Independente, normal e identicamente distribuídos

LIC – Limite inferior de controle

LSC – Limite superior de controle

LIE – Limite inferior de especificação

LSE – Limite superior de especificação

QMR – Quadrado médio dos resíduos

SQR – Soma de quadrados dos resíduos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Tema e Objetivos	12
1.2. Justificativa	13
1.2.1. Justificativa do tema	13
1.2.2. Justificativa dos objetivos.....	13
1.3. Método do Trabalho.....	15
1.4. Delimitações do Trabalho	17
1.5. Estrutura do Trabalho.....	17
2. ARTIGOS PROPOSTOS.....	18
2.1. ARTIGO 1: Uma Revisão da Literatura sobre as abordagens dos Índices de Capacidade de Processos	19
2.2. ARTIGO 2: Proposta de Índices de Capacidade para Gráficos de Controle baseados em Modelos de Regressão	43
2.3. ARTIGO 3: Comparação de Índices de Capacidade em um Processo de Torneamento	67
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
3.1. Conclusões	92
3.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	93

1. INTRODUÇÃO

A concorrência e a competitividade entre as empresas exigem a melhoria contínua dos processos e, conseqüentemente, o aumento da qualidade dos produtos e serviços. Os esforços devem estar direcionados visando controlar alterações no processo, assegurar as especificações dos produtos e reduzir os custos associados à produção de itens não conformes.

Diante disto, o Controle Estatístico de Processos (CEP) é um conjunto de técnicas utilizadas no monitoramento e detecção de alterações nos processos. Entre as técnicas mais simples e eficientes do CEP, estão os gráficos de controle (WOODALL E MONTGOMERY, 1999). Estes gráficos foram elaborados por Shewhart, em 1924, marcando o início formal do CEP e, atualmente, são utilizados com sucesso para o monitoramento do desempenho dos mais diversos processos industriais (COSTA *et al.*, 2005). O principal objetivo dos gráficos de controle é distinguir em um processo produtivo as causas comuns (causas inerentes ao processo) e as causas especiais (falhas, causas inesperadas) de variação (MONTGOMERY, 2004).

Caso o processo apresentar somente pontos localizados entre os limites de controle do gráfico, este é dito sob controle estatístico, estável e previsível ao longo do tempo. Caso algum ponto se localizar acima do limite superior de controle ou abaixo do limite inferior, o processo apresentou uma causa especial e não está sob controle estatístico. Quando o processo apresentar uma causa especial, é necessário investigar os possíveis problemas ocorridos e realizar ações corretivas.

Para a aplicação dos gráficos de controle propostos por Shewhart, há algumas suposições que precisam ser avaliadas, como: os dados devem ser independentes, Normal e identicamente distribuídos – i.n.i.d. (MONTGOMERY, 2004). Na abordagem tradicional do CEP, o processo é avaliado mediante a observação da variável de resposta, sem serem consideradas as variáveis de controle do processo. Esta prática pode ser inadequada e pouco efetiva quando há correlação entre estas variáveis. Nesses casos, a variável de resposta de um produto ou processo é melhor representada pelo seu relacionamento com as variáveis de controle (MANDEL, 1969; JACOBI *et al.*, 2002; SHU *et al.*, 2004).

Mandel (1969) propôs o gráfico de controle de regressão, que consiste na combinação das técnicas de gráfico de controle e modelos de regressão linear. É utilizado em processos em que o efeito de uma variável de resposta é uma função de uma variável de

controle, de forma a gerar um modelo que representa a relação existente entre as variáveis de interesse em um processo.

Como os gráficos de controle tradicionais não são capazes de realizar uma análise quando se tem um conjunto de variáveis correlacionadas ou dependentes entre si, utiliza-se os gráficos de controle de regressão, que são capazes de avaliar o efeito conjunto dessas variáveis (JACOBI *et al.*, 2002). De acordo com Almeida (2003), o gráfico de controle de regressão tem como principal função controlar uma variação média da variável de resposta, que ocorre devido à ação das variáveis de controle do processo, ao invés de controlar uma média constante como é usualmente feito nos gráficos tradicionais.

Para a construção dos gráficos de controle tradicionais e dos gráficos de controle de regressão há diferenças, porém, a metodologia de análise é a mesma. Estando o processo sob controle estatístico, é possível aplicar outra importante técnica do CEP: os índices de capacidade do processo.

Os índices de capacidade são medidas adimensionais que medem o quanto o processo consegue atender às especificações (COSTA *et al.*, 2005). 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. Os índices de capacidade tradicionais aplicados nos gráficos de controle de Shewhart são os mais difundidos. Entretanto, índices de capacidade mal empregados geram conclusões errôneas, comprometendo o estudo e análise do processo, prejudicando o atendimento de exigências gerenciais ou de clientes externos. Com isso, enfatiza-se a importância do conhecimento do comportamento dos dados do processo, a fim de monitorá-lo de maneira eficiente e analisá-lo conforme suas características, evitando interpretações equivocadas.

1.1. Tema e Objetivos

O tema desta dissertação são os índices de capacidade do processo. Este tema contempla as áreas de engenharia de qualidade, concentrando em índices de capacidade e gráficos de controle baseados em modelos de regressão.

O objetivo principal deste trabalho é propor índices de capacidade para processos monitorados por gráficos de controle baseados em modelos de regressão para variáveis contínuas, representado no presente trabalho por índices de capacidade GR. A proposta contempla limites de especificação simétricos e assimétricos. Como decorrência do objetivo

principal, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos: (i) Realizar um mapeamento dos artigos sobre índices de capacidade, identificando as diferentes abordagens; (ii) Comparar os índices de capacidade GR propostos com os índices tradicionais; e (iii) Desenvolver um fluxograma orientativo visando guiar a aplicação dos tipos de gráficos de controle e índices de capacidade e ilustrar sua aplicação através de um caso prático.

1.2. Justificativa

1.2.1. Justificativa do tema

Visando a melhoria contínua dos produtos e processos, as empresas estão cada vez mais buscando por alternativas eficientes para a melhoria da qualidade, redução de custos e da variabilidade. Assim, os gráficos de controle são de grande utilidade para monitorar o processo, verificando sua variabilidade e indicando causas especiais fora dos limites de controle (MONTGOMERY, 2004; COSTA *et al.*, 2005). Os gráficos de controle têm como objetivo verificar a estabilidade do processo, entretanto, não indicam se este está atendendo às especificações de projeto de um produto ou às especificações impostas por clientes.

Diante disto, é de extrema importância, analisar também a variabilidade inerente ao processo (causas comuns) a fim de compará-la com as especificações. Assim, os índices de capacidade são técnicas estatísticas utilizadas para este propósito, observando que um processo pode estar sob controle, mas caso apresente variabilidade maior do que a amplitude das especificações será considerado como não capaz. Portanto, índices de capacidade refletem a qualidade de um determinado processo (JEANG E CHUNG, 2009).

Com o resultado e interpretação dos índices de capacidade, tem-se um guia estratégico para melhoria da qualidade. Assim, elabora-se um plano de melhorias globais sobre o sistema, de responsabilidade da gerência, como por exemplo: mudança de tecnologia e trocas de máquinas. Caso a informação recebida dos índices for gerenciada corretamente, pode-se melhorar a qualidade do processo, diminuir custos de produção e obter clientes mais satisfeitos.

1.2.2. Justificativa dos objetivos

Não foram identificados trabalhos com a proposição de índices de capacidade para processos monitorados por gráficos de controle baseados em modelos de regressão,

justificando a relevância do objetivo principal da dissertação. No Brasil, os índices de capacidade são pouco explorados, sendo que foram encontrados apenas seis trabalhos em revistas nacionais na última década, sendo estes: Barriga *et al.* (2003), Bulba e Ho (2004), Claro *et al.* (2007), Gonzalez e Werner (2009), Mingoti e Glória (2008), Ramos e Ho (2003),

Os gráficos de controle baseados em modelos de regressão são utilizados para o monitoramento de processos em que a variável de resposta varia em função de frequentes alterações na variável de controle, fato que ocorre principalmente em processos da indústria química. Tanto os gráficos de regressão quanto os gráficos tradicionais de Shewhart são analisados e interpretados igualmente. Caso não existam pontos fora dos limites de controle, o processo é dito estável e previsível ao longo do tempo. Nesta situação, é possível analisar a capacidade do processo por meio dos cálculos dos índices de capacidade (COSTA *et al.*, 2005).

Entretanto, utilizar índices de capacidade tradicionais para processos monitorados com gráficos de regressão pode gerar conclusões errôneas à respeito da capacidade do processo, como por exemplo, concluindo que este é capaz quando, na verdade, não é. Assim, com a proposta dos índices de capacidade específicos para gráficos de controle baseados em modelos de regressão, o cálculo, a interpretação e a análise da capacidade do processo são preservadas.

Outra necessidade relevante é um panorama geral sobre o tema capacidade de processos, indicando abordagens e lacunas que necessitam de maiores estudos e pesquisas, e verificando a flexibilidade da aplicação dos índices, empregados em várias abordagens com objetivos diferentes. Um fluxograma orientativo visando guiar a escolha dos tipos de gráficos de controle e índices de capacidade também é de extrema importância. Antes de iniciar o monitoramento de um processo, é necessário identificar o comportamento dos dados, pois a escolha de gráficos de controle inadequados produz alarmes falsos em excesso (COSTA *et al.*, 2005). Assim, um fluxograma orientativo é proposto, contemplando processos com variáveis de resposta não correlacionadas, correlacionadas dependentes da variável de controle e autocorrelacionadas.

1.3. Método do Trabalho

O método do trabalho é apresentado segundo dois aspectos: a caracterização do tipo de pesquisa e a descrição das etapas, técnicas e ferramentas que serão utilizadas para atingir os objetivos da pesquisa.

Assim, este trabalho será executado sob o enfoque de uma pesquisa aplicada e quantitativa, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigida à solução de problemas específicos, possuindo ênfase em análises numéricas (SILVA E MENEZES, 2000). O presente trabalho é classificado como sendo uma pesquisa exploratória, já que visa proporcionar um maior conhecimento sobre o problema estudado, visando torná-lo explícito (GIL, 1991).

O desenvolvimento do presente trabalho realizou-se em 3 (três) etapas: (i) pesquisa bibliográfica; (ii) proposta de índices de capacidade para gráficos de regressão; e (iii) aplicação e comparação dos índices propostos. Os artigos desenvolvidos ao longo do trabalho estão apresentados na Figura 1. Na sequência, são descritos cada um dos artigos.

<i>Estudo</i>	<i>Questões de pesquisa</i>	<i>Objetivos</i>	<i>Revisão teórica</i>	<i>Método de Pesquisa</i>
Artigo 1	Q ₁ : Quais as abordagens estudadas contemplando índices de capacidade?	Realizar uma classificação e análise dos artigos da literatura de acordo com as abordagens identificadas.	1. Índices de capacidade	Pesquisa de caráter Exploratório
Artigo 2	Q ₂ : Consegue-se modificar os índices de capacidade tradicionais para aplicá-los especificamente em gráficos de regressão (índices GR)? Q ₃ : Existe diferença dos resultados dos índices GR e tradicionais aplicados em um estudo simulado?	Propor índices de capacidade para gráficos baseados em modelos de regressão (índices GR); Comparação dos índices tradicionais com os índices GR propostos.	1. Índices de capacidade 2. Gráficos de controle de regressão	Pesquisa de caráter Exploratório e Estudo Simulado
Artigo 3	Q ₄ : Existe dificuldade na escolha do tipo de gráfico de controle a ser utilizado? Q ₅ : Existe diferença dos resultados dos índices GR e tradicionais aplicados em um caso prático?	Propor um fluxograma orientativo e ilustrar sua utilização através de um caso práticos.	1. Gráficos de controle de regressão 2. Índices de capacidade para gráficos de regressão	Pesquisa de caráter Exploratório e Estudo Experimental

Figura 1 – Descrição resumida dos artigos da pesquisa desenvolvida.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O artigo 1 – Uma Revisão da Literatura sobre as Abordagens dos Índices de Capacidade de Processos – contempla um mapeamento dos artigos sobre índices de capacidade publicados no período de 2000 a 2009 em nove periódicos internacionais. No final, foram analisados 127 artigos nos periódicos visados. Após este mapeamento, identificaram-se as abordagens estudadas nos artigos e, em seguida, foram classificados de acordo com as abordagens identificadas. Com esta classificação, foi possível realizar o trabalho de análise, que envolveu o número de artigos por ano, número de artigos por periódico, número de artigos por abordagem e sugestões de pesquisas futuras. Este artigo foi submetido em língua inglesa para publicação no *International Journal of Quality and Reliability Management* em Agosto de 2010.

O artigo 2 – Proposta de Índices de Capacidade para Gráficos de Controle baseados em Modelos de Regressão – contempla preencher uma lacuna observada no artigo 1, ou seja, a falta de índices de capacidade específicos para processos monitorados por gráficos de regressão. Assim, o artigo 2 apresenta uma proposta de cálculo de índices de capacidade para gráficos de controle de regressão, contemplando limites de especificações simétricos e assimétricos. Um estudo com dados aleatórios monitorado com gráfico de regressão é realizado com o objetivo de comparar os índices de capacidade propostos com os índices tradicionais para gráficos de Shewhart, visando analisar e interpretar os resultados obtidos. Este artigo será submetido para publicação na revista Pesquisa Operacional em Dezembro de 2010.

O artigo 3 – Comparação de Índices de Capacidade em um Processo de Torneamento – contempla um fluxograma orientativo que visa identificar e guiar a escolha do tipo de gráfico de controle e índices de capacidade para processos com variáveis de resposta não correlacionadas, correlacionadas dependentes da variável de controle e autocorrelacionadas. O uso do fluxograma foi ilustrado através de um caso prático realizado no processo de torneamento de uma empresa do ramo de equipamentos agrícolas. Como a aplicação analisada é um processo correlacionado dependente da variável de controle, os índices de capacidade utilizados para a análise são os índices GR propostos no artigo 2. Este artigo será submetido para publicação na revista Gestão & Produção.

1.4. Delimitações do Trabalho

A proposta de cálculo de índices de capacidade para processos monitorados por gráficos de controle baseados em modelos de regressão contempla apenas variáveis contínuas, com limites de especificação simétricos ou assimétricos. Esta proposta engloba modificações nos índices tradicionais existentes na literatura.

O gráfico de controle baseado em modelos de regressão é elaborado baseado no modelo de Pedrini e Caten (2011), sendo estimado um modelo de regressão linear múltipla para a modelagem de apenas uma variável de resposta, portanto, não será contemplada a modelagem não linear ou a modelagem multivariada.

Os índices de capacidade propostos são aplicados em um processo produtivo de uma única empresa, assim, generalizações deverão ser realizadas com algumas ressalvas.

1.5. Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está organizada em três capítulos principais. No primeiro capítulo apresenta-se o tema, sendo justificada sua importância acadêmica e prática. Também são apresentados o objetivo principal e os objetivos específicos do trabalho, o método do trabalho, as delimitações e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo apresenta os artigos propostos, conforme a Figura 1. O terceiro capítulo apresenta as considerações finais obtidas com o desenvolvimento dos artigos e sugestões para pesquisas futuras a partir dos assuntos abordados nesta pesquisa.

2. ARTIGOS PROPOSTOS

- 2.1. ARTIGO 1:** Uma Revisão da Literatura sobre as abordagens dos Índices de Capacidade de Processos 17
- 2.2. ARTIGO 2:** Proposta de Índices de Capacidade para Gráficos de Controle baseados em Modelos de Regressão 41
- 2.3. ARTIGO 3:** Comparação de Índices de Capacidade em um Processo de Torneamento 65

2.1. ARTIGO 1

UMA REVISÃO DA LITERATURA SOBRE AS ABORDAGENS DOS ÍNDICES DE CAPACIDADE DE PROCESSOS

A LITERATURE REVIEW ON PROCESS CAPABILITY INDICES APPROACHES

Artigo submetido para

*International Journal of Quality and Reliability Management**

em Agosto de 2010

*Este artigo foi submetido em língua inglesa

UMA REVISÃO DA LITERATURA SOBRE AS ABORDAGENS DOS ÍNDICES DE CAPACIDADE DE PROCESSOS

Fernanda Siqueira Souza

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre/RS, Brasil
e-mail: fe_ssouza@producao.ufrgs.br

Carla Schwengber ten Caten

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre/RS, Brasil
e-mail: tencaten@producao.ufrgs.br

José Luis Duarte Ribeiro

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre/RS, Brasil
e-mail: ribeiro@producao.ufrgs.br

Resumo - Este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre índices de capacidade de processos. A revisão contempla artigos publicados de 2000 a 2009 em nove periódicos internacionais. As publicações foram obtidas das bases de dados *Wiley InterScience*, *Science Direct*, *Wilson*, *Emerald*, *World Scientific* e *Springer*. O principal objetivo deste trabalho é realizar a classificação e análise das artigos publicados de acordo com as 18 abordagens identificadas. Como principais contribuições, este artigo apresenta uma revisão em relação aos índices de capacidade, incentivando a utilização desta importante técnica no controle de processos e melhoria da qualidade. Além disso, identifica as abordagens existentes sobre índices de capacidade e promove sugestões de pesquisas futuras.

Palavras-chave: Controle estatístico do processo; índices de capacidade; revisão da literatura;

A LITERATURE REVIEW ON PROCESS CAPABILITY INDICES APPROACHES

Abstract - *This paper presents a literature review on process capability indices. The review comprises papers published from 2000 to 2009 in 9 international journals. The papers were obtained from Wiley InterScience, Science Direct, Wilson, Emerald, World Scientific and Springer data bases. The main objective was to conduct a classification and analysis of the published papers according to 18 identified approaches. As main contributions, this article presents a revision about capability indices, encouraging the use of this important technique for process control and quality improvement. Besides that, it identifies the existing approaches and presents suggestions for future research.*

Keywords: *Statistical process control; Process capability; Capability index; Literature review;*

1. INTRODUÇÃO

A qualidade dos produtos e serviços fornecidos se tornou um fator decisivo para os clientes, fazendo com que as empresas busquem se aperfeiçoar continuamente. Neste contexto, a utilização do Controle Estatístico do Processo (CEP) é uma técnica que consiste em métodos de compreensão, acompanhamento e melhoria do desempenho do processo ao longo do tempo (WOODALL, 2000). Em um ambiente competitivo, o CEP é essencial para contribuir com a melhoria da qualidade e confiabilidade, além de reduzir custos com a produção de itens não conformes.

Gráficos de controle constituem uma técnica do CEP, originalmente proposta por Shewhart, em 1924, sendo fundamental para o monitoramento dos processos (MONTGOMERY, 2004). A função principal de um gráfico de controle é detectar se o processo está ou não sob controle estatístico, distinguindo entre causas comuns e causas especiais. Após o processo estar sob controle, outra importante técnica pode ser empregada: a análise da capacidade do processo, através dos resultados obtidos pelos índices de capacidade.

Resumidamente, os gráficos de controle são utilizados para verificar a estabilidade do processo, enquanto que os índices de capacidade são utilizados para verificar se o processo é ou não capaz de atender aos limites de especificações estabelecidos no projeto. O objetivo é certificar-se que a variação do processo se enquadra dentro dos limites especificados, que são geralmente impostos pelos clientes (WOODALL E MONTGOMERY, 1999).

Se a variabilidade devido às causas comuns for maior que a amplitude das especificações, o processo é dito não capaz. Assim, os índices de capacidade refletem a qualidade do processo (JEANG E CHUNG, 2009). São medidas adimensionais usadas para quantificar a relação entre o desempenho do processo e os limites de especificação, sendo que esta quantificação é essencial para o sucesso de melhorias na qualidade (WU *et al.*, 2009). Utilizando a informação fornecida pelos índices, os gerentes podem reduzir a variabilidade, diminuir custos de produção e aumentar a satisfação dos clientes (DELERYD, 1999).

Observam-se várias publicações sobre capacidade de processos, identificando novas abordagens ou mesmo novas formulações de índices. Porém foram constatadas poucas publicações de revisão sobre este assunto, destacando os trabalhos de Pearn *et al.* (1992), Palmer e Tsui (1999), Kotz e Johnson (2002) e Anis (2008). Portanto, o principal objetivo deste artigo é realizar, por meio de um mapeamento da literatura nos últimos dez anos, uma classificação e análise dos artigos de acordo com as abordagens identificadas.

Este artigo está estruturado em cinco seções. Além desta introdução, a seção dois apresenta um referencial teórico abordando os principais índices de capacidade. A seção três apresenta os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento deste artigo. A classificação e análise dos artigos mapeados estão apresentadas na seção quatro, e a seção cinco resume as principais conclusões deste estudo.

2. ÍNDICES DE CAPACIDADE

Entender a estrutura do processo e quantificar seu desempenho é essencial para o sucesso das atividades de melhoria da qualidade. Assim, o estudo da capacidade é uma importante técnica que visa a melhoria contínua da qualidade e produtividade (WU *et al.*, 2009). Observa-se que um processo pode estar sob controle estatístico, mas caso apresente variabilidade maior do que a amplitude das especificações, será considerado não capaz, exigindo ações corretivas sobre o sistema. Spiring (1995) e Deleryd (1999) afirmam que o principal objetivo de estudar e interpretar a capacidade dos processos é servir de base para tomadas de decisões, provendo um guia estratégico para alavancar a qualidade.

Porém como quantificar a capacidade do processo? Esta pergunta é respondida pelos índices de capacidade, que surgiram a partir de 1974, quando Juran introduziu o primeiro estudo em relação ao índice C_p . A partir deste estudo, surgiram outros índices, como: C_{pk} , C_{pm} , C_{pmk} . Estes quatro índices estão representados nas equações (1), (2), (3) e (4), respectivamente, formando os índices básicos mais conhecidos. São utilizados quando os dados são normalmente distribuídos e quando o processo estiver sob controle estatístico (KOTZ E JONHSON, 2002).

$$\hat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}} \quad (1)$$

$$\hat{C}_{pk} = \min \left(\frac{\bar{y} - LIE}{3\hat{\sigma}}, \frac{LSE - \bar{y}}{3\hat{\sigma}} \right) \quad (2)$$

$$\hat{C}_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}} \quad (3)$$

$$\hat{C}_{pmk} = \min \left(\frac{\bar{y} - LIE}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}}, \frac{LSE - \bar{y}}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}} \right) \quad (4)$$

Nas equações (1), (2), (3) e (4), o limite superior de especificação, o limite inferior de especificação e o valor alvo do processo são representados, respectivamente, por LSE, LIE e T. A média é representada por \bar{y} e $\hat{\sigma}$ é o estimador do desvio padrão.

O índice C_p representa a capacidade potencial do processo para fornecer um produto aceitável, não levando em consideração a localização dos dados (MONTGOMERY, 2004). Para solucionar esta questão, Kane (1986) introduziu o índice C_{pk} (índice de capacidade efetiva). Os índices C_p e C_{pk} , quando usados em conjunto, proporcionam uma boa indicação da capacidade do processo, tanto em relação à média quanto à variabilidade (PALMER E TSUI, 1999). Entretanto, ambos não consideram o valor alvo do processo. Observou-se que não basta somente produzir peças dentro dos limites, mas também é preciso que o processo esteja o mais próximo do alvo possível. Tendo esta questão em vista, Chan *et al.* (1988) e Pearn *et al.* (1992) propuseram os índices C_{pm} e C_{pmk} , respectivamente, que penalizam o afastamento do alvo especificado. O índice C_{pm} considera apenas a variabilidade permitida ao processo (LSE-LIE), enquanto que o índice C_{pmk} considera a menor distância entre a média do processo em relação aos limites de especificação (GONÇALEZ E WERNER, 2009).

De acordo com os índices apresentados, observa-se que cada um acrescenta uma característica importante a partir do índice C_p proposto originalmente. Assim, Kotz e Johnson (2002) observam que: $C_p \geq C_{pk} \geq C_{pmk}$ e $C_p \geq C_{pm} \geq C_{pmk}$, sendo o índice C_{pmk} o menor valor diante dos demais, pois tem sua análise mais refinada. Vännman (1995) observou que, se $\bar{y} = T = M$, onde M é igual a metade do comprimento do intervalo de especificação, então, $C_p = C_{pk} = C_{pm} = C_{pmk}$, ou seja, todos os índices terão seu valor máximo igual ao índice C_p , já que o processo apresenta pouca variabilidade, está centrado e próximo do valor alvo. Com o propósito de promover uma visão esclarecedora em relação aos índices de capacidade mencionados, o trabalho de Vännman (1995) apresenta uma fórmula unificada que generaliza estes índices.

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). O desenvolvimento de novos índices e o surgimento de novas abordagens estão ligados às necessidades observadas nas empresas, considerando a vantagem frente à concorrência que pode ser alcançada através da qualidade dos produtos e processos.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento deste trabalho envolveu quatro etapas: (i) mapeamento de artigos publicados na literatura; (ii) identificação das abordagens; (iii) classificação dos artigos de acordo com as abordagens identificadas; e (iv) análise da classificação.

A revisão foi realizada através de uma busca em periódicos selecionados abrangidos pelas bases de dados: *Wiley InterScience*, *Science Direct*, *Wilson*, *Emerald*, *World Scientific* e *Springer*. A primeira etapa contemplou o mapeamento dos artigos publicados entre 2000 a 2009. Na consulta aos periódicos, foram selecionados os artigos que, em seus resumos ou palavras-chave, mencionassem as palavras “*capability index*” ou “*process capability*”. A opção pelos periódicos analisados deve-se ao fato de terem um maior número de publicações sobre índices de capacidade do processo, ficando fora da seleção os periódicos com menos de três publicações sobre o referido assunto e os periódicos que não se encontravam nas bases de dados pesquisadas.

Ao final, foram analisados 127 artigos nos periódicos visados. Estes artigos foram publicados nos seguintes periódicos: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *Quality and Reliability Engineering International*, *Microelectronics Reliability*, *Journal of Quality Technology*, *Quality & Quantity*, *European Journal of Operational Research*, *International Journal of Quality & Reliability Management*, *International Journal of Production Economics*, e *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*.

Artigos publicados em congressos e simpósios foram desconsiderados, por terem uma avaliação menos criteriosa do que os artigos publicados em periódicos. Publicações no formato de livros, dissertações e teses também foram desconsideradas.

Após o mapeamento da bibliografia disponível, a segunda etapa envolveu a leitura dos artigos e identificação das abordagens utilizadas. A lista de abordagens foi elaborada considerando a proposta de Wu *et al.* (2009), acrescida de alguns complementos em função de novos tópicos identificados. A lista final das abordagens utilizadas para a classificação dos artigos mapeados foi: múltiplas características, intervalos de confiança, tomadas de decisões, dados não-normais, rendimento, custos e perdas, múltiplos processos, múltiplas amostras, erro de medição e desgaste de ferramentas, incapacidade, especificação unilateral, tolerâncias assimétricas, família de produtos, revisão da literatura, EWMA, serviços e dados qualitativos, seis sigma, confiabilidade e meio ambiente.

A terceira etapa contemplou classificar os artigos mapeados segundo abordagens listadas. Com esta classificação, foi possível realizar o trabalho de análise (quarta etapa), que envolveu o número de artigos por ano, número de artigos por periódico, número de artigos por abordagem e sugestões de pesquisas futuras.

4. ARTIGOS MAPEADOS

4.1. Classificação

A Tabela 1 apresenta a classificação dos 127 artigos de acordo com a lista das 18 abordagens identificadas.

Tabela 1 – Abordagens propostas e artigos presentes em cada abordagem.

Abordagens	Artigos	
<i>Múltiplas características</i>	- Wang <i>et al.</i> (2000) - Noorossana (2002) - Chen <i>et al.</i> (2003a) - Lee e Yum (2003) - Wu <i>et al.</i> (2004) - Wang (2005) - Wu e Pearn (2005b) - Pearn e Wu (2006) - Wang (2006)	- Yu <i>et al.</i> (2007a) - Yu <i>et al.</i> (2008b) - Vännman e Kulahci (2008) - Ahmad <i>et al.</i> (2009) - Gonzalez e Sanchez (2009) - Lovelace <i>et al.</i> (2009) - Pan e Lee (2009) - Shinde e Khadse (2009)
<i>Intervalos de confiança</i>	- Zimmer <i>et al.</i> (2001) - Hoffman (2001) - Balamurali e Kalyanasundaram (2002) - Chen e Pearn (2002) - Pearn e Shu (2003a) - Pearn e Shu (2003b) - Perakis e Xekalaki (2004)	- Pearn e Shu (2004) - Pearn <i>et al.</i> (2005a) - Chen (2005) - Shu <i>et al.</i> (2006) - Mathew <i>et al.</i> (2007) - Wu <i>et al.</i> (2009b) - Wu (2009)
<i>Tomadas de decisão</i>	- Pearn <i>et al.</i> (2001) - Lee (2001) - Pearn e Lin (2002b) - Chen <i>et al.</i> (2003c) - Chen e Tong (2003) - Polansky (2001) - Chen e Chen (2004a)	- Chen e Chen (2004b) - Lin e Pearn (2005) - Lin (2005) - Chen <i>et al.</i> (2005a) - Hubele <i>et al.</i> (2005) - Polansky (2006) - Tsai e Chen (2006)
<i>Dados não-normais</i>	- Nahar <i>et al.</i> (2001) - Chen e Ding (2001) - Wu e Swain (2001) - Borges e Ho (2001) - Chang <i>et al.</i> (2002) - Ding (2004)	- Liu e Chen (2006) - Leung e Spiring (2007) - Vännaman e Albing (2007) - Pearn <i>et al.</i> (2007) - Hosseinifard <i>et al.</i> (2009) - Albing (2009)
<i>Rendimento, custos e perdas</i>	- Lee <i>et al.</i> (2002) - Pearn e Lin (2004) - Pearn <i>et al.</i> (2004) - Chao e Lin (2006) - Lin e Pearn (2009)	- Wu (2004) - Hsieh (2006) - Morita <i>et al.</i> (2009) - Jeang e Chung (2009)
<i>Múltiplos processos</i>	- Pearn <i>et al.</i> (2002) - Sung <i>et al.</i> (2002) - Huang <i>et al.</i> (2002) - Huang e Chen (2003) - Pearn <i>et al.</i> (2004)	- Chen <i>et al.</i> (2006a) - Chen <i>et al.</i> (2006b) - Pearn e Chang (2006) - Chen e Chen (2008)
<i>Múltiplas amostras</i>	- Pearn e Lin (2003) - Vännman e Hubele (2003) - Pearn e Yang (2003) - Hubele e Vännman (2004) - Pearn e Wu (2005)	- Wu e Pearn (2005a) - Pearn <i>et al.</i> (2005b) - Lin (2006b) - Wu (2008)

Tabela 1 – Continuação.

