

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

INFLUÊNCIA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO
NO USO DE CARTAS DE CONTROLE

PEDRO DA SILVA HACK

Porto Alegre

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Influência da Incerteza de Medição no Uso de Cartas de Controle

Pedro da Silva Hack

Orientador: Carla Schwengber ten Caten

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 da Qualidade.

Porto Alegre

2012

PEDRO DA SILVA HACK

Influência da Incerteza de Medição no Uso de Cartas de Controle

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 PPGE/UFGRS

Prof. Carla Schwengber ten Caten, Dr^a.

Coordenadora PPGE/UFGRS

Banca Examinadora:

Morgana Pizzolato (Dept. Engenharia de Produção/UFSM)

Maria Teresa Raya-Rodriguez (PPGECO/UFGRS)

João Alziro Herz da Jornada (INMETRO)

AGRADECIMENTOS

HACK, P.S. *Influência da Incerteza de Medição no Uso de Cartas de Controle*. 2012. Dissertação (mestrado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RESUMO

A incerteza de medição ainda é tema de estudo e desenvolvimento, mesmo quase vinte anos após o lançamento do ISO GUM, que definiu um padrão internacional para o cálculo de incerteza. Mesmo assim, poucos estudos tratam da interface entre a incerteza de medição e outros aspectos da qualidade industrial, em especial ferramentas de controle de processo como cartas de controle. Assim, o objetivo deste trabalho é estudar os efeitos da incerteza em cartas de controle e identificar sob quais situações de aplicação ela exerce maior influência. Foi feito um mapeamento dos artigos publicados entre 2004 e 2010 sobre incerteza de medição, para identificar quais as metodologias de cálculo e abordagem são mais utilizadas. Na sequência, foi desenvolvido um método incluir nas cartas de controle a incerteza do sistema de medição, modificando as probabilidades de erros tipo I e tipo II. Finalmente, foi elaborada uma simulação computacional utilizando o método desenvolvido, para que fosse possível analisar quais as situações nas quais a incerteza de medição deve ser obrigatoriamente considerada e quais ela pode ser negligenciada.

Palavras-chave: Incerteza de Medição, Cartas de Controle, Controle Estatístico de Processo.

HACK, P.S. *Influence of Measurement Uncertainty in the Usage of Control Charts*.
2012. Master's work – Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

ABSTRACT

The measurement uncertainty is still subject of study and development, even almost twenty years after the release of the ISO GUM, which set an international standard for the its calculation. Still, few studies have addressed the interface between the measurement uncertainty and other aspects of industrial quality, in particular process control tools like control charts. The objective of this work is to study the effects of measurement uncertainty on control charts and to identify the situations in which its application exerts greater influence. A research was made, mapping of the articles published between 2004 and 2010 regarding measurement uncertainty, aiming to identify which calculation methods and approaches are most widely used. After, a method was developed to include uncertainty of the measurement system in control charts, modifying the probabilities of type I and type II errors. Finally, it was created a computer simulation using the method developed, to make it possible to analyze those situations in which the measurement uncertainty must be considered and which it can be neglected.

Keywords: Measurement Uncertainty, Control Charts, Statistical Process Control.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Tema e objetivos	9
1.2. Justificativa	10
1.2.1. <i>Justificativa do tema</i>	10
1.2.2. <i>Justificativa dos objetivos</i>	10
1.3. Método do trabalho	11
1.4. Delimitações do trabalho	13
1.5. Estrutura do trabalho.....	14
2. ARTIGOS PROPOSTOS.....	15
2.1. ARTIGO 1	16
2.2. ARTIGO 2	39
2.3. ARTIGO 3	60
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
3.1. Conclusões	84
3.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	85
4. REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

A concorrência do mercado atual faz com que a indústria exija cada vez mais de seus produtos e processos, visando reduzir custos, cortar desperdícios e melhorar qualidade. Diante disso, o Controle Estatístico de Processo (CEP) é uma das ferramentas mais utilizadas para realizar o controle *online* da qualidade e reduzir a variabilidade de processos (MONTGOMERY, 2004), devido à sua simplicidade de entendimento e operação (ZHANG; WU, 2005). Sua função é diferenciar causas comuns de variabilidade de causas especiais, ou seja, diferenciar elementos intrínsecos ao processo que fazem variar suas características da qualidade geralmente em pequena magnitude dos fatores externos ao processo que fazem variar suas características geralmente em grande magnitude.

O CEP baseia-se no uso de cartas de controle: ferramentas gráficas que acompanham o processo em tempo real indicando o comportamento de medidas de tendência central e variabilidade. O processo é dito sob controle estatístico quando todas as amostras inspecionadas estão posicionadas dentro dos limites de controle interno e externo, nesse caso o processo está estável e previsível ao longo do tempo. Caso contrário ele apresentou um indício de causa especial e precisa ser investigado (SOUZA, 2010).

Os dados de entrada da carta de controle são medições das variáveis do processo e, portanto, passam pelo sistema de medição. O sistema de medição tem propriedades intrínsecas a ele, que são incorporadas por todas as suas medições e uma de suas propriedades mais importantes é a incerteza de medição (IM). A incerteza de um sistema de medição é um valor não menos crítico que a própria medição (REZNIK; DABKE, 2004) que expressa a faixa dentro da qual está o verdadeiro valor do mensurando e também representa o grau de confiança no resultado (DÉSENFANT; PRIEL, 2006).

Existem muitos modelos de cartas de controle de processo, com diferentes especificidades e aplicações para processos com características distintas (VARGAS, 2004), mas nenhum modelo considera devidamente o efeito que a incerteza de medição pode causar no controle do processo, mesmo se sabendo que as cartas estão constantemente sob sua influência (CARBONE *et al.*, 2003).

A incerteza de medição se traduz em uma possível mudança no posicionamento tanto da amostra quanto dos limites de controle no gráfico, podendo trazer uma amostra para dentro dos limites ou retirando-a, alterando assim a resposta da carta. Avaliar corretamente esse efeito de incertezas pode reduzir drasticamente o risco de realizar uma tomada de decisão equivocada (PENDRILL, 2006).

A incerteza nem sempre irá possuir um grande efeito sobre a carta de controle. Se a sua magnitude for pequena comparada à variabilidade do processo que está sendo controlado pela carta, o seu efeito pode ser desprezível (CARBONE *et al.*, 2003). Essa comparação recebe o nome de TUR (*Test Uncertainty Ratio*) e expressa a razão da variabilidade do processo pela incerteza de medição e quanto menor esse valor, maiores serão os índices de alarmes falsos e o número de amostras necessárias para detectar um processo fora de controle estatístico.

Para situações onde o valor do TUR é muito pequeno a incerteza certamente afetará o desempenho das ferramentas de controle e adaptações devem ser consideradas (HACK; CATEN, 2012; CARBONE *et al.*, 2003). Para esses casos as cartas de controle precisam considerar a variabilidade devido à incerteza de medição e seus efeitos nos limites de controle, para corretamente dimensionar seus parâmetros de forma a minimizar a taxa de alarmes falsos e as amostras necessárias para detectar que o processo tenha saído de controle.

1.1.Tema e objetivos

Os temas desta dissertação são incerteza de medição e cartas de controle de processo. Estes temas contemplam as áreas de metrologia e engenharia da qualidade.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um método para que as cartas de controle considerem a incerteza do sistema de medição. Como decorrência do objetivo principal, os seguintes objetivos específicos são esperados: (i) identificar as metodologias de cálculo de incerteza e as abordagens utilizadas através de um mapeamento dos artigos publicados sobre incerteza de medição; e; (ii) identificar situações de aplicação das cartas de controle nas quais a incerteza de medição deve ser considerada e nas quais ela pode ser negligenciada através de uma simulação computacional.

1.2. Justificativa

1.2.1. Justificativa do tema

A indústria está constantemente buscando a melhoria contínua de seus produtos e processos, e para isso são utilizadas diversas ferramentas da qualidade. Dessa forma, o gráfico de controle de processo é uma das ferramentas da qualidade mais utilizada para monitorar processos e garantir sua estabilidade de forma online (MONTGOMERY, 2004). Eles tem como objetivo indicar graficamente quando o processo sai de controle estatístico, ou seja, quando ele sofre uma mudança não intencional em seus parâmetros.

As cartas de controle são alimentadas com dados medidos diretamente do processo, e esses dados estão sujeitos às incertezas do sistema de medição (CARBONE *et al.*, 2003). Se essas incertezas não forem corretamente consideradas, o risco de uma tomada incorreta de decisão pode aumentar (PENDRILL, 2006). Diante disso, é de extrema importância avaliar corretamente o impacto que essas incertezas causam na utilização das cartas de controle de processo.

A incerteza de medição modifica significativamente o desempenho de cartas de controle, pois pode alterar a resposta da carta de um processo sob controle para fora de controle e vice-versa. No caso de alarmes falsos (falsamente acusar um processo sob controle como fora de controle), são incorridos gastos com parada de produção, inspeção do processo e até mesmo inspeção total do lote produzido. Quando a carta de controle deixa de acusar um processo fora de controle como tal, a empresa deixa de detectar o problema antes que ele ocasione grandes perdas, ou até mesmo que chegue ao cliente.

1.2.2. Justificativa dos objetivos

Já foi discutido sobre a falta de precisão sobre a real posição dos limites de controle (GÜLBAY E KAHRAMAN, 2007) e qual o seu impacto na determinação de causas especiais, porém ainda foi pouco explorado como a incerteza de medição contribui nesse sentido. Foram identificados poucos trabalhos especificamente sobre o efeito que a incerteza de medição pode causar em cartas de controle (CARBONE *et al.*, 2003), apesar de ambos os temas possuírem isoladamente diversas publicações internacionais (MONTGOMERY, 2004; HACK E CATEN, 2012).

Devido ao fato de não haver um tratamento específico para essa interface, há a necessidade de um método que trate do efeito da incerteza na carta de controle, pois ela pode modificar por completo os indicadores de desempenho da carta em relação aos erros tipo I e tipo II.

Se a incerteza do sistema de medição for suficientemente elevada em comparação com a variabilidade do processo controlado pela carta de controle, o posicionamento tanto dos limites quando das amostras pode não corresponder ao que está no gráfico, resultando em um controle do processo pouco eficaz. Caso a incerteza do sistema não seja elevada se comparada à variabilidade do processo, a influência na carta de controle é mínima e pode ser negligenciada. Esse valor limite para que a incerteza exerça influência na carta de controle não foi devidamente estudado ainda e é uma necessidade importante.

A maioria das indústrias de médio e grande porte já avalia periodicamente seu sistema de medição para estar de acordo com normas internacionais, incluindo a análise da sua incerteza de medição. Devido a isso, pouco esforço adicional seria necessário para implementar as modificações propostas pelo trabalho, requerendo apenas que os dados já disponíveis do sistema de medição fossem inseridos na carta de controle com incertezas.

1.3.Método do trabalho

A seguir são apresentados a caracterização do trabalho em relação ao tipo de pesquisa realizada, a descrição das etapas e as ferramentas e técnicas utilizadas para atingir os objetivos gerais e específicos do escopo.

Este trabalho foi classificado como uma pesquisa de natureza aplicada e abordagem quantitativa, gerando conhecimento para solucionar problemas baseando-se no desenvolvimento de ferramentas computacionais e desenvolvimento de formulários (SILVA E MENEZES, 2000). Quanto aos objetivos ele pode ser classificado como pesquisa exploratória com procedimentos de pesquisa bibliográfica e experimental, partindo do mapeamento de artigos científicos publicados em periódicos internacionais para o equacionamento e simulação computacional (GIL, 1991).

O trabalho foi estruturado e realizado em três etapas, cada uma resultando em um artigo: (i) mapeamento dos artigos científicos publicados; (ii) elaboração e proposta de um método para considerar a incerteza de medição nas cartas de controle de processos e; (iii) simulação computacional dos cenários de aplicação da carta proposta anteriormente. Os artigos, resultados de cada uma das etapas descritas acima, estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – descrição resumida dos artigos desenvolvidos

Estudo	Questões de Pesquisa	Objetivos	Revisão Teórica	Método de Pesquisa
Artigo 1	Q1: Quais as abordagens e ênfases dos artigos científicos sobre incerteza de medição?	Analisar e classificar os artigos publicados sobre o tema incerteza de medição	1. Incerteza de Medição	Pesquisa de caráter Exploratório
Artigo 2	Q2: Como incorporar as incertezas de medição em cartas de controle de processos?	Propor um método para considerar incerteza de medição em cartas de controle de processos	1. Incerteza de Medição 2. Cartas de Controle	Pesquisa de caráter Exploratório
Artigo 3	Q3: Em quais situações as incertezas devem ser consideradas no uso de cartas de controle?	Avaliar qual o comportamento da carta de controle com incertezas em diferentes cenários através de simulação computacional	1. Cartas de Controle 2. Cartas de Controle com Incertezas	Pesquisa de caráter Exploratório e Estudo Simulado

O primeiro artigo – Incerteza de Medição: Revisão da Literatura e Tendências de Pesquisa – apresenta um mapeamento dos artigos científicos publicados em periódicos internacionais sobre o tema incerteza de medição entre os anos de 2004 e 2010. Ao todo, foram analisados 114 artigos. Após o mapeamento, foram identificadas as abordagens utilizadas pelos artigos sobre incerteza de medição e, com esses dados, foi realizada uma classificação e análise dos artigos em relação à abordagem, método de cálculo de incerteza e ano de publicação. Esse artigo foi submetido em língua inglesa e aceito pelo periódico internacional *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* e será publicado em 2012.

O artigo 2 – Efeito da Incerteza de Medição na Utilização de Cartas de Controle – parte de uma oportunidade identificada no artigo 1: a falta de trabalhos que estudassem os efeitos da incerteza de medição na utilização de ferramentas da qualidade, como

cartas de controle de processo. O artigo apresenta um método para modificar cartas de controle de forma que elas considerem a incerteza do sistema de medição, modificando as probabilidades de erros tipo I e tipo II. Nele, é apresentado todo o formulário decorrente dessa modificação e um exemplo de aplicação. O artigo foi submetido em língua inglesa para o congresso internacional XVIII *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.

O artigo 3 – Comparação de Cartas de Controle com e sem a Influência da Incerteza de Medição – contempla uma simulação computacional dos possíveis diferentes cenários de aplicação de cartas de controle, com o objetivo de analisar qual a mudança dos efeitos da presença de incerteza nesses diferentes cenários nos indicadores de desempenho NMA_0 e NMA_1 da carta de controle. Combinando os parâmetros tamanho de amostra, probabilidades limites, limites de controle e coeficiente de variação do processo, foram simulados 108 cenários para cada indicador de desempenho, totalizando 216 cenários. O artigo será submetido em língua inglesa para o periódico internacional *Measurement*.

1.4.Delimitações do trabalho

O mapeamento dos periódicos realizado no primeiro artigo foi feito apenas nos periódicos que constassem no Portal de Periódicos da CAPES e, dentre esses, apenas os que tinham pelo menos cinco publicações sobre o tema Incerteza de Medição nos últimos sete anos. Também foram excluídos livros, artigos publicados em congressos, teses e dissertações.

O método desenvolvido para considerar a incerteza de medição nas cartas de controle baseia-se em distribuições normais de incerteza, concordando com os pressupostos do *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement* (IEC-ISO, 2008). Porém caso seja utilizado outro método de cálculo de incerteza cujo resultado não seja uma distribuição normal (como Simulação de Monte Carlos, por exemplo), devem ser realizadas adaptações no método.

As simulações realizadas na parte final do trabalho contemplam alguns dos cenários mais indicados de acordo com o escopo do trabalho. Generalizações dos cenários simulados devem ser feitas com cautela.

1.5.Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em três capítulos principais. Primeiramente é introduzido o tema, justificando a importância acadêmica e prática. Nesse capítulo são apresentados os objetivos, método e delimitações do trabalho.

No segundo capítulo são apresentados os três artigos propostos, decorrentes da pesquisa realizada, conforme a Figura 1.