<i>Erro de medição e desgaste de ferramentas</i>	- Bordignon e Scagliarini (2002) - Pearn e Liao (2005) - Bordignon e Scagliarini (2006) - Pearn e Liao (2006)	- Hsu <i>et al.</i> (2007) - Pearn e Hsu (2007) - Pearn e Liao (2007) - Shishebori e Hamadani (2009) - Sung e Chen (2004)
<i>Incapacidade</i>	- Pearn e Lin (2001) - Pearn e Lin (2002a) - Lin (2004) - Chen <i>et al.</i> (2005b)	- Lin (2005) - Lin (2006a) - Ke <i>et al.</i> (2009)
<i>Especificação unilateral</i>	- Pearn e Chen (2002) - Lin e Pearn (2002) - Chen <i>et al.</i> (2003b)	- Wu e Pearn (2006) - Chen <i>et al.</i> (2007b)
<i>Tolerâncias assimétricas</i>	- Jessenberger e Weihs (2000) - Lin <i>et al.</i> (2005)	- Pearn <i>et al.</i> (2005c) - Chang e Wu (2008)
<i>Família de produtos</i>	- Chen <i>et al.</i> (2002a) - Chen <i>et al.</i> (2002b)	- Huang <i>et al.</i> (2005) - Chen e Huang (2007)
<i>Revisão da literatura</i>	- Kotz e Johnson (2002) - Spiring <i>et al.</i> (2003)	- Wu <i>et al.</i> (2009a) - Burdick <i>et al.</i> (2003)
<i>EWMA</i>	- Castagliola (2001) - Castagliola e Vännman (2007)	- Castagliola e Vännman (2008)
<i>Serviço e dados qualitativos</i>	- Leal e Pereira (2007) - Spiring (2008)	- Hsieh e Tong (2006)
<i>Seis sigma</i>	- Chen <i>et al.</i> (2007a)	- Chen <i>et al.</i> (2009)
<i>Confiabilidade</i>	- Ramakrishnan <i>et al.</i> (2001)	
<i>Meio ambiente</i>	- Corbett e Pan (2002)	

4.1.1. Múltiplas características

Dezessete artigos foram classificados nesta abordagem, sendo que sete enfocam os índices de capacidade multivariados, quando as variáveis são correlacionadas. Wang *et al.* (2000) apresentam uma comparação de três índices multivariados, e Wang (2005) demonstra um procedimento para elaboração de índices de capacidade multivariados para processos produtivos de curto prazo usando a técnica de análise de componentes principais. Um gráfico de controle para processos com múltiplas características baseado na generalização do índice de rendimento S_{pk} foi desenvolvido por Chen *et al.* (2003a). Yu *et al.* (2007a) propuseram um índice de capacidade integrada de produtos (C_T) que considera os três tipos de característica de qualidade: maior-é-melhor, nominal-é-melhor e menor-é-melhor. Pan e Lee (2009) apontaram as limitações dos índices de capacidade para múltiplos processos propostos por Taam *et al.* (1993) e desenvolveram novos índices considerando a correlação entre múltiplas características de qualidade. Os trabalhos de Noorossana (2002), Vännman e Kulahci (2008) e Lovelace *et al.* (2009) consideram a análise da capacidade através de dados autocorrelacionados.

4.1.2. Intervalos de confiança

Quatorze artigos abordam intervalos de confiança para índices de capacidade do processo. Destes, sete contemplam o cálculo do limite de confiança inferior, que representa uma medida da capacidade mínima do processo, considerando os dados amostrados. Chen e Pearn (2002) utilizaram o método de simulação *bootstrap* para construção do limite de confiança inferior de S_{pk} . Este método foi também utilizado por Chen (2005) para comparação de quatro limites de confiança inferior para o índice S_{pk} . Pearn e Shu (2003b) desenvolveram um algoritmo eficiente para o cálculo do limite de confiança inferior de C_{pk} . Desta mesma forma, Pearn e Shu (2003a) e Pearn e Shu (2004) calcularam o limite de confiança inferior para outros índices (C_{pS} , C_{pI} e C_{pmk}). Com relação a intervalos de confiança generalizado, que é um método unificado para computação dos limites de confiança para diferentes índices de capacidade, foram encontrados os artigos de Mathew *et al.* (2007) e Wu *et al.* (2009b).

4.1.3. Tomadas de decisões

Quatorze artigos discutem o uso dos procedimentos e avaliações de capacidade nas tomadas de decisões. Desses artigos, oito apresentam estudos voltados à seleção de fornecedores, servindo como orientações na assinatura do contrato para produtores e fornecedores. Destaca-se os artigos de Polansky (2006) que desenvolveu uma estratégia para solucionar o problema de seleção de fornecedores baseado em testes de permutação, tendo como vantagem, níveis de significância exatos, independentemente da distribuição dos dados do processo; e Chen *et al.* (2005a) que desenvolveram um estudo que aplica o índice de incapacidade C_{pp} para avaliar o desempenho do processo de fornecedores e propõem a utilização do índice de preços I_p .

4.1.4. Dados não-normais

Os estudos sobre capacidade de processos para dados não-normais utilizando os índices desenvolvidos para dados normalmente distribuídos podem gerar interpretações errôneas sobre o processo. Para solucionar este problema, é necessário buscar alternativas que utilizem distribuições adequadas, existindo na literatura técnicas de transformação dos dados e métodos de análise da capacidade para dados não-normais. Foram mapeados doze artigos sobre esta abordagem, destacando os trabalhos de Chen e Ding (2001) que propõem um método que reflete o número de não-conformes do processo e Liu e Chen (2006) que

desenvolvem um método utilizando a distribuição de Burr XII para melhorar a precisão da estimativa de índices de capacidade de processos não-normais. Uma comparação de métodos existentes na literatura para análise de dados com distribuição não-normal é apresentada por Wu e Swain (2001). Os trabalhos de Nahar *et al.* (2001), Chang *et al.* (2002), Vännman e Albing (2007) e Albing (2009) consideraram nos seus estudos, as distribuições assimétricas.

4.1.5. Rendimento, custos e perdas

Os índices de capacidade do processo estão fortemente relacionados com qualidade e custos. Nove artigos discutiram esta abordagem, destacando os trabalhos de Wu (2004) e Jeang e Chung (2009). Wu (2004) aborda a filosofia de custeio-alvo (*target costing*) explicando que a redução da variabilidade do processo não é suficiente para resolver problemas de qualidade. Jeang e Chung (2009) desenvolveram um novo índice (C_{pmc}) que leva em consideração, além do impacto da média e da variação do processo, o nível da qualidade e os custos da produção incorridos no ciclo de vida do produto. Este índice explora a análise da capacidade do processo no estágio de pré-produção, sendo útil quando a questão econômica é uma preocupação principal.

A utilização dos índices de capacidade para interpretação do rendimento e perdas do processo foi discutida por Lee *et al.* (2002), Pearn e Lin (2004), Pearn *et al.* (2004), Chao e Lin (2006) e Lin e Pearn (2009). O trabalho de Pearn e Lin (2004) investigou o rendimento real do processo em termos de produtos não conformes e compararam os índices C_{pk} e C_{pm} em termos de rendimento e perdas do processo. Lin e Pearn (2009) usaram o índice de rendimento S_{pk} para comparar dois processos produtivos para selecionar aquele que tem maior rendimento de produção.

4.1.6. Múltiplos processos

Os índices de capacidade tradicionais são aplicáveis para um único processo, assim como as cartas tradicionais de Shewhart. Entretanto, estas ferramentas não são aplicáveis para múltiplos processos. Desta forma, a utilização da análise gráfica do desempenho multi-processo (em inglês, *multi-process performance analysis chart* – MPPAC) pode ser útil para determinar a prioridade das ações de melhoria. Foram encontrados nove artigos discutindo esse tema, destacando-se os trabalhos de: Huang e Chen (2003) que selecionaram o índice C_{pmk} para avaliar um produto com múltiplos processos com tolerâncias simétricas e

assimétricas, simultaneamente; Pearn e Chang (2006), que consideraram o índice C_p para processos com múltiplas linhas de produção; Chen *et al.* (2006a), que desenvolveram um modelo gráfico de capacidade multi-processo para avaliar a capacidade do processo com distribuição normal e não-normal; e Pearn *et al.* (2002), que apresentaram a análise MPPAC utilizando o índice de incapacidade C_{pp} .

4.1.7. Múltiplas amostras

A maioria dos artigos existentes na literatura trata de estimativas dos índices de capacidade baseados em uma única amostra. Entretanto, em aplicações reais do controle estatístico da qualidade, os dados são muitas vezes coletados em múltiplas amostras. Nove artigos relacionados a esta abordagem foram identificados, destacando os trabalhos de Pearn e Wu (2005) que generalizaram o procedimento Bayesiano para avaliar o índice C_p baseado em múltiplas amostras; Wu e Pearn (2005a) que aplicaram um procedimento similar para o índice C_{pm} ; e o trabalho de Lin (2006b), que investigou as propriedades do estimador do índice de incapacidade baseado em múltiplas amostras para processos normalmente distribuídos. Vännman e Hubele (2003), Hubele e Vännman (2004) e Wu (2008) consideraram os dados coletados em múltiplas subamostras.

4.1.8. Erros de medição e desgaste de ferramentas

No ambiente industrial, é possível observar duas principais fontes de variação: o processo produtivo em si e os erros de medição associados. Os erros de medição, por terem um efeito significativo na capacidade do processo, não podem ser desconsiderados. Oito artigos avaliaram o problema do efeito dos erros de medição sobre o desempenho dos índices de capacidade, destacando o trabalho de Pearn e Liao (2005) que investigaram a acurácia do estimador empírico \hat{C}_{pk}^Y quando os dados da amostra estão contaminados com erros de medição. A análise do efeito dos erros de medição no índice de capacidade multivariado de processos (MC_p) foi realizada por Shishebori e Hamadani (2009). Bordignon e Scagliarini (2002) apresentaram uma análise estatística para estimativa do intervalo de confiança para C_p com dados contaminados com erros de medição. Com relação ao desgaste de ferramenta, foi encontrado um artigo de Pearn e Hsu (2007), que aplicaram o índice de capacidade C_{pmk} para determinar o tempo de reposição ótimo da ferramenta ou instrumento para manter o produto com máxima qualidade.

4.1.9. Incapacidade

O índice de incapacidade do processo (C_{pp}) foi criado por Greenwich e Schaffrath (1995) com o objetivo de promover informações adicionais sobre a acurácia e a precisão do processo. De acordo com o mapeamento realizado, sete artigos estudaram este índice, destacando os trabalhos de Pearn e Lin (2001) e Pearn e Lin (2002a). O trabalho de Pearn e Lin (2001) investigou as propriedades estatísticas dos estimadores naturais do índice de incapacidade, sendo útil para decisões confiáveis sobre a capacidade do processo. Pearn e Lin (2002a) estenderam este estudo baseado no nível de erro relativo de diferentes tamanhos de amostra.

4.1.10. Especificação unilateral

Cinco artigos foram classificados nesta abordagem, destacando-se os trabalhos de Wu e Pearn (2006) que propuseram uma abordagem Bayesiana com base nos índices C_{pS} e C_{pI} para medir a capacidade de um processo na qual as especificações são unilaterais; Chen *et al.* (2003b) elaboraram um método que utiliza inferência fuzzy para estimar o índice de capacidade do processo em variável de resposta do tipo maior-é-melhor; e Chen *et al.* (2007b), que construíram um gráfico de controle dos índices C_{pS} e C_{pI} para monitorar e avaliar a estabilidade e capacidade de processos com especificações unilaterais.

4.1.11. Tolerâncias assimétricas

Um processo apresenta tolerâncias assimétricas se o valor alvo é diferente do ponto médio do intervalo de especificação. Esta abordagem foi foco de quatro artigos. Entre eles, destaca-se Jessenberger e Weihs (2000) que estudaram as propriedades do C_{pmk} na presença de limites de especificação assimétricos, e Pearn *et al.* (2005c) que desenvolveram a classe $C_{Np}''(u, v)$ para lidar com processos não-normais com tolerâncias assimétricas.

4.1.12. Família de produtos

O termo família refere-se a um conjunto de produtos que possuam a mesma função e *design*, porém com tamanhos diferentes, de acordo com as demandas dos clientes. Os índices de capacidade tradicionais não podem ser aplicados para avaliar a capacidade neste caso, portanto, o desenvolvimento de procedimentos para avaliar a capacidade de famílias de

produtos é muito importante para a indústria. Quatro artigos abordando esse assunto foram identificados. Destaque para os trabalhos de Chen *et al.* (2002a) e Chen *et al.* (2002b), que apresentam um método para avaliar a capacidade de uma família de produtos para processos do tipo menor-é-melhor e maior-é-melhor, respectivamente.

4.1.13. Revisão da literatura

Durante o período mapeado, foram encontrados quatro artigos de revisão sobre índices de capacidade. Spiring *et al.* (2003) listaram todas as referências bibliográficas na área de capacidade de processos no período de 1990-2000, classificadas por periódicos, congressos e livros. Kotz e Johnson (2002) realizaram uma revisão da literatura no período de 1992 a 2000, e Wu *et al.* (2009a) classificaram algumas extensões e aplicações dos índices.

4.1.14. EWMA

O gráfico de média móvel exponencialmente ponderada (*Exponentially Weighted Moving Average* - EWMA) é uma alternativa usada para detecção de pequenas mudanças na média do processo. O monitoramento dos índices de capacidade usando EWMA foi discutido em três artigos investigados. Destaca-se o trabalho de Catagliola (2001) que aborda o conceito do índice de capacidade da máquina (C_M) e utiliza EWMA para monitorar regularmente os dados coletados; e o trabalho de Catagliola e Vännman (2007) que propõem um procedimento para monitorar os índices de capacidade integrados – $C_p(u,v)$ – baseado no uso da EWMA, voltada para processos que são potencialmente capazes, mas não são estáveis.

4.1.15. Serviços e dados qualitativos

Foram encontrados dois artigos orientados a serviços e um artigo sobre dados qualitativos. Leal e Pereira (2007) elaboraram um índice de capacidade para avaliar serviços. De acordo com estes autores, a qualidade de serviços considera as expectativas dos consumidores como zonas e não como pontos determinados. Assim, eles consideraram, para a elaboração do índice, que a zona de tolerância pode ser modelada por uma distribuição uniforme com um limite inferior (serviço adequado) e um limite superior (serviço desejado). Spiring (2008) propõe uma técnica que padroniza as medições a partir de uma perspectiva de satisfação do cliente e, em seguida, usa técnicas de capacidade de processos para amostras

pequenas para fornecer um controle analítico para processos de curto prazo. O trabalho de Hsieh e Tong (2006) apresenta uma medida quantitativa para respostas qualitativas. A medida proposta é baseada na filosofia da função perda de Taguchi e no conceito dos índices de capacidade.

4.1.16. Seis sigma

A metodologia Seis Sigma é uma estratégia de gerenciamento desenvolvida para melhorar os negócios da empresa. Os índices de capacidade foram estudados no âmbito desta metodologia por Chen *et al.* (2007a) e Chen *et al.* (2009) no período mapeado. Chen *et al.* (2007a) aplicam o gráfico PCAC (*Production capability analysis chart*) como uma ferramenta de análise preliminar, usada na etapa “medir” do método DMAIC (definir, medir, analisar, melhorar e controlar). Chen *et al.* (2009) afirmam que muitas empresas utilizam número de sigma como uma ferramenta de medida da capacidade dos processos. Segundo esses autores, o conhecimento da relação entre o número de sigmas e o índice de capacidade pode diminuir problemas de comunicação entre diferentes empresas.

4.1.17. Confiabilidade e meio ambiente

Durante o período analisado, identificou-se apenas um artigo discutindo a confiabilidade dos produtos: Ramakrishnan *et al.* (2001), que apresentam um estudo do C_p e C_{pk} e relacionam esses índices à confiabilidade dos produtos através de um estudo de caso. O desempenho ambiental de um processo usando as técnicas do controle estatístico de processo, foi avaliada e discutida por um único artigo. Corbett e Pan (2002) propuseram o uso do gráfico CUSUM (gráfico de soma cumulativa) e os índices de capacidade de processo para avaliar o desempenho ambiental. Este é o primeiro artigo que combina índices de capacidade com a pesquisa ambiental, preenchendo uma lacuna entre ISO 14.000 e Gestão da Qualidade Total.

4.2. ANÁLISE

A Tabela 2 apresenta uma análise do número de artigos por periódico. Pode-se observar que os periódicos *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* e *Quality*

and Reliability Engineering International concentram aproximadamente 62% das publicações referentes aos índices de capacidade no período analisado.

Tabela 2 – Número de artigos em relação ao ano e aos periódicos.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total	%
<i>Int. Journal of Adv. Manuf. Technology</i>			3	4	7	10	10	2		5	41	32,3
<i>Quality and Reliability Eng. Int.</i>		6	6	3	2	2	4	4	3	7	37	29,1
<i>Microelectronics Reliability</i>		1	4	3		1		1			10	7,9
<i>Quality & Quantity</i>				1	1	1		4		1	8	6,3
<i>Journal of Quality Technology</i>	2		1	1	2	1	1				8	6,3
<i>Eur. Journal of Operat. Research</i>		1	1			1	1	1	2	1	8	6,3
<i>Int. Journal of Qual. & Reliab. Manag.</i>		1	2		1			1		1	6	4,7
<i>Int. Journal of Prod. Economics</i>						1	1	1	1	1	5	3,9
<i>Int. Journal of Rel., Quality and Saf.Eng.</i>		2		2							4	3,1
Total	2	11	17	14	13	17	17	14	6	16	127	100
%	1,6	8,7	13,4	11,0	10,2	13,4	13,4	11,0	4,7	12,6	100	

De acordo com a Tabela 2, observa-se que existe certa oscilação no número de publicações ao longo dos anos, notando-se picos nos anos de 2002, 2005, 2006 e 2009.

A Tabela 3 apresenta uma análise do número de publicações classificadas de acordo com as abordagens identificadas. Constata-se que os trabalhos se distribuem ao longo de várias abordagens. Destaque para as abordagens Múltiplas Características, Intervalos de Confiança, Tomada de Decisão e Dados Não-normais, que concentram aproximadamente 45% dos artigos.

Tabela 3 – Número de artigos em relação ao ano e às abordagens.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total	%
<i>Múltiplas características</i>	1		1	2	1	2	2	2	1	5	17	13,4
<i>Intervalos de confiança</i>		2	2	2	2	2	1	1		2	14	11,0
<i>Tomadas de decisão</i>		2	1	3	2	4	2				14	11,0
<i>Dados não-normais</i>		4	1		1		1	3		2	12	9,4
<i>Rendimento, custos e perdas</i>			1		3		2			3	9	7,1
<i>Múltiplos processos</i>			3	1	1		3		1		9	7,1
<i>Múltiplas amostras</i>				3	1	3	1		1		9	7,1
<i>Erro de medição e desgaste de ferramentas</i>			1		1	1	2	3		1	9	7,1
<i>Incapacidade</i>		1	1		1	2	1			1	7	5,5
<i>Especificação unilateral</i>			2	1			1	1			5	3,9
<i>Tolerâncias assimétricas</i>	1					2			1		4	3,1
<i>Família de produtos</i>			2			1		1			4	3,1
<i>Revisão da literatura</i>			1	2						1	4	3,1
<i>EWMA</i>		1						1	1		3	2,4
<i>Serviço and dados qualitativos</i>							1	1	1		3	2,4
<i>Seis sigma</i>								1		1	2	1,6
<i>Confiabilidade</i>		1									1	0,8
<i>Meio ambiente</i>			1								1	0,8
Total	2	11	17	14	13	17	17	14	6	16	127	100
%	1,6	8,7	13,4	11,0	10,2	13,4	13,4	11,0	4,7	12,6	100	

Foram encontrados 130 autores distribuídos nas 127 publicações. W.L. Pearn foi o autor com maior número de publicações na área de capacidade de processo, totalizando 39 artigos publicados.

A análise dos 127 artigos sobre capacidade dos processos revelou a utilidade e flexibilidade da aplicação dos índices, que podem ser empregados em várias situações com objetivos diferentes. Por exemplo, esta técnica tem se tornado útil para desenvolver estratégias de melhorias na produção, avaliar e selecionar fornecedores, avaliar custos e qualidade dos processos, dentre outras aplicações.

De acordo com os artigos mapeados, constatou-se que 12,6% (16 artigos) desenvolveram novos índices de capacidade baseados em novas percepções e características, como por exemplo: Wang (2006) que desenvolveu o índice MC_{pc} composto de vários índices

de capacidade univariados; Leal e Pereira (2007) que desenvolveram o índice SCI (*Service Capability Index*) aplicado à área de serviços; Jeang e Chung (2009) que desenvolveram o índice C_{pmc} para avaliar custos; e Yu *et al.* (2007a) que propuseram o índice C_t que considera os três tipos de características da qualidade. Destes dezesseis artigos, sete estão classificados na abordagem “múltiplas características”, tópico que tem despertado interesse crescente dos pesquisadores. Esta constatação pode ser justificada pela necessidade das empresas, onde é comum a presença de dados correlacionados ou autocorrelacionados.

Outra observação realizada através das abordagens é a progressiva preocupação com as questões financeiras. Existe uma clara tendência de aliar as questões financeiras com estudos de capacidade. Vinculando C_{pk} com Ganho, Perdas e Custo, têm-se uma linguagem mais facilmente entendida pelos gerentes e diretores.

Quanto aos trabalhos futuros, verifica-se que algumas abordagens têm sido objeto de poucas publicações até o momento. Entre as áreas que necessitam de maior volume de pesquisas, pode-se destacar: serviços e dados qualitativos, Six Sigma, confiabilidade dos produtos e meio ambiente.

A área de serviços oferece uma grande oportunidade de pesquisas envolvendo o estudo da capacidade de processos. Cronin (2003) salienta a importância de conhecer o efeito da variabilidade na avaliação da qualidade dos serviços ofertados ao cliente. Portanto, expressar opiniões e dados subjetivos em forma quantitativa, passível de análise estatística é uma importante frente de pesquisa. Isso irá permitir que a área de serviços progrida nas questões referentes a garantia da qualidade. Vale observar também que a satisfação do cliente depende tanto da qualidade do produto como dos serviços associados, sendo assim, fundamental progredir nesta área.

Em relação à abordagem seis sigma é importante aprofundar os estudos e divulgar a relação que existe entre os índices de capacidade e o correspondente nível sigma e percentual de defeitos (esperado) no processo. Esse esforço pode diminuir os problemas de comunicação entre os adeptos do seis sigma e demais engenheiros e estatísticos, conforme defendido por Chen *et al.* (2009).

Confiabilidade e meio ambiente caracterizam outras áreas onde há amplas possibilidades de pesquisas e avanços no estudo de capacidade de processos. No que concerne a confiabilidade de produtos, são necessários estudos que permitam associar C_{pk} a taxa de falha (λ). Vale observar que, na medida em que os valores de C_{pk} tendem a crescer (melhoria

contínua), a ênfase deixa de ser “atender as especificações”, já que estas já estão sendo atendidas com folga, e passa a ser “reduzir a variabilidade tanto quanto possível”. Esta relação entre C_{pk} e taxa de falha foi demonstrada pela primeira vez pelo engenheiro Bill Smith, em 1985, que estudou a correlação entre o ciclo devido do produto e quantas vezes este tinha sido reformulado durante o processo de fabricação (HARRY, 1998). Contudo, pouco se avançou após este estudo. Assim, é necessário aprofundar pesquisas que revelem: (i) como relacionar C_{pk} e λ ; (ii) qual a relação observada em diferentes segmentos, como mecânico, eletrônico, químico; e (iii) quais os resultados quantificados destas relações nos diferentes segmentos. Os estudos adicionais podem confirmar os resultados citados por Smith, podendo inclusive gerar recomendações referentes a limites adequados (diferentes do tradicional $C_{pk} > 1,33$) para diferentes processos tecnológicos.

Em relação a área ambiental, os avanços já alcançados nos estudos de C_{pk} (por exemplo, índices multivariados, índices para processos não-normais, índices para tolerâncias assimétricas, etc) deveriam ser utilizados nas análises de variáveis ambientais. No entanto, o uso tem sido escasso, conforme visto na Tabela 3. Na medida em que as pesquisas na área ambiental estão em ampla ascensão, é importante que a comunidade do CEP divulgue o uso e aplique gráficos de controle e estudos de capacidade nessa área. Essas técnicas incorporam a variabilidade e, portanto, são as mais adequadas para o tratamento de variáveis industriais, inclusive indicadores ambientais.

Além disso, identifica-se uma lacuna na literatura: a falta de índices específicos para processos monitorados com gráficos de controle baseados em modelos de regressão, que monitoram as variáveis de resposta que dependem de parâmetros do processo que sofrem alterações ao longo do tempo. Esta abordagem não foi discutida em nenhum artigo mapeado, entretanto, apresenta uma grande importância para as empresas que necessitam avaliar o efeito conjunto de variáveis correlacionadas dependentes das variáveis de controle.

5. CONCLUSÕES

Os índices de capacidade podem ser usados para direcionar as melhorias no processo produtivo, permitindo aumentar a qualidade dos produtos e serviços e a satisfação dos clientes. O levantamento da literatura contemplou os artigos referentes aos índices de capacidade publicados no período de 2000 a 2009. Esse levantamento permitiu identificar 127 artigos e 18 abordagens. A partir destas abordagens, foram classificadas as 127 publicações

mapeadas e foram realizadas análises referentes ao número de artigos publicados por ano, número de artigos publicados por periódico e número de artigos por abordagem.

Pode-se verificar que os periódicos *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* e *Quality and Reliability Engineering International* concentram aproximadamente 62% do total de publicações. Em relação aos tópicos de interesse, observa-se que Múltiplas Características, Intervalos de Confiança, Tomada de Decisão e Dados Não-normais concentram 45% do total de publicações.

Por outro lado, o estudo dos índices de capacidade relacionados a serviços, dados qualitativos, confiabilidade de produtos, EWMA, Seis Sigma, sustentabilidade de processos e gráficos de controle baseados em modelos regressão são objeto de poucas publicações e ainda demandam maiores pesquisas.

As principais contribuições do presente artigo são: (i) identificação das abordagens existentes sobre índices de capacidade; (ii) classificação dos artigos segundo as abordagens; (iii) análise da classificação, identificando lacunas e pesquisas futuras; e (iv) resumo dos conhecimentos atuais referente ao tema, sendo útil para pesquisadores da área de qualidade e controle de processos.

REFERÊNCIAS

1. Ahmad, S., Abdollahian, M., Zeepongsehul, P. and Abbasi, B. (2009), "Multivariate nonnormal process capability analysis", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, pp. 757-765.
2. Albing, M. (2009), "Process capability indices for Weibull distributions and upper specification limits", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 25, pp. 317-334.
3. Anis, M.Z. (2008), "Basic process capability indices: an expository review", *International Statistical Review*, Vol. 76 No. 3, pp. 347-367.
4. Balamurali, S. and Kalyanasundaram, M. (2002), "Bootstrap lower confidence limits for the process capability indices C_p , C_{pk} and C_{pm} ", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 19 No. 8/9, pp. 1088-1097.
5. Bordignon, S. and Scagliarini, M. (2002), "Statistical analysis of process capability indices with measurement errors", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 18, pp. 321-332.
6. Bordignon, S. and Scagliarini, M. (2006), "Estimation of C_{pm} when measurement error is present", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 22, pp. 787-801.
7. Borges, W.S. and Ho, L.L. (2001), "A fraction defective based capability index", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 17, pp. 447-458.
8. Burdick, R.K., Borror, C.M. and Montgomery, D.C. (2003), "A review of methods for measurement systems capability analysis", *Journal of Quality Technology*, Vol. 35, pp. 342-354.
9. Castagliola, P. (2001) "How to monitor capability index C_M using EWMA", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 8 No. 3, pp. 191-204.
10. Castagliola, P. and Vännman, K. (2007), "Monitoring capability indices using an EWMA approach", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 23, pp. 769-790.
11. Castagliola, P. and Vännman, K. (2008), "Average run length when monitoring capability indices using EWMA", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 24, pp. 941-955.
12. Chan, L.K., Cheng, S.W. and Spiring, F.A. (1988), "A new measure of process capability: C_{pm} ", *Journal of Quality Technology*, Vol. 20 No., pp. 3162-175.
13. Chang, Y.C. and Wu, C.W. (2008), "Assessing process capability based on the lower confidence bound of C_{pk} for asymmetric tolerances", *European Journal of Operational Research*, Vol. 190, pp. 205-227.

14. Chang, Y.S., Choi, I.S. and Bai, D.S. (2002), "Process capability indices for skewed populations", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 18, pp. 383-393.
15. Chao, M.T. and Lin, D.K.J. (2006), "Another look at the process capability index", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 22, pp. 153-163.
16. Chen, J-P. (2005), "Comparing four lower confidence limits for process yield index S_{pk} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, pp. 609-614.
17. Chen, J-P. and Chen, K.S. (2004a), "Comparing the capability of two processes using C_{pm} ", *Journal of Quality Technology*, Vol. 32 No. 4, pp. 440-443.
18. Chen, J-P. and Chen, K.S. (2004b), "Comparison of two process capabilities by using indices C_{pm} an application to a color STN display", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 21 No. 1, pp. 90-101.
19. Chen, J-P. and Ding, C.G. (2001), "A new process capability index for non-normal distributions", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 18 No. 7, pp. 762-770.
20. Chen, J-P. and Pearn, W.L. (2002), "Testing process performance based on the yield: na application to the liquid-crystal display module", *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, pp. 1235-1241.
21. Chen, J-P. and Tong, L.I. (2003), "Bootstrap confidence interval of the difference between two process capability indices", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 249-256.
22. Chen, K.L., Chen, K.S. and Li, R.K. (2005a), "Suppliers capability and price analysis chart", *International Journal of Production Economics*, Vol. 98, pp. 315-327.
23. Chen, K.S. and Chen, T.W. (2008), "Multi-process capability plot and fuzzy inference evaluation", *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, pp.70-79.
24. Chen, K.S. and Huang, M.L. (2007), "Process capability evaluation for the process of product families", *Quality & Quantity*, Vol. 41, pp. 151-162.
25. Chen, K.S., Chen, K.L. and Li, R.K. (2005b), "Contract manufacturer selection by using the process incapability index C_{pp} ", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, pp. 686-692.
26. Chen, K.S., Chen, S.C. and Li, R.K. (2002a), "Process quality analysis of products", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 19, pp. 623-628.
27. Chen, K.S., Hsu, C.H. and Ouyang, L.Y. (2007a), "Applied product capability analysis chart in measure step of Six Sigma", *Quality & Quantity*, Vol. 41, pp. 387-400.
28. Chen, K.S., Hsu, C.H. and Wu, C.C. (2006a), "Process capability analysis for a multi-process product", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 1235-1241.
29. Chen, K.S., Huang, H.L. and Huang, C.T. (2007b), "Control charts for one-sided capability indices", *Quality & Quantity*, Vol. 41, pp. 413-427.
30. Chen, K.S., Li, R.K. and Liao, S.J. (2002b), "Capability evaluation of a product family for processes of the larger-the-better type", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 20, pp. 824-832.
31. Chen, K.S., Ouyang, L.Y., Hsu, C.H. and Wu, C.C. (2009), "The communion bridge to Six Sigma and process capability indices", *Quality & Quantity*, Vol. 43, pp. 463-469.
32. Chen, K.S., Pearn, W.L. and Lin, P.C. (2003a), "Capability measures for Processes with multiple characteristics", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 19, pp. 101-110.
33. Chen, K.S., Yu, K.T. and Sheu, S.H. (2006b), "Process capability monitoring chart with an application in the silicon-filler manufacturing process", *International Journal of Production Economics*, Vol. 103, pp. 565-571.
34. Chen, T.W., Chen, K.S. and Lin, J.Y. (2003b), "Fuzzy evaluation of process capability for bigger-the-best type products", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 820-826.
35. Chen, T.W., Lin, J.Y. and Chen, K.S. (2003c), "Selecting a supplier by fuzzy evaluation of capability indices C_{pm} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, pp. 534-540.
36. Corbett, C.J. and Pan, J-N. (2002), "Evaluation environmental performance using Statistical Process Control techniques", *European Journal of Operation Research*, Vol. 139, pp. 68-83.
37. Cronin, J. (2003), "Looking back to see forward in services marketing: some ideas to consider", *Managing Service Quality*, Vol. 13 No. 5, pp. 332-337.
38. Deleryd, M. (1999), "A pragmatic view on process capability studies", *International Journal of Production Economics*, Vol. 58, pp.319-330.
39. Ding, J. (2004), "A method of estimating the process capability index from the first four moments of non-normal data", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 20, pp. 787-805.
40. Gonçalves, P.U. and Werner, L. (2009), "Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais", *Gestão e Produção*, Vol. 16 No. 1, pp. 121-132.
41. González, I. and Sánchez, I. (2009), "Capability indices and nonconforming proportion in univariate and multivariate processes", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, pp. 1036-1050.
42. Greenwich, M. and Schaffrath, B.L.J. (1995), "A process incapability index", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 12 No. 4, pp. 58-71.

43. Harry, M.J. (1998), "Six Sigma: A breakthrough strategy for profitability", *Quality Progress*, Vol. 31 No. 5, pp. 60-64.
44. Hoffman, L.L. (2001), "Obtaining confidence intervals for C_{pk} using percentiles of the distribution of \hat{C}_p ", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 17 No. 2, pp. 113-118.
45. Hosseinifard, S.Z., Abbasi, B., Ahmad, S. and Abdollahian, M. (2009), "A transformation technique to estimate the process capability index for non-normal processes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, pp. 512-517.
46. Hsieh, K.L. (2006), "The study of cost-tolerance model by incorporating process capability index into product lifecycle cost", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, pp. 638-642.
47. Hsieh, K.L. and Tong, L.I. (2006), "Incorporating process capability index and quality loss function into analyzing the process capability for qualitative data", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 1217-1222.
48. Hsu, B.M., Shu, M.H. and Pearn, W.L. (2007), "Measuring process capability based on C_{pmk} with gauge measurement errors", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 23, pp. 597-614.
49. Huang, M.L. and Chen, K.S. (2003), "Capability analysis for a multi-process product with bilateral specifications", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 801-806.
50. Huang, M.L., Chen, K.S. and Hung, Y.H. (2002), "Integrated process capability analysis with an application in backlight module", *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, pp. 2009-2014.
51. Huang, M.L., Chen, K.S. and Li, R.K. (2005), "Graphical analysis of capability of a process producing a product family" *Quality & Quantity*, Vol. 39, pp. 643-657.
52. Hubele, N.F. and Vännman, K. (2004), "The effect of pooled and un-pooled variance estimators on C_{pm} when using subsamples", *Journal of Quality Technology*, Vol. 36 No. 2, pp. 207-222.
53. Hubele, N.F., Berrado, A. and Gel, E.S. (2005), "A wald test for comparing multiple capability indices", *Journal of Quality Technology*, Vol. 37 No. 4, pp. 304-307.
54. Jeang, A. and Chung, C.P. (2009) "Process capability analysis based on minimum production cost and quality loss", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, pp. 710-719.
55. Jessenberger, J. and Weihs, C. (2000), "A note on the behavior of C_{pmk} with asymmetric specification limits", *Journal of Quality Technology*, Vol. 36 No. 3, pp. 329-335.
56. Kane, V.E. (1986), "Process capability indices", *Journal of Quality Technology*, Vol. 18 No. 1, pp. 41-52.
57. Ke, J.C., Chu, Y.K., Chung, Y.T. and Lin, P.C. (2009), "Assessing non-normally distributed processes by interval estimation of the incapability index C_{pp} ", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 25, pp. 427-437.
58. Kotz, S. and Johnson, N.L. (2002), "Process capability indices – a review, 1992-2000", *Journal of Quality Technology*, Vol. 34 No. 1, pp. 2-19.
59. Leal, R.P. and Pereira, Z.L. (2007), "Process capability in services", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 24 No. 8, pp. 800-812.
60. Lee, H.T. (2001), " C_{pk} index estimation using fuzzy numbers", *European Journal of Operation Research*, Vol. 129 No. 3, pp. 683-688.
61. Lee, J.C., Hung, H.N., Pearn, W.L. and Kueng, T.L. (2002), "On the distribution of the estimated process yield index S_{pk} ", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 18, pp. 111-116.
62. Lee, P.H. and Yum, B.J. (2003), "Multi-characteristics parameter design: a desirability function approach based on process capability indices", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 10 No. 4, pp. 445-461.
63. Leung, B.P.K. and Spiring, F. (2007), "Adjusted action limits for C_{pm} based on departures from normality", *International Journal of Production Economics*, Vol. 107, pp. 237-249.
64. Lin, C-J. and Pearn, W.L. (2009), "Process selection for higher production yield based on capability index S_{pk} ", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 26, pp. 247-258.
65. Lin, G.H. (2004), "Upper limits of the estimated incapability index: a practical application on the reliability assessment of printed circuit boards", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, pp. 841-846.
66. Lin, G.H. (2005), "Process reliability assessment with a Bayesian approach", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, pp. 392-395.
67. Lin, G.H. (2006a), "A random interval estimation of the estimated process accuracy index", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 969-979.
68. Lin, G.H. (2006b), "Assessing process performance with incapability index based on multiple samples", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 715-719.
69. Lin, G.H., Pearn, W.L. and Yang, Y.S. (2005), "A Bayesian Approach to Obtain a Lower Bound for the C_{pm} Capability Index", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 21, pp. 655-668.
70. Lin, H.C. (2005), "Using normal approximation for calculating the p-value in assessing process capability index C_{pk} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, pp. 160-166.

71. Lin, P.C. and Pearn, W.L. (2002), "Testing process capability for one-sided specification limit with application to the voltage level translator", *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, pp. 1975-1983.
72. Lin, P.C. and Pearn, W.L. (2005), "Testing manufacturing performance based on capability index C_{pm} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 351-358.
73. Liu, P.H. and Chen, F.L. (2006), "Process capability analysis of non-normal process data using the Burr XII distribution", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 975-984.
74. Lovelace, C.R., Swain, J.J., Zeinelabdin, H. and Gupta, J.N.D. (2009), "Lower confidence limits for process capability indices C_p and C_{pk} when data are autocorrelated", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 25, pp. 663-700.
75. Mathew, T., Sebastian, G. and Kurian, K.M. (2007), "Generalized confidence intervals for process capability indices", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 23, pp. 471-481.
76. Montgomery, D.C. (2004), *Introdução ao controle estatístico da qualidade*, LTC: Brasil, RJ.
77. Morita, M., Arizono, I., Nakase, I. and Takemoto, Y. (2009), "Economical operation of the C_{pm} control chart for monitoring process capability index", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, pp. 304-311.
78. Nahar, P.C., Hubele, N.F. and Zimmer, L.S. (2001), "Assessment of a capability index sensitive to skewness" *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 17, No. 4, pp. 233-241.
79. Noorossana, R. (2002), "Short communication process capability analysis in the presence of autocorrelation", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 18, pp. 75-77.
80. Palmer, K. and Tsui, K.L. (1999), "A review and interpretations of process capability indices", *Annals of Operations Research*, Vol. 87, pp. 31-47.
81. Pan, J-N. and Lee, C.Y. (2009), "New capability indices for evaluating the performance of multivariate manufacturing processes", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 26 No. 1, pp. 3-15.
82. Pearn, W.L. and Chang, C.S. (2006), "Precision measures for processes with multiple manufacturing lines", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 30, pp. 1202-1210.
83. Pearn, W.L. and Chen, K.S. (2002), "One-sided capability indices C_{pu} and C_{pl} : decision making with sample information", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 19 No. 3, pp. 221-245.
84. Pearn, W.L. and Hsu, Y.C. (2007), "Optimal tool replacement for processes with low fraction defective", *European Journal of Operational Research*, Vol. 180, pp. 1116-1129.
85. Pearn, W.L. and Liao, M-Y. (2005), "Measuring process capability based on C_{PK} with gauge measurement errors", *Microelectronics Reliability*, Vol. 45, pp. 739-751.
86. Pearn, W.L. and Liao, M-Y. (2006), "One-sided process capability assessment in the presence of measurement errors", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 22, pp. 771-785.
87. Pearn, W.L. and Liao, M-Y. (2007), "Estimating and testing process precision with presence of gauge measurement errors", *Quality & Quantity*, Vol. 41, pp. 757-777.
88. Pearn, W.L. and Lin, G.H. (2001), "On the reliability of the estimated incapability index", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 17, pp. 279-290.
89. Pearn, W.L. and Lin, G.H. (2002a), "Estimated incapability index reliability and decision making with sample information", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 18, pp. 141-147.
90. Pearn, W.L. and Lin, G.H. (2003), "A reliable procedure for testing linear regulators with one-sided specification limits based on multiple samples", *Microelectronics Reliability*, Vol. 43, pp. 651-644.
91. Pearn, W.L. and Lin, P.C. (2002b), "Computer program for calculating the p-values in testing process capability C_{pmk} ", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 18 No. 4, pp. 333-342.
92. Pearn, W.L. and Lin, P.C. (2004), "Measuring process yield based on the capability index C_{pm} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, pp. 503-508.
93. Pearn, W.L. and Shu, M-H. (2003a), "An algorithm for calculating the lower confidence bounds of C_{PU} and C_{PL} with application to low-drop-out linear regulators", *Microelectronics Reliability*, Vol. 43, pp. 495-502.
94. Pearn, W.L. and Shu, M-H. (2003b), "Manufacturing capability control for multiple power-distribution switch processes based on modified C_{pk} MPPAC", *Microelectronics Reliability*, Vol. 43, pp. 963-975.
95. Pearn, W.L. and Shu, M-H. (2004), "Measuring manufacturing capability based on lower confidence bounds of C_{pmk} applied to current transmitter process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 23, pp. 116-125.
96. Pearn, W.L. and Wu, C.W. (2005), "A Bayesian approach for assessing process precision based on multiple samples", *European Journal of Operational Research*, Vol. 165, pp. 685-695.
97. Pearn, W.L. and Wu, C.W. (2006), "Production quality and yield assurance for processes with multiple independent characteristics", *European Journal of Operational Research*, Vol. 173, pp. 637-647.
98. Pearn, W.L. and Yang, S.L. (2003), "Distributional and inferential properties of the estimated precision index C_p based on multiple samples", *Quality & Quantity*, Vol. 37, pp. 443-453.

99. Pearn, W.L., Chang, Y.C. and Wu, C.W. (2005a), "Bootstrap approach for estimating process quality yield with application to light emitting diodes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, pp. 560-570.
100. Pearn, W.L., Hung, H.N., Peng, N.F. and Huang, C.Y. (2007), "Testing process precision for truncated normal distributions", *Microelectronics Reliability*, Vol. 47, pp.2275-2281.
101. Pearn, W.L., Ko, C.H. and Wang, K.H. (2002), "A multiprocess performance analysis chart based on the incapability index C_{pp} : an application to the chip resistors", *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, pp. 1121-1125.
102. Pearn, W.L., Kotz, S. and Johnson, N.L. (1992), "Distributional and inferential properties of process control indices", *Journal of Quality Technology*, Vol. 24 No. 4, pp. 216-231.
103. Pearn, W.L., Lin, G.H. and Wang, K.H. (2004), "Normal approximation to the distributional of the estimated yield index S_{pk} ", *Quality & Quantity*, Vol. 38 No. 1, pp. 95-111.
104. Pearn, W.L., Shu, M-H. and Hsu, B.M. (2004), " C_{pm} MPPAC for manufacturing quality control applied to precision voltage reference process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 23, pp. 712-719.
105. Pearn, W.L., Wu, C.W. and Chuang, H.C. (2005b), "Procedures for testing manufacturing precision C_p based (X, R) or (X, S) control chart samples", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25 No. 5/6, pp. 598-607.
106. Pearn, W.L., Wu, C.W. and Wang, K.H. (2005c), "Capability measure for asymmetric tolerance non-normal processes applied to speaker driver manufacturing" *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, pp. 506-515.
107. Pearn, W.L., Yang, S.L., Chen, K.S. and Lin, P.C. (2001), "Testing process capability using the index C_{pmk} with an application", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 8 No. 1, pp. 15-34.
108. Perakis, M. and Xekalaki, E. (2004), "A new method for constructing confidence intervals for the index C_{pm} ", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 20, pp. 651-665.
109. Polansky, A.M. (2003), "Supplier selection based on bootstrap confidence regions of process capability indices", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 10 No. 1, pp.1-14.
110. Polansky, A.M. (2006), "Permutation methods for comparing process capabilities", *Journal of Quality Technology*, Vol. 38 No. 3, pp. 254-266.
111. Ramakrishnan, B., Sandborn, P. and Pecht, M. (2001), "Process capability indices and product reliability", *Microelectronics Reliability*, Vol. 41, pp. 2067-2070.
112. Shinde, R.L. and Khadse, K.G. (2009), "Multivariate process capability using principal component analysis", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 25, pp. 69-77.
113. Shishebori, D. and Hamadani, A.Z. (2009), "The effect of gauge measurement capability on MC_p and its statistical properties", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 26 No. 6, pp. 564-582.
114. Shu, M-H., Wang, C.H. and Hsu, B.M. (2006), "A review and extensions of sample size determination for estimating process precision and loss with a designated accuracy ratio", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 1038-1046.
115. Spiring, F. (2008), "A process capability/customer satisfaction approach to short-run processes", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 24, pp. 467-483.
116. Spiring, F., Leung, B., Cheng, S. and Yeung, A. (2003), "A bibliography of process capability papers", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol.19, pp. 445-460.
117. Spiring, F.A. (1995), "Process capability a total quality management tool", *Total Quality Management*, Vol. 6 No. 1, pp. 21-33.
118. Sung, W.P., Chen, K.S. and Go, C.G. (2002), "Analytical method of process capability for steel", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 20, pp. 480-486.
119. Sung, W-P. and Chen, K-S. (2004), "An analytical method for the process capability of a precision component of an instrument", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, pp. 126-131.
120. Taam, W., Subbaiah, P. and Liddy, J.W. (1993), "A note on multivariate capability indices", *Journal of Applied Statistics*, Vol. 20, pp. 339-351.
121. Tsai, C.C. and Chen, C.C. (2006), "Making decision to evaluate process capability index C_p with fuzzy numbers", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 30, pp. 334-339.
122. Vännman, K. (1995), "A unified approach to capability indices", *Statistica Sinica*, Vol. 5, pp. 805-820.
123. Vännman, K. and Albing, M. (2007), "Process capability indices for one-sided specification intervals and skewed distributions", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 23, pp. 755-765.
124. Vännman, K. and Hubele, N.F. (2003), "Distributional properties of estimated capability indices based on subsamples", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 19, pp. 111-128.

125. Vännman, K. and Kulahci, M. (2008), "A model-free approach to eliminate autocorrelation when testing for process capability", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 24, pp. 213-228.
126. Wang, C.H. (2005), "Constructing multivariate process capability indices for short-run production", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, pp. 1306-1311.
127. Wang, F.K. (2006), "Quality evaluation of a manufactured product with multiple characteristics", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 22, pp. 225-236.
128. Wang, F.K., Hubele, N.F., Lawrence, F.P., Miskulin, J.D. and Shahriari, H. (2000), "Comparison of three multivariate process capability indices", *Journal of Quality Technology*, Vol. 32 No. 3, pp. 263-275.
129. Woodall, W.H. (2000), "Controversies and contradictions in statistical process control", *Journal of Quality Technology*, Vol. 32 No. 4, pp. 341-350.
130. Woodall, W.H. and Montgomery, D.C. (1999), "Research issues and ideas in statistical process control", *Journal of Quality Technology*, Vol.31 No. 4, pp. 376-386.
131. Wu, C.C., Kuo, H.L. and Chen, K.S. (2004), "Implementing process capability indices for a complete product" *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, pp. 891-898.
132. Wu, C-W. (2008), "Assessing process capability based on Bayesian approach with subsamples", *European Journal of Operational Research*, Vol. 184, pp. 207-228.
133. Wu, C-W. (2009), "Decision-making in testing process performance with fuzzy data", *European Journal of Operational Research*, Vol. 193, pp. 499-509.
134. Wu, C-W. and Pearn, W.L. (2005a), "Capability testing based on C_{pm} with multiple samples", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 21, pp. 29-42.
135. Wu, C-W. and Pearn, W.L. (2005b), "Measuring manufacturing capability for couplers and wavelength division multiplexers", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, pp. 533-541.
136. Wu, C-W. and Pearn, W.L. (2006), "Bayesian approach for measuring EEPROM process capability based on the one-sided indices C_{PU} and C_{PL} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 31, pp. 135-144.
137. Wu, C-W., Pearn, W.L. and Kotz, S. (2009a), "An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance", *International Journal of Production Economics* Vol. 117, pp 338-359.
138. Wu, C-W., Shu, M.H. and Cheng, F.T. (2009b), "Generalized confidence intervals for assessing process capability of multiple production lines", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 25, pp. 701-716.
139. Wu, H-H. (2004), "Using target costing concept in loss function and process capability indices to set up goal control limits", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, pp. 206-213.
140. Wu, H-H. and Swain, J.J. (2001), "A Monte Carlo comparison of capability indices when processes are non-normally distributed", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 17, pp. 219-231.
141. Yu, K.T., Sheu, S.H. and Chen, K.S. (2007a), "Testing multi-characteristic product capability indices", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol, 34, pp. 421-429.
142. Yu, K.T., Sheu, S.H. and Chen, K.S. (2007b), "The evaluation of process capability for a machining center", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, pp. 505-510.
143. Zimmer, L.S., Hubele, N.F. and Zimmer, W.J. (2001), "Confidence intervals and sample size determination for C_{pm} ", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 17, pp. 51-68.

2.2. ARTIGO 2

PROPOSTA DE ÍNDICES DE CAPACIDADE PARA GRÁFICOS DE
CONTROLE BASEADOS EM MODELOS DE REGRESSÃO

*CAPABILITY INDICES FOR CONTROL CHARTS BASED ON REGRESSION
MODELS*

Artigo a ser submetido para
Pesquisa Operacional
em Dezembro de 2010

PROPOSTA DE ÍNDICES DE CAPACIDADE PARA GRÁFICOS DE CONTROLE BASEADOS EM MODELOS DE REGRESSÃO

Fernanda Siqueira Souza

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre/RS, Brasil
e-mail: fe_ssouza@producao.ufrgs.br

Danilo Cuzzuol Pedrini

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre/RS, Brasil
e-mail: danilo@producao.ufrgs.br

Carla Schwengber ten Caten

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre/RS, Brasil
e-mail: tencaten@producao.ufrgs.br

Resumo - A análise de capacidade do processo é de extrema importância para a otimização e melhoria da qualidade, visto que verifica se o processo está atendendo às especificações de engenharia/projeto ou às especificações dos clientes. Índices de capacidade mal empregados geram conclusões errôneas, comprometendo o estudo e análise do processo, prejudicando o atendimento de exigências gerenciais ou de clientes externos. Assim, visando preencher uma lacuna observada na literatura, as principais contribuições do presente trabalho são: (i) proposta de índices de capacidade para processos monitorados por gráficos de controle baseados em modelos de regressão para especificações simétricas e assimétricas; e (ii) comparação dos índices de capacidade propostos com os índices de capacidade tradicionais através da aplicação dos mesmos em um processo simulado.

Palavras-chave: Controle de processos. Modelos de regressão. Índices de capacidade.

CAPABILITY INDICES FOR CONTROL CHARTS BASED ON REGRESSION MODELS

Abstract - Process capability analysis is extremely important for optimization and quality improvement. It verifies whether the process under analysis is capable of producing items within engineering and customers' specifications. The use of capacity indices when assumptions are not satisfied leads to erroneous conclusions, compromising the study and analysis of the process, jeopardizing the fulfillment of the requirements management or external customers. Aiming to fill a gap identified in the literature, main contributions of this work are: (i) proposition of capability indices for processes monitored through control charts based on regression models, for symmetric and asymmetric specifications; and (ii) comparison of the proposed indices with traditional capability indices through a simulated process.

Keywords: Process control. Regression models. Capability indices.

1. INTRODUÇÃO

O Controle Estatístico do Processo (CEP) é uma técnica eficiente que consiste em métodos de compreensão, de monitoramento e de melhoria do desempenho do processo ao longo do tempo (WOODALL, 2000). O CEP tem por objetivo detectar e facilitar a identificação de problemas para redução da variabilidade, sendo essencial para contribuir com a melhoria da qualidade e confiabilidade, além de reduzir os custos associados com a má qualidade dos produtos fabricados. O conhecimento do processo, através dos gráficos de controle e dos índices de capacidade, é essencial para a garantia da qualidade da empresa.

Na literatura, os gráficos de controle mais difundidos são os gráficos tradicionais de Shewhart, por sua relativa simplicidade e facilidade de compreensão e elaboração. Estes gráficos assumem que os dados são independentes e identicamente distribuídos em torno de uma média constante (COSTA *et al.*, 2005; MONTGOMERY, 2004). Estas suposições podem não ser satisfeitas quando há alterações frequentes no ajuste das variáveis de controle (variáveis independentes) do processo, pois nesse caso, ocorre uma alteração na média e variabilidade dos dados, sendo necessário um gráfico de controle para cada novo ajuste da máquina (PEDRINI E CATEN, 2011; LOREDO *et al.*, 2002). Este fato dificulta a operacionalização do CEP, pois seria necessária a implantação de um gráfico de Shewart para cada novo ajuste, além da dificuldade do cálculo dos limites de controle em função do baixo número de amostras de cada lote fabricado em cada ajuste. Nesses casos, a variável de resposta (variável dependente) de um produto ou processo é melhor representada por uma equação matemática que modele seu relacionamento com as variáveis de controle do processo (JACOBI *et al.*, 2002; SHU *et al.*, 2004).

Mandel (1969) propôs o gráfico de controle de regressão, que consiste na combinação das técnicas de gráfico de controle e modelos de regressão linear simples. Este gráfico é utilizado em processos em que o efeito de uma variável de resposta é uma função de uma variável de controle. Inicialmente gera-se um modelo de regressão que representa a relação existente entre a variável de resposta e a variável de controle e posteriormente monitora-se o resíduo pelo modelo. Os gráficos de controle tradicionais não são capazes de realizar uma análise quando a variável de resposta é dependente da variável de controle, pois pressupõe uma média constante ao longo do tempo.

A proposta original de Mandel (1969) somente pode ser aplicada em processos que apresentam uma variável de controle. Haworth (1996) estendeu a proposta de Mandel (1969) propondo o gráfico de regressão múltipla, consistindo na estimativa de um modelo de

regressão linear múltipla e monitoramento dos resíduos padronizados. Entretanto, o trabalho de Haworth (1996) não apresenta um método suficientemente claro para a aplicação do gráfico. Pedrini e Caten (2011) propuseram um método simples e eficiente para a aplicação do gráfico de controle de regressão no monitoramento de processos produtivos com uma ou mais variáveis de controle.

Resumidamente, os gráficos de controle verificam a estabilidade do processo. Entretanto, são os índices de capacidade que avaliam se o processo é capaz de atender tanto às especificações de engenharia/projeto quanto às especificações dos clientes. 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, devendo tomar ações corretivas para reduzir a variabilidade do sistema. Os índices tradicionais, ou seja, os índices aplicados aos gráficos de controle propostos por Shewhart são os mais difundidos, se destacando pela facilidade de aplicação. Entretanto, observa-se uma lacuna na literatura: a ausência de índices de capacidade específicos para processos monitorados com gráficos de controle baseados em modelos de regressão.

Assim, o objetivo deste artigo é preencher esta lacuna, sendo que as principais contribuições são: (i) proposta de índices de capacidade para gráficos de controle baseados em modelos de regressão, no presente trabalho, representados por índices GR, contemplando especificações simétricas e assimétricas; e (ii) comparação dos índices de capacidade propostos com os índices de capacidade tradicionais, através da aplicação em um processo simulado.

O presente artigo está dividido em seis seções. Além desta introdução, a seção dois apresenta um referencial teórico abordando índices de capacidade do processo e gráficos de controle de regressão. A seção três apresenta os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Na seção quatro, a proposta de cálculo dos índices de capacidade para gráficos de controle baseados em modelos de regressão e na seção cinco, apresenta-se a análise comparativa dos índices propostos com os índices tradicionais. Finalmente, a seção seis resume as principais conclusões deste estudo, com sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Índices de capacidade

O principal objetivo do estudo dos índices de capacidade é servir de base para tomadas de decisões na empresa, promovendo um guia estratégico para alavancar e refletir a qualidade do processo (JEANG E CHUNG, 2009). Os índices são medidas adimensionais usadas para quantificar a relação entre o desempenho do processo e os limites de especificação, sendo que esta quantificação é essencial para o sucesso de atividades de melhorias (WU *et al.*, 2009). Como regra geral, quanto maior for o valor dos índices, melhor o processo estará atendendo às especificações (COSTA *et al.*, 2005).

Os quatro índices básicos mais conhecidos e difundidos são: C_p , C_{pk} , C_{pm} e C_{pmk} , representados pelas equações (1), (2), (3) e (4), respectivamente (DELERYD, 1999; KOTZ E JONHSON, 2002). Estes índices são utilizados para os casos em que o valor alvo (T) é igual à metade do comprimento do intervalo de especificação (M) e para dados normalmente distribuídos.

$$\hat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}} \quad (1)$$

$$\hat{C}_{pk} = \min(\hat{C}_{pI}; \hat{C}_{pS}) \quad (2)$$

$$\hat{C}_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}} \quad (3)$$

$$\hat{C}_{pmk} = \min(\hat{C}_{pmI}; \hat{C}_{pmS}) \quad (4)$$

Nas equações (1), (2), (3) e (4), o limite superior de especificação, o limite inferior de especificação e o valor alvo do processo são representados, respectivamente, por LSE, LIE e T. A média é representada por \bar{y} e $\hat{\sigma}$ é o estimador do desvio padrão.

O índice C_p (índice de capacidade potencial) considera a variabilidade do processo sem considerar a localização da média, assim, muitas vezes não é aplicado, já que este não reflete o impacto que as alterações da média apresentam sobre a capacidade (PEARN E KOTZ, 2006). Como o índice C_p somente pode ser utilizado em processos com limites de especificação bilaterais, Kane (1986) apresenta os índices C_{pI} e C_{pS} para processos com limites de especificação unilaterais, que são utilizados para a avaliação de capacidade de processos com variáveis de resposta do tipo maior-é-melhor e menor-é-melhor, respectivamente, representados nas equações (5) e (6). Visando avaliar o impacto que as

alterações da média apresentam sobre a capacidade, Kane (1986) introduziu o índice C_{pk} (índice de capacidade efetivo), que avalia tanto a variabilidade quanto a centralização do processo. A aplicação dos índices C_p e C_{pk} em paralelo proporciona uma boa indicação da capacidade do processo em relação à média e variabilidade, entretanto, não consideram o valor alvo do processo (T).

$$\hat{C}_{pI} = \frac{\bar{y} - LIE}{3\hat{\sigma}} \quad (5)$$

$$\hat{C}_{pS} = \frac{LSE - \bar{y}}{3\hat{\sigma}} \quad (6)$$

Baseados na função quadrática de perda de Taguchi, Chan *et al.* (1988) e Pearn *et al.* (1992) introduziram os índices C_{pm} e C_{pmk} , respectivamente, que consideram tanto o desvio-padrão do processo quanto o quadrado da diferença entre a média do processo e o valor-alvo. De forma análoga aos índices C_{pI} e C_{pS} , Chan *et al.* (1988) apresentam os índices de capacidade unilaterais C_{pmI} e C_{pmS} , que devem ser utilizados para processos com variáveis de resposta do tipo menor-é-melhor e maior-é-melhor, respectivamente, representados pelas equações (7) e (8).

$$\hat{C}_{pmI} = \frac{\bar{y} - LIE}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}} \quad (7)$$

$$\hat{C}_{pmS} = \frac{LSE - \bar{y}}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}} \quad (8)$$

Quando a média do processo se afasta do valor alvo, o valor de C_{pmk} é mais sensível do que os valores dos índices C_p , C_{pk} e C_{pm} (CHANG, 2009). De acordo com Pearn *et al.* (1992), $C_{pmk} \leq C_{pm} \leq C_{pk} \leq C_p$ e, na igualdade entre estes quatro indicadores, o processo está centralizado. Se estes índices forem iguais e maiores que 1, o processo é capaz de atender às especificações (VÄNNMAN, 1995).

Os índices apresentados nas equações (1), (2), (3), (4) são utilizados para os casos em que o valor-alvo (T) é igual ao ponto médio dos limites de especificação (M). Entretanto, situações em que $T \neq M$ ocorrem frequentemente em processos produtivos (WU *et al.*, 2009). Estas situações indicam limites de especificação assimétricos, onde os desvios do alvo são menos toleráveis em uma direção do que na outra.