No último capítulo são apresentadas as considerações finais, resultantes da pesquisa desenvolvida, contemplando conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. ARTIGOS PROPOSTOS

2.1.	ARTIGO 1	16
2.2.	ARTIGO 2	39
2.3.	ARTIGO 3	60

2.1. ARTIGO 1

INCERTEZA DE MEDIÇÃO: REVISÃO DA LITERATURA E
TENDÊNCIAS DE PESQUISA

*MEASUREMENT UNCERTAINTY: LITERATURE REVIEW AND
RESEARCH TRENDS*

Artigo aceito pelo periódico internacional

*IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**

em Janeiro de 2012

* Este artigo foi submetido em língua inglesa

INCERTEZA DE MEDIÇÃO: REVISÃO DA LITERATURA E TENDÊNCIAS DE PESQUISA

Pedro da Silva Hack

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil
E-mail: pedrohack@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: O artigo apresenta uma revisão e análise da literatura sobre incerteza de medição. Foram examinados 114 artigos desde 2004 até 2010 nos periódicos internacionais IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Measurement, Flow Measurement and Instrumentation e Precision Engineering. Os artigos foram classificados de acordo com as seis abordagens identificadas durante a pesquisa e os seis diferentes métodos de cálculo de incerteza utilizados pelos autores. O trabalho apresenta um breve resumo do estado da arte e analisa o cenário de pesquisa sobre o tema incerteza de medição e ao final apresenta sugestões de trabalhos futuros baseadas na análise.

Palavras-chave: metrologia, incerteza de medição, revisão da literatura.

MEASUREMENT UNCERTAINTY: LITERATURE REVIEW AND RESEARCH TRENDS

Abstract: *This paper reviews and analyses studies concerning measurement uncertainty, examining 114 papers published between 2004 and 2010 in the following international journals: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Measurement, Flow Measurement and Instrumentation and Precision Engineering. The papers were classified according to six different approaches identified during the research and six different methods of calculating uncertainty used by the authors of the researched articles. The paper provides a short summary of the state of the art of measurement uncertainty, analyzes the research scenario on the theme and, finally, brings suggestions on future work based on the analysis.*

Keywords: *metrology, measurement uncertainty, literature review.*

1. Introdução

Expressar a qualidade dos resultados das medições e ensaios é de essencial importância não somente como um fator de vantagem competitiva entre diferentes laboratórios, como também para prover uma estimativa da dúvida ao redor do resultado e tornar possível a comparação de resultados distintos. A incerteza de medição é a maneira mais simples e aceita de expressar essa confiança no resultado (DÉSENFANT; PRIEL, 2006), além de ser uma exigência das normas internacionais de qualidade. Ela consiste em um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando (IEC-ISO, 2008a).

Com a publicação pela International Organization for Standardization (ISO) do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) em, um método unificado para a estimativa de incerteza de medição foi estabelecido mundialmente e vem sendo utilizado pela maior parte da indústria, principalmente na área de calibração. Porém, em muitos casos a metodologia do GUM pode não ser considerada a mais adequada ou viável de ser implementada, seja pela complexidade dos cálculos envolvidos ou pelos pré-requisitos exigidos pelo atual método (JORNADA, 2005).

A própria ISO, reconhecendo lacunas metodológicas deixadas pelo GUM, publicou o guia Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method (IEC-ISO, 2008b) no qual é indicada a utilização da simulação de Monte Carlo para cálculo de incerteza de medição. O método de Monte Carlo não possui os mesmos pré-requisitos originalmente impostos pelo GUM e é operacionalizado através de simulações experimentais ao invés de modelagens matemáticas. Os métodos do GUM e Monte Carlo podem prover metodologias suficientemente aceitas pela indústria e comunidade científica, mas ainda há aplicações específicas que não conseguem expressar suas incertezas de medição por nenhum desses dois métodos. Por conta disso, vêm surgindo novas metodologias, com abordagens de cálculo distintas, para aplicações mais restritas que os métodos convencionais, que visam suprir essas deficiências da indústria (GINIOTIS *et al.*, 2004).

Diversos artigos foram publicados apresentando novas metodologias para essas aplicações, bem como revisitando os métodos mais consolidados ou apresentando aplicações não usuais para suas metodologias. O presente artigo tem como objetivo mapear as publicações referentes à incerteza de medição nos últimos seis anos e

classificá-las de acordo com a abordagem, metodologia utilizada para cálculo, periódico no qual foi publicado e ano de publicação.

Este trabalho é dividido em cinco seções. Após a introdução, é apresentado um breve referencial teórico sobre incerteza de medição, seguido da seção 3 com os procedimentos metodológicos utilizados para desenvolver o trabalho de revisão bibliográfica. A análise e classificação dos artigos mapeados são apresentadas na seção 4 e a última seção resume as conclusões sobre os resultados obtidos.

2. Incerteza de Medição

Desde a publicação do GUM, tem havido um crescente reconhecimento de que a incerteza de medição não é menos crítica do que o valor da própria medição (REZNIK; DABKE, 2004). Além de fortemente utilizada na área de metrologia e ensaios, em diversas outras áreas a incerteza de medição pode ser utilizada como o principal parâmetro para comparar diferentes métodos, como apresentado por Augustyn (2008) e Jokinen e Ritala (2010). Cataldo *et al* (2008), Santana *et al* (2008) e Melo *et al* (2009) ainda demonstram a utilização da incerteza de medição para validar novas metodologias.

2.1. Metodologia do GUM

O GUM é a metodologia mais utilizada para estimativa de incerteza de medição, o qual formaliza um procedimento baseado em conhecimento estatístico e análise experimental dos dados de uma medição.

Na maioria dos casos, o mensurando não é medido diretamente, mas determinado a partir de outras grandezas através de uma função, conforme a equação (1).

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (1)$$

Onde f é o modelo matemático que expressa o mensurando Y em função das grandezas x_i de entrada.

As incertezas de cada uma das grandezas de entrada do modelo são avaliadas e propagadas ao mensurando através da lei de propagação de incerteza, descrita na equação (2).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2)$$

Onde $u_c(y)$ representa a incerteza padrão do mensurando, $\partial f/\partial x$ são os coeficientes de sensibilidade de cada variável, calculados através de derivadas parciais, e $u(x)$ são as incertezas das variáveis aleatórias das quais o mensurando depende.

Finalmente, a incerteza de medição expandida é o resultado da multiplicação da incerteza padrão do mensurando pelo fator de abrangência.

$$U = ku_c \quad (3)$$

O fator de abrangência k é obtido a partir da combinação dos graus de liberdade das diferentes grandezas de entrada e do intervalo de confiança desejado.

Para que a aplicação do GUM seja válida, algumas condições devem ser satisfeitas. Quando a incerteza expandida for determinada, as seguintes quatro circunstâncias devem ser observadas (JORNADA *et al.*, 2010):

- (1) Condições para o teorema do limite central, caracterizando Y como uma distribuição normal ou t-student;
- (2) Adequabilidade da equação para calcular os graus efetivos de liberdade quando uma ou mais grandezas de entrada tiverem um grau de liberdade associado finito;
- (3) As grandezas de entrada sejam independentes quando os graus de liberdade associados com suas incertezas são finitos; e
- (4) Suficiente linearidade do modelo, através de uma expansão de primeira ordem da série de Taylor.

O GUM descreve os objetivos a serem alcançados na estimativa de incerteza de medição e as principais direções que deveriam ser seguidas para perseguir esses objetivos. Entretanto, considerando problemas práticos e a grande variedade de situações específicas, diferentes metodologias, de complexidades distintas, podem ser necessárias (LOCCI *et al.*, 2002).

Martens (2002) e Jornada (2007) apresentam elementos do GUM que podem torná-lo uma abordagem difícil de ser implementada, enquanto Ferrero (2008) comenta sobre a dificuldade de aplicar certos casos às recomendações do GUM. Heping e

Xiangqian (2009) ainda apontam situações onde a metodologia do GUM, apesar de suficiente, pode ser melhorada. Além disso, Martens (2002) alega que a aplicação do GUM pode ser difícil e exaustiva se algumas simplificações não forem adotadas.

2.2. Simulação de Monte Carlo

Visando suprir as dificuldades de determinadas áreas em utilizar a metodologia apresentada pelo GUM, foi publicado em 2008 o Suplemento 1 ao GUM (IEC-ISO, 2008a), que aponta a utilização da Simulação de Monte Carlo como alternativa ao cálculo da incerteza.

A Simulação de Monte Carlo utiliza informações *a priori* das grandezas de entrada que afetam a incerteza através das suas distribuições de probabilidade, gera números aleatórios para essas distribuições e então obtém uma probabilidade *a posteriori* dos resultados (IEC-ISO, 2008b).

O Suplemento 1 propõe a propagação das funções de distribuição de probabilidade das grandezas de entrada, ao invés de propagar apenas as suas variâncias, como descrito no GUM. Esse método consiste em definir funções densidade de probabilidade para cada grandeza de entrada e então propagá-las através do modelo matemático até o mensurando, utilizando simulações numéricas. A incerteza de medição é calculada de acordo com o intervalo de abrangência desejado (normalmente cerca de 95%) após um grande número de repetições.

A operacionalização através da Simulação de Monte Carlo não requer que sejam calculados os coeficientes de sensibilidade através de derivadas parciais, o que pode ser um fator de dificuldade da aplicação do GUM em muitos casos (JORNADA; CATEN, 2007). Além dessa vantagem, também é possível visualizar distribuições de probabilidade assimétricas, que não satisfariam os requisitos da metodologia do GUM.

O método de Monte Carlo, além de poder ser utilizado de maneira auto-suficiente para o cálculo da incerteza, também pode ser utilizada como validação dos cálculos pelo método do GUM, pois a propagação de distribuições é uma forma mais abrangente da lei de propagação de incertezas (JORNADA; CATEN, 2007). Oliveira *et al* (2009) utilizam a Simulação de Monte Carlo para comparar métodos diferentes, e ainda comparam os resultados com os obtidos através do GUM, para validá-los.

Um cuidado que se deve ter ao aplicar este método é com relação à qualidade de geração dos números aleatórios e ao tamanho da semente aleatória. Tais fatores impactam diretamente na qualidade do resultado da simulação (JORNADA, 2007).

2.3. Outros Métodos

Algumas aplicações não encontram no GUM ou na Simulação de Monte Carlo a melhor abordagem para suas situações. Nesses casos, cada cenário exige um diferente método científico de estimativa de incerteza que atenda suas necessidades individuais. Mauris *et al* (2001) sugerem que as restrições impostas pelo GUM algumas vezes o tornam impraticável em certas situações e que muitos métodos são propostos na literatura para representar incerteza de medição e Jornada (2007) aponta que o GUM pode acabar por subestimar ou até superestimar a incerteza em alguns casos.

Por outro lado, alguns trabalhos sugerem métodos complementares ou não-conflitantes com o GUM, com o objetivo de refinar a metodologia para situações onde os resultados das metodologias tradicionais não sejam suficientes. Nesse âmbito, Raznik e Dabke (2004) discutem que o aumento da resolução e sensibilidade das medições passou a requerer, dentre outros fatores, modelos físicos mais sofisticados para sua descrição. Métodos alternativos tem sido adotados para superar essas dificuldades, dos quais podem ser citados a integração numérica através de transformadas de Fourier e Mellin (JORNADA, 2007, JORNADA; CATEN, 2007) e a utilização de variáveis Fuzzy.

3. Procedimentos Metodológicos

A pesquisa foi caracterizada como de natureza aplicada, visto que objetiva um estudo direcionado sobre incerteza de medição. A abordagem foi qualitativa e quantitativa, pois foram utilizados critérios qualitativos para a seleção e classificação dos artigos mapeados e dados numéricos para as suas análises. Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa foi classificada como exploratória, pois envolve diretamente o levantamento bibliográfico e, do ponto de vista dos procedimentos, foi classificada como bibliográfica, pois foi elaborada fundamentalmente a partir de material já publicado (artigos científicos).

O trabalho foi desenvolvido em cinco etapas estruturadas: (i) seleção dos periódicos a serem mapeados; (ii) mapeamento dos artigos científicos publicados nos últimos seis anos nos periódicos selecionados; (iii) análise dos artigos quanto à critérios pré-definidos; (iv) classificação dos artigos quanto aos critérios obtidos no terceiro passo; (v) identificação das tendências atuais e oportunidades de pesquisa.

Os periódicos foram selecionados a partir de buscas nas bases de dados virtuais Science Direct Online, Emerald e SciELO. Foi feita uma busca pelos artigos nos

últimos sete anos que possuísem as expressões “*measurement uncertainty*” ou “*uncertainty of measurement*” nos seus títulos ou palavras-chave. A partir do resultado, os seguintes periódicos (com seus fatores de impacto) tiveram o maior número de publicações sobre o tema: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (1,02), *Measurement* (0,76), *Flow Measurement and Instrumentation* (0,72) e *Precision Engineering* (1,18). Periódicos com menos de cinco publicações relacionadas à incerteza de medição no período de análise não foram mapeados, bem como publicações em congressos, livros, teses e dissertações. Nesse passo, os periódicos excluídos foram os seguintes: *Analytica Chimica Acta*, *Journal of Chromatography A*, *Atmospheric Environment*, *International Journal of Pure and Applied Analytical Chemistry*, *Applied Radiation and Isotopes*, *International Journal of Mass Spectrometry*, *Journal of Hydrology*, *Journal of Sound and Vibration*, *Remote Sensing of Environment*, *Clinical Biochemistry*, *Optics and Lasers in Engineering*, *Radiation Physics and Chemistry*.

No segundo passo foi feita uma nova busca nos periódicos já selecionados por artigos publicados entre os anos de 2004 e 2010 que possuísem “uncertainty” no título ou palavras-chave e, posteriormente, foi feita uma triagem manual dos resultados para que somente fossem mapeados artigos que abordassem incerteza de medição como tema principal do trabalho e os que não apresentassem somente um estudo de caso de cálculo de Incerteza de Medição. Artigos que não explicitaram o método de cálculo de incerteza também foram excluídos do estudo. Utilizando esses critérios, foram mapeados 114 artigos. Esse intervalo de sete anos foi escolhido devido a rápida redução no número de publicações sobre o tema de 2003 a 1990, de acordo com as bases de dados selecionadas.

Na análise dos artigos, preocupou-se em identificar critérios que os diferenciasses entre si de acordo com o escopo do trabalho e sua metodologia, com o objetivo de identificar as tendências atuais na área e possíveis oportunidades para pesquisas futuras. Em seguida, foram selecionados como critérios para análise a abordagem e metodologia de cálculo, juntamente com o ano de publicação e o periódico no qual o artigo foi publicado. Foram identificadas as seguintes abordagens de incerteza de medição: parâmetro de qualidade, apresentação de metodologia, sugestão de melhoria, comparação de métodos, indicação de falhas e análise de risco. Quanto ao método de cálculo, foram listados os seguintes: GUM, metodologias próprias, variáveis *Fuzzy*, múltiplas metodologias, Monte Carlo e outras metodologias.

No quarto passo, cada artigo foi classificado de acordo com cada um dos critérios selecionados no passo anterior. Além dessa classificação, foi também cruzado com os mesmos critérios o número de publicações por ano de cada periódico.

Para finalizar, foi realizada uma análise baseada nesses dados, buscando identificar quais as tendências envolvendo incerteza de medição nos últimos seis anos e quais os setores com mais deficiência nessa área a fim de sugerir trabalhos futuros.

4. Artigos Mapeados

Na seção 4.1 os artigos foram classificados quanto às abordagens: parâmetro de qualidade, apresentação de metodologia, sugestão de melhoria, comparação de métodos, indicação de falhas e análise de risco e na seção 4.2 quanto ao método de cálculo: GUM, metodologias próprias, variáveis *Fuzzy*, múltiplas metodologias, Monte Carlo e outras metodologias. Em cada seção são descritos alguns artigos como exemplos dos motivos de suas classificações.

4.1. Classificação quanto à abordagem

A Tabela 1 apresenta a distribuição das abordagens identificadas em relação aos periódicos. Uma enumeração dos artigos mapeados quanto às suas abordagens está descrita no Apêndice A.