Kane (1986) adaptou os índices C_p , C_{pI} , C_{pS} e C_{pk} para limites assimétricos, representados por C_p^* , C_{pI}^* , C_{pS}^* e C_{pk}^* , apresentados nas equações (9), (10), (11) e (12), respectivamente.

$$\hat{C}_p^* = \frac{\min(LSE - T; T - LIE)}{3\hat{\sigma}} \quad (9)$$

$$\hat{C}_{pl}^* = \frac{T - LIE}{3\hat{\sigma}} \left(1 - \frac{|T - \bar{y}|}{T - LIE} \right) \quad (10)$$

$$\hat{C}_{ps}^* = \frac{LSE - T}{3\hat{\sigma}} \left(1 - \frac{|T - \bar{y}|}{LSE - T} \right) \quad (11)$$

$$\hat{C}_{pk}^* = \min(\hat{C}_{pl}^*, \hat{C}_{ps}^*) \quad (12)$$

Chan *et al.* (1988) apresentam o índice C_{pm}^* , que é uma generalização do índice C_{pm} para os processos com limites de especificação não-simétricos. Este índice é apresentado na equação (13). De acordo com Chan *et al.* (1988), este índice relaciona a menor diferença entre os limites de especificação e o valor-alvo do processo com a variabilidade e os desvios da média em relação ao alvo do processo.

$$\hat{C}_{pm}^* = \frac{\min(LSE - T; T - LIE)}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}} \quad (13)$$

Pearn *et al.* (1999) propuseram uma generalização do índice C_{pmk} para processos com limites de especificação assimétricos. Esta generalização é definida pela equação (14).

$$\hat{C}_{pmk}'' = \frac{d^* - A^*}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + A^2}} \quad (14)$$

onde:

$$A = \max(d(\bar{y}-T) / D_S; d(T-\bar{y}) / D_I)$$

$$A^* = \max(d^*(\bar{y}-T) / D_S; d^*(T-\bar{y}) / D_I)$$

$$D_S = LSE - T$$

$$D_I = T - LIE$$

$$d^* = \min(D_S; D_I)$$

$$d = (LSE - LIE) / 2$$

Dentre os estudos de índices de capacidade para limites de especificação assimétricos, destacam-se os trabalhos de Chen *et al.* (1999), Jessenberger e Weihs (2000), Pearn *et al.* (2005), Pearn *et al.* (2006), Chang e Wu (2008) e Chang (2009).

A aplicação de índices de capacidade para processos com limites de especificação simétricos em processos com limites assimétricos pode gerar conclusões errôneas. Esta mesma situação ocorre na aplicação dos índices apresentados em processos não-normais,

evidenciando a importância do conhecimento do comportamento e das características de cada processo produtivo. Assim, em processos não-normais, é necessário buscar alternativas que utilizem os índices de capacidade para as distribuições adequadas (GONÇALEZ E WERNER, 2009).

2.2. Gráficos de controle de regressão

Os gráficos de controle de regressão são utilizados quando a variável de resposta varia em função de frequentes alterações das variáveis de controle, não permitindo a aplicação de um gráfico de controle tradicional, que pressupõe que os dados sejam independentes e identicamente distribuídos em torno de uma média constante. O gráfico de regressão deve ser utilizado em processos em que o efeito de uma variável dependente é uma função linear de uma variável independente, dada por uma equação linear (JACOBI *et al.*, 2002; SHU *et al.*, 2004), já que as variáveis envolvidas no processo são correlacionadas e o controle individual dessas variáveis não é o mais indicado. Woodall e Montgomery (1999) apontam os gráficos de regressão como sendo uma das técnicas desenvolvidas na literatura com grande potencial de aplicação prática. Um dos objetivos destes gráficos é controlar a variação média da variável de resposta em função do ajuste das variáveis de controle, ao contrário dos gráficos de controle tradicionais, que monitoram a média.

Para isso, é necessário analisar a relação entre as características mensuradas com o objetivo de encontrar uma expressão quantitativa que indique estas relações. O modelo adequado deve permitir interpretar a situação, obter estimativas e realizar previsões. A aplicação da técnica de modelagem por regressão linear a um grupo de dados resulta na determinação de coeficientes lineares, ponderando o efeito de variáveis independentes sobre a variável dependente (FOGLIATTO, 2000). O modelo de regressão linear é apresentado na equação (15), representando a relação entre a variável dependente y e as k variáveis independentes X (MONTGOMERY *et al.*, 2001).

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (15)$$

onde:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Na equação (15), y é o vetor dos valores da variável de resposta, X é a matriz dos valores das n observações das k variáveis de controle, β é o vetor dos coeficientes de regressão, sendo que β_0 é chamado de coeficiente de intercepto (valor de y quando todas as variáveis de controle são iguais a zero). O vetor ε é estimado pelo vetor dos resíduos e , definido como a diferença entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo (\hat{y}), assumidos como independentemente distribuídos, com média zero e variância constante σ^2 . Estas suposições são importantes para validação do modelo estimado (NETER *et al.*, 2005). 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 (NETER *et al.*, 2005).

Segundo Woodal e Montgomery (1999), um método de aplicação dos gráficos de controle pode ser dividido em duas fases: (i) Fase I (análise retrospectiva) que contempla a estimação dos parâmetros e (ii) Fase II que contempla o monitoramento do processo. Uma vez estimado o modelo, deve-se construir o gráfico de controle de regressão para a Fase I. Para a construção do gráfico, o limite de controle superior, a linha central e o limite de controle inferior são dados pelas equações (16), (17) e (18), respectivamente (PEDRINI E CATEN, 2011).

$$LSC_i = \hat{y}_i + L\sqrt{QMR} \quad (16)$$

$$LC_i = \hat{y}_i \quad (17)$$

$$LIC_i = \hat{y}_i - L\sqrt{QMR} \quad (18)$$

Onde L é um valor constante determinado conforme a sensibilidade e número de alarmes falsos desejados para o gráfico, na maioria dos casos, adota-se 2 ou 3. Mandel (1969) adotou 2 desvios-padrão como critério. A estimativa da variância dos resíduos do modelo de regressão é dada pelo quadrado médio dos resíduos (QMR), apresentado na equação (19).

$$QMR = \frac{e'e}{n-p} = \frac{SQR}{n-p} \quad (19)$$

onde $e = y - \hat{y}$ e $p = k + 1$

Com o processo sob controle na Fase I, desenvolve-se o gráfico de regressão da Fase II. É necessário assumir que os dados do processo a ser monitorado apresentam o mesmo comportamento dos dados utilizados na Fase I. A coleta de dados para o monitoramento deve

conter a variável de resposta monitorada e os respectivos valores das variáveis de controle do processo e devem ser coletadas em intervalos de tempos regulares.

A proposta de Pedrini e Caten (2011) apresenta uma modificação do gráfico de controle baseado em modelos de regressão proposto por Haworth (1996), permitindo o monitoramento direto das observações referentes a uma variável de resposta dependente de uma ou mais variáveis de controle, ao invés do monitoramento dos resíduos da regressão. Para a construção do gráfico de controle da Fase II é preciso corrigir os limites de controle da Fase I, já que se trata de amostras diferentes. De acordo com a proposta de Pedrini e Caten (2011), o limite de controle superior, a linha central e o limite de controle inferior são calculados a partir das equações (20), (21) e (22), respectivamente.

$$LSC_i = \hat{y}_i + 3\sqrt{QMR(1 + h_{ii})} \quad (20)$$

$$LC_i = \hat{y}_i \quad (21)$$

$$LIC_i = \hat{y}_i - 3\sqrt{QMR(1 + h_{ii})} \quad (22)$$

onde $h_{ii} = \mathbf{x}'_i(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{x}_i$ e \mathbf{x}_i é o vetor das variáveis de controle da i -ésima nova observação.

O elemento h_{ii} é utilizado como um fator de correção do desvio-padrão da predição de uma nova observação, já que mede o distanciamento do vetor de variáveis de controle em relação ao vetor composto pelo valor médio de cada variável de controle.

Se um ponto não se encontra sob controle (acima ou abaixo dos limites superior e inferior), o processo é considerado fora de controle estatístico, sendo que as causas especiais devem ser investigadas e tomadas ações de melhoria.

Uma evolução dos principais trabalhos sobre gráficos de controle de regressão é apresentada na Figura 1. Loredó *et al.* (2002) aplicaram o gráfico de medidas individuais para os resíduos de um modelo de regressão linear múltipla e Shu *et al.* (2004) propuseram o gráfico EWMAREG, que consiste basicamente no monitoramento dos resíduos padronizados do modelo de regressão com um gráfico de controle EWMA. Os gráficos de controle propostos por Haworth (1996), Loredó *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). Uma revisão sobre gráficos de controle de regressão pode ser encontrada em Shu *et al.* (2007).

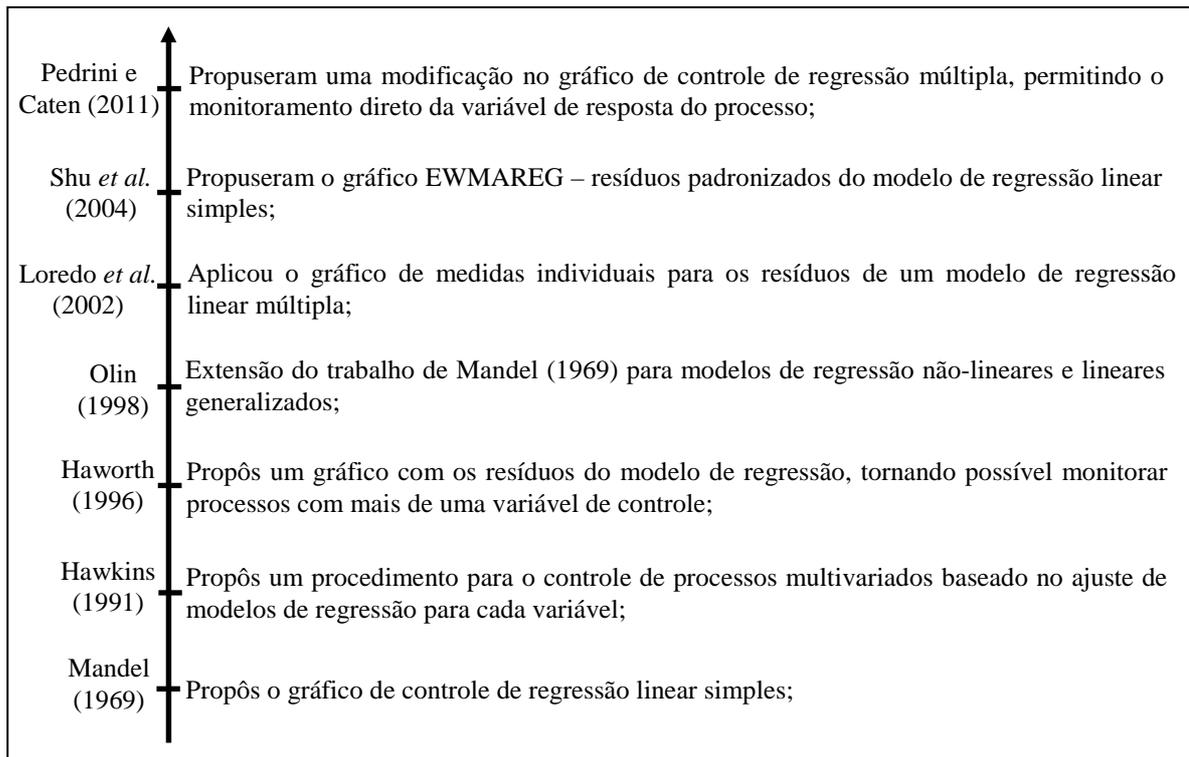


Figura 1 – Evolução dos estudos referentes aos gráficos de controle baseados em modelos de regressão.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente artigo envolveu três etapas: (i) proposta de índices de capacidade para gráficos de controle baseados em modelos de regressão (GR); (ii) desenvolvimento do gráfico de regressão para um processo com dados aleatórios; e (iii) comparação dos índices propostos com os índices tradicionais.

A primeira etapa envolveu a proposta dos índices de capacidade GR, visto que as aplicações de índices de capacidade tradicionais em processos monitorados com gráficos de controle de regressão podem gerar conclusões errôneas em relação a capacidade do processo em produzir itens não conformes às especificações.

Para a proposição dos índices de capacidade GR, partiu-se da suposição que o valor alvo do processo e os limites de controle superior e inferior nos gráficos de controle de regressão não são valores constantes como nos gráficos de controle tradicionais, mas sim, valores definidos de acordo com o ajuste das variáveis de controle. Os índices propostos consideraram processos com limites de especificação simétricos, representados por C_{pR} , C_{pkR} , C_{pmR} e C_{pmkR} , e processos com limites de especificação assimétricos, representados por C_{pR}^* , C_{pkR}^* , C_{pmR}^* e C_{pmkR}^* .

A segunda etapa contemplou o desenvolvimento do gráfico de controle de regressão para um processo com dados aleatórios baseado no método proposto por Pedrini e Caten (2011), que contempla a Fase I de coleta de dados, ajuste do modelo de regressão e cálculo dos limites de controle do gráfico da Fase I; e a Fase II para monitoramento do processo, com o objetivo de identificar e eliminar as causas especiais resultantes de falhas na operação do mesmo. Na Fase II são coletados novos dados do processo e, desenvolve-se o gráfico de controle de monitoramento, de acordo com o modelo validado na Fase I.

A terceira etapa envolveu a aplicação dos índices GR e dos índices tradicionais através da aplicação dos mesmos no processo simulado. Uma vez que o processo esteja estável, realiza-se o cálculo dos índices de capacidade GR utilizando-se o desvio-padrão calculado pela equação (23).

$$\hat{\sigma}_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (23)$$

Como trata-se do cálculo dos resíduos de um novo conjunto de dados descontando-se o valor estimado por um modelo de regressão cujos parâmetros foram calculados com os dados da Fase I, não é necessário descontar os graus de liberdade p no denominador, justificando, assim, a equação (23).

As etapas do método de trabalho, contemplando o desenvolvimento do gráfico de controle de regressão baseado no método de Pedrini e Caten (2011) e o cálculo dos índices GR, são apresentadas resumidamente na Figura 2.

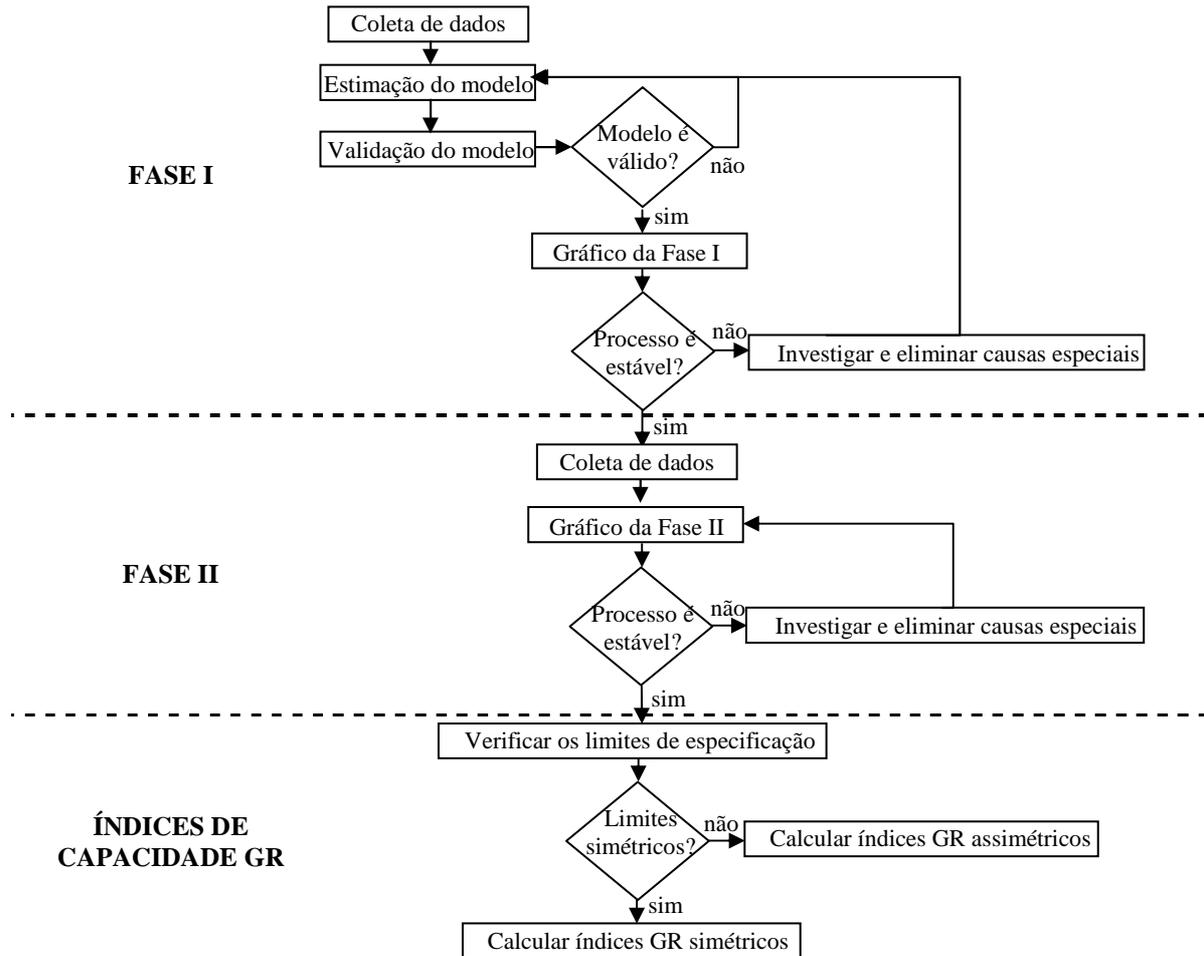


Figura 2 – Método para construção dos gráficos de regressão e cálculo dos índices de capacidade.

4. PROPOSTA DE ÍNDICES DE CAPACIDADE PARA GRÁFICOS DE CONTROLE BASEADOS EM MODELOS DE REGRESSÃO

Para o desenvolvimento dos índices de capacidade GR, foi necessária a definição de algumas premissas. O valor alvo do processo (T) nos gráficos de controle de regressão não é um valor constante como nos gráficos de controle tradicionais, mas sim um valor definido de acordo com o ajuste das variáveis de controle, conforme equação (24). O mesmo ocorre para o limite superior de especificação (LSE) e para o limite inferior de especificação (LIE), que são calculados pelas equações (25) e (26). Os limites de especificação superior e inferior assim como o valor alvo, geralmente são propostos pela gerência ou clientes a partir das necessidades e análises do produto e/ou processo.

$$T_i = b_{0T} + b_{1T}x_{1i} + b_{2T}x_{2i} + \dots + b_{kT}x_{ki} \quad (24)$$

$$LSE_i = b_{0S} + b_{1S}x_{1i} + b_{2S}x_{2i} + \dots + b_{kS}x_{ki} \quad (25)$$

$$LIE_i = b_{0I} + b_{1I}x_{1i} + b_{2I}x_{2i} + \dots + b_{kI}x_{ki} \quad (26)$$

onde: $i = 1, 2, \dots, n$

As constantes de intercepto do alvo, do limite superior e do limite inferior são representadas por b_{0T} , b_{0S} e b_{0I} , respectivamente. Na maioria dos casos, admite-se que o T, LSE e LIE são paralelos, logo, $b_{jT} = b_{jI} = b_{jS} = b_k$. A única diferença corresponde às constantes de intercepto, onde $b_{0I} < b_{0T} < b_{0S}$, conforme mostra a Figura 3.

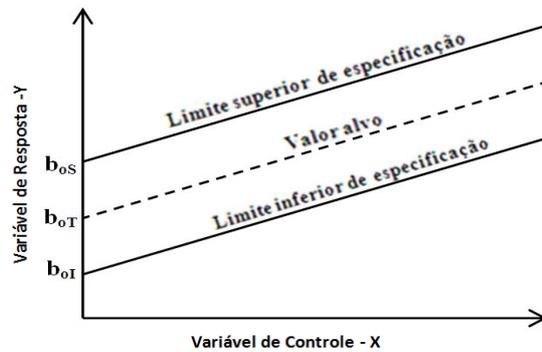


Figura 3 – Identificação dos limites de especificações e constantes de intercepto.

4.1. Índices de capacidade GR para processos com limites de especificação simétricos

Considerando que os limites de especificação variem de acordo com o ajuste das variáveis de controle e admitindo-se que LSE_i e LIE_i podem ser representados pelas equações (25) e (26), o numerador da equação do índice C_p tradicional é reescrito conforme equação (27).

$$LSE - LIE = \frac{\sum_{i=1}^n LSE_i - LIE_i}{n} \quad (27)$$

O número de amostras é dado por n . Para simplificação, assume-se que estes limites de especificação são paralelos, logo, $LSE_i - LIE_i$ é igual a $b_{0S} - b_{0I}$. Assim, de acordo com esta igualdade, a diferença entre $LSE_i - LIE_i$ é sempre um valor constante. Utilizando este resultado e a propriedade de somatório de constantes, obtém-se a equação (28).

$$\frac{\sum_{i=1}^n LSE_i - LIE_i}{n} = \frac{n(b_{0S} - b_{0I})}{n} = b_{0S} - b_{0I} \quad (28)$$

O índice de capacidade potencial C_{pR} para os gráficos de controle de regressão é apresentado na equação (29), obtido com a substituição da equação (28) na equação (1) e utilizando o desvio padrão estimado $\hat{\sigma}_R$ mostrado na equação (23).

$$\hat{C}_{pR} = \frac{b_{0S} - b_{0I}}{6\hat{\sigma}_R} \quad (29)$$

Similarmente, a adaptação do índice de capacidade efetiva C_{pk} para os gráficos de controle baseados em modelos de regressão é elaborada através da modificação do numerador

do índice de capacidade inferior (C_{pI}) e do numerador do índice de capacidade superior (C_{pS}), conforme equações (30) e (31).

$$\bar{y} - LIE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - LIE_i)}{n} \quad (30)$$

$$LSE - \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n (LSE_i - y_i)}{n} \quad (31)$$

A substituição das equações (30) e (31) nas equações dos índices C_{pI} e C_{pS} tradicionais apresentados nas equações (5) e (6), resultam no índice de capacidade efetiva C_{pkR} para os gráficos de controle baseados em modelos de regressão. Os índices C_{pIR} , C_{pSR} e C_{pkR} estão apresentados nas equações (32), (33) e (34), respectivamente.

$$\hat{C}_{pIR} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - LIE_i)}{3n\hat{\sigma}_R} \quad (32)$$

$$\hat{C}_{pSR} = \frac{\sum_{i=1}^n (LSE_i - y_i)}{3n\hat{\sigma}_R} \quad (33)$$

$$\hat{C}_{pkR} = \min(\hat{C}_{pIR}, \hat{C}_{pSR}) \quad (34)$$

Como já mencionado anteriormente, os índices C_{pm} , C_{pmI} e C_{pmS} tradicionais levam em consideração o valor alvo do processo. Os denominadores destes índices, representados pelas equações (3), (7) e (8) respectivamente, são obtidos a partir da função perda quadrática de Taguchi, onde o valor alvo do processo é constante, como mostra a equação (35). Entretanto, para os processos monitorados por gráficos de controle baseado em modelos de regressão, o alvo varia em função das variáveis de controle. Assim, a variância é calculada conforme equação (36).

$$\sigma'^2 = E(y_i - T_i)^2 = \hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2 \quad (35)$$

$$\sigma'^2 = E(y_i - T_i)^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n} \quad (36)$$

Com a substituição das equações (28) e (36) na equação (3) do índice de capacidade C_{pm} , obtém-se o índice de capacidade C_{pmR} . Similarmente, a substituição das equações (30), (31) e (36) nas equações (7) e (8) origina os índices C_{pmIR} e C_{pmSR} . Os índices de capacidade aplicados para gráficos de controle baseados em modelos de regressão C_{pmR} , C_{pmIR} , C_{pmSR} e C_{pmkR} são apresentados nas equações (37), (38), (39) e (40).

$$\hat{C}_{pmR} = \frac{b_{0S} - b_{0I}}{6\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}} \quad (37)$$

$$\hat{C}_{pmIR} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - LIE_i)}{3n\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}} \quad (38)$$

$$\hat{C}_{pmSR} = \frac{\sum_{i=1}^n (LSE_i - y_i)}{3n\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}} \quad (39)$$

$$\hat{C}_{pmkR} = \min(\hat{C}_{pmIR}, \hat{C}_{pmSR}) \quad (40)$$

4.2. Índices de capacidade GR para processos com limites de especificação assimétricos

A proposta de índices de capacidade para limites assimétricos, ou seja, $T \neq M$, segue o mesmo raciocínio dos índices propostos para tolerâncias simétricas.

A adaptação dos índices C_p^* , C_{pI}^* e C_{pS}^* para os gráficos de controle baseados em modelos de regressão é elaborada através da modificação do numerador, conforme equações (41), (42) e (43).

$$T - LIE = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - LIE_i)}{n} = b_{0T} - b_{0I} \quad (41)$$

$$LSE - T = \frac{\sum_{i=1}^n (LSE_i - T_i)}{n} = b_{0S} - b_{0T} \quad (42)$$

$$T - \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - y_i)}{n} \quad (43)$$

Com a substituição das equações (41), (42) e (43) nas equações (9), (10), (11) e (12), obtém-se os índices de capacidade GR, representados por C_{pR}^* , C_{pIR}^* , C_{pSR}^* e C_{pkR}^* para limites de especificação assimétricos, de acordo com as equações (44), (45), (46) e (47), respectivamente.

$$\hat{C}_{pR}^* = \frac{\min(b_{0S} - b_{0T}; b_{0T} - b_{0I})}{3\hat{\sigma}_R} \quad (44)$$

$$\hat{C}_{pIR}^* = \frac{b_{0T} - b_{0I}}{3\hat{\sigma}_R} \left(1 - \frac{|\sum_{i=1}^n (T_i - y_i)|}{n(b_{0T} - b_{0I})} \right) \quad (45)$$

$$\hat{C}_{pSR}^* = \frac{b_{0S} - b_{0T}}{3\hat{\sigma}_R} \left(1 - \frac{|\sum_{i=1}^n (T_i - y_i)|}{n(b_{0S} - b_{0T})} \right) \quad (46)$$

$$\hat{C}_{pkR}^* = \min(\hat{C}_{pIR}^*; \hat{C}_{pSR}^*) \quad (47)$$

Com a substituição das equações (36), (41) e (42) na equação (13) do índice de capacidade tradicional C_{pm}^* para limites assimétricos, obtém-se o índice de capacidade C_{pmR}^* , representado na equação (48).

$$\hat{C}_{pmR}^* = \frac{\min(b_{0S} - b_{0T}; b_{0T} - b_{0I})}{3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}} \quad (48)$$

Para o índice C_{pmkR}^* para limites de especificação assimétricos, os elementos da equação (14) foram modificados, representados pelas equações (49) e (50). O índice C_{pmkR}^* é apresentado na equação (51).

$$A_R = \max \left[d_R \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)}{nD_{SR}} \right); d_R \left(\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - y_i)}{nD_{IR}} \right) \right] \quad (49)$$

$$A_R^* = \max \left[d_R^* \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)}{nD_{SR}} \right); d_R^* \left(\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - y_i)}{nD_{IR}} \right) \right] \quad (50)$$

$$\hat{C}_{pmkR}^* = \frac{d_R^* - A_R^*}{3\sqrt{\hat{\sigma}_R^2 + A_R^2}} \quad (51)$$

Onde:

$$D_{SR} = b_{0S} - b_{0T}$$

$$D_{IR} = b_{0T} - b_{0I}$$

$$d_R^* = \min(D_{SR}; D_{IR})$$

$$d_R = (b_{0S} - b_{0I})/2$$

5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ÍNDICES DE CAPACIDADE TRADICIONAIS E ÍNDICES DE CAPACIDADE GR

O processo estudado 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 baseados em modelos de regressão. Na Fase I, o modelo de regressão estimado apresentado na equação (52) foi baseado em um projeto de experimentos, apresentando um QMR = 70,06 e um coeficiente de determinação R^2 de 85,2%. Neste modelo, as interações não foram incluídas, já que apresentaram valores-p maiores que o nível de significância adotado (0,05).

$$\hat{y}_i = 89,84 + 9,49x_1 - 5,13x_2 - 6,48x_3 + 12,59x_4 - 7,94x_1^2 \quad (52)$$

Com as suposições de validade do modelo apresentadas no método de Pedrini e Caten (2011), desenvolve-se o gráfico de controle baseado em modelos de regressão para a Fase II de monitoramento do processo contemplando 100 novas amostras, apresentadas no Apêndice. A Figura 4 apresenta o gráfico de controle da Fase II.

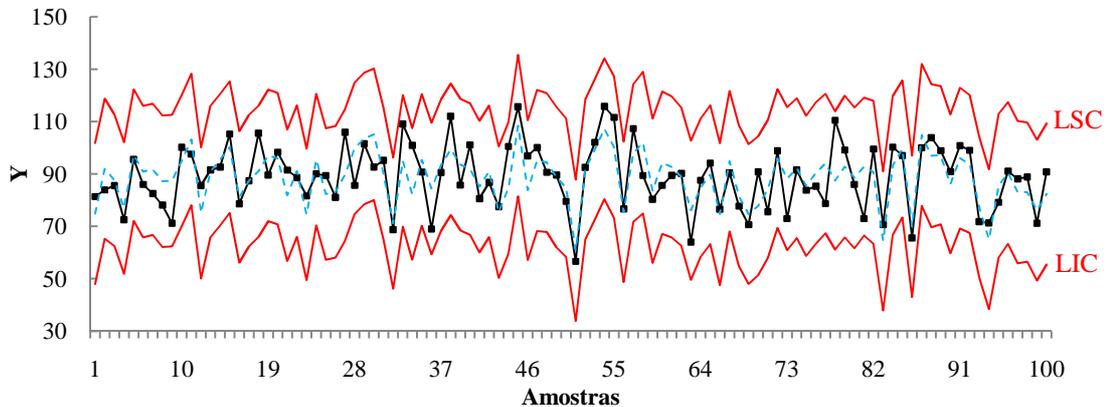


Figura 4 – Gráfico de controle baseado em modelos de regressão para o monitoramento do processo.