Tabela 1 – Classificação cruzada de abordagens encontradas e periódicos

Abordagem	Measurement	IEEE			Total	%
		Transactions on Instrumentation & Measurement	Precision Engineering	Flow Measurement and Instrumentation		
Parâmetro de qualidade	21	12	10	5	48	42,1
Apresentação de método	10	14	2		26	22,8
Sugestão de melhoria	13	9	1		23	20,2
Comparação de métodos	5	4			9	7,9
Indicação de falhas	3	1			4	3,5
Análise de risco	3		1		4	3,5
Total	55	40	14	5	114	100,0
%	48,2	35,1	12,3	4,4	100,0	

4.1.1. Artigos que utilizam Incerteza de Medição como parâmetro de qualidade

A abordagem mais encontrada nos artigos mapeados foi o uso de Incerteza de Medição como principal parâmetro para comparação de diferentes metodologias de medição, calibração ou ensaio. Merkaç e Acko (2010) apresentam um novo método de calibração para anéis de segmento (*thread rings*) e o compara com outros dois métodos clássicos, baseando-se na análise de incerteza dos métodos para escolher o mais adequado. Um método para reconstrução de formas 3-D foi proposto por De Cecco *et al* (2010), no qual é comparada a incerteza de dois diferentes métodos. Na mesma linha, Galliana *et al* (2009) analisam os métodos de calibração de resistores de alta tensão no *National Institute of Metrological Research* da Itália, Giniotis e Rybokas (2009) propõem a criação de um novo padrão internacional para medição de ângulos e Forbes *et al* (2009) analisam as diferentes formas de medir coordenadas cartesianas.

4.1.2. Artigos que apresentam novas metodologias

Vinte e seis artigos foram encontrados apresentando metodologias para o cálculo de incerteza, dos quais cinco utilizaram a teoria de variáveis aleatórias *Fuzzy* (três baseados na teoria da possibilidade e dois na teoria de evidência), dois basearam-se no uso de Polinômios Caóticos (*Polynomial Chaos*) e um em Monte Carlo. Farooqui *et al* (2009) demonstram um método baseado em técnicas de *bootstrapping* para avaliar a incerteza de medições de cilindros (*cylindricity*). Utilizando a teoria de variáveis *Fuzzy*, Pertile *et al* (2010) apresentam um método aprimorado para incerteza de medições 2-D e De Capua e Romeo (2007) propõem um método para avaliar incerteza nas medições de distorções harmônicas. Bono *et al* (2010) desenvolvem um método para avaliar incerteza com a qual a ferramenta de corte é posicionada em tornos mecânicos de alta precisão.

4.1.3. Artigos que sugerem melhorias aos métodos

Alguns trabalhos focaram-se em apresentar melhorias e correções para métodos já consolidados, para aplicações específicas onde existem algumas deficiências. Dezoito desses artigos sugeriram melhorias para o método do GUM, três para o método baseado em variáveis *Fuzzy* e dois em Monte Carlo. Vilbaste *et al* (2010) e Fotowicz (2004) debatem a melhor forma de determinar o fator de abrangência na metodologia do GUM. Também baseado nessa metodologia, Hall (2005) demonstra uma forma para avaliar

sistemas modulares de medição e Braudaway (2006) identifica um tratamento mais adequado para sistemas de aquisição de dados. Para variáveis *Fuzzy*, Ferrero e Salicone (2009) propõem melhorias na forma como as informações do sistema devem ser utilizadas baseando-se na teoria da evidência, enquanto De Capua e Romero (2009) introduzem o uso de *triangular norm operators* para modelar certos sistemas utilizando a teoria da possibilidade.

4.1.4. Artigos comparando métodos diferentes

Nove trabalhos foram mapeados cuja intenção é comparar duas ou mais metodologias já existentes, concluindo sobre qual o melhor método ou apenas apontando suas diferenças. Chakrabarti *et al* (2009) discutem as divergências entre os métodos do GUM, Monte Carlo e Fuzzy na aplicação variáveis de estado em sistemas de potência, enquanto Désenfant e Priel (2006) introduzem diferentes alternativas para estimativa de incerteza em situações onde o GUM não é o melhor método. Shahanaghi e Nakhjiri (2010) estudam as diferenças e limitações dos métodos do GUM e Monte Carlo, e desenvolvem um algoritmo de otimização para essas situações.

4.1.5. Artigos identificando deficiências metodológicas

Quatro artigos basearam-se na análise apenas das deficiências de métodos de estimativa de incerteza. Enquanto Wirandi e Lauber (2006) trabalham sobre as limitações do GUM para variáveis qualitativas, Mari (2005) apresenta lacunas na própria epistemologia da metrologia que impactam na estimativa de incerteza.

4.1.6. Artigos sobre análise de risco

Quatro dos artigos mapeados aplicaram a teoria de Incerteza de Medição na área de análise de risco e tomada de decisão. Pendrill (2006) avalia a relação de custo da análise de incerteza contra as consequências de uma tomada de decisão incorreta e Rossi e Crenna (2006) apresentam uma metodologia que unifica a análise de risco com a Incerteza de Medição, enquanto Forbes (2006) considera o impacto da Incerteza de Medição na inspeção de qualidade de um produto.

4.2. Classificação quanto ao método

A Tabela 2 apresenta os métodos de cálculo de Incerteza de Medição e suas distribuições conforme os periódicos mapeados.

Tabela 2 - Classificação cruzada de métodos de cálculo e periódicos

Metodologia	Measurement	IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement	Precision Engineering	Flow Measurement and Instrumentation	Total	%
GUM	34	15	10	4	63	55,3
Próprio	9	6	1		16	14,0
Fuzzy	1	9			10	8,8
Múltiplas	5	4			9	7,9
Monte Carlo	3	3	2		8	7,0
Outros	3	3	1	1	8	7,0
Total	55	40	14	5	114	100,0
%	48,2	35,1	12,3	4,4	100,0	

4.2.1. Artigos que utilizam a metodologia do GUM

A metodologia de cálculo mais encontrada na literatura foi de fato a apresentada no GUM. Lira e Cargill (2004) enfatizam que a incerteza na calibração de máquinas CNC não deve ser calculada de acordo com a ISO 230-2, mas sim com o GUM para que haja concordância internacional. Acko (2005) apresenta uma metodologia de calibração que, para ser acreditada, utiliza a norma internacional. Forbes *et al* (2009) utilizam as técnicas apresentadas no GUM para tratamento multivariado de probabilidade no seu estudo.

4.2.2. Artigos que utilizam metodologias próprias

Dezesseis artigos utilizaram metodologias propostas pelos próprios autores. Ao propor novos métodos para medição de exposição a campos eletromagnéticos, Stratakis *et al* (2010) não encontram suporte nas metodologias existentes e desenvolvem uma nova sistemática para avaliação de incerteza. Para casos em que as simplificações assumidas pelo GUM não podem ser consideradas, Mekid e Vaja (2008) desenvolvem

equações de cálculo de incerteza incluindo elementos de segunda e terceira ordem com momentos de ordem mais elevada que as apresentadas no GUM.

4.2.3. Artigos que utilizam a metodologia de variáveis Fuzzy

Ferrero e Salicone (2004) introduzem o uso de variáveis *Fuzzy* baseadas na teoria da evidência no cálculo de Incerteza de Medição, utilizado posteriormente por Ferrero *et al.* (2004), Ferrero e Salicone (2009) e Ferrero e Salicone (2005), outros autores (WIRANDI *et al.*, 2009, PERTILE *et al.*, 2010, CAPUA; ROMEO, 2007) baseiam seus artigos nessa metodologia. Al-Othman (2009) ainda utiliza um estimador linear de estados *Fuzzy* para modelar a incerteza de um sistema de potência.

4.2.4. Artigos que utilizam o método de Monte Carlo

Nove artigos utilizaram o método de Monte Carlo no cálculo de Incerteza de medição. Bringman e Knapp (2009) e Liebrich *et al* (2009) comentam que no uso de uma placa de esferas (*3D-Ball Plate*), a incerteza é afetada por muitos fatores externos ao processo de medição, e para tanto é necessária a simulação de Monte Carlo. Bastiaensen *et al* (2008) utilizam Monte Carlo por ser a melhor forma de propagar incertezas uma vez que as distribuições das contribuições são conhecidas e Oliveira *et al* (2009) analisam o efeito de variáveis correlacionadas nas incertezas das variáveis elétricas de células de combustível.

4.2.5. Artigos que utilizam metodologias múltiplas

Alguns artigos abordaram mais de um método de cálculo, particularmente os que basearam seus artigos em comparações de metodologias. Velychko e Gordiyenko (2007) apresentam as metodologias indicadas em aplicações na área ambiental, enquanto D'Errico (2009) afirma que dentre as diferentes metodologias analisadas, apenas o cálculo de probabilidade não viola as leis clássicas da lógica. Apesar de adotar Monte Carlo, Shahanaghi e Nakhjiri (2009) traçam um paralelo com a metodologia do GUM e apontam suas diferenças na calibração de termômetros por resistência de platina. Salicone e Tinarelli (2006) também discutem as diferenças entre a metodologia do GUM e variáveis Fuzzy em análise de sinais baseados em transformadas Wavelet.

4.2.6. Artigos que utilizam outros métodos

Artigos que não utilizaram as metodologias citadas anteriormente também foram mapeados. Hsu e Chen (2010) utilizam a metodologia da EURACHEM/CITAC para medições de espectrometria, enquanto Lovett *et al* (2006), Monti e Ponci (2010) e Smith *et al* (2009) utilizam Polinômios Caóticos em seus trabalhos. Bitou (2009) ainda utiliza a metodologia da incerteza relativa para seus cálculos.

4.3. Análise

De acordo com a Tabela 1 o maior uso de Incerteza de Medição em publicações, dentre as abordagens identificadas, é como parâmetro de qualidade para comparar entre diferentes aplicações metrológicas com objetivo em comum. O segundo maior número de artigos encontrado foi referente às publicações que apresentavam metodologias de cálculo de incerteza. Combinadas, essas abordagens representam aproximadamente 65% dos artigos.

Conforme a Tabela 2 o GUM é a metodologia mais utilizada pelos pesquisadores em todos os periódicos consultados, concentrando mais da metade dos artigos. Não há uma hegemonia entre os demais métodos, apesar de as variáveis *Fuzzy* terem um número razoável de publicações tendo em vista que foi uma metodologia apresentada recentemente.

A Tabela 3 apresenta uma análise do número de artigos por periódico em cada ano mapeado. Measurement e IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement foram os periódicos com o maior número de publicações relevantes para a pesquisa dentro do intervalo analisado, concentrando mais de 83% dos artigos. Observa-se também uma concentração maior de publicações no ano de 2009, que também foi o ano com o maior número de publicações no periódico Measurement, indicando uma crescimento recente na pesquisa sobre Incerteza de Medição.

Tabela 3 – Concentração de artigos por ano e por periódico

Periódico	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Total	%
Measurement	5	4	8	7	6	15	10	55	48,2
IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement	5	6	10	4	3	8	4	40	35,1
Precision Engineering	2	2	1	1	2	3	3	14	12,3
Flow Measurement and Instrumentation		1		1		2	1	5	4,4
Total	12	13	19	13	11	28	18	114	100
%	10,5	11,4	16,7	11,4	9,6	24,6	15,8	10,5	

A Tabela 4 compara as abordagens identificadas com as metodologias de cálculo utilizadas pelos autores. É possível notar que o método GUM, apesar de ser muito abordado, foi o método mais criticado pelos autores dos artigos mapeados: um número elevado de artigos sugere melhorias e aponta problemas. A metodologia baseada em variáveis *Fuzzy*, particularmente a baseada na teoria da evidência, claramente está em fase de desenvolvimento, mas apresenta uma tendência em se tornar uma forte alternativa ao GUM, o que pode ser visto pelo número de artigos publicados e explicando a robustez do método ao lidar com a pouca informação disponível, que é frequentemente encontrado na indústria (FERRERO; SALICONE, 2009). Também foram apresentadas diversas metodologias de cálculo, mas observa-se que suas aplicações são muito restritas ou pouco exploradas, pois não são encontradas em publicações além das quais foram inicialmente apresentadas.

A análise dos 114 artigos sobre Incerteza de Medição revelou que a metodologia do GUM, apresentada há mais de uma década, ainda é a mais utilizada (55,3% dos artigos). Mesmo tendo limitações e com diversas outras metodologias sendo propostas no decorrer dos anos, os pesquisadores, de uma forma geral, ainda preferem segui-la. Porém, mesmo o método do GUM sendo o mais solicitado, também apresenta-se como o mais criticado. A apresentação de métodos alternativos para cálculo de incerteza também se mostrou acentuado (22,8% dos artigos), sendo que o método de variáveis *Fuzzy*, apresentado em 2004 por Ferrero e Salicone (2004), parece ser muito promissora, visto que ela não necessariamente entra em conflito com o GUM, mas o considera como um caso particular (FERRERO; SALICONE, 2009).

Tabela 4 – Concentração de artigos por abordagem e metodologia

Abordagem	GUM	Próprio	Fuzzy	Múltiplas	Monte Carlo	Outros	Total	%
Parâmetro de qualidade	37	1	2		4	4	48	42,1
Apresentação de método		15	5		2	4	26	22,8
Sugestão de melhoria	18		3		2		23	20,2
Comparação de métodos				9			9	7,9
Indicação de falhas	4						4	3,5
Análise de risco	4						4	3,5
Total	63	16	10	9	8	8	114	100,0
%	55,3	14,0	8,8	7,9	7,0	7,0	100,0	

Para futuros trabalhos, alguns tópicos parecem promissores. Existem poucos trabalhos abordando análise de risco utilizando técnicas de Incerteza de Medição e todos os trabalhos mapeados utilizaram o método do GUM, apontando uma oportunidade para talvez utilizar outros métodos de cálculo. Também poucos trabalhos foram publicados estudando as características de outros métodos de cálculo além do GUM. A interface com outras técnicas estatísticas para estimativa de incerteza também foi utilizada em poucos artigos. Ainda foram identificadas algumas lacunas na literatura. O único campo da ciência além de metrologia encontrado utilizando a teoria de Incerteza de Medição foi a análise de risco. O impacto da incerteza em indicadores econômicos e de produção não foi abordado em nenhum dos artigos. Outros temas não abordados foram a análise de Incerteza de Medição em cartas de controle e outras ferramentas da qualidade e a aplicação da incerteza na metrologia da nanotecnologia.

5. Conclusão

A Incerteza de Medição é hoje de grande importância para a indústria, sendo considerada tão importante quanto o próprio resultado da medição. Devido a essa importância, vêm surgindo diferentes métodos para o cálculo de incerteza para diversas aplicações. O objetivo desse artigo foi apresentar uma análise da literatura classificando

artigos sobre o tema nos últimos anos em relação à abordagem e ao método de cálculo utilizado no artigo.

Foram analisados 114 artigos em quatro periódicos internacionais publicados entre 2004 e 2010. Os artigos foram classificados de acordo com as seis abordagens e os seis diferentes métodos de cálculo, Foram avaliados os artigos verificando-se a concentração do número de artigos por abordagem e por método utilizado e também do número de publicações por ano e por periódicos nos quais os artigos foram publicados.

Os periódicos *Measurement* e *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement* contemplaram aproximadamente 83% das publicações analisadas. As abordagens mais encontradas sobre incerteza de medição foram parâmetro de qualidade para comparação e apresentações de metodologias (64,9% ao todo). Poucas publicações foram encontradas abordando Incerteza de Medição em outras áreas da ciência, sendo análise de risco o único tópico abordado, com 3,5% dos artigos. O método mais utilizado pelos autores para cálculo de incerteza foi o do GUM (55,3% dos artigos), seguido por metodologias desenvolvidas pelos próprios autores dos artigos (14%). Das metodologias alternativas, a mais utilizada nos trabalhos foi a de variáveis *Fuzzy*, presente em 8,8% dos artigos.

Estudos envolvendo aplicação da teoria de Incerteza de Medição em outras áreas foram sugeridos, em especial em conjunto com ferramentas da qualidade como cartas de controle, e também a sua aplicação na nanotecnologia.

6. Bibliografia

1. Acko, B. Calibration of electronic levels using a special sine bar. *Precision Engineering*, vol. 29, pp. 48-55, 2005.
2. Al-Othman, A.K. A fuzzy state estimator based on uncertain measurements. *Measurement*, vol. 42, pp. 628-637, 2009.
3. Angrisani, L.; D'Apuzzo, M.; Lo Moriello, R.S. Unscented Transform: A Powerful Tool for Measurement Uncertainty Evaluation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 737-743, 2006.
4. Angrisani, L.; Lo Moriello, R.S.; D'Apuzzo, M. New Proposal for Uncertainty Evaluation in Indirect Measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 1059-1064, 2006.
5. Attivissimo, F.; Giaquinto, N.; Savino, M. Uncertainty evaluation in dithered ADC-based instruments. *Measurement*, vol. 41, pp. 364-370, 2008.
6. Augustyn, J. Some LMS-based algorithms for impedance measurements. *Measurement*, vol. 41, pp. 178-185, 2008.
7. B. D. Hall, Propagating Uncertainty in Instrumentation Systems. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 2376-2380, 2005.
8. Bachmanna, J.; Linares, J.M.; Sprauel, J. M.; Bourdet, P. Aide in decision-making: contribution to uncertainties in three-dimensional measurement. *Precision Engineering*, vol. 28, pp. 78-88, 2004.
9. Barini, E. M.; Tosello, G.; Chiffre, L. Uncertainty analysis of point-by-point sampling complex surfaces using touch probe CMMs DOE for complex surfaces verification with CMM. *Precision Engineering*, vol. 34, pp. 16-21, 2010.

10. Bastiaensen, C.; Deprez, W.; Symens, W.; Driesen, J. Parameter Sensitivity and Measurement Uncertainty Propagation in Torque-Estimation Algorithms for Induction Machines. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, pp. 2727-2732, 2008.
11. Batista, E.; Pinto, L.; Filipe, E.; Veen, A.M.H. Calibration of micropipettes: Test methods and uncertainty analysis. *Measurement*, vol. 40, pp. 338-342, 2007.
12. Bertocco, M.; Sona, A.; Zanchetta, P. An Improved Method for the Evaluation of Uncertainty of Channel Power Measurement With a Spectrum Analyzer. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, pp. 1165-1170, 2007.
13. Betta, G.; Liguori, C.; Pietrosanto, A. Uncertainty Evaluation in Algorithms With Conditional Statement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 969-976, 2004.
14. Bitou, Y. High-accuracy displacement metrology and control using a dual Fabry-Perot cavity with an optical frequency comb generator. *Precision Engineering*, vol. 33, pp. 187-193, 2009.
15. Bono, M. J.; Seugling, R. M.; Kroll, J. J.; Nederbragt, W. W. An uncertainty analysis of tool setting methods for a precision lathe with a B-axis rotary table. *Precision Engineering*, vol. 32, pp. 242-252, 2010.
16. Braudaway, D. W. Uncertainty Specification for Data Acquisition (DAQ) Devices. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 74-78, 2006.
17. Bringmann, B.; Knapp, W. Machine tool calibration: Geometric test uncertainty depends on machine tool performance. *Precision Engineering*, vol. 33, pp. 524-529, 2009.
18. Cataldo, A.; Tarricone, L.; Vallone, M.; Attivissimo, F.; Trotta, A. Uncertainty Estimation in Simultaneous Measurements of Levels and Permittivities of Liquids Using TDR Technique. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, pp. 454-466, 2008.
19. Cataldo, A.; Vallone, M.; Tarricone, L.; Attivissimo, F. An evaluation of performance limits in continuous TDR monitoring of permittivity and levels of liquid materials. *Measurement*, vol. 41, pp. 719-730, 2008.
20. Chakrabarti, S.; Kyriakides, E.; Albu, M. Uncertainty in Power System State Variables Obtained Through Synchronized Measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 2452-2458, 2009.
21. Chen, H.; Wu, P.; Huang, J.; Chen, L. Uncertainty analysis for measurement of measurand. *Measurement*, vol. 43, pp. 1250-1254, 2010.
22. Chen, X.; Wan, Y.; Koenders, L.; Schilling, M. Measurements of dimensional standards and etalons with feature size from tens of micrometres to millimetres by using sensor strengthened nanomeasuring machine. *Measurement*, vol. 43, pp. 1369-1375, 2010.
23. Choi, H.M.; Park, K.A.; Oh, Y.K.; Choi, Y.M. Improvement and uncertainty evaluation of mercury sealed piston prover using laser interferometer. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 20, pp. 200-205, 2009.
24. D'Antona, G. Measurement Data Processing Using Random Matrices: A Generalized Formula for the Propagation of Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 537-545, 2004.
25. D'Errico, G. E. Paradigms for uncertainty treatments: A comparative analysis with application to measurement. *Measurement*, vol. 42, pp. 494-500, 2009.
26. De Capua, C.; Romeo, E. A Smart THD Meter Performing an Original Uncertainty Evaluation Procedure. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, pp. 1257-1264, 2007.
27. De Capua, C.; Romeo, E. A t-Norm-Based Fuzzy Approach to the Estimation of Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 350-355, 2009.
28. De Cecco, M.; Pertile, M.; Baglivo, L.; Lunardelli, M.; Setti, F.; Tavernini, M. A Unified Framework for Uncertainty, Compatibility Analysis, and Data Fusion for Multi-Stereo 3-D Shape Estimation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 2834-2842, 2010.
29. De Santo, M.; Liguori, C.; Paolillo, A.; Pietrosanto, A. Standard uncertainty evaluation in image-based measurements. *Measurement*, vol. 36, pp. 347-358, 2004.
30. Désenfant, M.; Priel, M. Road map for measurement uncertainty evaluation. *Measurement*, vol. 39, pp. 841-848, 2006.
31. Dey, D.; Chatterjee, B.; Chakravorti, S.; Munshi, S. Importance of denoising in dielectric response measurements of transformer insulation: An uncertainty analysis based approach. *Measurement*, vol. 43, pp. 54-66, 2010.
32. Ellis, J.D.; Smith, S.T.; Hocken, R.J. Alignment uncertainties in ideal indentation styli. *Precision Engineering*, vol. 32, pp. 207-214, 2008.
33. Farooqui, S.A.; Doiron, T.; Sahay, C. Uncertainty analysis of cylindricity measurements using bootstrap method. *Measurement*, vol. 42, pp. 524-531, 2009.
34. Feng, C.J.; Saal, A.L.; Salsbury, J.G.; Ness, A.R.; Lin, G.C.S. "Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study. *Precision Engineering*, vol. 31, pp. 94-101, 2007.

35. Ferrero, A. Measuring electric power quality: Problems and perspectives. *Measurement*, vol. 41, pp. 121-129, 2008.
36. Ferrero, A.; Gamba, R.; Salicone, S. A Method Based on Random-Fuzzy Variables for Online Estimation of the Measurement Uncertainty of DSP-Based Instruments. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 1362-1369, 2004.
37. Ferrero, A.; Salicone, S. Fully Comprehensive Mathematical Approach to the Expression of Uncertainty in Measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 706-712, 2006.
38. Ferrero, A.; Salicone, S. The Construction of Random-Fuzzy Variables From the Available Relevant Metrological Information. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 365-374, 2009.
39. Ferrero, A.; Salicone, S. The Use of Random-Fuzzy Variables for the Implementation of Decision Rules in the Presence of Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* Vol. 54, 1482-1488, 2005.
40. Ferrero, A; Salicone, S. The Random-Fuzzy Variables: A New Approach to the Expression of Uncertainty in Measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 1370-1377, 2004.
41. Ferrero, A.; Salicone, S. A Comparative Analysis of the Statistical and Random-Fuzzy Approaches in the Expression of Uncertainty in Measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 1475-1481, 2005.
42. Fischer, A.; Pfister, T.; Czarske, J. Derivation and comparison of fundamental uncertainty limits for laser-two-focus velocimetry, laser Doppler anemometry and Doppler global velocimetry. *Measurement*, vol. 43, pp. 1556-1574, 2010.
43. Forbes, A.B. Measurement uncertainty and optimized conformance assessment. *Measurement*, vol. 39, pp. 808-814, 2006.
44. Forbes, A.B.; Hughes, B.; Sun, W. Comparison of measurements in co-ordinate metrology. *Measurement*, vol. 42, pp. 1473-1477, 2009.
45. Fotowicz, P. A method of approximation of the coverage factor in calibration. *Measurement*, vol. 35, pp. 251-256, 2004.
46. Furuichi, N.; Sato, H.; Terao, Y.; Takamoto, M. A new calibration facility for water flowrate at high Reynolds number. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 20, pp. 38-47, 2009.
47. Gadelmawla, E. S. Development of a microscopic computer aided measurement system and its uncertainty *Measurement*, vol. 41, pp. 1152-1161, 2008.
48. Galliana, F.; Capra, P.P.; Gasparotto, E. Metrological management of the high dc resistance scale at INRIM. *Measurement*, vol. 42, pp. 314-321, 2009.
49. Ghiani, E.; Locci, N.; Muscas, C. Auto-Evaluation of the Uncertainty in Virtual Instruments. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 672-677, 2004.
50. Giniotis, V.; Grattan, K.T.V.; Rybokas M.; Kulvietiene, R. Uncertainty and indeterminacy of measurement data. *Measurement*, vol. 36, pp. 195-202, 2004.
51. Giniotis, V.; Rybokas, M. Traceability enhancement in angle measurements. *Measurement*, vol. 42, pp. 1516-1521, 2009.
52. Godina, A.; Acko, B.; Druzovec, M. New approach to uncertainty evaluation in the calibration of gauge block comparators. *Measurement*, vol. 40, pp. 607-614, 2007.
53. Hale, P.D.; Wang, C.M.J. Calculation of Pulse Parameters and Propagation of Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 639-648, 2009.
54. Haycocks, J.; Jackson, K. Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy. *Precision Engineering*, vol. 29, pp. 168-175, 2005.
55. Heping, P.; Xiangqian, J. Evaluation and management procedure of measurement uncertainty in new generation geometrical product specification (GPS). *Measurement*, vol. 42, pp. 653-660, 2009.
56. Hernandez, W. Optimal estimation of the relevant information coming from a rollover sensor placed in a car under performance tests. *Measurement*, vol. 41, pp. 20-31, 2008.
57. Hsu, K.; Chen, C.S. The effect of calibration equations on the uncertainty of UV-Vis spectrophotometric measurements. *Measurement*, vol. 49, pp. 1525-1531, 2010.
58. IEC-ISO, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 2008a.
59. IEC-ISO, *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, 2008b.
60. Iida, H.; Shimada, Y.; Komiyama, K. Noise Temperature and Uncertainty Evaluation of a Cryogenic Noise Source by a Sliding Short Method. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 1090-1096, 2009.
61. Jokinen, H.; Ritala, R. Value of measurement information: A simple case study on grade change decisions. *Measurement*, vol. 43, pp. 122-134, 2010.
62. Jornada, D. Calculation of measurement uncertainty: a comparative study of GUM, Monte Carlo and numerical integration. In *Congresso da Qualidade em Metrologia*, São Paulo, Brasil, 2007.

63. Jornada, D. Uso de Planilhas Eletrônicas para Implementação do Método de Monte Carlo para Estimativa de Incerteza de Medição. In *Encontro para a Qualidade de Laboratórios*, São Paulo, Brasil, 2005.
64. Jornada, D.; Caten, C.S. A review of approaches and methods for calculating uncertainty. In *V Congresso Latino Americano de Metrologia*, Paraná, Brasil, 2007.
65. Jornada, D.; Caten, C.S.; Pizzolato, M. Guidance documents on measurement uncertainty: an overview and critical analysis. *Journal of Measurement Science*, vol. 1, pp. 68-76, 2010.
66. Kobayoshi, M.; Chui, Q.S.H. The positioning influence of dial gauges on their calibration results. *Measurement*, vol. 38, pp 67–76, 2005.
67. Korpelainen, V.; Seppa, J.; Lassila, A. Design and characterization of MIKES metrological atomic force microscope. *Precision Engineering*, vol. 34, pp. 735–744, 2010.
68. Kurokawa, S.; Hirose, M.; Komiyama, K. Measurement and Uncertainty Analysis of Free-Space Antenna Factors of a Log-Periodic Antenna Using Time-Domain Techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 1120-1125, 2009.
69. Lampasi, D.A. An alternative approach to measurement based on quantile functions. *Measurement*, vol. 41, pp. 994–1013, 2008.
70. Lampasi, D.A.; Di Nicola, F.; Podestà, L. Generalized Lambda Distribution for the Expression of Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 1281-1287, 2006.
71. Lazzari, A.; Iuculano, G. Evaluation of the uncertainty of an optical machine with a vision system for contact-less three-dimensional measurement. *Measurement*, vol. 36, pp. 215–231, 2004.
72. Lee, J.; Kim, J.; Park, J.; Kang, U. Uncertainty Evaluation of a Broadband Attenuation Standard. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 705-708, 2005
73. Liebrich, T.; Bringmann, B.; Knapp, W. Calibration of a 3D-ball plate. *Precision Engineering*, vol. 33, pp, 1-6, 2009.
74. Link, A.; Täubner, A.; Wabinski, W.; Bruns, T.; Elster, C. Modelling accelerometers for transient signals using calibration measurements upon sinusoidal excitation. *Measurement*, vol. 40, pp. 928–935, 2007.
75. Lira, I.; Cargill, G. Uncertainty analysis of positional deviations of CNC machine tools. *Precision Engineering*, vol. 28, pp. 232-239, 2004.
76. Locci, N.; Muscas, C.; Ghiani, E. Evaluation of uncertainty in measurements based on digitized data. *Measurement*, vol. 32, pp. 265-272, 2002.
77. Locci, N.; Muscas, C.; Sulis, S. Modeling ADC Nonlinearity in Monte Carlo Procedures for Uncertainty Estimation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 1671-1676, 2006.
78. Lorefice, S. Traceability and uncertainty analysis in volume measurements. *Measurement*, vol. 42, pp. 1510–1515, 2009.
79. Lovett, T. E.; Ponci, F.; Monti, A. A Polynomial Chaos Approach to Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 729-736, 2006.
80. Lu, T.; Chen, C. Uncertainty evaluation of humidity sensors calibrated by saturated salt solutions. *Measurement*, vol. 40, pp. 591–599, 2007.
81. Mao, J.; Cao, Y.; Yang, J. Implementation uncertainty evaluation of cylindricity errors based on geometrical product specification (GPS). *Measurement*, vol. 42, pp. 742–747, 2009.
82. Mari, L. The problem of foundations of measurement. *Measurement*, vol. 38, pp. 259-266, 2005.
83. Mariscotti, A. Measurement Procedures and Uncertainty Evaluation for Electromagnetic Radiated Emissions From Large-Power Electrical Machinery. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, pp. 2452-2463, 2007.
84. Martens, H. Evaluation of uncertainty in measurements – problems and tools. *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 38, pp. 185-206, 2002.
85. Mauris, G.; Lasserre, V.; Foulloy, L. A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement. *Measurement*, vol. 29, pp. 165-177, 2001.
86. Mayor, T.S.; Pinto, A.M.F.R.; Campos, J.B.L.M. An image analysis technique for the study of gas–liquid slug flow along vertical pipes—associated uncertainty. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 18, pp. 139-147, 2007.
87. Mekid, S.; Vaja, D. Propagation of uncertainty: Expressions of second and third order uncertainty with third and fourth moments. *Measurement*, vol. 41, pp. 600-609, 2008.
88. Melo, C.F.; Araújo, R.L.; Ardjomand, L.M.; Quoirin, N.S.R.; Ikeda, M.; Costa, A.A. Calibration of low frequency magnetic field meters using a Helmholtz coil. *Measurement*, vol. 42, pp. 1330-1334, 2009.
89. Merkaç, T. P.; Acko, B. Comparising measuring methods of pitch diameter of thread gauges and analysis of influences on the measurement results. *Measurement*, vol. 43, pp. 421-425, 2010.