O gráfico de controle apresentado na Figura 4 encontra-se sob controle estatístico, já que o mesmo não indicou amostras fora da região definida pelos limites de controle. Desta forma, é possível realizar a análise da capacidade do processo. O desvio padrão para o cálculo dos índices de capacidade será obtido através da equação (23).

Para o cálculo dos índices de capacidade, considerou-se: (i) limites de especificação simétricos; e (ii) limites de especificação assimétricos.

Para o cálculo dos índices de capacidade tradicionais simétricos, considerou-se que LSE, LIE e T valem respectivamente, 160, 50 e 105. Para os cálculos dos índices GR simétricos, os limites de especificação e valor alvo variam de acordo com as variáveis de controle conforme equações (53), (54) e (55).

$$LSE_i = 160,00 + 9,49x_1 - 5,13x_2 - 6,48x_3 + 12,59x_4 - 7,94x_1^2 \quad (53)$$

$$LIE_i = 50,00 + 9,49x_1 - 5,13x_2 - 6,48x_3 + 12,59x_4 - 7,94x_1^2 \quad (54)$$

$$T_i = 105,00 + 9,49x_1 - 5,13x_2 - 6,48x_3 + 12,59x_4 - 7,94x_1^2 \quad (55)$$

Para a aplicação dos índices tradicionais assimétricos definiu-se o valor alvo do processo $T = 80$, sendo considerados os mesmos valores para os LSE e LIE. Para o cálculo dos índices GR assimétricos, definiu-se T conforme a equação (56), sendo considerados as mesmas equações (53) e (54) para os LSE e LIE.

$$T_i = 80,00 + 9,49x_1 - 5,13x_2 - 6,48x_3 + 12,59x_4 - 7,94x_1^2 \quad (56)$$

Para o cálculo dos índices tradicionais simétricos ($T=M$) apresentados na Tabela 1, utilizaram-se as equações (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) e (8) e para os índices GR simétricos, as equações (29), (32), (33), (34), (37), (38), (39) e (40). Para os índices tradicionais assimétricos ($T \neq M$) apresentados na Tabela 2, utilizaram-se as equações (9), (10), (11), (12), (13) e (14) e para os índices GR assimétricos, as equações (44), (45), (46), (47), (48) e (51). Os cálculos dos índices estão apresentados no Apêndice. A Figura 5 apresenta a comparação dos índices para limites simétricos e assimétricos, visando ilustrar a comparação.

Tabela 1 – Índices de capacidade tradicionais e índices GR para gráficos de controle baseados em modelos de regressão considerando limites de especificação simétricos ($T=M$).

Índices de especificação simétricos	Índices tradicionais	\hat{C}_p	\hat{C}_{pI}	\hat{C}_{pS}	\hat{C}_{pk}	\hat{C}_{pm}	\hat{C}_{pmk}
		1,47	1,04	1,89	1,04	0,91	0,64
Índices GR		\hat{C}_{pR}	\hat{C}_{pIR}	\hat{C}_{pSR}	\hat{C}_{pkR}	\hat{C}_{pmR}	\hat{C}_{pmkR}
		2,22	1,50	2,95	1,50	0,83	0,56

Tabela 2 – Índices de capacidade tradicionais e índices GR para gráficos de controle baseados em modelos de regressão considerando limites de especificação assimétricos ($T \neq M$).

Índices de especificação assimétricos	Índices tradicionais	\hat{C}_p^*	\hat{C}_{pI}^*	\hat{C}_{pS}^*	\hat{C}_{pk}^*	\hat{C}_{pm}^*	$\hat{C}_{pmk}''^*$
		0,80	0,56	1,89	0,56	0,65	0,64
Índices GR		\hat{C}_{pR}^*	\hat{C}_{pIR}^*	\hat{C}_{pSR}^*	\hat{C}_{pkR}^*	\hat{C}_{pmR}^*	\hat{C}_{pmkR}^*
		1,21	1,07	3,09	1,07	0,71	0,83

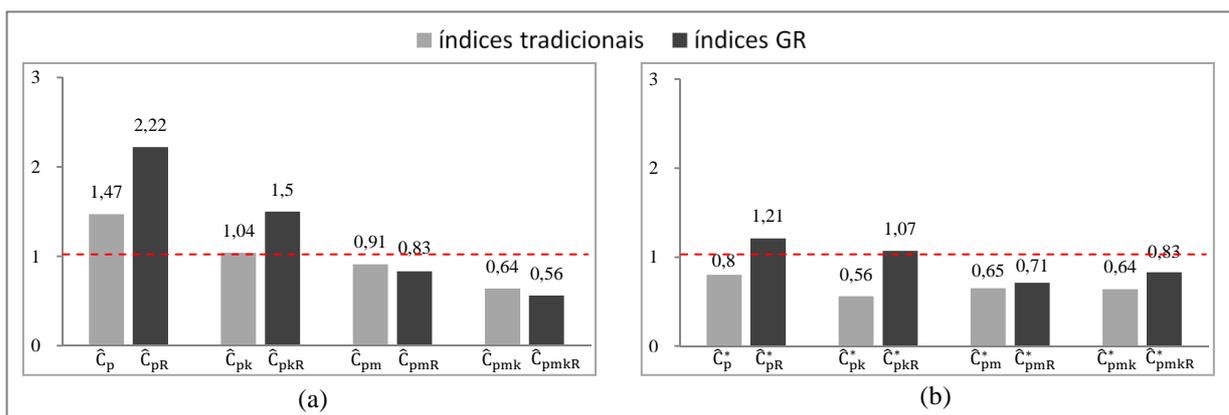


Figura 5 – (a) Comparação dos índices de capacidade tradicionais e GR para limites simétricos; e (b) Comparação dos índices de capacidade tradicionais e GR para limites assimétricos.

Observa-se pela Tabela 1 e Figura 5a que o índice C_p apresentou um valor de 1,47, inferior ao valor encontrado para o índice C_{pR} , de 2,22, indicando um processo com ótima

capacidade de atender às especificações. O índice C_{pkR} também apresentou um valor superior ao índice tradicional C_{pk} . Nota-se que os valores obtidos para C_{pI} e C_{pIR} indicam que o processo está com a média (89,5) mais próxima do limite inferior de especificação, já que os valores obtidos foram inferiores, se comparados aos índices C_{pS} e C_{pSR} . O índice C_{pkR} apresentou um valor de 1,50, indicando que o processo é capaz. Entretanto, este poderá aumentar sua capacidade através de sua centralização, já que o índice de capacidade potencial C_{pR} indica uma capacidade de 2,22. Os índices C_{pm} e C_{pmk} , assim como os índices C_{pmR} e C_{pmkR} , indicam o processo como não-capaz, pois não está atingindo o alvo T.

Segundo a Tabela 2 e Figura 5b, o índice de capacidade C_p^* apresentou um valor de 0,80 indicando que o processo é potencialmente não capaz. Entretanto, o índice C_{pR}^* apresentou um valor de 1,21, sendo o processo potencialmente capaz. A mesma situação acontece para os índices C_{pk}^* (0,56) e C_{pkR}^* (1,07). Os índices C_{pmR}^* e C_{pmkR}^* apresentam valores baixos, indicando o processo como não capaz de atingir o alvo T, apresentando comportamento semelhante aos mesmos índices para limites simétricos apresentados na Tabela 1.

Portanto, observa-se que os índices tradicionais empregados em processos monitorados com gráficos de controle baseados em modelos de regressão podem induzir a conclusões errôneas. Neste contexto, ressalta-se a importância de se aplicar corretamente os índices de capacidade de acordo com o tipo de gráfico de controle utilizado para o monitoramento do processo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivos: (i) propor índices de capacidade GR para gráficos de controle baseados em modelos de regressão, contemplando especificações simétricas e assimétricas; e (ii) comparar os índices de capacidade GR com os índices de capacidade tradicionais através da aplicação dos mesmos em um processo simulado.

Os índices de capacidade GR propostos assumem que os limites de especificação não são fixos, mas variam em função do ajuste das variáveis de controle. Baseado nesta suposição, foram realizadas adaptações nos índices de capacidade tradicionais e propostos os índices C_{pR} , C_{pkR} , C_{pmR} e C_{pmkR} para especificações simétricas e os índices C_{pR}^* , C_{pkR}^* , C_{pmR}^* e C_{pmkR}^* para especificações assimétricas.

Foram realizadas comparações entre os valores dos índices tradicionais e dos índices GR propostos através da aplicação dos mesmos em um processo com dados aleatórios. A utilização de índices mal empregados pode gerar conclusões errôneas, comprometendo o estudo e análise do processo, prejudicando o atendimento de exigências gerenciais ou de clientes externos.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a aplicação dos índices GR em processos produtivos, incluindo as etapas de estimação do gráfico de controle baseados em modelos de regressão. Recomenda-se também o desenvolvimento de um fluxograma com o objetivo de guiar as escolhas dos índices de capacidade de acordo com as características de cada processo.

REFERÊNCIAS

1. Chan, L.K., Cheng, S.W. & Spiring, F.A. (1988). A new measure of process capability: C_{pm} . *Journal of Quality Technology*, **20**, 162-175.
2. Chang, Y.C. (2009). Interval estimation of capability index C_{pmk} for manufacturing processes with asymmetric tolerances. *Computers & Industrial Engineering*, **56**, 312-322.
3. Chang, Y.C., Wu, C.W. (2008). Assessing process capability based on the lower confidence bound of C_{pk} for asymmetric tolerances. *European Journal of Operational Research*, **190**, 205–227.
4. Chen, K.S., Pearn, W.L., Lin, P.C. (1999). A new generalization of the capability index C_{pm} for asymmetric tolerances. *International Journal of Reliability, Quality & Safety Engineering*, **6**, 383–398.
5. Costa, A.F.B.; Epprecht, E. K.; Carpinetti, L. C. R. (2005). *Controle Estatístico de Qualidade*. São Paulo: Editora Atlas, 2ª Edição, 334 p.
6. Deleryd, M. (1999). A pragmatic view on process capability studies. *International Journal of Production Economics*, **58**, 319-330.
7. Fogliatto, F.S. (2000). Estratégias para modelagem de dados multivariados na presença de correlação. *Gestão & Produção*, **7**, 17-28.
8. Gonzalez, P.U. & Werner, L. (2009). Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais. *Gestão & Produção*, **16**, 121-132.
9. Hawkins, D.M. (1991). Multivariate Quality Control Based on Regression-Adjusted Variables. *Technometrics*, **33**, 61-75.
10. Haworth, D.A. (1996). Regression control charts to manage software maintenance. *Software Maintenance: Research and Practice*, **8**, 35-48.
11. Jacobi, L.F., Souza, A.M. & Pereira, J.E.S. (2002). Gráfico de Controle de Regressão Aplicado na Monitoração de Processos. *Revista Produção*, **12**, 46-59.
12. Jeang, A. & Chung, C.P. (2009). Process capability analysis based on minimum production cost and quality loss. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **43**, 710-719.
13. Jessenberger, J. & Weihs, C. (2000). A note on the behavior of C_{pmk} with asymmetric specification limits. *Journal of Quality Technology*, **36**, 329-335.
14. Kane, V.E. (1986). Process Capability Indices. *Journal of Quality Technology*, **18**, 41-52.
15. Kotz, S. & Johnson, N.L. (2002). Process capability indices – a review, 1992-2000. *Journal of Quality Technology*, **34**, 2-19.

16. Loredó, E.N., Jerkpaorn, D. & Borrór, C.M. (2002). Model-based Control Chart for Autoregressive and Correlated Data. *Quality and Reliability Engineering International*, **18**, 489-496.
17. Mandel, B.J. (1969). The Regression Control Chart. *Journal of Quality Technology*., **1**, 1-9.
18. Montgomery, D.C. (2004). *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 513 p.
19. Montgomery, D.C., Vining, G.G. & Peck, E.A. (2001). *Introduction to linear regression analysis*. 3. Ed., New York: John Wiley & Sons, 641 p.
20. Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. & Li, W. (2005), *Applied Linear Statistical Models*. 5. Ed. New York: Mc Graw-Hill/Irwin, 1396 p.
21. Olin, B.D. (1998). Regression Control Charts Revisited: Methodology and Cases Studies. In: *Annual Fall Technical Conference, 42°*, New York: American Society for Quality, 17 p.
22. Pearn W.L., Wu, C.W. & Wang, K.H. (2005). Capability measure for asymmetric tolerance non-normal processes applied to speaker driver manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **25**, 506-515.
23. Pearn, W.L. & Kotz, S. (2006). Encyclopedia And Handbook of Process Capability Indices: A Comprehensive Exposition of Quality Control Measures. *Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics*, 12.
24. Pearn, W.L., Chen, K.S. & Lin, P.C. (1999). On the generalizations of the capability index C_{pmk} for asymmetric tolerances. *Far East Journal of Theoretical Statistics*, **3**, 47-66.
25. Pearn, W.L., Kotz, S. & Johnson, N.L. (1992). Distributional and inferential properties of process control indices. *Journal of Quality Technology*, **24**, 216-231.
26. Pearn, W.L., Lin, P.C., Chang, Y.C. & Wu, C.W. (2006). Quality yield measure for processes with asymmetric tolerances. *IIE Transactions*, **38**, 619-633.
27. Pedrini, D.C. & Caten, C.S. (2011). Método para a Aplicação de Gráficos de Controle de Regressão no Monitoramento de Processos. *Revista Produção*. Em publicação.
28. Shu, L., Tsui, K. L. & Tsung, F. (2007). 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, 1569-1573.
29. Shu, L., Tsung, F. & Tsui, K.L. (2004). Run-length Performance of Regression Control Charts with Estimated Parameters. *Journal of Quality Technology*, **36**, 280-292.
30. Vännman, K. (1995). A Unified Approach to Capability Indices. *Statistica Sinica*, **5**, 805-820.
31. Woodall, W.H. (2000). Controversies and Contradictions in Statistical Process Control. *Journal of Quality Technology*, **32**, 341-350.
32. Woodall, W.H., Montgomery, D.C. (1999). Research issues and ideas in statistical process control. *Journal of Quality Technology*, **31**, 376-386, 1999.
33. Wu, C.W., Pearn, W.L. & Kotz, S. (2009). An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. *International Journal of Production Economics*, **117**, 338-359.

Apêndice

A Tabela 3 apresenta o banco de dados em que foram aplicados os índices de capacidade.

Tabela 3 – Banco de dados

	x_1	x_2	x_3	x_4	y	\hat{y}		x_1	x_2	x_3	x_4	y	\hat{y}
1	37,30	4,29	16,46	122,64	81,39	74,92	51	27,91	7,62	15,80	109,15	56,66	60,81
2	58,36	6,42	14,55	231,48	83,95	92,04	52	109,60	4,35	14,71	134,58	92,56	91,84
3	83,93	5,21	9,89	104,06	85,63	87,59	53	73,75	6,60	1,70	198,65	102,11	99,55
4	51,28	6,76	12,81	127,82	72,54	76,98	54	82,02	4,91	7,83	245,68	115,80	107,27
5	81,21	5,73	4,55	167,19	95,61	97,29	55	68,52	4,65	4,75	189,35	111,64	100,31
6	120,32	4,47	14,83	135,21	86,00	90,85	56	31,09	5,73	11,77	154,80	76,70	75,52
7	103,10	5,39	8,76	124,50	82,51	91,81	57	104,79	4,04	15,90	182,64	107,37	97,99
8	76,23	4,98	7,79	95,70	78,13	87,30	58	96,26	7,99	2,17	225,85	89,45	101,96
9	136,10	7,59	15,25	192,94	71,19	87,52	59	114,47	4,59	19,79	101,93	80,36	83,60
10	85,96	5,58	13,09	185,74	100,27	95,10	60	57,55	6,82	0,55	187,39	85,64	94,29
11	88,36	5,28	12,94	240,95	97,60	103,20	61	55,00	5,89	6,60	193,68	89,47	92,75
12	38,24	6,57	12,48	146,83	85,61	75,11	62	109,61	5,11	16,85	138,27	90,25	88,98
13	70,06	2,77	19,07	147,55	91,56	90,91	63	36,86	6,28	10,52	144,12	64,04	76,18
14	78,14	5,75	6,77	168,00	92,66	95,40	64	78,99	6,64	9,66	115,28	87,62	84,76
15	102,75	4,47	4,13	148,70	105,27	100,23	65	97,57	7,33	11,25	161,55	94,19	89,75
16	116,90	6,26	10,57	71,02	78,65	81,24	66	107,62	6,58	17,24	55,95	76,56	74,64
17	73,86	4,56	18,84	149,14	87,45	87,49	67	41,50	5,78	6,21	245,21	90,53	94,92
18	70,86	4,75	15,44	169,02	105,62	91,08	68	110,28	6,82	19,29	128,00	77,72	81,69
19	97,74	5,63	14,68	203,47	89,65	97,16	69	35,73	4,61	9,34	96,15	70,64	74,69
20	102,00	5,90	-0,34	120,64	98,34	95,90	70	37,13	5,21	5,13	107,42	90,85	77,91
21	110,01	4,87	14,90	66,90	91,51	81,86	71	72,59	6,28	12,20	127,30	75,60	84,36
22	121,22	3,79	4,41	70,63	88,65	91,12	72	108,04	4,58	9,53	145,12	98,90	95,98
23	50,39	7,00	13,79	120,88	81,65	74,55	73	122,42	5,95	3,03	85,39	72,99	88,22
24	103,74	4,95	9,68	149,49	90,08	95,50	74	86,49	4,62	1,26	82,06	91,58	92,25
25	41,90	3,50	12,16	128,59	89,42	82,40	75	120,21	4,93	12,39	89,59	83,82	85,52
26	53,77	5,00	17,68	160,14	81,11	83,23	76	68,56	5,04	3,63	112,05	85,39	90,31
27	104,13	6,06	9,56	124,05	105,99	89,53	77	113,65	5,17	19,74	195,72	78,69	94,01
28	72,41	5,16	4,99	190,11	85,65	99,79	78	118,52	6,24	4,25	89,19	110,54	87,55
29	66,08	4,36	7,77	229,79	101,55	103,60	79	86,24	5,09	12,21	153,43	99,18	92,90
30	87,40	4,20	6,06	199,58	92,65	105,12	80	66,35	7,04	17,69	215,56	86,02	88,56
31	81,98	5,06	5,27	99,07	95,26	90,07	81	68,01	6,02	16,82	221,09	72,98	92,83
32	40,59	5,76	20,90	135,03	68,74	71,21	82	110,51	5,19	13,55	136,57	99,57	90,67
33	64,27	5,83	11,83	216,82	109,09	95,09	83	51,51	6,42	19,20	53,60	70,70	64,46
34	118,10	6,07	14,94	99,60	100,95	82,39	84	61,48	6,53	3,46	179,41	100,28	93,27
35	98,71	4,81	4,40	119,25	90,78	95,35	85	116,63	5,43	12,01	207,37	97,08	99,61
36	83,76	5,25	13,28	97,20	68,99	84,42	86	43,03	4,71	12,40	52,24	65,64	69,98
37	78,98	3,10	6,20	94,88	90,58	93,51	87	121,70	4,31	2,54	181,92	100,03	104,97
38	100,72	5,45	5,09	167,86	112,02	99,47	88	78,04	7,99	8,51	235,31	103,89	96,98
39	118,20	3,52	11,90	120,69	85,76	93,56	89	95,85	5,05	10,05	168,61	98,94	97,17
40	81,00	7,68	11,77	201,36	101,15	91,86	90	44,41	5,20	14,06	195,29	90,91	86,18
41	40,59	4,90	12,97	187,93	80,61	85,21	91	64,34	4,68	13,65	210,43	100,84	96,08
42	75,00	5,18	16,98	178,65	86,80	91,04	92	108,51	5,59	5,38	127,43	99,07	93,84
43	67,70	5,68	12,72	55,26	77,54	75,42	93	59,06	4,96	13,95	79,29	71,78	77,21
44	74,57	4,90	17,22	124,07	100,55	84,63	94	25,21	5,31	13,50	94,71	71,36	65,05
45	114,30	5,97	3,52	243,88	115,69	108,49	95	33,05	7,97	6,93	247,90	79,19	85,54
46	32,27	4,37	10,90	183,94	96,95	83,81	96	68,40	7,30	0,19	141,54	91,08	90,42
47	108,38	4,28	4,25	105,01	100,14	95,12	97	92,19	4,51	17,84	87,97	88,16	83,10
48	67,07	5,10	6,26	162,09	90,65	94,39	98	88,18	5,79	10,06	76,72	88,87	83,07
49	61,50	7,65	6,01	179,95	89,63	88,82	99	77,14	6,59	10,84	54,69	71,21	76,17
50	51,22	5,33	4,95	120,35	79,54	84,80	100	30,29	4,25	13,79	192,21	90,88	82,36

As Tabelas 4 e 5 apresentam as equações dos índices de capacidade GR aplicados aos dados para limites de especificação simétricos e assimétricos, respectivamente.

Tabela 4 – Índices de capacidade GR para limites de especificação simétricos.

<i>Índices de capacidade GR para limites simétricos</i>	<i>Aplicação dos índices GR no processo simulado</i>	<i>Resultado</i>
$\hat{C}_{pR} = \frac{b_{0S} - b_{0I}}{6\hat{\sigma}_R}$	$\hat{C}_{pR} = \frac{160 - 50}{6 \times 8,24}$	2,22
$\hat{C}_{pIR} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - LIE_i)}{3n\hat{\sigma}_R}$	$\hat{C}_{pIR} = \frac{3699,09}{3 \times 100 \times 8,24}$	1,50
$\hat{C}_{pSR} = \frac{\sum_{i=1}^n (LSE_i - y_i)}{3n\hat{\sigma}_R}$	$\hat{C}_{pSR} = \frac{7300,91}{3.100 \times 8,24}$	2,95
$\hat{C}_{pkR} = \min(\hat{C}_{pIR}, \hat{C}_{pSR})$	$\hat{C}_{pkR} = \min(1,50; 2,95)$	1,50
$\hat{C}_{pmR} = \frac{b_{0S} - b_{0I}}{6\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}}$	$\hat{C}_{pmR} = \frac{160 - 50}{6\sqrt{\frac{49112,51}{100}}}$	0,83
$\hat{C}_{pmIR} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - LIE_i)}{3n\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}}$	$\hat{C}_{pmIR} = \frac{3699,09}{3 \times 100 \sqrt{\frac{49112,51}{100}}}$	0,56
$\hat{C}_{pmSR} = \frac{\sum_{i=1}^n (LSE_i - y_i)}{3n\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}}$	$\hat{C}_{pmSR} = \frac{7300,91}{3 \times 100 \sqrt{\frac{49112,51}{100}}}$	1,10
$\hat{C}_{pmkR} = \min(\hat{C}_{pmIR}, \hat{C}_{pmSR})$	$\hat{C}_{pmkR} = \min(0,86, 1,85)$	0,56

Tabela 5 – Índices de capacidade GR para limites de especificação assimétricos.

<i>Índices de capacidade GR para limites assimétricos</i>	<i>Aplicação dos índices GR no processo simulado</i>	<i>Resultado</i>
$\hat{C}_{pR}^* = \frac{\min(b_{0S} - b_{0T}; b_{0T} - b_{0I})}{3\hat{\sigma}_R}$	$\hat{C}_{pR}^* = \frac{\min(160 - 80; 80 - 50)}{3 \times 8,24}$	1,21
$\hat{C}_{pIR}^* = \frac{b_{0T} - b_{0I}}{3\hat{\sigma}_R} \left(1 - \frac{ \sum(T_i - y_i) }{n(b_{0T} - b_{0I})}\right)$	$\hat{C}_{pIR}^* = \frac{80 - 50}{3 \times 8,24} \left(1 - \frac{360,96}{100(80 - 50)}\right)$	1,07
$\hat{C}_{pSR}^* = \frac{b_{0S} - b_{0T}}{3\hat{\sigma}_R} \left(1 - \frac{ \sum(T_i - y_i) }{n(b_{0S} - b_{0T})}\right)$	$\hat{C}_{pSR}^* = \frac{160 - 80}{3 \times 8,24} \left(1 - \frac{360,96}{100(160 - 80)}\right)$	3,09
$\hat{C}_{pkR}^* = \min(\hat{C}_{pIR}^*; \hat{C}_{pSR}^*)$	$\hat{C}_{pkR}^* = \min(1,07; 3,09)$	1,07
$\hat{C}_{pmR}^* = \frac{\min(b_{0S} - b_{0T}; b_{0T} - b_{0I})}{3\sqrt{\frac{\sum(y_i - T_i)^2}{n}}}$	$\hat{C}_{pmR}^* = \frac{\min(160 - 80; 80 - 50)}{3\sqrt{\frac{19768,00}{100}}}$	0,71
$\hat{C}_{pmkR}^* = \frac{d_R^* - A_R^*}{3\sqrt{\hat{\sigma}_R^2 + A_R^2}}$	$\hat{C}_{pmkR}^* = \frac{30 - 3,61}{3\sqrt{67,96 + 6,62^2}}$	0,83

2.3. ARTIGO 3

**COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE CAPACIDADE EM UM PROCESSO DE
TORNEAMENTO**

COMPARISON OF CAPABILITY INDICES IN A HARD TURNING PROCESS

Artigo a ser submetido para
Gestão & Produção

COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE CAPACIDADE EM UM PROCESSO DE TORNEAMENTO

Fernanda Siqueira Souza
Danilo Cuzzuol Pedrini
Francieli Costa Borba
Carla Schwengber ten Caten

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre/RS, Brasil
fe_ssouza@producao.ufrgs.br; danilo@producao.ufrgs.br;
frann_borba@yahoo.com.br; tencaten@producao.ufrgs.br

Resumo – O presente estudo apresenta um fluxograma orientativo para direcionar a escolha do tipo de gráfico de controle e índices de capacidade para processos com variáveis de resposta: (i) não correlacionadas, (ii) correlacionadas dependentes das variáveis de controle e (iii) autocorrelacionadas. O uso do fluxograma foi ilustrado através da aplicação do mesmo em um processo de torneamento de uma empresa do ramo de equipamentos agrícolas. O processo foi monitorado por gráficos de controle de regressão múltipla, sendo sua capacidade avaliada utilizando-se os índices de capacidade para gráficos de controle baseados em modelos de regressão. Os resultados destes índices foram comparados com os índices de capacidade tradicionais.

Palavras-chave: Controle estatístico de processo, Gráfico de controle de regressão, Índices de capacidade do processo.

COMPARISON OF REGRESSION CAPABILITY INDICES IN A HARD TURNING PROCESS

Abstract - This study presents a flowchart to direct the choice of control chart and capability indices for processes with response variables: (i) uncorrelated, (ii) correlated dependent control variables and (iii) autocorrelated. The use of the flowchart was illustrated by applying it to the hard turning process of an agricultural machinery company. The process was monitored by control charts for multiple regression and its capability assessed using capability indices to control charts based on regression models. The results of these indices were compared with the traditional capability indices.

Keywords: Statistical process control, regression control chart, process capability indices.

1. INTRODUÇÃO

Aprimorar o sistema de controle de processos é uma das principais formas para redução dos custos com a produção de itens não conformes, sendo parte fundamental do sistema geral de negócios para melhoria da qualidade e confiabilidade. A melhoria da qualidade é a redução da variabilidade nos processos e, conseqüentemente, dos produtos (MONTGOMERY, 2004; COSTA *et al.*, 2005). Essa variabilidade excessiva no desempenho de um processo resulta, normalmente, em desperdício. O Controle Estatístico de Processo (CEP) é uma coleção de técnicas que apresentam como objetivo, detectar e facilitar a identificação de problemas para reduzir a variabilidade dos processos.

Os gráficos de controle constituem uma técnica do CEP fundamental para o monitoramento dos processos (MONTGOMERY *et al.*, 2001). A função principal de um gráfico de controle é detectar se o processo está ou não sob controle estatístico, distinguindo entre causas comuns e causas especiais. Após o processo estar sob controle, é utilizada outra importante técnica: os índices de capacidade do processo. O objetivo é verificar se o processo consegue atender às especificações de engenharia/projeto. Utilizando a informação fornecida pelos índices, os gerentes podem reduzir a variabilidade, diminuir custos de produção e aumentar a satisfação dos clientes (DELERYD, 1999), servindo como um guia estratégico para melhoria da qualidade.

Na literatura, os índices de capacidade tradicionais, ou seja, os índices aplicados aos gráficos de controle tradicionais propostos por Shewhart, em 1924, são os mais difundidos e utilizados. Entretanto, as aplicações destes gráficos assumem que os dados são independentes (não correlacionados) e identicamente distribuídos em torno de uma média constante. Quando os dados são autocorrelacionados com a variável tempo, a literatura sugere o uso de gráficos de controle baseado em modelos autoregressivos (COSTA *et al.*, 2005).

Quando há alterações frequentes no ajuste das variáveis de controle do processo, as suposições podem não ser satisfeitas, ocorrendo uma alteração na média e na variabilidade dos dados, sendo necessário um gráfico de controle para cada novo ajuste da máquina (PEDRINI E CATEN, 2011). Nesses casos, a variável de resposta (variável dependente) não varia em torno de uma média constante, sendo melhor representada por uma equação matemática que modele seu relacionamento em função do ajuste das variáveis de controle do processo (JACOBI *et al.*, 2002; SHU *et al.*, 2004). Esta combinação de modelos de regressão com as técnicas de gráfico de controle é chamada de gráfico de controle de regressão, proposto por Mandel (1969). Woodall e Montgomery (1999) e Woodall (2000) apontam os

gráficos de controle baseados em modelos de regressão como sendo uma das técnicas desenvolvidas na teoria com grande potencial de aplicação prática.

Entretanto, os estudos dos índices de capacidade para processos monitorados com os gráficos de controle baseados em modelos de regressão são escassos. Souza *et al.* (2011) propuseram índices de capacidade para gráficos de regressão (GR), contemplando limites de especificação simétricos e assimétricos.

O presente estudo propõe um fluxograma orientativo para direcionar a escolha do tipo de gráfico de controle e índices de capacidade para processos com variáveis de resposta não correlacionadas, correlacionadas dependentes das variáveis de controle e autocorrelacionadas. O uso do fluxograma é ilustrado através do monitoramento e avaliação da capacidade do processo de torneamento de uma empresa do ramo de equipamentos agrícolas. A capacidade do processo é avaliada de acordo com os índices de capacidade GR, que são comparados com os índices tradicionais.