90. Miao, J.J.; Yeh, C.F.; Hu, C.C.; Chou, J.H. On measurement uncertainty of a vortex flowmeter. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 16, pp. 397-404, 2005.
91. Misumi, I.; Gonda, S.; Kurosawa, T.; Azuma, Y.; Fujimoto, T.; Kojima, I.; Sakurai, T.; Ohmi, T.; Takamasu, K. Reliability of parameters of associated base straight line in step height samples: Uncertainty evaluation in step height measurements using nanometrological AFM. *Precision Engineering*, vol. 30, pp. 13–22, 2006.
92. Monti, A.; Ponci, F. Uncertainty Evaluation Under Dynamic Conditions Using Polynomial Chaos Theory. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 2825-2833, 2010.
93. Novotny, M.; Sedlacek, M. Measurement of active power by time domain digital signal processing. *Measurement*, vol. 42, pp.1139–1152, 2009.
94. Oliveira, S.P.; Rocha, A.C.; Filho, J.T.; Couto, P.R.G. Uncertainty of measurement by Monte-Carlo simulation and metrological reliability in the evaluation of electric variables of PEMFC and SOFC fuel cells. *Measurement*, vol. 42, pp. 1497-1501, 2009.
95. Oota, A.; Usuda, T.; Nozato, H. Correction and evaluation of the effect due to parasitic motion on primary accelerometer calibration. *Measurement*, vol. 43, pp. 719–725, 2010.
96. Patel, K.; Negi, P.S.; Kothari, P.C. Complex S-parameter measurement and its uncertainty evaluation on a vector network analyzer. *Measurement*, vol. 42, pp.145–149, 2009.
97. Pavese, F. On the degree of objectivity of uncertainty evaluation in metrology and testing, *Measurement*, vol. 42, pp. 1297–1303, 2009.
98. Pendrill, L.R. Optimized measurement uncertainty and decision-making when sampling by variables or by attribute. *Measurement*, vol. 39, pp. 829-840, 2006.
99. Peretto, L.; Sasdelli, R.; Tinarelli, R. On Uncertainty in Wavelet-Based Signal Analysis. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 1593-1599, 2005a.
100. Peretto, L.; Sasdelli, R.; Tinarelli, R. Uncertainty Propagation in the Discrete-Time Wavelet Transform. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 2474-2480, 2005b.
101. Pertile, M.; De Cecco, M.; Baglivo, L. Uncertainty Evaluation in Two-Dimensional Indirect Measurement by Evidence and Probability Theories. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 2816-2824, 2010.
102. Pertile, M.; De Cecco, M.; Baglivo, L. Uncertainty Evaluation in Two-Dimensional Indirect Measurement by Evidence and Probability Theories. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 2816-2824, 2010.
103. Pogliano, U. Evaluation of the Uncertainties in the Measurement of Distorted Power by Means of the IEN Sampling System. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 620-624, 2006.
104. Pogliano, U. Traceability of electrical quantities obtained by sampling. *Measurement*, vol. 42, pp. 1439–1442, 2009.
105. Reznik, L.; Dabke, K.P. Measurement models: applications of intelligent methods. *Measurement*, vol. 35, pp. 47-58, 2004.
106. Roberts, M. L.; Stevens, J. W.; Luck, R. Evaluation of parameter effects in estimating non-linear uncertainty propagation. *Measurement*, vol. 40, pp. 15–20, 2007.
107. Rosa, J.J.G.; Moreno, A.; Lloret, I.; Pallares, V.; Liñán, M. Characterisation of frequency instability and frequency offset using instruments with incomplete data sheets. *Measurement*, vol. 39, pp. 664–673, 2006.
108. Rossi, G.B.; Crenna, F. A probabilistic approach to measurement-based decisions. *Measurement*, vol. 39, pp. 101-119, 2006.
109. Salicone, S.; Tinarelli, R. An Experimental Comparison in the Uncertainty Estimation Affecting Wavelet-Based Signal Analysis by Means of the IEC-ISO Guide and the Random-Fuzzy Approaches. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp 691-699, 2006.
110. Santana, M.A.A.; Santos, F.S.N.; Sousa, V.C.; Chui, Q.S.H. Variability sources of DC voltage–current measurements in the study of TiO₂-based varistors. *Measurement*, vol. 41, pp. 1105-1112, 2008.
111. Shahanaghi, K.; Nakhjiri, P. A new optimized uncertainty evaluation applied to the Monte-Carlo simulation in platinum resistance thermometer calibration. *Measurement*, vol. 43, pp. 901-911, 2010.
112. Shimada, T.; Mahadeva, D.V.; Baker, R.C. Further investigation into a water flow rig related to calibration. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 21, pp. 462-475, 2010.
113. Sklyar, R. Suppression of low-frequency interferences in the induction sensor of magnetic field. *Measurement*, vol. 39, pp. 634–642, 2006.
114. Smith, A.H.C.; Monti, A.; Ponci, F. Uncertainty and Worst-Case Analysis in Electrical Measurements Using Polynomial Chaos Theory. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 58-67, 2009.

115. Smołalski, G. Measurability conditions of the signal parameter for a given prior knowledge. *Measurement*, vol. 42, pp. 583–603, 2009.
116. Stratakis, D. I.; Miaoudakis, A. I.; Zacharopoulos, V. G.; Xenos, T. D. On the Spatial Averaging of Multiple Narrowband Electromagnetic Field Measurements: Methods and Uncertainty Estimation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 1520–1536, 2010.
117. Stratakis, D.I.; Miaoudakis, A.I.; Xenos, T.D.; Zacharopoulos, V.G. Overall Uncertainty Estimation in Multiple Narrow-Band In Situ Electromagnetic Field Measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 2767–2779, 2009.
118. Tiemann, I.; Spaeth, C.; Wallner, G.; Metz, G.; Israel, W.; Yamaryo, Y.; Shimomura, T.; Kubo, T.; Wakasa, T.; Morosawa, T.; Köning, R.; Flügge, J.; Bosse, H. An international length comparison using vacuum comparators and a photoelectric incremental encoder as transfer standard. *Precision Engineering*, vol. 32, pp. 1–6, 2008.
119. Vabson, V.; Kübarsepp, T.; Vendt, R.; Noorma, M. Traceability of mass measurements in Estonia. *Measurement*, vol. 43, pp. 1127–1133, 2010.
120. Velychko, O.; Gordiyenko, T. The use of metrological terms and SI units in environmental guides and international standards. *Measurement*, vol. 40, pp. 202–212, 2007.
121. Vilbaste, M.; Slavin, G.; Saks, O.; Pihl, V.; Leito, I. Can coverage factor 2 be interpreted as an equivalent to 95% coverage level in uncertainty estimation? Two case studies. *Measurement*, vol. 43, pp. 392–399, 2010.
122. Wang, C.M.; Iyer, H. K. A generalized confidence interval for a measurand in the presence of type-A and type-B uncertainties. *Measurement*, vol. 39, pp. 856–863, 2006.
123. Wegener, G.; Andrae, J. Measurement uncertainty of torque measurements with rotating torque transducers in power test stands. *Measurement*, vol. 40, pp. 803–810, 2007.
124. Willink, R.; Lira, I. A united interpretation of different uncertainty intervals. *Measurement*, vol. 38, pp. 61–66, 2005.
125. Wilrich, P. Rounding of measurement values or derived values. *Measurement*, vol. 37, pp. 21–30, 2005.
126. Wirandi, J.; Chen, J.; Kulesza, W. J. An Adaptive Quality Assessment System—Aspect of Human Factor and Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 68–75, 2009.
127. Wirandi, J.; Lauber, A. Uncertainty and traceable calibration- how modern measurement concepts improve product quality in process industry. *Measurement*, vol. 39, pp. 612–620, 2006.
128. Wirandi, J.; Lauber, A.; Kulesza, W. J. Problem of Applying Modern Uncertainty Concepts to the Measurement of Instrument-Specific Parameters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 700–705, 2006.
129. Xintao, X.; Xiaoyang, C.; Yongzhen, Z.; Zhongyu, W. Grey bootstrap method of evaluation of uncertainty in dynamic measurement. *Measurement*, vol. 41, pp. 687–696, 2008.
130. Yhland, K.; Stenarson, J. Measurement Uncertainty in Power Splitter Effective Source Match. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, pp. 669–672, 2007.

Apêndice A – Enumeração dos artigos mapeados

Abordagem	Artigos		
Parâmetro de qualidade	Oliveira <i>et al.</i> (2009) Merkaç e Acko (2010) De Cecco <i>et al.</i> (2010) Galliana <i>et al.</i> (2009) Giniotis e Rybokas (2009) Forbes <i>et al.</i> (2009) Lira e Cargill (2004) Acko (2005) Wirandi <i>et al.</i> (2009) Liebrich <i>et al.</i> (2009) Bastiaensen <i>et al.</i> (2008) Hsu e Chen (2007) Bitou (2009) Kobayoshi e Chui (2005) Sklyar (2006) Rosa <i>et al.</i> (2006)	Batista <i>et al.</i> (2007) Lu e Chen (2007) Godina <i>et al.</i> (2007) Link <i>et al.</i> (2007) Hernandez (2008) Gadelmawla (2008) Novotny e Sedlacek (2009) Loreface (2009) Dey <i>et al.</i> (2010) Vabson <i>et al.</i> (2010) Fischer <i>et al.</i> (2010) Chen <i>et al.</i> (2010) Iida <i>et al.</i> (2009) Kurokawa <i>et al.</i> (2009) Hale e Wang (2009) Cataldo <i>et al.</i> (2008)	Mariscotti (2007) Perreto <i>et al.</i> (2005a) Perreto <i>et al.</i> (2005b) Lee <i>et al.</i> (2005) Ferrero <i>et al.</i> (2004) Miao <i>et al.</i> (2005) Mayor <i>et al.</i> (2007) Fuichi <i>et al.</i> (2009) Choi <i>et al.</i> (2009) Shimada <i>et al.</i> (2010) Haycocks e Jackson (2005) Misumi <i>et al.</i> (2006) Tiemann <i>et al.</i> (2008) Ellis <i>et al.</i> (2008) Barini <i>et al.</i> (2010) Korpelainen <i>et al.</i> (2010)
Apresentação de método	Heping e Xiangqian (2009) Farooqui <i>et al.</i> (2009) Pertile <i>et al.</i> (2010) De Capua e Romeo (2007) Bono <i>et al.</i> (2010) Stratakis <i>et al.</i> (2010) Mekid e Vaja (2008) Ferrero e Salicone (2004) Al-Othman (2009)	Brigmann e Knapp (2009) Lovett <i>et al.</i> (2006) Monti e Ponci (2010) Smith <i>et al.</i> (2009) Pogliano (2006) Wegener e Andrae (2007) Xintao <i>et al.</i> (2008) Lampasi (2008) Smolalski (2009)	Mao <i>et al.</i> (2009) Oota <i>et al.</i> (2010) Stratakis <i>et al.</i> (2009) Yhland e Stenarson (2007) Angrisani <i>et al.</i> (2006) Lampasi <i>et al.</i> (2006) Ferrero e Salicone (2006) Angrisani <i>et al.</i> (2006)
Sugestão de melhoria	Giniotis <i>et al.</i> (2004) Vilbaste <i>et al.</i> (2010) Fotowicz (2004) Hall (2005) Braudaway (2006) Ferrero e Salicone (2009) De Capua e Romeo (2009) De Santo <i>et al.</i> (2004)	Lazzari e Iuculano (2004) Wilrich (2005) Willink e Lira (2005) Wang e Iyer (2006) Roberts <i>et al.</i> (2007) Attivissimo <i>et al.</i> (2008) Patel <i>et al.</i> (2009) Pogliano (2009)	Chen <i>et al.</i> (2010) Bertocco <i>et al.</i> (2007) Locci <i>et al.</i> (2006) Ferrero e Salicone (2005) Betta <i>et al.</i> (2004) D'Antona (2004) Feng <i>et al.</i> (2007)
Comparação de métodos	Désenfant e Priel (2006) Reznik e Dabke (2004) Chakrabarti <i>et al.</i> (2009)	Shahanaghi e Nakhjiri (2010) Velychko e Gordiyenko (2007) D'Errico (2009)	Salicone e Tinarelli (2006) Ferrero e Salicone (2005) Ghiani <i>et al.</i> (2004)
Indicação de falhas	Wirandi e Lauber (2006) Mari (2005)	Pavese (2009)	Wirandi <i>et al.</i> (2006)
Análise de risco	Prendrill (2006) Rossi e Crenna (2006)	Forbes (2006)	Bachmanna <i>et al.</i> (2004)

2.2. ARTIGO 2

EFEITO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA UTILIZAÇÃO DE
CARTAS DE CONTROLE

EFFECT OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN CONTROL CHARTS

Artigo enviado para o congresso internacional

*XVIII International Conference on Industrial Engineering and Operations
Management**

em Dezembro de 2011

EFEITO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA UTILIZAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLE

Pedro da Silva Hack

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil
E-mail: pedrohack@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: O artigo apresenta os efeitos de considerar a distribuição da incerteza do sistema de medição na utilização de cartas de controle de processo. É desenvolvido um modelo de carta de controle na qual está inserida a variabilidade da incerteza de medição, na forma de regiões de incerteza dos pontos e dos limites de controle. Com isso, a carta de controle passa a ter suas probabilidades de cometer tanto os erros tipo I quanto tipo II alteradas, e o operador da carta de controle passa a trabalhar com probabilidades de que o processo tenha saído de controle, baseado nos dados dos gráficos de tendência central e variabilidade, dessa forma torna-se possível monitorar apenas uma variável de saída ao invés de dois gráficos simultaneamente. Ao final do artigo é apresentado um exemplo da metodologia empregada, incluindo as informações do *budget* de incerteza.

Palavras-chave: Controle da qualidade. Controle estatístico de processo. Incerteza de medição.

EFFECT OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN CONTROL CHARTS

Abstract: *This article presents the effects of considering the probability distributions that come from measurement uncertainty in process control charts. It was developed a model of control charts in which is inserted the variability of measurement uncertainty in the form of uncertainty regions that affect the points in the charts and also the control limits. Thus, the control chart has its probabilities of type I and II errors altered, and the operator uses the total probabilities that the process has gone out of control, based on data from both central tendency and variability charts. It becomes possible to monitor just one output variable instead of two graphics simultaneously. At the end of the article, it is presented an example of the method adopted, including information about the uncertainty budget.*

Keywords: *Quality control. Statistical process control. Measurement uncertainty.*

1. Introdução

Métodos de controle *online* são ferramentas primárias para melhorar o desempenho e reduzir a variabilidade de processos (MONTGOMERY, 2004). Nesse sentido, cartas de controle são largamente utilizadas para monitorar processos na área de manufatura e serviços devido à sua simplicidade de entendimento e operação (ZHANG; WU, 2005). Apesar de as cartas de controle se comportarem bem quanto aos efeitos de erros aleatórios, suas sensibilidades são deficitárias na detecção de erros sistemáticos (EPPE; DE PAUW, 2009) e, por consequência disso, outras cartas de controle de processo foram introduzidas de forma a complementar as já existentes, como a *exponentially weighted moving average* (EWMA), *cumulative sum* (CuSum) e cartas de controle multivariadas (VARGAS, 2004).

As regras clássicas do controle estatístico avaliam um processo como fora de controle quando uma de suas amostras se encontra fora dos limites de controle da carta utilizada, porém consideram-se os valores representados tanto pelas amostras quanto pelos limites de controle como sendo determinísticos, quando essencialmente são estocásticos (GÜLBAY; KAHRAMAN, 2007). Estudos realizados por Zarandi *et al.* (2008) e Gülbay e Kahraman (2007) demonstram os efeitos de se considerar os limites de controle como faixas de valores com distribuições de probabilidade associadas, obtendo resultados superiores às cartas tradicionais.

Apesar de trabalhos discutirem regras suplementares aos limites de controle clássicos (MARGAVIO *et al.*, 1994; ZHANG; WU, 2005; GAURI; CHAKRABORTY, 2009), variações de modelos (VARGAS *et al.*, 2004; EPPE; DE PAUW, 2009) e diferentes aplicações (HANSLIK *et al.*, 2001; DULL; TEGARDEN, 2004), muito pouco tem sido estudado sobre o efeito do sistema de medição (especificamente a incerteza desse sistema) sobre o controle estatístico de processo e, com o rápido desenvolvimento de sistema de coleta automática de dados, há uma preocupação em utilizar efetivamente e eficientemente a enorme quantidade de dados disponíveis que caracterizam o processo (CHEN, 2010).

Todo valor obtido a partir de uma medição (ou série de medições) está sujeito às propriedades intrínsecas ao sistema de medição utilizado, que são responsáveis por torná-lo não um valor determinístico, mas sim uma faixa de valores caracterizados por uma distribuição de probabilidade. Essa distribuição que caracteriza o valor de um

mensurando é denominada incerteza de medição (IM), e pode alterar significativamente a tomada de decisão baseada direta ou indiretamente em medições (CARBONE *et al*, 2003).

A incerteza de um sistema de medição expressa a faixa dentro da qual está o verdadeiro valor do mensurando e também representa o grau de confiança no resultado (DÉSENFANT; PRIEL, 2006). Desde a publicação do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (1993), tem havido um crescente reconhecimento de que a IM não é menos crítica do que o valor da própria medição (REZNIK; DABKE, 2004).

O presente artigo se concentra em estudar os efeitos da IM na composição de cartas de controle quanto à detecção de causas especiais considerando distribuições de probabilidade associadas tanto aos limites de controle quanto às amostras e o seu impacto sobre a sensibilidade e a taxa de alarmes falsos. Também é demonstrado o efeito nos erros do tipo I e II devido à IM. Com isso, o objetivo do trabalho é desenvolver uma metodologia para calcular a probabilidade individual de cada amostra em uma carta de controle indicar que o processo esteja realmente dentro ou fora de controle estatístico, considerando não apenas a sua posição no gráfico, mas também a distribuição de probabilidade dessa posição causada pela IM. Essa probabilidade associada é um importante indicador que aumenta ainda mais o poder da carta de controle.