O trabalho está estruturado em seis seções. Além desta introdução, a seção dois apresenta um referencial teórico sobre gráficos de controle de regressão e índices de capacidade GR. A seção três descreve os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do trabalho. A proposta de um fluxograma orientativo está apresentado na seção quatro. Os resultados da aplicação são apresentados na seção cinco e a seção seis resume as principais conclusões deste estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Gráficos de controle de regressão

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 variável de resposta e as variáveis de controle do processo. A relação entre as variáveis pode ser descrita por um modelo matemático, que sumariza ou descreve um conjunto de dados.

O modelo de regressão linear é apresentado na equação (1), representando a relação entre a variável dependente y e as k variáveis independentes (MONTGOMERY *et al.*, 2001).

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

onde:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Onde \mathbf{y} é o vetor dos valores da variável de resposta, \mathbf{X} é a matriz dos valores das n observações das k variáveis de controle, $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor dos coeficientes de regressão, sendo que β_0 é chamado de coeficiente de intercepto (valor de y quando todas as variáveis de controle são iguais a zero). O vetor $\boldsymbol{\varepsilon}$ é estimado pelo vetor dos resíduos \boldsymbol{e} , definido como a diferença entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo (\hat{y}).

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 *et al.*, 2001).

O gráfico de controle baseado em modelos regressão, inicialmente proposto por Mandel (1969), é utilizado em processos em que o efeito de uma variável de resposta é uma função de uma variável de controle, gerando um modelo apresentado na equação (1). Desta forma, os gráficos de controle baseados em modelos de regressão ajudam a detectar falhas no processo, pois a análise é realizada com o conjunto de variáveis e não mais com as variáveis tratadas individualmente, uma vez que os gráficos de controle tradicionais não são capazes de realizar uma análise quando se tem um conjunto de variáveis correlacionadas ou dependentes entre si.

No gráfico de Mandel (1969), a linha central é inclinada em relação ao eixo horizontal e os limites de controle superior e inferior são paralelos à linha central. O eixo horizontal representa a variável de controle e não uma sequência de amostras como nos gráficos de controle tradicionais propostos por Shewhart, com isso, perde-se a ordem temporal dos gráficos, dificultando a interpretação.

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 variável de resposta diretamente, tornando possível monitorar processos com mais de uma variável de controle. Loredó *et al.* (2002) e Shu *et al.* (2004) propuseram alternativas que permitem o uso de modelos de regressão linear múltipla. Loredó *et al.* (2002) utilizaram a amplitude móvel dos resíduos para estimar o desvio padrão do gráfico de controle baseado em modelos de regressão. Já o trabalho de 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 (2011), os gráficos de controle propostos por Haworth (1996), Loredó *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).

Hawkins (1991) propôs um procedimento para o monitoramento de processos multivariado baseado em variáveis ajustadas por regressão. Olin (1998) apresentou o gráfico de controle baseado em modelos de regressão não-linear e propôs o uso de modelos lineares generalizados (MLG) para o monitoramento de processos.

Segundo Woodal e Montgomery (1999), um método de aplicação dos gráficos de controle pode ser dividido em duas fases: (i) Fase I (análise retrospectiva) que contempla a estimação dos parâmetros e (ii) Fase II que contempla o monitoramento do processo. O método proposto por Pedrini e Caten (2011) apresenta esta estrutura, além de contemplar uma modificação do gráfico de controle de regressão proposto por Haworth (1996), permitindo o monitoramento direto das observações referentes a uma variável de resposta dependente de uma ou mais variáveis de controle, ao invés do monitoramento dos resíduos da regressão. As três suposições necessárias para a aplicação deste método são: (i) a variável de resposta deve ser variável contínua e sua relação com as variáveis de controle deve ser ajustável por um modelo de regressão linear; (ii) os resíduos da regressão devem ser normalmente e independentemente distribuídos, com média zero e desvio padrão constante; (iii) os dados utilizados para o ajuste do modelo na Fase I devem ter o mesmo comportamento dos dados monitorados na Fase II.

Com o modelo de regressão ajustado e validado, utiliza-se o limite de controle superior, limite central e limite de controle inferior apresentados nas equações (2), (3) e (4), respectivamente, para a construção do gráfico de controle para a Fase I (PEDRINI E CATEN, 2011).

$$LSC_i = \hat{y}_i + 3\sqrt{QMR} \quad (2)$$

$$LC_i = \hat{y}_i \quad (3)$$

$$LIC_i = \hat{y}_i - 3\sqrt{QMR} \quad (4)$$

O desvio padrão utilizado é obtido através da raiz quadrada do quadrado médio dos resíduos (QMR), calculado através da equação (5) (MANDEL, 1969):

$$QMR = \frac{e'e}{n-p} = \frac{SQR}{n-p} \quad (5)$$

onde $e = y - \hat{y}$ e $p = k + 1$

Caso existam pontos fora dos limites de controle esses devem ser investigados. Uma vez que não sejam decorrentes de causas comuns, devem ser desconsiderados do processo. Após a retirada desses pontos devem ser recalculados os limites de controle e o modelo de regressão. Com o processo sob controle, desenvolve-se o gráfico de controle para a Fase II, fase de monitoramento do processo. Entretanto, anteriormente, precisa-se verificar se os valores das variáveis de controle extrapolaram a região original de dados utilizados para estimar o modelo de regressão (PEDRINI E CATEN, 2011). Esta verificação ocorre com o desenvolvimento do gráfico de controle de extrapolação, que possui somente o limite superior de controle (h_{max}), que é o maior valor de todos os elementos diagonais h_{ii} da matriz da Fase I. A variável monitorada pelo gráfico de controle de extrapolação é h_{ii} das novas observações da Fase II, onde $h_{ii} = x_i'(X'X)^{-1}x_i$, sendo utilizado como um fator de correção do desvio-padrão da predição de uma nova observação, já que mede o distanciamento do vetor de variáveis de controle em relação ao vetor composto pelo valor médio de cada variável de controle.

Calcula-se o h_{ii} para cada amostra coletada da Fase II, comparando com o limite superior de controle do gráfico de extrapolação. Caso h_{ii} for menor que o h_{max} , o valor coletado pode ser monitorado pelo gráfico de controle de regressão, pois está contido no intervalo de investigação das variáveis de controle utilizados na Fase I. Se h_{ii} for maior que o h_{max} , o valor coletado não pode ser monitorado pelo gráfico de controle de regressão proposto, devendo ser eliminado. Caso ocorram muitos pontos de extrapolação da região original dos dados, recomenda-se retornar à Fase I e alterar o intervalo de variação das variáveis de controle (PEDRINI E CATEN, 2011). Caso contrário, desenvolve-se o gráfico de controle de regressão da Fase II.

Para a construção do gráfico da Fase II é preciso corrigir os limites de controle da Fase I, já que se trata de amostras diferentes. O limite de controle superior, o limite central e o limite de controle inferior seguem as equações (6), (7), (8) (PEDRINI E CATEN, 2011).

$$LSC_i = \hat{y}_i + 3\sqrt{QMR(1 + h_{ii})} \quad (6)$$

$$LC_i = \hat{y}_i \quad (7)$$

$$LIC_i = \hat{y}_i - 3\sqrt{QMR(1 + h_{ii})} \quad (8)$$

Revisões e aplicações sobre gráficos de controle baseado em modelos de regressão podem ser encontradas em Shu *et al.* (2007) e Jacobi *et al.* (2002).

2.2. Índices de capacidade para gráficos de regressão (GR)

Os índices de capacidade são medidas adimensionais usadas para quantificar a relação entre o desempenho do processo e os limites de especificação, refletindo, assim, sua qualidade (JEANG E CHUNG, 2009). Observa-se que um processo pode estar sob controle estatístico, mas caso apresente variabilidade maior do que a amplitude das especificações, será considerado não capaz, exigindo ações corretivas sobre o sistema. Assim, os índices de capacidade servem como um guia estratégico da empresa para a melhoria contínua da qualidade, reduzindo a variabilidade do processo e servindo de base para as tomadas de decisões (SPIRING, 1995; DELERYD, 1999). A avaliação da capacidade do processo normalmente é realizada diante da comparação dos resultados dos índices de capacidade com os valores mínimos estipulados em normas ou os fixados pelos clientes (RAMOS E HO, 2003).

Para os processos com limites de especificação simétricos, o valor alvo do processo representado por T equivale a metade do intervalo dos limites de especificação, representado por M . Diante de processos com $T=M$, dados normalmente distribuídos e processo sob controle estatístico, os índices básicos mais conhecidos são C_p , C_{pk} , C_{pm} e C_{pmk} (KOTZ E JONHSON, 2002).

Os índices C_p e C_{pk} representam a capacidade potencial e efetiva do processo, respectivamente. O índice C_p considera apenas a variabilidade do processo, não levando em consideração a média, ou seja, a localização dos dados, que é considerada no índice C_{pk} . Desta maneira, quando usados em conjunto, estes índices proporcionam uma boa indicação da capacidade, tanto em relação à média quanto à variabilidade (PALMER E TSUI, 1999). Entretanto, ambos não consideram o valor alvo do processo.

Observou-se que não basta somente produzir peças dentro dos limites, mas também, é preciso que o processo esteja o mais próximo possível do alvo. Tendo esta questão em vista, Chan *et al.* (1988) e Pearn *et al.* (1992) propuseram os índices C_{pm} e C_{pmk} , respectivamente, que penalizam o afastamento do alvo especificado. O índice C_{pm} considera apenas a variabilidade permitida ao processo, enquanto que o índice C_{pmk} considera a menor distância

entre a média do processo em relação aos limites de especificação (GONÇALEZ E WERNER, 2009).

Parlar e Wesolowsky (1999) observaram que, se $T=M$, os quatro índices tradicionais C_p , C_{pk} , C_{pm} e C_{pmk} se relacionam conforme equação (9).

$$C_{pk} = C_p - \frac{1}{3} \sqrt{\left(\frac{C_p}{C_{pm}}\right)^2 - 1} \quad (9)$$

Muitas vezes, os processos industriais apresentam limites de especificação assimétricos ($T \neq M$). Nestes casos, ocorrem modificações no cálculo dos índices que propiciam uma interpretação mais próxima à realidade, evitando conclusões equivocadas em relação a capacidade do processo. Os índices de capacidade para limites assimétricos são representados por C_p^* , C_{pl}^* , C_{ps}^* e C_{pk}^* .

Os índices de capacidade para limites simétricos ($T=M$) e assimétricos ($T \neq M$) estão apresentados na Tabela 1. Os trabalhos de Kotz e Johnson (2002), Spiring *et al.* (2003) e Wu *et al.* (2009) apresentam uma revisão sobre índices de capacidade do processo.

Tabela 1 – Índices de capacidade tradicionais para limites simétricos e assimétricos

<i>Índices de capacidade tradicionais para limites de especificação simétricos</i>	<i>Índices de capacidade tradicionais para limites de especificação assimétricos</i>
$\hat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}}$	$\hat{C}_p^* = \frac{\min(LSE - T; T - LIE)}{3\hat{\sigma}}$
$\hat{C}_{pl} = \frac{\bar{y} - LIE}{3\hat{\sigma}}$	$\hat{C}_{pl}^* = \frac{T - LIE}{3\hat{\sigma}} \left(1 - \frac{ T - \bar{y} }{T - LIE}\right)$
$\hat{C}_{ps} = \frac{LSE - \bar{y}}{3\hat{\sigma}}$	$\hat{C}_{ps}^* = \frac{LSE - T}{3\hat{\sigma}} \left(1 - \frac{ T - \bar{y} }{LSE - T}\right)$
$\hat{C}_{pk} = \min(\hat{C}_{pl}, \hat{C}_{ps})$	$\hat{C}_{pk}^* = \min(\hat{C}_{pl}^*, \hat{C}_{ps}^*)$
$\hat{C}_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}}$	$\hat{C}_{pm}^* = \frac{\min(LSE - T; T - LIE)}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}}$
$\hat{C}_{pmk} = \min\left(\frac{\bar{y} - LIE}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}}, \frac{LSE - \bar{y}}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\bar{y} - T)^2}}\right)$	$\hat{C}_{pmk}'' = \frac{d^* - A^*}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + A^2}}$

Fontes: Kane (1986), Chan *et al.* (1988), Pearn *et al.* (1992), e Pearn *et al.* (1999)

Na Tabela 1, os cálculos para A , A^* , d^* para o índice C_{pmk}'' são representados pelas equações (10), (11) e (12); o limite superior de especificação, o limite inferior de

especificação e o valor alvo do processo são representados por LSE, LIE e T, respectivamente. A média é representada por \bar{y} e $\hat{\sigma}$ é o estimador do desvio padrão.

$$A = \max \left[d \left(\frac{\bar{y} - T}{D_S} \right); d \left(\frac{T - \bar{y}}{D_I} \right) \right] \quad (10)$$

$$A^* = \max \left[d^* \left(\frac{\bar{y} - T}{D_S} \right); d^* \left(\frac{T - \bar{y}}{D_I} \right) \right] \quad (11)$$

$$d^* = \min(D_S; D_I) \quad (12)$$

Onde:

$$d = (\text{LSE-LIE})/2$$

$$D_S = \text{LSE-T}$$

$$D_I = \text{T-LIE}$$

De acordo com os índices apresentados na Tabela 1, observa-se que cada um acrescenta uma característica importante a partir do índice C_p proposto originalmente. 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 na qualidade (KOTZ E JOHNSON, 2002).

Na literatura existem diversos trabalhos sobre índices de capacidade de processos, envolvendo variações dos quatro índices básicos para limites simétricos e assimétricos, ou até mesmo novos índices diante das características e necessidades dos processos, destacando os trabalhos de Wang (2006), Leal e Pereira (2007), Jeang e Chung (2009), Yu *et al.* (2007), Chen *et al.* (2007), Jessenberger e Weihs (2000), Pearn *et al.* (2005) e Chang e Wu (2008).

Ressalta-se a importância de se aplicar corretamente os índices de capacidade de acordo com o tipo de gráfico de controle utilizado para monitorá-lo. Muitos processos produtivos são monitorados por gráficos de controle baseados em modelos de regressão e a aplicação dos índices tradicionais nestes processos, pode induzir a conclusões errôneas, comprometendo o estudo e análise, prejudicando o atendimento de exigências gerenciais ou de clientes externos.

Diante disto, supondo limites de especificação que variem de acordo com o ajuste das variáveis de controle do processo, o trabalho de Souza *et al.* (2011) propôs os índices de capacidade GR para serem aplicados em processos monitorados por gráficos de controle baseados em modelos de regressão, sendo representados por C_{pR} , C_{pkR} , C_{pmR} e C_{pmkR} considerando limites de especificação simétricos, e C_{pR}^* , C_{pkR}^* , C_{pmR}^* e C_{pmkR}^* , considerando

limites de especificação assimétricos. As fórmulas destes índices estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices de capacidade GR para limites simétricos e assimétricos.

<i>Índices de capacidade GR para limites simétricos</i>	<i>Índices de capacidade GR para limites assimétricos</i>
$\hat{C}_{pR} = \frac{b_{0S} - b_{0I}}{6\hat{\sigma}_R}$	$\hat{C}_{pR}^* = \frac{\min(b_{0S} - b_{0T}; b_{0T} - b_{0I})}{3\hat{\sigma}_R}$
$\hat{C}_{pIR} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - LIE_i)}{3n\hat{\sigma}_R}$	$\hat{C}_{pIR}^* = \frac{b_{0T} - b_{0I}}{3\hat{\sigma}_R} \left(1 - \frac{ \sum (T_i - y_i) }{n(b_{0T} - b_{0I})} \right)$
$\hat{C}_{pSR} = \frac{\sum_{i=1}^n (LSE_i - y_i)}{3n\hat{\sigma}_R}$	$\hat{C}_{pSR}^* = \frac{b_{0S} - b_{0T}}{3\hat{\sigma}_R} \left(1 - \frac{ \sum (T_i - y_i) }{n(b_{0S} - b_{0T})} \right)$
$\hat{C}_{pkR} = \min(\hat{C}_{pIR}, \hat{C}_{pSR})$	$\hat{C}_{pkR}^* = \min(\hat{C}_{pIR}^*, \hat{C}_{pSR}^*)$
$\hat{C}_{pmR} = \frac{b_{0S} - b_{0I}}{6\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}}$	$\hat{C}_{pmR}^* = \frac{\min(b_{0S} - b_{0T}; b_{0T} - b_{0I})}{3\sqrt{\frac{\sum (y_i - T_i)^2}{n}}}$
$\hat{C}_{pmkR} = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - LIE_i)}{3n\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}}, \frac{\sum_{i=1}^n (LSE_i - y_i)}{3n\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)^2}{n}}} \right)$	$\hat{C}_{pmkR}^* = \frac{d_R^* - A_R^*}{3\sqrt{\hat{\sigma}_R^2 + A_R^2}}$

Fonte: Souza *et al.* (2011).

Na Tabela 2, os cálculos para A_R , A_R^* , d_R^* para o índice C_{pmkR}^* são representados pelas equações (13), (14) e (15).

$$A_R = \max \left[d_R \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)}{nD_{SR}} \right); d_R \left(\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - y_i)}{nD_{IR}} \right) \right] \quad (13)$$

$$A_R^* = \max \left[d_R^* \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - T_i)}{nD_{SR}} \right); d_R^* \left(\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - y_i)}{nD_{IR}} \right) \right] \quad (14)$$

$$d_R^* = \min(D_{SR}; D_{IR}) \quad (15)$$

Onde:

$$d_R = (b_{0S} - b_{0I})/2$$

$$D_{SR} = b_{0S} - b_{0T}$$

$$D_{IR} = b_{0T} - b_{0I}$$

Os índices GR são aplicados após a Fase II de monitoramento do processo e se os dados estiverem sob controle estatístico. Assim, como não ocorre a estimação de um modelo de regressão na Fase II e o cálculo dos índices aplica-se no conjunto de dados desta fase, não é

necessário descontar os graus de liberdade p no denominador para o cálculo dos índices de capacidade (SOUZA *et al.*, 2011). Com isso, o desvio padrão utilizado nas equações da Tabela 2 é calculado a partir da equação (16), onde n representa o número de amostras.

$$\hat{\sigma}_R = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (16)$$

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente artigo contemplou cinco etapas: (i) desenvolvimento de um fluxograma orientativo; (ii) coleta de dados; (iii) desenvolvimento do gráfico de controle baseado em modelos de regressão de acordo com o método proposto por Pedrini e Caten (2011); (iv) aplicação dos índices de capacidade para gráficos de controle de regressão (GR); (v) comparação dos índices tradicionais com os índices GR.

A primeira etapa envolveu a construção de um fluxograma orientativo com o objetivo de guiar a escolha adequada do tipo de gráfico de controle e índices de capacidade para processos com variáveis de respostas: (i) não correlacionadas; (ii) correlacionadas dependentes da variável de controle; e (iii) autocorrelacionadas.

A segunda etapa envolveu a coleta de dados históricos para o processo de torneamento realizado em um torno em perfeitas condições de conservação e funcionamento, sem problemas de folgas ou vibrações. Essa máquina é dedicada à usinagem dos itens utilizados na transmissão dos tratores, sendo que esta é responsável por produzir nove produtos com a mesma matéria-prima e fornecedor. Do total de produtos produzidos pelo torno, foram analisados cinco produtos devido a importância destes em relação às taxas de produção. A coleta de dados foi realizada por um período de um mês, coletando-se 10 produtos por dia. A variável de resposta a ser monitorada no processo estudado é a deformação na circularidade, que corresponde a diferença entre o diâmetro interno e externo do produto. As variáveis de controle deste processo são: torque (x_1) e altura da castanha (x_2). A altura da castanha corresponde a altura necessária para a colocação da peça no torno.

A terceira etapa envolveu o desenvolvimento do gráfico de controle baseado em modelos de regressão, conforme o método proposto por Pedrini e Caten (2011). Com os dados coletados, foi desenvolvida a Fase I do método, ou seja, o ajuste do modelo de regressão linear que relaciona a variável de resposta do processo às variáveis de controle. Com o modelo validado, desenvolve-se o gráfico de controle para a Fase I. Caso os dados estiverem

sob controle, inicia-se a Fase II, com os novos dados para o monitoramento do processo, assumindo que estes apresentam o mesmo comportamento dos dados da Fase I. Desenvolve-se o gráfico de controle da Fase II e, caso o processo seja estável, analisa-se a sua capacidade. Caso contrário, as causas especiais devem ser investigadas e eliminadas do processo.

A quarta etapa envolveu o cálculo dos índices de capacidade GR para cada produto individualmente e para o processo de torneamento estudado. Calcularam-se também, os índices de capacidade tradicionais com o objetivo de comparar os resultados. Portanto, na quinta etapa ocorre a comparação dos índices tradicionais com os índices GR.

Os trabalhos de Vännman e Deleryd (1999), Chen *et al.* (2001) e Huang e Chen (2003) estudaram índices de capacidade com produtos com múltiplas características. Entretanto, estes não abordam os índices de capacidade para processos que produzem diferentes produtos (YU *et al.*, 2007). Com o objetivo de calcular o índice de capacidade para o processo de torneamento, utilizou-se uma média geométrica dos índices calculados para cada um dos cinco produtos analisados no estudo, de acordo com o trabalho de Yu *et al.* (2007). Assim, a capacidade do torno em produzir peças dentro dos limites de especificação depende da capacidade de cada produto. O trabalho de Yu *et al.* (2007) estipula pesos para cada produto de acordo com a importância ou taxa de produção; entretanto, no presente estudo, considera-se que os produtos apresentam pesos iguais, já que foram selecionados apenas produtos com maiores taxas de produção. Os índices de capacidade tradicionais e os índices de capacidade GR para o processo de torneamento, considerando os diferentes produtos, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Índices tradicionais e GR para limites simétricos e assimétricos para o processo considerando os diferentes produtos

<i>Índices de capacidade tradicionais</i>		<i>Índices de capacidade GR</i>	
<i>Limites simétricos</i>	<i>Limites assimétricos</i>	<i>Limites simétricos</i>	<i>Limites assimétricos</i>
$C_p^T = \left(\prod_{i=1}^n C_{pi} \right)^{1/n}$	$C_p^{*T} = \left(\prod_{i=1}^n C_{pi}^* \right)^{1/n}$	$C_{pR}^T = \left(\prod_{i=1}^n C_{pRi} \right)^{1/n}$	$C_{pR}^{*T} = \left(\prod_{i=1}^n C_{pRi}^* \right)^{1/n}$
$C_{pk}^T = \left(\prod_{i=1}^n C_{pk_i} \right)^{1/n}$	$C_{pk}^{*T} = \left(\prod_{i=1}^n C_{pk_i}^* \right)^{1/n}$	$C_{pkR}^T = \left(\prod_{i=1}^n C_{pkRi} \right)^{1/n}$	$C_{pkR}^{*T} = \left(\prod_{i=1}^n C_{pkRi}^* \right)^{1/n}$
$C_{pm}^T = \left(\prod_{i=1}^n C_{pm_i} \right)^{1/n}$	$C_{pm}^{*T} = \left(\prod_{i=1}^n C_{pm_i}^* \right)^{1/n}$	$C_{pmR}^T = \left(\prod_{i=1}^n C_{pmRi} \right)^{1/n}$	$C_{pmR}^{*T} = \left(\prod_{i=1}^n C_{pmRi}^* \right)^{1/n}$
$C_{pmk}^T = \left(\prod_{i=1}^n C_{pmk_i} \right)^{1/n}$	$C_{pmk}^{*T} = \left(\prod_{i=1}^n C_{pmk_i}^* \right)^{1/n}$	$C_{pmkR}^T = \left(\prod_{i=1}^n C_{pmkRi} \right)^{1/n}$	$C_{pmkR}^{*T} = \left(\prod_{i=1}^n C_{pmkRi}^* \right)^{1/n}$

Fonte: Yu *et al.* (2007)

4. FLUXOGRAMA ORIENTATIVO

Um índice de capacidade mal empregado no processo pode gerar conclusões errôneas, deixando de identificar possíveis e importantes melhorias para otimizar o processo. Assim, visando guiar a seleção do tipo de gráfico de controle, assim como direcionar o uso correto dos índices de capacidade, este artigo propõe um fluxograma orientativo, conforme Figura 1, contemplando processos com variáveis de resposta não correlacionadas, correlacionadas dependentes da variável de controle e autocorrelacionadas.

Para a utilização dos gráficos tradicionais de Shewhart, é necessário que as observações sejam independentes e identicamente distribuídas (COSTA *et al.*, 2005; MONTGOMERY, 2004). Caso esta hipótese seja violada, a eficiência da aplicação dos gráficos tradicionais se reduz. Portanto, é de extrema importância, antes de iniciar o monitoramento de um processo, identificar o comportamento dos dados, pois a escolha de gráficos de controle inadequados produz alarmes falsos em excesso (COSTA *et al.*, 2005).

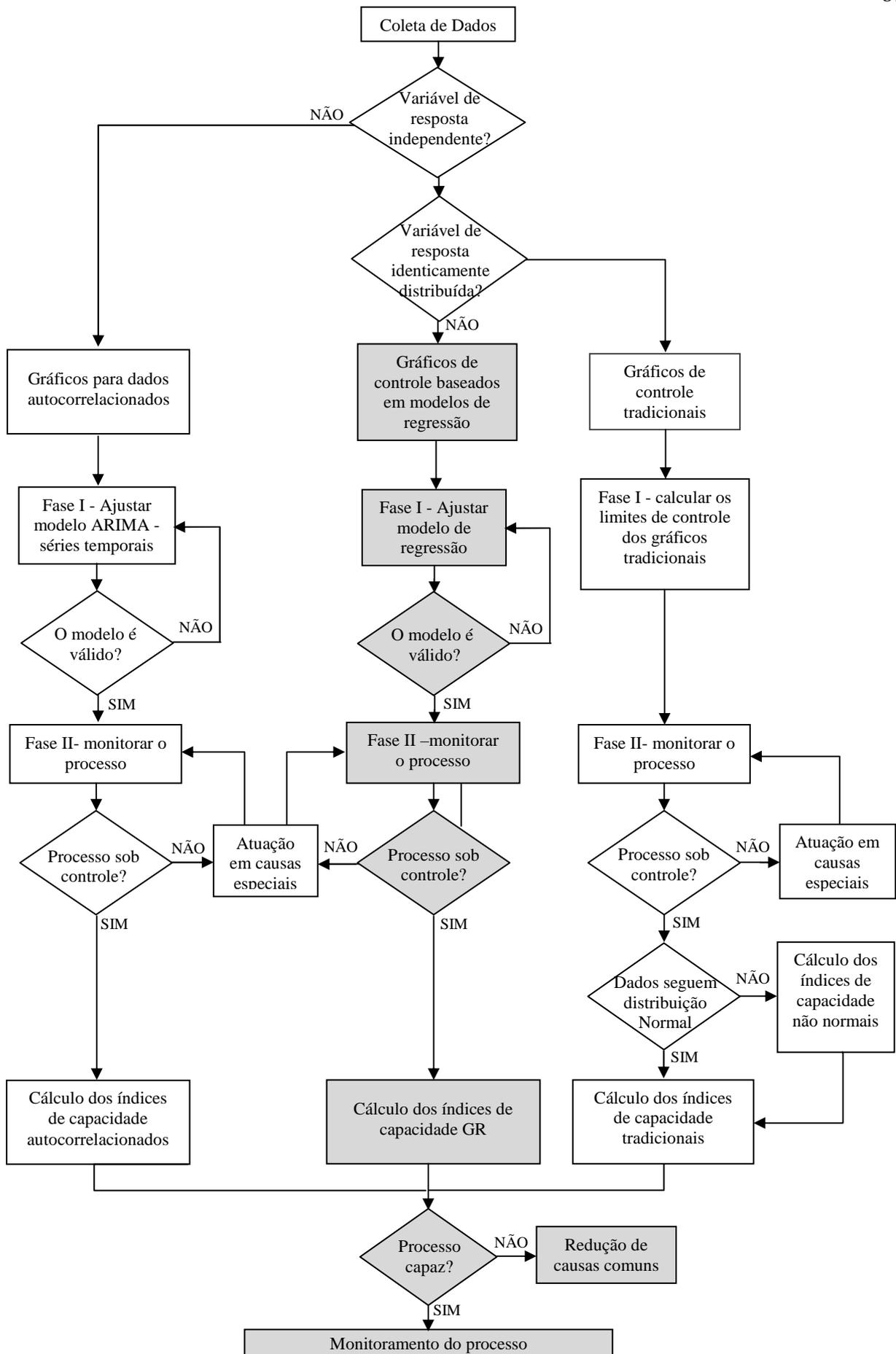


Figura 1 – Fluxograma orientativo para escolha do tipo de gráfico de controle e índices de capacidade

Após a coleta de dados, inicialmente deve-se verificar se a variável de resposta monitorada é independente. Caso não seja independente, estas estão autocorrelacionadas e, neste caso, deve-se utilizar um gráfico de controle baseado em séries temporais do tipo modelo Autoregressivo Integrado de Média Móvel (ARIMA) a fim de eliminar a autocorrelação. Através de uma identificação de modelos potenciais, seleciona-se o melhor modelo usando os critérios adequados e valida-se o modelo escolhido. Assim, realizam-se previsões e constrói-se um gráfico de controle para os resíduos do modelo (MAKRIDAKIS *et al.*, 1998).

Posteriormente, deve-se verificar se a variável de resposta é identicamente distribuída em torno de uma média constante. Caso negativo, a variável de resposta é dependente das variáveis de controle do processo e, neste caso, deve-se ajustar um modelo de regressão. Realiza-se uma série de testes para verificar a validação do modelo estimado, como: (i) teste F da significância do modelo; (ii) teste de multicolinearidade através do fator de inflação da variância (FIV); (iii) teste t a fim de testar os coeficientes individuais de regressão; (iv) análise dos pontos influentes na estimativa do modelo através da Distância de Cook (D_i); (v) elaboração do gráfico dos resíduos versus os valores estimados pelo modelo para analisar se os resíduos apresentam desvio-padrão aproximadamente constante; e (vi) teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, adotando um nível de significância de 5%.

Com o modelo validado, constrói-se o gráfico de controle para a Fase I e verificam-se as causas especiais. Caso existam causas especiais, o processo é considerado fora de controle e após a detecção das mesmas, a equação de regressão deve ser recalculada. Esta etapa não está inserida na Figura 2 devido a uma melhor visualização do fluxograma. Se o processo estiver sob controle, os coeficientes de regressão do modelo e a estimativa do QMR serão utilizados para cálculo dos limites de controle da Fase II referente ao monitoramento do processo (PEDRINI E CATEN, 2011).

Caso o processo apresente variável de resposta independente e identicamente distribuída em torno de uma média constante, pode-se utilizar os gráficos de controle tradicionais, propostos por Shewhart, verificando se dados são variáveis ou atributos. Se a variável controlada é uma variável contínua, o usual é monitorar o processo com o gráfico \bar{X} e R. Caso a variável controlada seja uma fração de defeituosos, utilizam-se os gráficos de controle por atributos np ou p e caso a variável seja do tipo taxa de defeitos, utilizam-se os gráficos c ou u (COSTA *et al.*, 2005).

Na Fase II de monitoramento, a interpretação da estabilidade do processo é a mesma para todos os gráficos, ou seja, se existirem pontos fora dos limites de controle, o processo não é estável e apresenta causas especiais, necessitando de uma análise a fim de identificá-las e eliminá-las. Se o processo estiver sob controle estatístico, pode-se calcular a capacidade através dos índices de capacidade do processo.

Para os gráficos tradicionais, utilizam-se os índices tradicionais, levando em conta a normalidade dos dados. Caso os dados seguirem uma distribuição normal, usam-se os índices da Tabela 1. Caso os dados não seguirem uma distribuição normal, é necessário buscar por alternativas que utilizem as distribuições adequadas (GONÇALEZ E WERNER, 2009). Existem na literatura transformações de Box-Cox ou de Johnson, por exemplo, que podem converter dados não normais em dados normalmente distribuídos, podendo fazer uso dos índices apresentados. Outra alternativa é utilizar métodos para analisar a capacidade de dados não-normais. O primeiro método foi desenvolvido por Clements (1989), seguido dos métodos de Pearn e Chen (1997) e de Chen e Ding (2001). Uma comparação destes índices de capacidade para dados não normais pode ser encontrado em Gonçalves e Werner (2009).

Para os modelos baseados em séries temporais, utiliza-se os índices de capacidade autocorrelacionados propostos por Vännman e Kulahci (2008) e Lovelace *et al.* (2009). Os índices de capacidade GR apresentados na Tabela 2 aplicam-se quando se utiliza os modelos de regressão, ou seja, quando os dados da variável de resposta são dependentes das variáveis de controle.

A capacidade deve ser comparada com as expectativas e metas gerenciais. Caso ela não seja satisfatória, a gerência deve agir sobre o sistema para a redução de causas comuns de variação através de: treinamento, melhoria da matéria-prima, troca de fornecedores, aquisição de novas tecnologias, aquisição de novos equipamentos, etc. Caso o processo seja capaz, realiza-se o monitoramento do processo com o objetivo de garantir a estabilidade e a capacidade do mesmo.

5. APLICAÇÃO

O desenvolvimento do trabalho ocorreu em uma indústria do ramo de equipamentos agrícolas situada no estado do Rio Grande do Sul. A atividade principal da planta na qual o trabalho será desenvolvido é a fabricação de tratores. O estudo será desenvolvido no setor de

usinagem da fábrica, especificamente em tornos, devido a sua alta taxa de produção e por serem os maiores responsáveis por problemas de produtos não conformes no setor.

Inicialmente foi utilizado o fluxograma para direcionar a escolha do tipo de gráfico. Como a variável de resposta é independente, ou seja, não está autocorrelacionada com a variável tempo, não é necessário aplicar os gráficos de controle baseados em modelos ARIMA. Como a variável de resposta não é identicamente distribuída em torno de uma média constante, o fluxograma direciona para o uso de gráficos de controle baseados em modelos de regressão que monitora a variável de resposta em função do ajuste das variáveis de controle.

Na sequência foi realizada a coleta de dados históricos do processo contemplando as variáveis de controle torque (x_1) e altura da castanha (x_2) e a variável de resposta deformação da circularidade (y). Foram coletados 100 dados para a Fase I. Uma vez coletado os dados, estima-se o modelo de regressão da Fase I, conforme apresentado na equação (17).

$$\hat{y}_i = 0,042 - 0,0013x_1 + 0,0035x_2 \quad (17)$$

Este modelo apresenta um coeficiente de determinação de aproximadamente 88,0%, um coeficiente de determinação ajustado de 87,7% e QMR= $1,73 \times 10^{-6}$. Ressalta-se que todas as variáveis de controle inseridas no modelo foram apontadas como estatisticamente significativas nos testes t individuais, considerando o intervalo de investigação das variáveis de controle. O modelo foi validado de acordo com os testes apresentados na seção 4. De acordo com Pedrini e Caten (2011), utiliza-se o gráfico de controle da Fase I para verificação da estabilidade dos dados utilizados para estimar o modelo de regressão linear. Como não houve pontos fora de controle, o modelo é válido e os coeficientes do modelo apresentados na equação (17) podem ser utilizados para monitorar o processo de torneamento na Fase II. Portanto, com as suposições atendidas, desenvolveu-se o gráfico de controle baseado em modelos de regressão da Fase II.

Na Fase II, foram coletadas 100 novas amostras do processo. Com o objetivo de verificar se as novas variáveis de controle da Fase II estavam dentro do intervalo de investigação utilizado para estimar o modelo de regressão na Fase I, foi construído o gráfico de extrapolação. Primeiramente foram calculados os h_{ii} da Fase I e filtrado o maior valor ($h_{máx}$) que será utilizado como LSC. Foram calculados os valores do h_{ii} para os 100 novos valores da Fase II. O gráfico de extrapolação é apresentado na Figura 2.

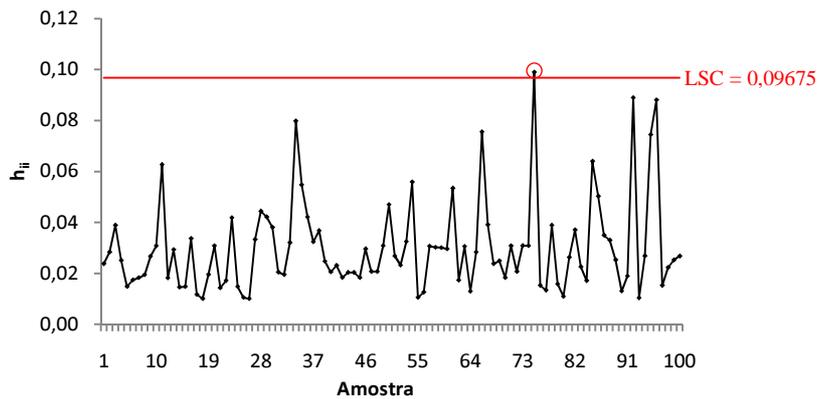


Figura 2 - Gráfico de extrapolação da Fase II para o processo de torneamento

A amostra 75 apresentou um $h_{ii} > LSC$; logo, é retirada do processo, uma vez que extrapola a região formada pelo intervalo de investigação das variáveis de controle utilizadas para estimar o modelo de regressão. O gráfico de controle baseado em modelo de regressão para a Fase II é apresentado na Figura 3. Observa-se que o processo está sob controle estatístico, uma vez que não apresenta pontos fora dos limites de controle.

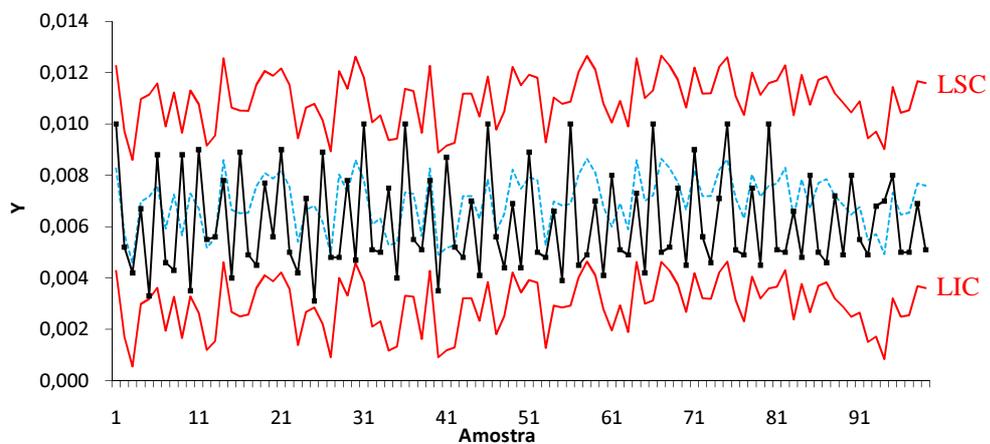


Figura 3 – Gráfico de controle de regressão do processo

Seguindo o fluxograma orientativo, com o processo sob controle, calculam-se os índices de capacidade GR. Com o objetivo de comparar os resultados, também foram calculados os índices de capacidade tradicionais. Como os cinco produtos analisados apresentam limites de especificação simétricos, o cálculo dos índices será baseado nos índices GR simétricos e índices tradicionais simétricos.

Foram estudados cinco produtos no processo de torneamento; assim, o cálculo dos índices ocorre, inicialmente, para cada produto separadamente. A Tabela 4 apresenta a média,

o desvio padrão para cálculo dos índices de capacidade tradicionais e o desvio padrão para cálculo dos índices de capacidade GR de cada produto.

Tabela 4 – Produtos analisados

	Média	Desvio padrão tradicional	Desvio padrão GR
Produto 1	0,0085	0,00073	0,00030
Produto 2	0,0059	0,00081	0,00033
Produto 3	0,0049	0,00060	0,00031
Produto 4	0,0076	0,00075	0,00021
Produto 5	0,0041	0,00070	0,00050

Para o cálculo dos índices tradicionais, os limites de especificação e o valor alvo não variam em função dos ajustes das variáveis de controle, sendo utilizados os valores apresentados na Tabela 5. Já para o cálculo dos índices GR, os limites de especificação e o valor alvo seguiram os modelos especificados para cada produto, portanto, foram considerados os modelos da Tabela 6.

Tabela 5 – Limites de especificação e alvo para cálculo dos índices tradicionais

	LSE	LIE	T
Produto 1	0,0155	0,0050	0,0102
Produto 2	0,0076	0,0022	0,0049
Produto 3	0,0065	0,0015	0,0040
Produto 4	0,0095	0,0045	0,0070
Produto 5	0,0060	0,0010	0,0035

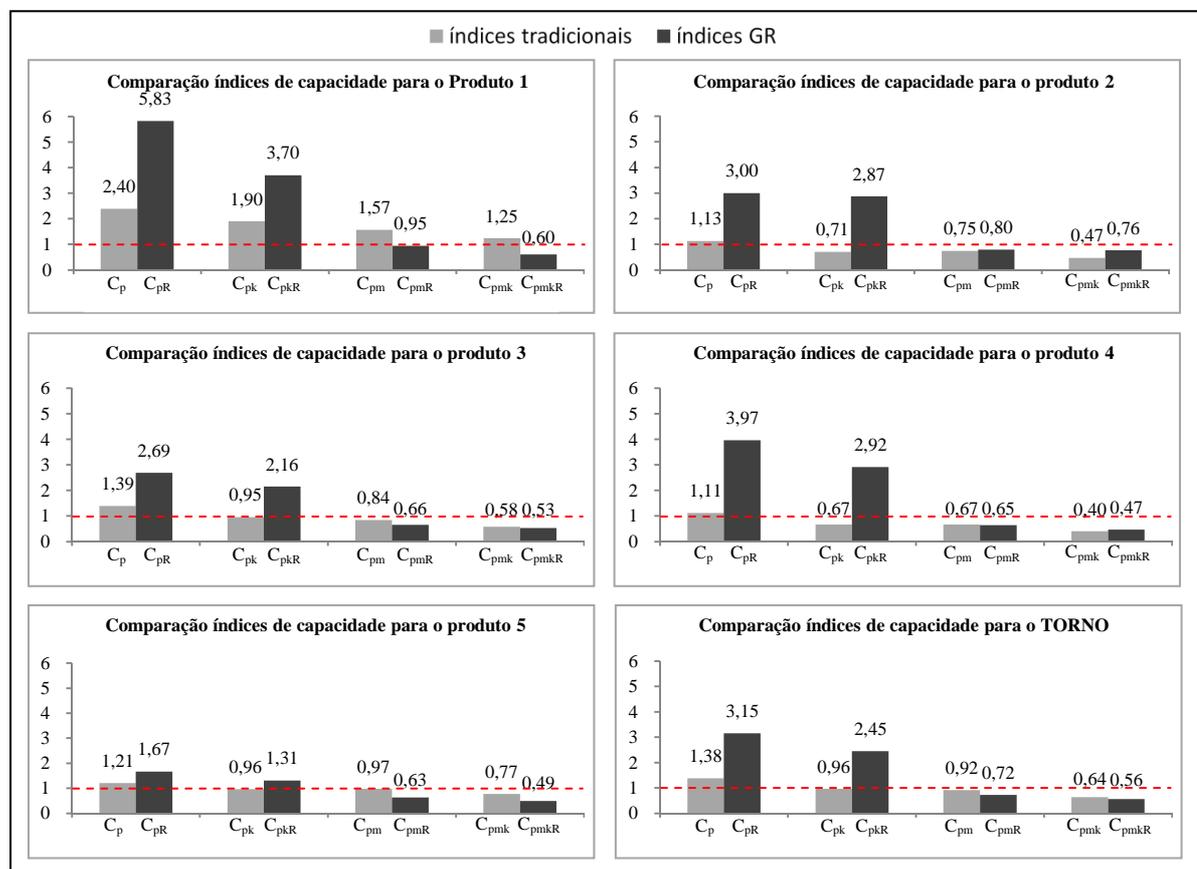
Tabela 6 – Limites de especificação e alvo para cálculo dos índices GR

	LSE_i	LIE_i	T_i
Produto 1	$0,0513-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,0408-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,0458-0,00135x_1+0,00350x_2$
Produto 2	$0,0434-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,038-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,0408-0,00135x_1+0,00350x_2$
Produto 3	$0,0423-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,0373-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,0398-0,00135x_1+0,00350x_2$
Produto 4	$0,0453-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,0403-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,0428-0,00135x_1+0,00350x_2$
Produto 5	$0,0418-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,0368-0,00135x_1+0,00350x_2$	$0,0393-0,00135x_1+0,00350x_2$

Utilizando as equações dos índices tradicionais simétricos apresentadas na Tabela 1 e as equações dos índices GR simétricos apresentados na Tabela 2, é possível realizar os cálculos para cada produto analisado e obter uma comparação dos resultados, apresentados na Tabela 7 e na Figura 4. Como a capacidade do torno em produzir peças dentro dos limites de especificação depende da capacidade de cada produto, utilizaram-se as equações da Tabela 3 para o cálculo da capacidade do processo de torneamento.

Tabela 7 – Comparação dos índices GR com os índices tradicionais para cada produto e para o torno.

	Produto 1		Produto 2		Produto 3		Produto 4		Produto 5		TORNO	
	Trad.	GR	Trad.	GR								
C_p	2,40	5,83	1,13	3,00	1,39	2,69	1,11	3,97	1,21	1,67	1,38	3,15
C_{pI}	1,90	3,70	1,21	3,13	1,83	3,22	1,24	5,02	1,45	1,86	1,50	3,22
C_{ps}	2,89	7,96	1,04	2,87	0,95	2,16	0,99	2,92	0,96	1,31	1,22	2,85
C_{pk}	1,90	3,70	1,04	2,87	0,95	2,16	0,99	2,92	0,96	1,31	1,12	2,45
C_{pm}	1,57	0,95	1,12	0,80	0,84	0,66	1,04	0,65	0,97	0,63	1,08	0,72
C_{pmI}	1,25	0,60	1,20	0,83	1,11	0,79	1,16	0,82	1,17	0,70	1,18	0,74
C_{pmS}	1,90	1,29	1,03	0,76	0,58	0,53	0,92	0,47	0,77	0,49	0,96	0,65
C_{pmk}	1,25	0,60	1,03	0,76	0,58	0,53	0,92	0,47	0,77	0,49	0,88	0,56

**Figura 4** – Comparação dos índices de capacidade tradicionais e GR para os cinco produtos e para o processo de torneamento.

Pela comparação apresentada na Tabela 7 e Figura 4, podem-se notar interpretações errôneas em relação à capacidade de determinados produtos. Os índices GR C_{pR} e C_{pkR} apresentaram resultados superiores aos índices tradicionais C_p e C_{pk} , sendo que para os produtos 3, 4 e 5, a interpretação foi diferenciada. Para estes produtos, os índices tradicionais C_{pk} indicaram a não capacidade efetiva, apresentando valores menores que 1. Entretanto, os

índices C_{pkR} apresentaram valores superiores a 1, indicando assim, que estes produtos são capazes. Os índices C_{pm} e C_{pmk} apresentaram resultados inferiores a 1 na maioria dos índices estudados, concluindo que os produtos não estão atingindo o valor alvo especificado.

Com os resultados dos índices de capacidade GR e tradicionais de cada produto, foi possível calcular os índices de capacidade para o processo de torneamento através da média geométrica dos índices dos produtos. Observa-se pela Tabela 7 que, pelos índices GR, o processo apresentou uma capacidade potencial e efetiva alta, indicando um processo com pouca variabilidade. Considerando os índices tradicionais, o processo também apresentou boa capacidade, porém, com valores próximos a 1 e inferiores aos índices GR. O processo de torneamento apresentou os índices C_{pm} , C_{pmk} , C_{pmR} e C_{pmkR} baixos (<1), indicando a descentralização do processo em relação ao valor alvo.

Com isso, os resultados mostraram que o processo necessita de melhorias em relação a centralização do processo no valor alvo especificado. Evidencia-se que, em relação aos índices C_{pR} e C_{pkR} , todos os produtos foram considerados potencialmente e efetivamente capazes. Entretanto, como C_{pkR} apresenta valores diferentes de C_{pR} , o processo necessita de centralização.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo propôs um fluxograma orientativo para direcionar a escolha do tipo de gráfico de controle e índices de capacidade para processos com variáveis de resposta não correlacionadas, correlacionadas dependentes das variáveis de controle e autocorrelacionadas. O uso deste fluxograma foi ilustrado através do monitoramento e avaliação da capacidade do processo de torneamento de uma empresa do ramo de equipamentos agrícolas.

O tipo de gráfico de controle e índice de capacidade utilizados na aplicação prática foi direcionado pelo fluxograma orientativo proposto no presente trabalho. Com o aplicação do gráfico de controle de regressão foi possível demonstrar a efetividade do controle simultâneo da variável de resposta dependente das variações frequentes das variáveis de controle, assim como a facilidade de operacionalização do gráfico.

Visando comparar os índices de capacidade, foram aplicados os índices de capacidade GR para processos monitorados com gráficos de controle baseados em modelos de regressão, assim como os índices de capacidade tradicionais. Os resultados evidenciaram que dependendo do índice utilizado, as conclusões sobre a capacidade do processo podem ser

diferenciadas, demonstrando a importância da escolha dos índices de capacidade adequados para cada comportamento do processo.

Como a aplicação foi realizada em um processo de torneamento, foram monitorados cinco produtos fabricados nesta máquina. Assim, a capacidade do torno em produzir peças conforme às especificações depende da capacidade de cada produto separadamente. Os resultados mostraram alta capacidade potencial e efetiva, demonstrando um processo com baixa variabilidade, entretanto, não alcançando o valor alvo especificado, necessitando de melhorias em relação a centralização do processo.

Portanto, as principais contribuições do presente trabalho foram a proposta de um fluxograma orientativo, assim com a comparação dos índices GR com os índices tradicionais em um caso prático e o cálculo dos índices de capacidade para processos de uma mesma máquina que produzem mais de um produto com especificações distintas.

REFERÊNCIAS

1. CHAN, L.K.; CHENG, S.W.; SPIRING, F.A. A new measure of process capability: C_{pm} . **Journal of Quality Technology**, v. 20, p. 162-175, 1988.
2. CHANG, Y.C.; WU, C.W. Assessing process capability based on the lower confidence bound of C_{pk} for asymmetric tolerances. **European Journal of Operational Research**, v. 190, p. 205–227, 2008.
3. CHEN, J.P.; DING, C.G. A new process capability index for non-normal distributions. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 18, p. 762-770, 2001.
4. CHEN, K.S., HSU, C.H.; OUYANG, L.Y. Applied product capability analysis chart in measure step of Six Sigma, **Quality & Quantity**, v. 41, p. 387-400, 2007.
5. CHEN, K.S.; HUANG, M.L.; LI, R.K. Process capability analysis for an entire product. **International Journal of Production Economics Research**, v. 39, p. 4077–4087, 2001.
6. CLEMENTS, J.A. Process capability calculations for non-normal distributions. **Quality Progress**, v. 22, p. 95-100, 1989.
7. COSTA, A.F.B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. São Paulo: Editora Atlas, 2ª Edição, 334 p., 2005.
8. DELERYD, M. A pragmatic view on process capability studies. **International Journal of Production Economics**, v. 58, p. 319-330, 1999.
9. GONÇALEZ, P.U.; WERNER, L. Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais. **Gestão & Produção**, v. 16, p. 121-132, 2009.
10. HAWKINS, D.M. Multivariate Quality Control Based on Regression-Adjusted Variables. **Technometrics**, v. 33, p. 61-75, 1991.
11. HAWORTH, D.A. Regression control charts to manage software maintenance. **Software Maintenance: Research and Practice**, v. 8, p. 35-48, 1996.
12. HUANG, M.L.; CHEN, K.S. Capability analysis for a multiprocess product with bilateral specifications. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 21, p. 801–806, 2003.
13. JACOBI, L.F.; SOUZA, A.M.; PEREIRA, J.E.S. Gráfico de Controle de Regressão Aplicado na Monitoração de Processos. **Revista Produção**, v. 12, p. 46-59, 2002.

14. JEANG, A.; CHUNG, C.P. Process capability analysis based on minimum production cost and quality loss. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 43, p. 710-719, 2009.
15. JESSENBERGER J.; WEIHS C. A note on the behavior of C_{pmk} with asymmetric specification limits. **Journal of Quality Technology**, v. 36, p. 329-335, 2000.
16. KANE, V.E. Process Capability Indices. **Journal of Quality Technology**, v. 18, p. 41-52, 1986.
17. KOTZ, S.; JOHNSON, N.L. Process capability indices – a review, 1992-2000. **Journal of Quality Technology**, v. 34, p. 2-19, 2002.
18. LEAL, R.P.; PEREIRA, Z.L. Process capability in services. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 24, p. 800-812, 2007.
19. LOREDO, E.N.; JERKPAPOM, D.; BORROR, C.M. Model-based Control Chart for Autoregressive and Correlated Data. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 18, p. 489-496, 2002.
20. LOVELACE, C.R.; SWAIN, J.J.; ZEINELABDIN, H.; GUPTA, J.N.D. Lower confidence limits for process capability indices C_p and C_{pk} when data are autocorrelated. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 25, p. 663-700, 2009.
21. MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S.; HYNDMAN, R. **Forecasting, Methods and Applications**. 3ª edição. John Wiley & Sons. New York, 1998.
22. MANDEL, B.J. The Regression Control Chart. **Journal of Quality Technology**, v. 1, p. 1-9, 1969.
23. MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 513 p., 2004.
24. MONTGOMERY, D.C.; VINING, G.G.; PECK, E.A. **Introduction to linear regression analysis**. 3ª Edição, New York: John Wiley & Sons, 641 p., 2001.
25. OLIN, B.D. Regression Control Charts Revisited: Methodology and Cases Studies. In: **Annual Fall Technical Conference**, 42º, New York: American Society for Quality, 17 p., 1998.
26. PALMER, K.; TSUI, K.L. A review and interpretations of process capability indices, **Annals of Operations Research**, v. 87, p. 31-47, 1999.
27. PARLAR, M.; WESOLOWSKY, G.O. Specification Limits, Capability Indices, and Process Centering in Assembly Manufacture. **Journal of Quality Technology**, v. 31, p. 317-325, 1999.
28. PEARN W.L., WU C.W.; WANG K.H. Capability measure for asymmetric tolerance non-normal processes applied to speaker driver manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, p. 506-515, 2005.
29. PEARN, W.L.; CHEN, K.S. Capability indices for non-normal distributions with an application in electrolytic capacitor manufacturing. **Microelectronics Reliability**, v. 37, p. 1853-1858, 1997.
30. PEARN, W.L.; CHEN, K.S.; LIN, P.C. On the generalizations of the capability index C_{pmk} for asymmetric tolerances. **Far East Journal of Theoretical Statistics**, v. 3, p. 47-66, 1999.
31. PEARN, W.L.; KOTZ, S.; JOHNSON, N.L. Distributional and inferential properties of process control indices. **Journal of Quality Technology**, v. 24, p. 216-231, 1992.
32. PEDRINI, D.C.; CATEN, C.S. Método para a Aplicação de Gráficos de Controle de Regressão no Monitoramento de Processos. **Revista Produção**. Em publicação, 2011.
33. RAMOS, A.W.; HO, L.L. Procedimentos inferenciais em índices de capacidade para dados autocorrelacionados via bootstrap. **Revista Produção**, v.13, n.3, 2003.
34. 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.
35. SHU, L.; TSUNG, F.; TSUI, K.L. Run-length Performance of Regression Control Charts with Estimated Parameters. **Journal of Quality Technology**, v. 36, p. 280-292, 2004.
36. SOUZA, F.S.; PEDRINI, D.C.; CATEN, C.S. Proposta de índices de capacidade para gráficos de controle baseados em modelos de regressão. Artigo a ser submetido para a revista **Pesquisa Operacional**, 2011.
37. SPIRING, F.; LEUNG, B.; CHENG, S.; YEUNG, A. A bibliography of process capability papers, **Quality and Reliability Engineering International**, v.19, p. 445-460, 2003.
38. SPIRING, F.A. Process capability a total quality management tool, **Total Quality Management**, v. 6, p. 21-33, 1995.

39. VÄNNMAN, K.; DELERYD, M. Process capability plots—a quality improvement tool, **Quality and Reliability Engineering International**, v. 22, p. 213–217, 1999.
40. VÄNNMAN, K.; KULAHCI, M. A Model-free approach to eliminate autocorrelation when testing for process capability. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 24, p. 213-228, 2008.
41. WANG, F.K. Quality evaluation of a manufactured product with multiple characteristics, **Quality and Reliability Engineering International**, v. 22, p. 225-236, 2006.
42. WOODALL, W.H. Controversies and Contradictions in Statistical Process Control. **Journal of Quality Technology**, v. 32, p. 341-350, 2000.
43. WOODALL, W.H.; MONTGOMERY, D.C. Research issues and ideas in statistical process control. **Journal of Quality Technology**, v. 31, p. 376-386, 1999.
44. WU, C.W.; PEARN, W.L.; KOTZ, S. An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. **International Journal of Production Economics**, v. 117, p. 338-359, 2009.
45. YU, K.T.; SHEU, S.H.; CHEN, K.S. The evaluation of process capability for a machining center, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, p. 505-510, 2007.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta inicialmente as conclusões da dissertação, e na sequência, são apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

3.1. Conclusões

Nesta dissertação discutiu-se a importância de aplicar corretamente os índices de capacidade de processos, tendo como objetivo principal propor índices de capacidade para processos monitorados por gráficos de controle baseados em modelos de regressão, contemplando limites de especificação simétricos e assimétricos. Para atingir o objetivo principal e os objetivos específicos da presente dissertação, foram elaborados três artigos.

O primeiro artigo contemplou um mapeamento da literatura visando identificar as principais abordagens pesquisadas em relação à capacidade de processos, além de identificar lacunas existentes passíveis de pesquisas e estudos. Com o mapeamento realizado, pode-se analisar o número de artigos publicados em relação aos periódicos visados, em relação ao ano de publicação e em relação às diferentes abordagens. Identificou-se que a abordagem “múltiplas características” apresentou um maior número de publicações no período mapeado. A proposição de índices de capacidade para processos monitorados por gráficos de controle baseados em modelos de regressão não foi identificada em nenhum artigo, justificando a relevância do objetivo principal da dissertação.

Esta linha de pesquisa é importante uma vez que o uso dos gráficos de controle e posterior aplicação dos índices de capacidade tradicionais supõe que as variáveis monitoradas sejam independentes e identicamente distribuídas. Quando ocorrem frequentes ajustes nas variáveis de controle, a distribuição da variável de resposta do processo pode ser alterada significativamente, fazendo com que os gráficos de controle propostos por Shewhart sejam ineficientes. Nesta situação, se existir uma relação linear entre a variável de resposta e as variáveis de controle, é possível utilizar os gráficos de controle baseados em modelos de regressão. A aplicação dos índices de capacidade tradicionais em processos monitorados com este tipo de gráfico ficaria prejudicada.

Assim, contemplando o objetivo principal desta dissertação, o artigo dois apresentou a proposta de índices de capacidade para processos monitorados com gráficos de controle baseados em modelos de regressão (índices GR) para especificações simétricas e assimétricas.

Um processo com dados simulados foi utilizado para a comparação dos índices GR com os índices tradicionais existentes na literatura. Os resultados demonstraram que se pode realizar uma interpretação equivocada em relação à capacidade quando se utiliza os índices tradicionais em processos que são controlados por gráficos de controle baseados em modelos de regressão.

O artigo 3 apresentou a proposição de um fluxograma orientativo com o objetivo de direcionar a escolha do tipo de gráfico de controle e dos índices de capacidade para processos com variáveis de resposta não correlacionadas, correlacionadas dependentes das variáveis de controle e autocorrelacionadas. O uso deste fluxograma foi ilustrado através do monitoramento e avaliação da capacidade do processo de torneamento de uma empresa do ramo de equipamentos agrícolas. Como resultado, obteve-se uma comparação dos índices GR com os índices tradicionais evidenciando a importância de aplicar os índices de capacidade corretos de acordo com o monitoramento e comportamento dos dados de um processo.

Com o conjunto dos três artigos, considera-se que os objetivos da dissertação foram plenamente atingidos: *(i)* foi proposto índices de capacidade para gráficos de controle baseados em modelos de regressão; *(ii)* realizou-se um mapeamento dos artigos sobre índices de capacidade, identificando as diferentes abordagens existentes na literatura; *(iii)* comparou-se os índices GR propostos com os índices tradicionais; *(iv)* desenvolveu-se um fluxograma orientativo visando direcionar o tipo de gráfico de controle e índices de capacidade, ilustrado através de uma aplicação do gráfico de controle de regressão em um processo de torneamento de uma empresa do ramo de equipamentos agrícolas.

3.2. Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do trabalho, foi possível identificar algumas sugestões para trabalhos futuros: *(i)* aplicação dos índices GR propostos na presente dissertação em outros processos produtivos; *(ii)* contemplar no fluxograma orientativo outros tipos de gráficos de controle existentes na literatura; *(iii)* adaptação dos índices de capacidade para gráficos de controle baseados em modelos de regressão para atributos; *(iv)* estudos que aliem os índices GR com critérios ambientais; *(v)* realizar simulações com os índices GR propostos; e *(vi)* contemplar o estudo dos índices de capacidade na área de serviços e na área de confiabilidade.