Este artigo está organizado conforme segue. Na seção 2 são apresentadas revisões sobre os temas cartas de controle e incerteza de medição. Os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa seguem na seção 3. Na seção 4 é apresentado o desenvolvimento matemático para obtenção das expressões que indicam as probabilidades de amostras estarem fora de controle. A seção 5 traz um exemplo de aplicação e a discussão dos resultados, seguida da conclusão, na seção 6.

2. Referencial Teórico

O conceito de incerteza como um atributo quantificável é relativamente novo na história da metrologia, apesar de a análise de erro ser uma prática dessa ciência há muito tempo. Mesmo quando todos os componentes de erro são estudados e suas correções são aplicadas, ainda resta uma incerteza sobre o valor do resultado, expressando uma dúvida

sobre quão bem esse resultado representa o valor da quantidade sendo medida (IEC-ISO, 2008).

O Vocabulário Internacional de Medições (1993) define incerteza de medição como um parâmetro, associado com o resultado da medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos ao mensurando. Para Désenfant e Priel (2006), toda vez que decisões são tomadas com base em medições, a IM é a maneira mais simples e aceita de expressar essa confiança no resultado, além de ser exigida em normas internacionais de qualidade.

Em 1993, a *International Organization for Standardization* (ISO) publicou a primeira versão do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM), unificando um método para o cálculo de incerteza, baseado na expansão de primeira ordem da série de Taylor e na lei de propagação de incertezas, descrita na equação (1).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (1)$$

Onde i e j representam as variáveis aleatórias das quais o mensurando depende, $u(x_i)$ e $u(x_j)$ a incerteza individual dessas variáveis, $u_c(y)$ representa a incerteza padrão do mensurando, $\partial f / \partial x_i$ e $\partial f / \partial x_j$ são os coeficientes de sensibilidade de cada variável e $u(x_i, x_j)$ a incerteza das variáveis correlacionadas x_i e x_j .

Através da equação (1), todas as incertezas de medição são propagadas ao mensurando, utilizando como base o modelo matemático referente ao sistema de medição utilizado. Baseando-se no teorema do limite central, assume-se que o resultado final da medição assumirá uma distribuição aproximadamente normal (ou t-student) centrada na média das medições e com desvio padrão igual à incerteza padrão.

Para obter uma alta probabilidade de abrangência (usualmente 95%) na estimativa de incerteza, é necessário multiplicar a incerteza padrão por um fator de abrangência k , que depende dos graus de liberdade das fontes que contribuem para a incerteza, resultando na incerteza expandida, conforme a equação (2).

$$U_{95\%} = k u_c(y) \quad (2)$$

O desvio experimental da média é uma importante contribuição para a IM, porém outros elementos podem influenciar o resultado e devem ser estudados, como por exemplo, a repetitividade, reprodutibilidade, incertezas herdadas e especificações técnicas dos equipamentos. Se todas as fontes de incerteza não forem estudadas e consideradas, corre-se o risco de subestimar ou até mesmo superestimar a IM do mensurando (JORNADA; CATEN, 2007).

De acordo com Pendrill (2006), sempre que existem incertezas de medição, existem também riscos de tomar uma decisão errada, e a esses riscos sempre estão associados custos. Para Rossi e Crenna (2006), na garantia de conformidade de um processo com requerimentos técnicos, a IM afeta fortemente o processo de tomada de decisão. Ao se desconsiderar as incertezas de medição em procedimentos de controle da qualidade, se está aumentando os custos potenciais do processo ao utilizar um controle ineficaz.

Na coleta de dados para cartas controle por variáveis, todos os dados coletados estão sujeitos às incertezas de seus sistemas de medição e, segundo Gülbay e Kahraman (2007), mesmo cartas de controle por atributos possuem uma propriedade estocástica associada. Na construção de ambas as fases da aplicação de cartas de controle (fase de implementação e fase de monitoramento) os valores são classicamente considerados determinísticos e a presença de um valor fora da região de controle é considerada uma causa especial, sem que haja a preocupação com a confiança de que esse valor esteja realmente naquela determinada região do gráfico e qual a real probabilidade de que o processo esteja dentro ou fora de controle, detendo-se somente aos indicadores clássicos de erros tipo I e tipo II.

Na construção de qualquer carta de controle é necessário o cálculo de pelo menos três limites de controle: LCS, LCC, LCI (limite de controle superior, central e inferior, respectivamente), classicamente calculados com três desvios padrões de distância da média para ambos os lados. A cada um desses limites, assim como aos pontos que representam as amostras, estão intrinsecamente associadas fontes de incerteza de medição. Se essas incertezas não forem corretamente estudadas e consideradas, as conclusões tomadas acerca da carta de controle podem ser equivocadas, gerando potenciais paradas desnecessárias de produção, retrabalho ou descarte (MONTGOMERY, 2004).

Cartas de controle possuem dois tipos de erros associados (CARBONE *et al.*, 2003). Erros tipo I ou α estão associados ao risco de a carta indicar que o processo não está sob controle quando isso não é verdade (alarme falso). Erros tipo II ou β correspondem à probabilidade de o processo sair de controle sem que a carta assim indique. Ao contrário dos erros tipo I, os erros do tipo II não podem ser determinados sem conhecer a real média do processo, porém a estratégia de amostragem deve ser determinada de forma a minimizar a probabilidade de a carta não detectar mudanças de magnitude considerável no processo. Dessa forma, tamanhos de amostra maiores podem detectar desvios da média com maior facilidade e rapidez.

A distância dos limites de controle em relação à média está diretamente ligada às probabilidades de erro α e β . Segundo Montgomery (2004), ao aproximar os limites da linha central aumenta-se o risco de erros tipo I e diminui-se os tipo II, enquanto ao afastá-los ocorre o oposto. Diferentes cartas de controle possuem diferentes sensibilidades a alarmes falsos para pontos fora dos limites (ZHANG e WU, 2005), porém essas análises não contemplam a incerteza associada aos cálculos dos seus diferentes parâmetros, detendo-se somente às regras suplementares de controle.

Ao se considerar a incerteza do sistema de medição, passa-se a considerar intervalos de probabilidade tanto para os limites de controle quanto para as amostras e isso tem como consequência a alteração dos riscos de erros do tipo I e II. Ao avaliar a incerteza na carta de controle é possível estimar, para cada ponto de média amostral, a probabilidade de que o processo esteja dentro ou fora dos limites de controle independente da sua localização no gráfico, ou ainda, a probabilidade de que ocorra um alarme falso decorrente de erros do tipo I e II.

Segundo Chen (2010), a presença de alarmes falsos é um dos principais fatores que levam os operadores a rejeitarem o emprego de determinados tipos de cartas de controle. Portanto, ao fornecer uma estimativa da probabilidade de se tomar uma decisão errada ao investigar a ocorrência de uma causa especial, é oferecida ao operador uma importante ferramenta para auxiliá-lo nessa decisão.

Nesse sentido é importante avaliar corretamente a IM associada às cartas de controle e o seu potencial impacto sobre o controle estatístico de processo, quantificando seus benefícios e os esforços necessários para realizar esse objetivo.

3. Procedimentos Metodológicos

A pesquisa foi caracterizada como de natureza aplicada, visto que objetiva um estudo direcionado sobre incerteza de medição. A abordagem foi quantitativa, baseada nos equacionamentos decorrentes dos fundamentos de IM e cartas de controle. Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa foi classificada como exploratória, pois se trata do desenvolvimento de uma metodologia e, do ponto de vista dos procedimentos, foi classificada como bibliográfica, pois foi elaborada fundamentalmente a partir de material já publicado (artigos científicos).

O trabalho foi desenvolvido em três etapas estruturadas: *(i)* pesquisa na literatura por publicações relativas aos temas abordados; *(ii)* estudo de quais efeitos da incerteza seriam abordados do ponto de vista das cartas de controle; *(iii)* elaboração da sistemática para avaliar incerteza de cartas de controle e avaliação dos seus impactos no controle estatístico de processo.

Na etapa inicial foram realizadas pesquisas nas bases de dados online Science Direct, Emerald e SciELO por artigos científicos que contivessem contribuições relevantes sobre IM e cartas de controle de uma forma correlacionada. Além dessas publicações foram incluídos na pesquisa livros importantes para as áreas relacionadas à pesquisa.

Posteriormente foi realizado um estudo baseado na bibliografia coletada na primeira etapa sobre quais abordagens do tema requeriam uma maior atenção e onde havia lacunas metodológicas para serem desenvolvidas. Com base nessa pesquisa iniciou-se a etapa de elaboração da metodologia para considerar o efeito da IM no controle estatístico de processo. Com a metodologia definida, foi elaborado um exemplo de aplicação que facilitasse a visualização do método e proporcionasse uma discussão dos resultados.

4. Efeito da Incerteza de Medição em Cartas de Controle

As amostras plotadas assim como os limites de controle calculados na carta de controle estão sujeitos às incertezas do instrumento de medição, do operador, das condições de operação (classificadas como incertezas do tipo B, de acordo com o GUM) e também da

variabilidade da amostra (incerteza do tipo A). As incertezas do tipo B são dimensionadas com base nas distribuições de probabilidade das fontes de variação que afetam o sistema, decorrentes das especificações técnicas do instrumento, efeitos do meio ambiente, operador, etc. Já a incerteza do tipo A é estimada pelo desvio padrão da média amostral.

Ao incorporar as fontes de variação (A e B) e a distribuição de probabilidade da incerteza tanto nas amostras individuais da carta de controle quanto nos seus limites de controle, passa-se a trabalhar com faixas de valores para ambos, que representam a dúvida, ou incerteza, dos seus reais valores, ou seja, utilizam-se regiões de incerteza para definir as amostras e os limites na carta de controle, e não valores determinísticos. Esse efeito da IM nas cartas de controle pode ser observado na Figura 1.

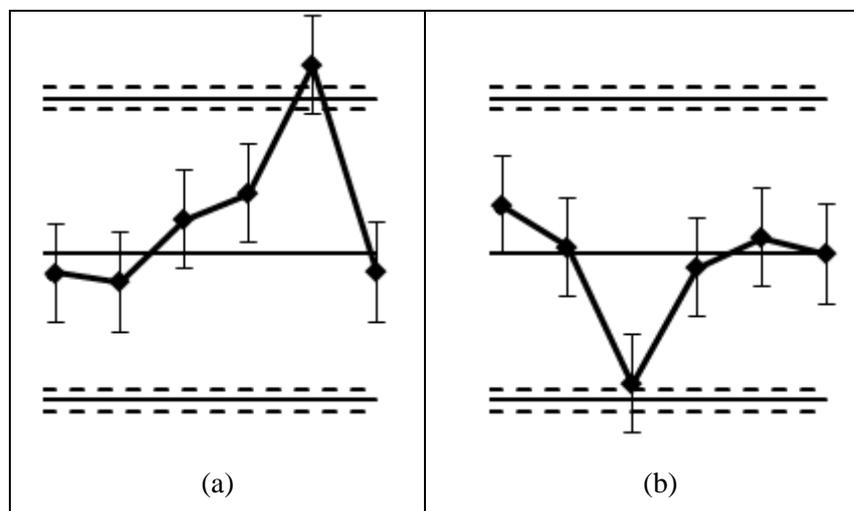


Figura 1 – Carta de controle considerando incertezas de medição

É possível observar na Figura 1 que tanto os limites de controle quanto as amostras da carta de controle adquirem uma região de incerteza ao seu redor, que define a dúvida do seu real posicionamento na carta.

Caso parte da região de incerteza de uma amostra fora dos limites esteja contemplada dentro dos limites críticos de controle, essa amostra passa a ter uma probabilidade de pertencer a essa região e, portanto, de o processo estar sob controle estatístico (erro tipo I). Do mesmo modo, uma amostra dentro dos limites de controle que tenha parte de sua região de incerteza fora dos limites possui uma probabilidade de estar fora da região sob controle (erro tipo II). Na Figura 1(a) há uma amostra fora dos limites de controle (considerada uma causa especial), porém ao considerarmos as incertezas envolvidas no sistema de medição ela passa a ter uma probabilidade de se localizar abaixo do limite

superior de controle. Da mesma forma na Figura 1(b) há uma amostra localizada dentro dos limites que passa a ter uma probabilidade de ser considerada fora da região de controle quando a incerteza é avaliada.

Para avaliar se o processo está de fato sob controle estatístico, é necessário obter a real probabilidade de que cada amostra esteja dentro ou fora da região de controle, baseando-se em suas regiões de incerteza.

A probabilidade de que uma determinada amostra esteja compreendida dentro da região de incerteza do limite de controle (região que se inicia a probabilidade de representar causa especial) é determinada pela integral da convolução das funções de distribuição de probabilidade da amostra e do limite.

$$P = \int f_{amostra}(x) * f_{limite}(x) \quad (3)$$

Onde $f(x)$ é a função de distribuição de probabilidade da variável aleatória x .

Com o objetivo de obter essa probabilidade em tempo real e manter o controle de processo *online*, o usuário responsável pela carta de controle necessitaria calcular a integral da equação (3) ou resolvê-la numericamente. Como esse cálculo dificultaria a operacionalização do método em tempo real, pode-se alternativamente utilizar limites de controle críticos, correspondentes aos valores das extremidades das regiões de incerteza dos limites de controle, definidos da seguinte forma:

$$\begin{cases} LCS_{crit} = LCS \pm \frac{U_{95\%}(LC_{crit})}{2} \\ LCI_{crit} = LCI \pm \frac{U_{95\%}(LC_{crit})}{2} \end{cases} \quad (4)$$

O usuário pode trabalhar utilizando limites críticos externos (somando a parcela de incerteza ao limite superior e subtraindo-a do limite inferior) ou internos (realizando o procedimento oposto). O critério de utilizar os limites críticos externos ou internos para os limites de controle deve ser realizado ponderando-se sobre o risco do cliente e do produtor. Ao utilizar os limites críticos internos o controle da carta se torna mais rigoroso, pois assume o pior caso da incerteza associada aos limites e, portanto, a chance do erro tipo I é aumentada e a carta indica o processo como fora de controle com

maior frequência (risco do produtor). Da mesma forma, ao utilizar os limites críticos externos, ocorrem mais erros tipo II e o processo pode ser falsamente considerado sob controle mais frequentemente (risco do cliente).

Ao utilizar limites críticos, a integral da equação (3) fica reduzida à comparação da região de incerteza da amostra (caracterizada por uma distribuição normal) ao valor do limite crítico utilizado, dispensando o cálculo da integral da convolução e possibilitando a utilização de valores tabelados ou planilhas eletrônicas.

Qualquer que seja o limite de controle crítico definido pelo usuário, a probabilidade de que uma amostra esteja fora dos limites de controle devido à distribuição da IM passa a ser:

$$P_i = P(X_i \geq LCS_{crit}) + P(X_i \leq LCI_{crit}) \quad (5)$$

Onde P_i é a probabilidade de a i -ésima amostra estar fora dos limites de controle de acordo com sua região de incerteza, LCS_{crit} é o limite de controle crítico superior e LCI_{crit} o limite de controle crítico inferior.

E equação (5) ainda pode ser reescrita utilizando a distribuição normal padrão:

$$P_i = [1 - \Phi(LCS_{crit})] + \Phi(LCI_{crit}) \quad (6)$$

Onde $\Phi(x)$ é a probabilidade de uma variável normalmente distribuída se localizar abaixo de x .

Como a variabilidade devido à IM é muito inferior à variabilidade do processo, em uma aplicação real apenas uma das caudas da região de incerteza poderá contemplar a região fora dos limites de controle, portanto a equação (6) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P_i = \begin{cases} 1 - \Phi(LCS_{crit}), & x_i \geq \bar{\bar{x}} \\ \Phi(LCI_{crit}), & x_i < \bar{\bar{x}} \end{cases} \quad (7)$$

Como a posição gráfica da amostra representa a sua média, para amostras graficamente fora dos limites de controle a probabilidade P_i estará no intervalo entre 0,5 e 1, caso contrário estará no intervalo entre 0 e 0,5.