REFERÊNCIAS

1. AHMAD, S., ABDOLLAHIAN, M., ZEEPHONGSEHUL, P.; ABBASI, B. (2009), "Multivariate nonnormal process capability analysis", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 44, 757-765.
2. ALBING, M. (2009), "Process capability indices for Weibull distributions and upper specification limits", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 25, 317-334.
3. ALMEIDA, S.S. (2003), "*Desenvolvimento de Gráficos de Controle Aplicados ao Modelo Funcional de Regressão*". Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina.
4. ANIS, M.Z. (2008), "Basic process capability indices: an expository review", *International Statistical Review*, v. 76, n. 3, 347-367.
5. BALAMURALI, S.; KALYANASUNDARAM, M. (2002), "Bootstrap lower confidence limits for the process capability indices C_p , C_{pk} and C_{pm} ", *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 19, n. 8/9, 1088-1097.
6. BARRIGA, G.D.C.; HO, L.L.; BORGES, W.S. (2003), "Um índice de capacidade para especificações unilaterais", *Revista Produção*, v. 13, n. 1, 40-49.
7. BORDIGNON, S.; SCAGLIARINI, M. (2002), "Statistical analysis of process capability indices with measurement errors", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 18, 321-332.
8. BORDIGNON, S.; SCAGLIARINI, M. (2006), "Estimation of C_{pm} when measurement error is present", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 22, 787-801.
9. BORGES, W.S.; HO, L.L. (2001), "A fraction defective based capability index", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 17, 447-458.
10. BULBA, E.A.; HO, L.L. (2004), "Índices de capacidade de relações funcionais lineares e não-lineares", *Revista Produção*, v. 14, n. 1, 6-11.
11. BURDICK, R.K., BORROR, C.M.; MONTGOMERY, D.C. (2003), "A review of methods for measurement systems capability analysis", *Journal of Quality Technology*, v. 35, 342-354.
12. CASTAGLIOLA, P. (2001) "How to monitor capability index C_M using EWMA", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, v. 8, n. 3, 191-204.
13. CASTAGLIOLA, P.; VÄNNMAN, K. (2007), "Monitoring capability indices using an EWMA approach", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 23, 769-790.
14. CASTAGLIOLA, P.; VÄNNMAN, K. (2008), "Average run length when monitoring capability indices using EWMA", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 24, 941-955.
15. CHAN, L.K., CHENG, S.W.; SPIRING, F.A. (1988), "A new measure of process capability: C_{pm} ", *Journal of Quality Technology*, v. 20, 162-175.
16. CHANG, Y.C. (2009), "Interval estimation of capability index C_{pmk} for manufacturing processes with asymmetric tolerances", *Computers & Industrial Engineering*, v. 56, 312-322.
17. CHANG, Y.C.; WU, C.W. (2008), "Assessing process capability based on the lower confidence bound of C_{pk} for asymmetric tolerances", *European Journal of Operational Research*, v. 190, 205-227.
18. CHANG, Y.S., CHOI, I.S.; BAI, D.S. (2002), "Process capability indices for skewed populations", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 18, 383-393.
19. CHAO, M.T.; LIN, D.K.J. (2006), "Another look at the process capability index", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 22, 153-163.
20. CHEN, J.P.; DING, C.G. (2001). "A new process capability index for non-normal distributions", *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 18, 762-770.
21. CHEN, J-P. (2005), "Comparing four lower confidence limits for process yield index S_{pk} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 26, 609-614.
22. CHEN, J-P.; CHEN, K.S. (2004), "Comparing the capability of two processes using C_{pm} ", *Journal of Quality Technology*, v. 32, n. 4, 440-443.
23. CHEN, J-P.; CHEN, K.S. (2004), "Comparison of two process capabilities by using indices C_{pm} an application to a color STN display", *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 21, n. 1, 90-101.
24. CHEN, J-P.; DING, C.G. (2001), "A new process capability index for non-normal distributions", *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 18, n. 7, 762-770.
25. CHEN, J-P.; PEARN, W.L. (2002), "Testing process performance based on the yield: na application to the liquid-crystal display module", *Microelectronics Reliability*, v. 42, 1235-1241.
26. CHEN, J-P.; TONG, L.I. (2003), "Bootstrap confidence interval of the difference between two process capability indices", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 21, 249-256.
27. CHEN, K.L., CHEN, K.S.; LI, R.K. (2005), "Suppliers capability and price analysis chart", *International Journal of Production Economics*, v. 98, 315-327.

28. CHEN, K.S., CHEN, K.L.; LI, R.K. (2005), "Contract manufacturer selection by using the process incapability index C_{pp} ", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 26, 686-692.
29. CHEN, K.S., CHEN, S.C.; LI, R.K. (2002), "Process quality analysis of products", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 19, 623-628.
30. CHEN, K.S., HSU, C.H.; OUYANG, L.Y. (2007), "Applied product capability analysis chart in measure step of Six Sigma", *Quality & Quantity*, v. 41, 387-400.
31. CHEN, K.S., HSU, C.H.; WU, C.C. (2006), "Process capability analysis for a multi-process product", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 27, 1235-1241.
32. CHEN, K.S., HUANG, H.L.; HUANG, C.T. (2007), "Control charts for one-sided capability indices", *Quality & Quantity*, v. 41, 413-427.
33. CHEN, K.S., HUANG, M.L., LI, R.K. (2001), "Process capability analysis for an entire product", *International Journal of Production Economics Research*, v. 39, 4077-4087.
34. CHEN, K.S., LI, R.K.; LIAO, S.J. (2002), "Capability evaluation of a product family for processes of the larger-the-better type", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 20, 824-832.
35. CHEN, K.S., OUYANG, L.Y., HSU, C.H.; WU, C.C. (2009), "The communion bridge to Six Sigma and process capability indices", *Quality & Quantity*, v. 43, 463-469.
36. CHEN, K.S., PEARN, W.L., LIN, P.C. (1999). "A new generalization of the capability index C_{pm} for asymmetric tolerances", *International Journal of Reliability, Quality & Safety Engineering*, 6, 383-398.
37. CHEN, K.S., PEARN, W.L.; LIN, P.C. (2003), "Capability measures for Processes with multiple characteristics", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 19, 101-110.
38. CHEN, K.S., YU, K.T.; SHEU, S.H. (2006), "Process capability monitoring chart with an application in the silicon-filler manufacturing process", *International Journal of Production Economics*, v. 103, 565-571.
39. CHEN, K.S.; CHEN, T.W. (2008), "Multi-process capability plot and fuzzy inference evaluation", *International Journal of Production Economics*, v. 111, 70-79.
40. CHEN, K.S.; HUANG, M.L. (2007), "Process capability evaluation for the process of product families", *Quality & Quantity*, v. 41, 151-162.
41. CHEN, T.W., CHEN, K.S.; LIN, J.Y. (2003), "Fuzzy evaluation of process capability for bigger-the-best type products", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 21, 820-826.
42. CHEN, T.W., LIN, J.Y.; CHEN, K.S. (2003), "Selecting a supplier by fuzzy evaluation of capability indices C_{pm} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 22, 534-540.
43. CLARO, F.A.E.; COSTA, A.F.B.; MACHADO, M.A.G. (2007), "Gráficos de controle de EWMA e de X para monitoramento de processos autocorrelacionados", *Revista Produção*, v. 17, n. 3, 536-546.
44. CLEMENTS, J. A. (1989). "Process capability calculations for non-normal distributions", *Quality Progress*, 22, 95-100.
45. CORBETT, C.J.; PAN, J-N. (2002), "Evaluation environmental performance using Statistical Process Control techniques", *European Journal of Operation Research*, v. 139, 68-83.
46. COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. (2005). *Controle Estatístico de Qualidade*. São Paulo: Editora Atlas, 2ª Edição, 334 p.
47. CRONIN, J. (2003), "Looking back to see forward in services marketing: some ideas to consider", *Managing Service Quality*, v. 13, n. 5, 332-337.
48. DELERYD, M. (1999), "A pragmatic view on process capability studies", *International Journal of Production Economics*, v. 58, 319-330.
49. DING, J. (2004), "A method of estimating the process capability index from the first four moments of non-normal data", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 20, 787-805.
50. FOGLIATTO, F.S. (2000). "Estratégias para modelagem de dados multivariados na presença de correlação", *Gestão & Produção*, v. 7, 17-28.
51. GIL, A.C. (1991), "Como elaborar projetos de pesquisa", 3. ed. São Paulo: Atlas, 159 p.
52. GONÇALEZ, P.U.; WERNER, L. (2009), "Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais", *Gestão e Produção*, v. 16, n. 1, 121-132.
53. GONZÁLEZ, I.; SÁNCHEZ, I. (2009), "Capability indices and nonconforming proportion in univariate and multivariate processes", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 44, 1036-1050.
54. GREENWICH, M.; SCHAFFRATH, B.L.J. (1995), "A process incapability index", *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 12, n. 4, 58-71.
55. HARRY, M.J. (1998), "Six Sigma: A breakthrough strategy for profitability", *Quality Progress*, v. 31, n. 5, 60-64.
56. HAWKINS, D.M. (1991). "Multivariate Quality Control Based on Regression-Adjusted Variables", *Technometrics*, v. 33, 61-75.
57. HAWORTH, D.A. (1996). "Regression control charts to manage software maintenance", *Software Maintenance: Research and Practice*, v. 8, 35-48.

58. HOFFMAN, L.L. (2001), "Obtaining confidence intervals for C_{pk} using percentiles of the distribution of \hat{C}_p ", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 17, n. 2, 113-118.
59. HOSSEINIFARD, S.Z., ABBASI, B., AHMAD, S.; ABDOLLAHIAN, M. (2009), "A transformation technique to estimate the process capability index for non-normal processes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 40, 512-517.
60. HSIEH, K.L. (2006), "The study of cost-tolerance model by incorporating process capability index into product lifecycle cost", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 28, 638-642.
61. HSIEH, K.L.; TONG, L.I. (2006), "Incorporating process capability index and quality loss function into analyzing the process capability for qualitative data", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 27, 1217-1222.
62. HSU, B.M., SHU, M.H.; PEARN, W.L. (2007), "Measuring process capability based on C_{pmk} with gauge measurement errors", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 23, 597-614.
63. HUANG, M.L., CHEN, K.S. (2003), "Capability analysis for a multiprocess product with bilateral specifications", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 21, 801-806.
64. HUANG, M.L., CHEN, K.S.; HUNG, Y.H. (2002), "Integrated process capability analysis with an application in backlight module", *Microelectronics Reliability*, v. 42, 2009-2014.
65. HUANG, M.L., CHEN, K.S.; LI, R.K. (2005), "Graphical analysis of capability of a process producing a product family" *Quality & Quantity*, v. 39, 643-657.
66. HUANG, M.L.; CHEN, K.S. (2003), "Capability analysis for a multi-process product with bilateral specifications", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 21, 801-806.
67. HUBELE, N.F., BERRADO, A.; GEL, E.S. (2005), "A wald test for comparing multiple capability indices", *Journal of Quality Technology*, v. 37, n. 4, 304-307.
68. HUBELE, N.F.; VÄNNMAN, K. (2004), "The effect of pooled and un-pooled variance estimators on C_{pm} when using subsamples", *Journal of Quality Technology*, v. 36, n. 2, 207-222.
69. JACOBI, L.F., SOUZA, A.M.; PEREIRA, J.E.S. (2002). "Gráfico de Controle de Regressão Aplicado na Monitoração de Processos", *Revista Produção*, v. 12, 46-59.
70. JEANG, A.; CHUNG, C.P. (2009) "Process capability analysis based on minimum production cost and quality loss", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 43, 710-719.
71. JESSENBERGER J.; WEIHS C. (2000) "A note on the behavior of C_{pmk} with asymmetric specification limits", *Journal of Quality Technology*, v. 36, 329-335.
72. KANE, V.E. (1986), "Process capability indices", *Journal of Quality Technology*, v. 18, n. 1, 41-52.
73. KE, J.C., CHU, Y.K., CHUNG, Y.T.; LIN, P.C. (2009) "Assessing non-normally distributed processes by interval estimation of the incapability index C_{pp} ", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 25, 427-437.
74. KOTZ, S.; JOHNSON, N.L. (2002), "Process capability indices – a review, 1992-2000", *Journal of Quality Technology*, v. 34, n. 1, 2-19.
75. LEAL, R.P.; PEREIRA, Z.L. (2007), "Process capability in services", *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 24, n. 8, 800-812.
76. LEE, H.T. (2001), " C_{pk} index estimation using fuzzy numbers", *European Journal of Operation Research*, v. 129, n. 3, 683-688.
77. LEE, J.C., HUNG, H.N., PEARN, W.L.; KUENG, T.L. (2002), "On the distribution of the estimated process yield index S_{pk} ", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 18, 111-116.
78. LEE, P.H.; YUM, B.J. (2003), "Multi-characteristics parameter design: a desirability function approach based on process capability indices", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, v. 10, n. 4, 445-461.
79. LEUNG, B.P.K.; SPIRING, F. (2007), "Adjusted action limits for C_{pm} based on departures from normality", *International Journal of Production Economics*, v. 107, 237-249.
80. LIN, C-J.; PEARN, W.L. (2009), "Process selection for higher production yield based on capability index S_{pk} ", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 26, 247-258.
81. LIN, G.H. (2004), "Upper limits of the estimated incapability index: a practical application on the reliability assessment of printed circuit boards", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 24, 841-846.
82. LIN, G.H. (2005), "Process reliability assessment with a Bayesian approach", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 25, 392-395.
83. LIN, G.H. (2006a), "A random interval estimation of the estimated process accuracy index", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 27, 969-979.
84. LIN, G.H. (2006b), "Assessing process performance with incapability index based on multiple samples", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 27, 715-719.
85. LIN, G.H., PEARN, W.L.; YANG, Y.S. (2005), "A Bayesian Approach to Obtain a Lower Bound for the C_{pm} Capability Index", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 21, 655-668.

86. LIN, H.C. (2005), "Using normal approximation for calculating the p-value in assessing process capability index C_{pk} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 25, 160-166.
87. LIN, P.C.; PEARN, W.L. (2002), "Testing process capability for one-sided specification limit with application to the voltage level translator", *Microelectronics Reliability*, v. 42, 1975-1983.
88. LIN, P.C.; PEARN, W.L. (2005), "Testing manufacturing performance based on capability index C_{pm} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 27, 351-358.
89. LIU, P.H.; CHEN, F.L. (2006), "Process capability analysis of non-normal process data using the Burr XII distribution", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 27, 975-984.
90. LOREDO, E.N., JERKPAPORN, D.; BORROR, C.M. (2002) "Model-based Control Chart for Autoregressive and Correlated Data", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 18, 489-496.
91. LOVELACE, C.R., SWAIN, J.J., ZEINELABDIN, H.; GUPTA, J.N.D. (2009), "Lower confidence limits for process capability indices C_p and C_{pk} when data are autocorrelated", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 25, 663-700.
92. MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S.; HYNDMAN, R. (1998), *Forecasting, Methods and Applications*. 3ª edição. John Wiley & Sons. New York.
93. MANDEL, B.J. (1969). "The Regression Control Chart", *Journal of Quality Technology*, v. 1, 1-9.
94. MATHEW, T., SEBASTIAN, G.; KURIAN, K.M. (2007), "Generalized confidence intervals for process capability indices", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 23, 471-481.
95. MINGOTI, S.A.; GLÓRIA, F.A.A. (2008), "Comparing Mingoti and Glória's and Niverthi and Dey's multivariate capability indexes", *Revista Produção*, v. 18, n. 3, 598-608.
96. MONTGOMERY, D. C. (2004). *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 513 p.
97. MONTGOMERY, D.C., VINING, G.G.; PECK, E.A. (2001). *Introduction to linear regression analysis*. 3. Ed., New York: John Wiley & Sons, 641 p.
98. MORITA, M., ARIZONO, I., NAKASE, I.; TAKEMOTO, Y. (2009), "Economical operation of the C_{pm} control chart for monitoring process capability index", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 43, 304-311.
99. NAHAR, P.C., HUBELE, N.F.; ZIMMER, L.S. (2001), "Assessment of a capability index sensitive to skewness" *Quality and Reliability Engineering International*, v. 17, n. 4, 233-241.
100. NETER, J., KUTNER, M.H., NACHTSHEIM, C.J.; Li, W. (2005), *Applied Linear Statistical Models*. 5. Ed. New York: Mc Graw-Hill/Irwin, 1396 p.
101. NOOROSSANA, R. (2002), "Short communication process capability analysis in the presence of autocorrelation", *Quality and Reliability Engineering International*, v.18, 75-77.
102. OLIN, B.D. (1998). Regression Control Charts Revisited: Methodology and Cases Studies. In: *Annual Fall Technical Conference, 42°*, New York: American Society for Quality, 17 p.
103. PALMER, K.; TSUI, K.L. (1999), "A review and interpretations of process capability indices", *Annals of Operations Research*, v. 87, 31-47.
104. PAN, J-N.; LEE, C.Y. (2009), "New capability indices for evaluating the performance of multivariate manufacturing processes", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 26, n. 1, 3-15.
105. PARLAR, M.; WESOLOWSKY, G.O. (1999), "Specification Limits, Capability Indices, and Process Centering in Assembly Manufacture", *Journal of Quality Technology*, v. 31, 317-325.
106. PEARN W.L., WU C.W.; WANG K.H. (2005), "Capability measure for asymmetric tolerance non-normal processes applied to speaker driver manufacturing", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 25, 506-515.
107. PEARN, W.L., CHANG, Y.C.; WU, C.W. (2005a), "Bootstrap approach for estimating process quality yield with application to light emitting diodes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 25, 560-570.
108. PEARN, W.L., HUNG, H.N., PENG, N.F.; HUANG, C.Y. (2007), "Testing process precision for truncated normal distributions", *Microelectronics Reliability*, v. 47, 2275-2281.
109. PEARN, W.L., KO, C.H.; WANG, K.H. (2002), "A multiprocess performance analysis chart based on the incapability index C_{pp} : an application to the chip resistors", *Microelectronics Reliability*, v. 42, 1121-1125.
110. PEARN, W.L., KOTZ, S.; JOHNSON, N.L. (1992). "Distributional and inferential properties of process control indices", *Journal of Quality Technology*, v. 24, n. 4, 216-231.
111. PEARN, W.L., LIN, G.H.; WANG, K.H. (2004), "Normal approximation to the distributional of the estimated yield index S_{pk} ", *Quality & Quantity*, v. 38, n. 1, 95-111.
112. PEARN, W.L., LIN, P.C., CHANG, Y.C., WU, C.W. (2006), "Quality yield measure for processes with asymmetric tolerances", *IIE Transactions*, v. 38, 619-633.
113. PEARN, W.L., SHU, M-H.; HSU, B.M. (2004), " C_{pm} MPPAC for manufacturing quality control applied to precision voltage reference process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 23, 712-719.

114. PEARN, W.L., WU, C.W.; CHUANG, H.C. (2005), "Procedures for testing manufacturing precision C_p based (X, R) or (X, S) control chart samples", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 25, n. 5/6, 98-607.
115. PEARN, W.L., WU, C.W.; WANG, K.H. (2005), "Capability measure for asymmetric tolerance non-normal processes applied to speaker driver manufacturing" *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 25, 506-515.
116. PEARN, W.L., YANG, S.L., CHEN, K.S.; LIN, P.C. (2001), "Testing process capability using the index C_{pmk} with an application", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, v. 8, n. 1, 15-34.
117. PEARN, W.L.; CHANG, C.S. (2006), "Precision measures for processes with multiple manufacturing lines", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 30, 1202-1210.
118. PEARN, W.L.; CHEN, K.S. (1997), "Capability indices for non-normal distributions with an application in electrolytic capacitor manufacturing", *Microelectronics Reliability*, v. 37, 1853-1858.
119. PEARN, W.L.; CHEN, K.S. (1997), "Capability indices for non-normal distributions with an application in electrolytic capacitor manufacturing", *Microelectronics Reliability*, v. 37, 1853-1858.
120. PEARN, W.L.; CHEN, K.S. (2002), "One-sided capability indices C_{pu} and C_{pl} : decision making with sample information", *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 19, n. 3, 221-245.
121. PEARN, W.L.; CHEN, K.S.; LIN, P.C. (1999), "On the generalizations of the capability index C_{pmk} for asymmetric tolerances", *Far East Journal of Theoretical Statistics*, v. 3, 47-66.
122. PEARN, W.L.; HSU, Y.C. (2007), "Optimal tool replacement for processes with low fraction defective", *European Journal of Operational Research*, v. 180, 1116-1129.
123. PEARN, W.L.; KOTZ, S. (2006), "Encyclopedia And Handbook of Process Capability Indices: A Comprehensive Exposition of Quality Control Measures", *Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics*, v. 12.
124. PEARN, W.L.; KOTZ, S.; JOHNSON, N.L. (1992), "Distributional and inferential properties of process control indices", *Journal of Quality Technology*, v. 24, 216-231.
125. PEARN, W.L.; LIAO, M-Y. (2005), "Measuring process capability based on C_{pk} with gauge measurement errors", *Microelectronics Reliability*, v. 45, 739-751.
126. PEARN, W.L.; LIAO, M-Y. (2006), "One-sided process capability assessment in the presence of measurement errors", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 22, 771-785.
127. PEARN, W.L.; LIAO, M-Y. (2007), "Estimating and testing process precision with presence of gauge measurement errors", *Quality & Quantity*, v. 41, 757-777.
128. PEARN, W.L.; LIN, G.H. (2001), "On the reliability of the estimated incapability index", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 17, 279-290.
129. PEARN, W.L.; LIN, G.H. (2002a), "Estimated incapability index reliability and decision making with sample information", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 18, 141-147.
130. PEARN, W.L.; LIN, G.H. (2003), "A reliable procedure for testing linear regulators with one-sided specification limits based on multiple samples", *Microelectronics Reliability*, v. 43, 651-644.
131. PEARN, W.L.; LIN, P.C. (2002b), "Computer program for calculating the p-values in testing process capability C_{pmk} ", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 18, n. 4, 333-342.
132. PEARN, W.L.; LIN, P.C. (2004), "Measuring process yield based on the capability index C_{pm} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 24, 503-508.
133. PEARN, W.L.; SHU, M-H. (2003a), "An algorithm for calculating the lower confidence bounds of C_{PU} and C_{PL} with application to low-drop-out linear regulators", *Microelectronics Reliability*, v. 43, 495-502.
134. PEARN, W.L.; SHU, M-H. (2003b), "Manufacturing capability control for multiple power-distribution switch processes based on modified C_{pk} MPPAC", *Microelectronics Reliability*, v. 43, 963-975.
135. PEARN, W.L.; SHU, M-H. (2004), "Measuring manufacturing capability based on lower confidence bounds of C_{pmk} applied to current transmitter process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 23, 116-125.
136. PEARN, W.L.; WU, C.W. (2005), "A Bayesian approach for assessing process precision based on multiple samples", *European Journal of Operational Research*, v. 165, 685-695.
137. PEARN, W.L.; WU, C.W. (2006), "Production quality and yield assurance for processes with multiple independent characteristics", *European Journal of Operational Research*, v. 173, 637-647.
138. PEARN, W.L.; YANG, S.L. (2003), "Distributional and inferential properties of the estimated precision index C_p based on multiple samples", *Quality & Quantity*, v. 37, 443-453.
139. PEDRINI, D.C.; CATEN, C.S. (2011). "Método para a Aplicação de Gráficos de Controle de Regressão no Monitoramento de Processos", *Revista Produção*. Aceito para publicação.
140. PERAKIS, M.; XEKALAKI, E. (2004), "A new method for constructing confidence intervals for the index C_{pm} ", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 20, 651-665.

141. POLANSKY, A.M. (2003), "Supplier selection based on bootstrap confidence regions of process capability indices", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, v. 10, n. 1, 1-14.
142. POLANSKY, A.M. (2006), "Permutation methods for comparing process capabilities", *Journal of Quality Technology*, v. 38, n. 3, 254-266.
143. RAMAKRISHNAN, B., SANDBORN, P.; PECHT, M. (2001), "Process capability indices and product reliability", *Microelectronics Reliability*, v. 41, 2067-2070.
144. RAMOS, A.W.; HO, L.L. (2003), "Procedimentos inferenciais em índices de capacidade para dados autocorrelacionados via bootstrap", *Revista Produção*, v.13, n.3.
145. SHINDE, R.L.; KHADSE, K.G. (2009), "Multivariate process capability using principal component analysis", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 25, 69-77.
146. SHISHEBORI, D.; HAMADANI, A.Z. (2009), "The effect of gauge measurement capability on MC_p and its statistical properties", *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 26, n. 6, 564-582.
147. SHU, L., TSUI, K. L.; TSUNG, F. (2007). "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, 1569-1573.
148. SHU, L., TSUNG, F. & TSUI, K.L. (2004). "Run-length Performance of Regression Control Charts with Estimated Parameters", *Journal of Quality Technology*, v. 36, 280-292.
149. SHU, M-H., WANG, C.H.; HSU, B.M. (2006), "A review and extensions of sample size determination for estimating process precision and loss with a designated accuracy ratio", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 27, 1038-1046.
150. SILVA, E.L.; MENEZES, E.M. (2000), "*Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação*", UFSC/PPGEP/LED, Florianópolis-SC.
151. SOUZA, F.S.; PEDRINI, D.C.; CATEN, C.S. (2011), "Proposta de índices de capacidade para gráficos de controle baseados em modelos de regressão", *Artigo a ser submetido para a revista Pesquisa Operacional*.
152. SPIRING, F. (2008), "A process capability/customer satisfaction approach to short-run processes", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 24, 467-483.
153. SPIRING, F., LEUNG, B., CHENG, S.; YEUNG, A. (2003), "A bibliography of process capability papers", *Quality and Reliability Engineering International*, v.19, 445-460.
154. SPIRING, F.A. (1995), "Process capability a total quality management tool", *Total Quality Management*, v. 6, n. 1, 21-33.
155. SUNG, W.P., CHEN, K.S.; GO, C.G. (2002), "Analytical method of process capability for steel", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 20, 480-486.
156. SUNG, W-P.; CHEN, K-S. (2004), "An analytical method for the process capability of a precision component of an instrument", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 24, 126-131.
157. TAAM, W., SUBBAIAH, P.; LIDDY, J.W. (1993), "A note on multivariate capability indices", *Journal of Applied Statistics*, v. 20, 339-351.
158. TSAI, C.C.; CHEN, C.C. (2006), "Making decision to evaluate process capability index C_p with fuzzy numbers", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 30, 334-339.
159. VÄNNMAN, K. (1995), "A unified approach to capability indices", *Statistica Sinica*, v. 5, 805-820.
160. VÄNNMAN, K., DELERYD, M. (1999), "Process capability plots—a quality improvement tool", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 22, 213–217.
161. VÄNNMAN, K.; ALBING, M. (2007), "Process capability indices for one-sided specification intervals and skewed distributions", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 23, 755-765.
162. VÄNNMAN, K.; HUBELE, N.F. (2003), "Distributional properties of estimated capability indices based on subsamples", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 19, 111-128.
163. VÄNNMAN, K.; KULAHCI, M. (2008), "A model-free approach to eliminate autocorrelation when testing for process capability", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 24, 213-228.
164. VÄNNMAN, K.; KULAHCI, M. (2008). "A Model-free approach to eliminate autocorrelation when testing for process capability", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 24, 213-228.
165. WANG, C.H. (2005), "Constructing multivariate process capability indices for short-run production", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 26, 1306-1311.
166. WANG, F.K. (2006), "Quality evaluation of a manufactured product with multiple characteristics", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 22, 225-236.
167. WANG, F.K., HUBELE, N.F., LAWRENCE, F.P., MISKULIN, J.D.; SHAHRIARI, H. (2000), "Comparison of three multivariate process capability indices", *Journal of Quality Technology*, v. 32, n. 3, 263-275.
168. WOODALL, W. H., MONTGOMERY, D.C. (1999). "Research issues and ideas in statistical process control", *Journal of Quality Technology*, v. 31, n.4, 376-386.

169. WOODALL, W.H. (2000), "Controversies and contradictions in statistical process control", *Journal of Quality Technology*, v. 32, n. 4, 341-350.
170. WU, C.C., KUO, H.L.; CHEN, K.S. (2004), "Implementing process capability indices for a complete product" *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 24, 891-898.
171. WU, C.W., PEARN, W.L.; KOTZ, S. (2009). "An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance", *International Journal of Production Economics*, v. 117, 338-359.
172. WU, C-W. (2008), "Assessing process capability based on Bayesian approach with subsamples", *European Journal of Operational Research*, v. 184, 207-228.
173. WU, C-W. (2009), "Decision-making in testing process performance with fuzzy data", *European Journal of Operational Research*, v. 193, 499-509.
174. WU, C-W., PEARN, W.L.; KOTZ, S. (2009), "An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance", *International Journal of Production Economics*, v. 117, 338-359.
175. WU, C-W., SHU, M.H.; CHENG, F.T. (2009), "Generalized confidence intervals for assessing process capability of multiple production lines", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 25, 701-716.
176. WU, C-W.; PEARN, W.L. (2005a), "Capability testing based on C_{pm} with multiple samples", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 21, 29-42.
177. WU, C-W.; PEARN, W.L. (2005b), "Measuring manufacturing capability for couplers and wavelength division multiplexers", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 25, 533-541.
178. WU, C-W.; PEARN, W.L. (2006), "Bayesian approach for measuring EEPROM process capability based on the one-sided indices C_{PU} and C_{PL} ", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 31, 135-144.
179. WU, H-H. (2004), "Using target costing concept in loss function and process capability indices to set up goal control limits", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 24, 206-213.
180. WU, H-H.; SWAIN, J.J. (2001), "A Monte Carlo comparison of capability indices when processes are non-normally distributed", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 17, 219-231.
181. YU, K.T., SHEU, S.H.; CHEN, K.S. (2007), "Testing multi-characteristic product capability indices", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 34, 421-429.
182. YU, K.T., SHEU, S.H.; CHEN, K.S. (2007), "The evaluation of process capability for a machining center", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 33, 505-510.
183. ZIMMER, L.S., HUBELE, N.F.; ZIMMER, W.J. (2001), "Confidence intervals and sample size determination for C_{pm} ", *Quality and Reliability Engineering International*, v. 17, 51-68.