4.1. Erros tipo I e tipo II considerando incerteza de medição

Uma amostra fora dos limites de controle está sujeita ao risco de ser um alarme falso, definido por α (geralmente 0,27% nas cartas de controle tradicionais), porém ao se considerar a IM esse risco passa a depender dos limites de controle críticos utilizados. O erro do tipo I é definido como a probabilidade de uma amostra fora dos limites de controle ser decorrente de uma causa comum, ou seja, a probabilidade de que ocorra um alarme falso, porém ao utilizar limites de controle críticos a probabilidade α é alterada, resultando em um $\alpha_{\text{crítico}}$, que representa a probabilidade de uma amostra normalmente distribuída estar localizada fora dos limites de controle críticos sem que o processo esteja fora de controle estatístico, calculado conforme (8).

$$\alpha_{\text{crit}} = 1 - P(LCI_{\text{crit}} \leq \bar{X} \leq LCS_{\text{crit}}) \quad (8)$$

O oposto de um alarme falso também pode ocorrer, ou seja, o processo estar fora de controle estatístico mesmo quando todas as amostras estão dentro dos limites de controle (erro tipo II). A probabilidade de que ocorra esse erro é definida por β . Como a probabilidade de β também depende dos limites de controle críticos calculados com base no $\alpha_{\text{crítico}}$. Ao se utilizar limites de controle críticos a probabilidade de ocorrência de erros tipo II também passa a ser redefinida:

$$\beta_{\text{crit}} = \Phi\left(Z_{\alpha_{\text{crit}}/2} - \frac{\delta\sqrt{n}}{\sigma}\right) - \Phi\left(-Z_{\alpha_{\text{crit}}/2} - \frac{\delta\sqrt{n}}{\sigma}\right) \quad (9)$$

Onde $Z_{\alpha_{\text{crit}}/2}$ é o ponto da distribuição normal padrão correspondente à porcentagem superior $\alpha_{\text{crit}}/2$, δ é a distância em relação à média para a qual se quer detectar uma causa especial e σ é o desvio padrão do processo.

Uma vez calculados os erros tipo I e II considerando-se os limites críticos, é necessário calcular quando a carta de controle estará indicando corretamente a causa especial ao se considerar a IM.

De acordo com a equação (7), ao considerar as incertezas de medição, as amostras possuem uma probabilidade de estarem fora dos limites (representadas por suas regiões de incerteza), porém de acordo com a equação (8) uma amostra fora dos limites ainda

pode ser um alarme falso. A probabilidade de uma amostra estar efetivamente localizada fora dos limites de controle (P_i) e isso representar de fato que o processo está fora de controle, $P_{OC,inside}$, é dada pela combinação das equações (7) e (8):

$$P_{OC,inside} = (P_i)(1 - \alpha_{crit}) \quad (10)$$

O processo ainda pode estar fora de controle mesmo quando a amostra está graficamente dentro dos limites de controle, $P_{OC,outside}$, nesse caso essa probabilidade do erro tipo β é combinada à probabilidade de a amostra estar dentro dos limites ($1 - P_i$):

$$P_{OC,outside} = (1 - P_i)\beta_{crit} \quad (11)$$

Por fim, a probabilidade de que qualquer amostra (independente da sua localização gráfica na carta de controle) represente uma causa especial decorrente de um processo fora de controle estatístico, P_{OC} , é dada pela soma das probabilidades das equações (10) e (11).

$$P_{OC} = (P_i)(1 - \alpha_{crit}) + (1 - P_i)\beta_{crit} \quad (12)$$

A Tabela 1 apresenta as probabilidades de que amostras graficamente dentro e fora dos limites de controle representem realmente causas comuns decorrentes de processos sob controle e especiais decorrentes de processos fora de controle, tanto para cartas de controle tradicionais quanto para cartas de controle considerando IM.

Tabela 1 – Comparação de probabilidades entre as cartas de controle tradicional e considerando a incerteza de medição

	Carta de controle tradicional	Carta de controle considerando IM
Amostra graficamente fora dos limites de controle		
Processo Fora de Controle	$(1 - \alpha)$	$(P_i)(1 - \alpha_{crit}) + (1 - P_i)\beta_{crit}$
Processo Sob Controle	α	$1 - [(P_i)(1 - \alpha_{crit}) + (1 - P_i)\beta_{crit}]$

Amostra graficamente dentro dos limites de controle		
Processo Fora de Controle	β	$(P_i)(1 - \alpha_{crit}) + (1 - P_i)\beta_{crit}$
Processo Sob Controle	$(1 - \beta)$	$1 - [(P_i)(1 - \alpha_{crit}) + (1 - P_i)\beta_{crit}]$

A probabilidade final de o processo estar fora de controle considerando as cartas de tendência central e variabilidade de que uma determinada amostra esteja fora de controle é dada pela combinação das probabilidades independentes das duas cartas:

$$P_{OC,total} = 1 - (1 - P_{OC,TC})(1 - P_{OC,V}) \quad (13)$$

Onde $P_{OC,TC}$ é a probabilidade referente à carta de tendência central e $P_{OC,V}$ a probabilidade referente à carta de variabilidade.

Observa-se que na carta de controle tradicional as probabilidades referentes à rejeição das hipóteses de controle de processo são generalistas (ou seja, aplicadas à carta inteira e não às amostras) e também diferentes para amostras dentro e fora dos limites. Na carta de controle considerando IM ocorre o contrário, cada amostra da carta de controle possui sua própria probabilidade de representar um processo fora de controle, e a expressão para o cálculo dessa probabilidade é a mesma independente da posição gráfica da amostra.

5. Aplicação e Discussão

A Figura 2 exemplifica uma carta de controle \bar{X} e R com 5 medições por amostra, considerando a incerteza do sistema de medição. Para efeitos demonstrativos, foram considerados no exemplo apenas os efeitos de incerteza do desvio padrão da média amostral (Tipo A), incerteza herdada do instrumento (Tipo B) e resolução do instrumento (Tipo B). As contribuições para o cálculo de incerteza estão apresentadas na Tabela 2. Para o exemplo apresentado foram adotados os limites de controle críticos externos. Para simplificar a operacionalização do método, a incerteza Tipo A pode ser

considera a mesma para todas as peças, fazendo com que as incertezas padrões de todas as peças seja equivalente, ou seja, $u^2(x_i) \cong u^2(x)$.

Tabela 2 – Contribuições para o cálculo de incerteza de cada amostra

Efeito	Varição	Distrib.	Divisor	Contribuição para incerteza (u_i)	Graus de liberdade
Desvio padrão da média amostral	0,01	t	$\sqrt{2}$	0,007	2
Incerteza Herdada	0,01	t	2	0,05	∞
Resolução	0,01	Ret.	$\sqrt{3}$	0,00287	∞

A incerteza dos pontos nos gráficos de controle e dos limites de controle críticos para os gráficos de média e amplitude da Figura 2 foram calculados utilizando as equações (14) a (17) (ver Apêndice A).

$$u^2(\bar{X}) = \frac{u^2(x)}{n} \quad (14)$$

$$u^2(R) = 2u^2(x) \quad (15)$$

$$u_c^2(LC_{crit,\bar{X}}) = \frac{u^2(x)(1 + 2C^2)}{n} \quad (16)$$

$$u_c^2(LC_{crit,R}) = \frac{C^2 2u^2(x)}{n} \quad (17)$$

As equações (16) e (17) foram utilizadas para compor os limites críticos (externos) de acordo com a equação (4).

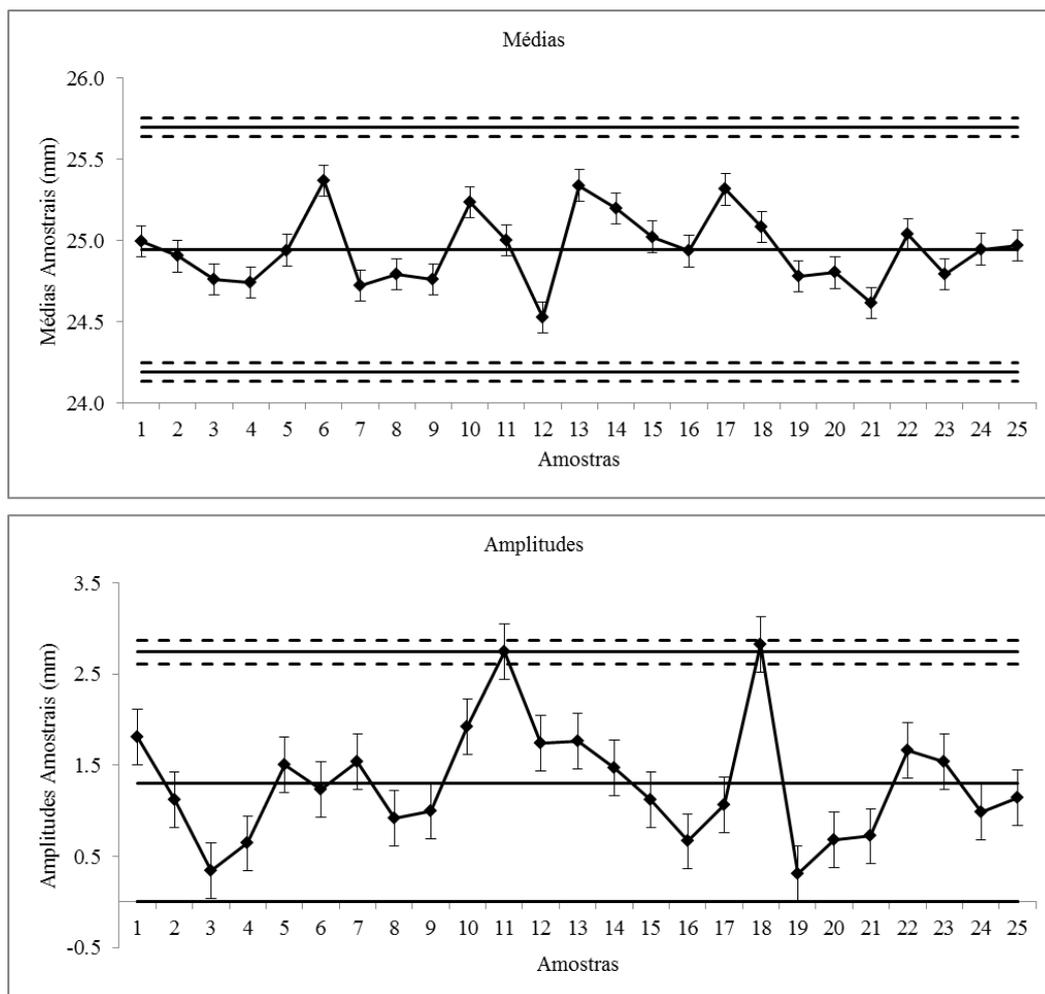


Figura 2 – Carta de Controle \bar{X} e R considerando a incerteza de medição

Na Figura 2 é possível observar que as regiões de incerteza das amostras para a carta de amplitude são maiores que para a carta de médias, devido ao fato de a incerteza para as médias possuir no seu denominador o tamanho de amostra. Por decorrência disso, tamanhos de amostra maiores tendem a reduzir a região de incerteza das amostras da carta de média, além de reduzir a probabilidade de erro tipo II. Esses dois motivos aumentam a recomendação de tamanhos de amostras maiores no planejamento de cartas de controle.

Utilizando as equações (1) e (2) com os dados da Tabela 2 e posteriormente as equações (7), a (13) foram obtidas as probabilidades para cada amostra de que o processo esteja fora de controle. O β foi estimado considerando um desvio da média de dois desvios padrões. Os resultados estão na Tabela 3. A primeira coluna da Tabela 3 identifica o número da amostra e as colunas 2 e 3 a sua média e amplitude. Na última linha estão as magnitudes das regiões de incerteza para média e amplitude, a quarta coluna apresenta a

probabilidade de que a amostra seja uma causa especial, considerando a sua média e amplitude.

Tabela 3 – Probabilidades de que o processo da Figura 2 esteja fora de controle

Amostra	\bar{X}	R	$P_{OC,TC}$	$P_{OC,V}$	$P_{OC,total}$
1	24,994	1,811	0,024%	0,024%	0,049%
2	24,904	1,119	0,024%	0,024%	0,049%
3	24,763	0,341	0,024%	1,259%	1,283%
4	24,742	0,643	0,024%	0,026%	0,050%
5	24,941	1,508	0,024%	0,024%	0,049%
6	25,367	1,231	0,024%	0,024%	0,049%
7	24,724	1,542	0,024%	0,024%	0,049%
8	24,792	0,919	0,024%	0,024%	0,049%
9	24,762	0,998	0,024%	0,024%	0,049%
10	25,236	1,926	0,024%	0,024%	0,049%
11	25,001	2,747	0,024%	20,756%	20,775%
12	24,527	1,741	0,024%	0,024%	0,049%
13	25,339	1,763	0,024%	0,024%	0,049%
14	25,199	1,467	0,024%	0,024%	0,049%
15	25,023	1,125	0,024%	0,024%	0,049%
16	24,935	0,665	0,024%	0,025%	0,049%
17	25,315	1,066	0,024%	0,024%	0,049%
18	25,085	2,828	0,024%	38,866%	38,881%
19	24,781	0,314	0,024%	1,952%	1,976%
20	24,803	0,680	0,024%	0,025%	0,049%
21	24,613	0,722	0,024%	0,025%	0,049%
22	25,038	1,666	0,024%	0,024%	0,049%
23	24,791	1,540	0,024%	0,024%	0,049%
24	24,947	0,986	0,024%	0,024%	0,049%
25	24,968	1,144	0,024%	0,024%	0,049%
U_{95%}	0,096	0,304			
	$LCS_{crit,\bar{X}} = 25,753$		$LCS_{crit,R} = 2,871$		
	$LCI_{crit,\bar{X}} = 24,134$		$LCI_{crit,R} = 0,000$		

Pela Tabela 3 observa-se que as amostras com maiores probabilidades de estarem fora de controle estatístico são as de número 11 e 18 (20,77% e 38,88% respectivamente). Isso se deve principalmente à variabilidade dentro da amostra (amplitude) ser elevada, porém também ao fato de a incerteza expandida da amplitude possuir uma magnitude grande, se comparada à incerteza da média.

A carta de controle tradicional não considera o erro tipo II na identificação de causas especiais, pois pela sua abordagem essa probabilidade é a mesma para todos os pontos da carta. Já ao considerar a IM, a probabilidade de ocorrência de um erro tipo II é diferente para cada amostra, pois ele está associado à probabilidade de a amostra estar de fato dentro dos limites de controle e, portanto, é modificado pela região de incerteza da amostra e pela posição de sua tendência central. Alternativamente pode-se utilizar a carta de controle com incertezas desconsiderando o erro β , a fim de manter a mesma metodologia empregada pela carta de controle tradicional. Nesse caso as probabilidade de as amostras estarem fora de controle são reduzidas em todos os pontos da carta.

Um facilitador na operacionalização da carta de controle considerando incertezas é de que as incertezas tipo B dependem de fatores intrínsecos ao processo de medição e, portanto, não são alterados. Da mesma forma a incerteza tipo A pode ser considerada equivalente em todos os mensurandos (conforme o exemplo), fazendo com que as incertezas possam ser mantidas em um banco de dados e apenas alteradas quando a produção for alterada ou o sistema de medição sofrer alguma calibração ou alteração.

6. Conclusões

O efeito do sistema de medição e sua estimativa de incerteza é geralmente negligenciado na utilização de cartas de controle. Dessa forma, o presente trabalho apresentou um estudo dos efeitos da incerteza de medição nas cartas de controle tradicionais, objetivando desenvolver uma metodologia para calcular a probabilidade de que uma amostra da carta de controle represente uma causa especial, considerando não apenas a sua posição no gráfico, mas também a distribuição de probabilidade associada a ela devido à IM.

Através da lei de propagação de incertezas e das propriedades das cartas de controle, foi apresentado um equacionamento que determina a probabilidade de que cada amostra em uma carta de controle represente uma causa especial, considerando os erros tipo I e tipo II em ambos os gráficos de controle. Com essa equação, o usuário da carta de controle necessita apenas dos dados do cálculo da incerteza do sistema de medição utilizado.

Como exemplo foi apresentada uma carta de controle \bar{X} e R considerando os efeitos da IM, demonstrando as probabilidades de uma amostra dentro dos limites de controle

representar uma causa especial. Nesse exemplo observou-se que a incerteza de medição possui um efeito maior na carta de amplitude, devido ao seu equacionamento. Uma forma de reduzir a região de incerteza para ambos os gráficos é aumentar o tamanho da amostra, o que também colaboraria para redução do erro tipo II.

Futuramente, sugere-se uma comparação da carta de controle tradicional com a carta de controle com incertezas, para determinar quais são mais recomendadas em determinadas situações e também comparar seus comprimentos médios de corrida (número de amostras necessárias até que ocorra um alarme falso) para diferentes parâmetros utilizados. Também se sugere incorporar IM nas regras suplementares das cartas de controle (tendência, pontos em sequência acima ou abaixo do limite central, limites de alarme, etc.). Pode-se também investigar o efeito de considerar ou não o erro tipo II na carta de controle com incertezas. O estudo da sensibilidade da IM na análise de capacidade também é bastante promissor, pois impacta diretamente nos custos para o fabricante.

7. Bibliografia

1. Carbone, P.; Macii, D.; Petri, D. Measurement uncertainty and metrological confirmation in quality-oriented organizations, *Measurement*, v. 34, p. 263-271, 2003.
2. Chen, T. On reducing false alarms in multivariate statistical process control. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 88, p. 430-436, 2010.
3. Désenfant, M.; Priel, M. Road map for measurement uncertainty evaluation. *Measurement*, v. 39, p. 841-848, 2006.
4. Dull, R. B.; Tegarden, D. P. Using control charts to monitor financial reporting of public companies. *International Journal of Accounting Information Systems*, v. 5, p. 109-127, 2004.
5. Eppe, G.; De Pauw, E. Advances in quality control for dioxins monitoring and evaluation of measurement uncertainty from quality control data. *Journal of Chromatography B*, v. 877, p. 2380-2387, 2009.
6. Gauri, S. K.; Chakraborty, S. Recognition of control chart patterns using improved selection of features. *Computers & Industrial Engineering*, v. 56, p. 1577-1588, 2009.
7. Gülbay, M.; Kahraman, C. An alternative approach to fuzzy control charts: Direct fuzzy approach. *Information Sciences*, v. 177, p. 1463-1480, 2007.
8. Hanslik, T.; Boelle, P. Y.; Flahault, A. The control chart: an epidemiological tool for public health monitoring. *Public Health*, v. 115, p. 277-281, 2001.
9. IEC-ISO. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – GUM*. ISO Publishing, 2008.
10. ISO. *International vocabulary of basic and general terms in metrology* (2nd ed.). Geneva, Switzerland: ISO Publishing, 1993.
11. Margavio, T. M.; Conerly, M. D.; Woodall, W. H.; Drake, L. G. Alarm rates for quality control charts. *Statistics and Probability Letters*, v. 24, p. 219-224, 1995.
12. Montgomery, D. C. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade* (4th ed). Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.
13. Pendrill, L. Optimised measurement uncertainty and decision-making when sampling by variables or by attribute. *Measurement*, v. 39, p. 829-840, 2006.
14. Jornada, D. H.; Caten, C. S. Uma revisão sobre abordagens e métodos de cálculo de incerteza. *V Congresso Latino Americano de Metrologia*, Paraná, Brasil, 2007.

15. Reznik, L.; Dabke, K.P. Measurement models: applications of intelligent methods, *Measurement*, v. 35, p. 47-58, 2004.
16. Rossi, G.; Crenna, F. A probabilistic approach to measurement-based decisions. *Measurement*, v. 39, p. 101-119, 2006.
17. Vargas, V. C.; Lopes, L. F.; Souza, A. M. Comparative study of the performance of the CuSum and EWMA control charts. *Computers & Industrial Engineering*, v. 46, p 707–724, 2004.
18. Zarandi, M.H. F., Alaeddini, A., Turksen, I. B. A hybrid fuzzy adaptive sampling – Run rules for Shewhart control charts. *Information Sciences*, v. 178, p. 1152-1170, 2008.
19. Zhang, S.; Wu, Z. Design of control charts with supplementary runs rules. *Computer and Industrial Engineering*, v. 49, p. 76-97, 2005.

Apêndice A. Desenvolvimento das Equações (14-17)

Adotando a hipótese de que a incerteza tipo A é aproximadamente a mesma para todas as peças, ou seja, $u^2(x_i) \cong u^2(x)$, obtém-se a incerteza para os pontos da carta de média e da carta de amplitude aplicando-se a equação (1) nas equações para cálculo de média e de amplitude:

$$u^2(\bar{X}) = \frac{\sum_{i=1}^n u^2(x_i)}{n^2} \cong \frac{\sum_{i=1}^n u^2(x)}{n^2} \cong \frac{n(u^2(x))}{n^2} \cong \frac{u^2(x)}{n} \quad (\text{A.1})$$

$$u^2(R) = u^2(x_{max}) + u^2(x_{min}) \cong 2u^2(x) \quad (\text{A.2})$$

Os limites de controle da carta de médias são calculados da seguinte forma:

$$LC_{crit,\bar{X}} = \bar{X} \pm C \cdot \bar{R} \quad (\text{A.3})$$

Onde C é a constante que depende do tamanho da amostra.

Aplicando (A.3) em (1):

$$u_c^2(LC_{crit,\bar{X}}) = 1u^2(\bar{X}) + C^2u^2(\bar{R}) \quad (\text{A.4})$$

A incerteza de \bar{X} é calculada conforme (A.1) e a incerteza de \bar{R} é calculada da seguinte forma:

$$u^2(\bar{R}) = \frac{\sum_{i=1}^n 2u^2(x_i)}{n^2} \cong \frac{2u^2(x)}{n} \quad (\text{A.5})$$

Portanto ao aplicar-se (A.1) e (A.5) em (A.4), obtém-se:

$$u_c^2(LC_{crit,\bar{x}}) = \frac{u^2(x)}{n} + C^2 \frac{2u^2(x)}{n}$$

$$u_c^2(LC_{crit,\bar{x}}) = \frac{u^2(x)(1 + 2C^2)}{n} \quad (A.6)$$

Os limites de controle da carta de amplitude são calculados da seguinte forma:

$$LC_{crit,R} = C \cdot \bar{R} \quad (A.7)$$

Aplicando (A.7) em (1):

$$u_c^2(LC_{crit,R}) = C^2 u^2(\bar{R}) \quad (A.8)$$

Aplicando (A.5) em (A.8):

$$u_c^2(LC_{crit,R}) = \frac{C^2 2u^2(x)}{n} \quad (A.9)$$

2.3. ARTIGO 3

COMPARAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLE CONSIDERANDO OU
NÃO O EFEITO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

*COMPARISON OF CONTROL CHARTS WITH AND WITHOUT THE
EFFECT OF MEASUREMENT UNCERTAINTY*

Artigo a ser enviado para o periódico internacional

Measurement

COMPARAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLE CONSIDERANDO OU NÃO O EFEITO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Pedro da Silva Hack

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil
E-mail: pedrohack@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: o presente artigo apresenta uma comparação de diferentes cenários de utilização da carta de controle \bar{X} e R, sob o efeito ou não da incerteza de medição. Foi realizado um estudo de simulação computacional de todas as combinações de cenários variando os limites de controle utilizados, probabilidades limites, tamanho da amostra e coeficiente de variação do processo, totalizando 216 cenários. Ao fim do estudo, foi constatado que o impacto da incerteza do sistema de medição quando a variabilidade do processo está suficientemente próxima da variabilidade devido à incerteza de medição pode alterar significativamente os indicadores de desempenho da carta de controle ARL_0 e ARL_1 , porém para alguns cenários quando essa diferença de variabilidades é maior esses efeitos são reduzidos e podem ser até mesmo desprezados.

Palavras-Chave: Incerteza de Medição; Controle Estatístico de Processo; Test Uncertainty Ratio.

Abstract: this paper presents a comparison of different scenarios for the use of \bar{X} and R control charts, under the effect or not of measurement uncertainty. It was conducted a computer simulation study of all combinations of scenarios varying control limits used, probability limits, sample size and coefficient of variation of the process, to a total of 216 scenarios. At the end of the study, it was found that the impact of the system measurement uncertainty when the process variability is close enough to the variation due to measurement uncertainty can significantly alter the performance indicators of the control chart ARL_0 and ARL_1 , but for some scenarios where this difference of variability is greater these effects are reduced and may even be neglected.

Keywords: Measurement Uncertainty; Statistical Process Control; Test Uncertainty Ratio.

1. Introdução

Cartas de controle são ferramentas largamente utilizadas para realizar o controle *online* da qualidade (MONTGOMERY, 2004), principalmente devido à sua simplicidade de entendimento e operação (ZHANG; WU, 2005). Sua função é indicar quando o processo sai de controle estatístico, ou seja, quando suas características de produção são modificadas de modo não intencional. Apesar de os modelos originais de cartas de controle obterem um bom desempenho, ao longo do tempo foram introduzidas variações mais sofisticadas que, por adicionarem outros conceitos, podem apresentar um comportamento superior às cartas tradicionais (VARGAS, 2004).

Há pouco se começou a trabalhar com modelos de cartas de controle que questionam a natureza determinística dos limites de controle (GÜLBAY; KAHRAMAN, 2007; ZARANDI *et al.*, 2008) e passou-se a ponderar sobre a utilização de limites de controle estocásticos derivados da presença de incertezas nos parâmetros da carta e quais seriam seus efeitos nas suas medidas de desempenho, porém a incerteza do sistema de medição sobre esses efeitos foi muito pouco abordado (EPPE; DE PAUW, 2009).

A incerteza de medição certamente tem um forte impacto nesse sentido, pois toda a estrutura da carta de controle resulta de medições e, portanto, estão sob efeito constante das fontes de incerteza (CARBONE *et al.*, 2003). Sabe-se que no ambiente industrial moderno, se deve tomar especial cuidado ao lidar com incertezas e seus efeitos em sistemas de gestão (CARBONE *et al.*, 2003), pois elas aumentam o risco de realizar uma tomada de decisão errada (PENDRILL, 2006) e, com o rápido desenvolvimento de sistema de coleta automática de dados, há uma preocupação em utilizar efetivamente e eficientemente a enorme quantidade de dados disponíveis que caracterizam o processo (CHEN, 2010).

Caso a incerteza de medição seja suficientemente pequena em relação às variações do processo controlado, o seu efeito pode ser desprezível (CARBONE *et al.*, 2003), porém quanto menor essa diferença, maiores serão os índices de alarmes falsos e o número de amostras necessárias para detectar um processo fora de controle estatístico. No ambiente industrial a proporção entre a variação do processo e a incerteza de medição (denominada TUR – *Test Uncertainty Ratio*) usualmente está na faixa de 4:1 ou até mesmo 10:1 (WONG, 1999), apesar de algumas normas técnicas aceitarem TUR de 1:1. Porém em algumas situações é impossível obter um TUR melhor que 1:1, seja pela

variabilidade do processo ser muito pequena, pela incerteza de medição do sistema ser muito grande ou por ambos os dois fatores simultaneamente (BENNET; ZION, 2005).

Para situações onde o valor do TUR é muito pequeno e a incerteza não pode ser negligenciada, adaptações para as ferramentas de controle devem ser consideradas (HACK; CATEN, 2012; CARBONE *et al.*, 2003). Para esses casos as cartas de controle precisam levar em conta a variabilidade devido à incerteza de medição e seus efeitos nos limites de controle, para corretamente dimensionar seus parâmetros de forma a minimizar a taxa de alarmes falsos e as amostras necessárias para detectar que o processo tenha saído de controle.

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento das cartas de controle sob o efeito de incertezas de medição em diferentes situações através de simulação computacional, a fim de identificar em quais cenários são realmente necessárias adaptações na estrutura das cartas e quais são os melhores parâmetros das cartas de controle para maximizar seus indicadores de desempenho.

O artigo está organizado conforme segue: após a introdução, a seção 2 apresenta as definições de uma carta de controle e seus indicadores de desempenho. A seção 3 demonstra os efeitos de se considerar incerteza de medição nas cartas de controle. Na seção 4 é explicada a metodologia utilizada para realizar a pesquisa e na seção 5 são apresentadas as simulações realizadas para os diferentes cenários sob os quais as cartas de controle foram submetidas, assim como uma discussão sobre os resultados obtidos. Por fim, a seção 6 apresenta as conclusões do trabalho.

2. Cartas de Controle

Cartas de controle são ferramentas comumente utilizadas para monitorar e examinar um processo (GÜLBAY; KAHRAMAN, 2007), medindo, classificando e analisando dados para melhorar a qualidade dos produtos e serviços detectando instabilidades e apontando graficamente possíveis variações (ZARANDI *et al.*, 2008). A característica da qualidade monitorada pela carta de controle é plotada em dois gráficos, um para medir o comportamento da tendência central e um para o da variabilidade (MONTGOMERY, 2004). A cada intervalo de tempo, uma amostra do processo é coletada e uma medida de tendência central e uma de variabilidade dessa amostra são

adicionadas às suas respectivas cartas de controle. O Objetivo da carta de controle é identificar que o processo saiu de controle estatístico, ou seja, sua média ou variabilidade foram alteradas.

Cada um dos gráficos de uma carta de controle contém três partes: uma linha central que representa o valor médio da característica da qualidade correspondente ao estado sob controle estatístico, e duas outras linhas, chamadas de limites de controle superiores e inferiores (LCS e LCI respectivamente) que geralmente estão afastados a uma distância de 3σ em relação à linha central, de forma a garantir que em um processo normalmente distribuído sob controle, 99,73% das amostras estejam dentro dos limites. Dessa forma, o processo será considerado fora de controle estatístico quando uma amostra cair fora dos limites de controle (ZARANDI *et al.*, 2008).

Da mesma forma, quando há um desvio na média ou mudança na variabilidade do processo, a carta de controle pode demorar um determinado número de amostras para detectar que o processo saiu de controle. O indicador dessa característica da carta é o NMA_1 (número médio de amostras), e quanto menor o seu valor, maior é o poder da carta de controle (GÜLBAY; KAHRAMAN, 2007). Outro poderoso indicador de desempenho da carta de controle é o NMA_0 , que indica o número médio de amostras entre cada alarme falso apresentado pela carta, ou seja, que uma amostra caia fora dos limites de controle mesmo que o processo esteja estável. Quanto maior o NMA_0 , mais econômica será a carta de controle, pois serão necessárias menos paradas no processo para investigar as causas da suposta instabilidade (ZHANG; WU, 2005). Ao comparar diferentes modelos de cartas de controle, deve-se observar seus valores de NMA_0 e de NMA_1 para concluir qual a mais adequada para determinada situação.

3. Carta de Controle Considerando os Efeitos de Incerteza de Medição

Os limites de uma carta de controle e a posição dos pontos no gráfico são tradicionalmente considerados determinísticos, porém estudos já demonstraram os efeitos de considerar os limites de controle como faixas de possíveis valores estocásticos (GÜLBAY; KAHRAMAN, 2007; ZARANDI *et al.*, 2008).

Um dos efeitos estocásticos que estão presentes nas cartas de controle são as incertezas de medição envolvidas nas leituras dos dados inseridos na carta, que por sua vez

transmitem suas propriedades estocásticas para todos os processos que dependem de seus resultados (ROSSI; CRENNNA, 2006). A consideração das distribuições de incerteza na tomada de decisão decorrente das cartas de controle pode alterar significativamente o resultado final (PENDRILL, 2006), pois ela está diretamente associada com a probabilidade de detectar instabilidades do processo e de acusar alarmes-falsos, afetando, portanto, o NMA_0 e o NMA_1 da carta de controle (CARBONE *et al*, 2003) e um dos desafios das equipes responsáveis pela qualidade é justamente lidar com as incertezas (EL-HAIK, 2005). O impacto da incerteza de medição na tomada de decisão também tem sido forte tema de estudo também nas áreas de metrologia legal e monitoramento ambiental (ROSSI; CRENNNA, 2006; VALCARCEL; CARDENAS, 2001). Mas apesar de um papel claro nas questões de tomada de decisão, pouca atenção foi dada sobre como efetivamente e objetivamente tratar a incerteza de medição nas ferramentas da qualidade (PENDRILL, 2006).

Ao considerar o efeito da incerteza de medição na carta de controle, os limites de controle deixam de ser determinísticos e passam a ser representados por uma faixa de valores, denominada região de incerteza, devido ao sistema de medição. O mesmo ocorre com os pontos do gráfico, que também passam a ter uma região de incerteza ao seu redor. O resultado dessa modificação é que as os pontos da carta passam a ter uma probabilidade associada de indicar o processo como fora de controle, mesmo caindo dentro dos limites de controle. A figura 1 mostra uma carta de controle considerando os efeitos da incerteza de medição.

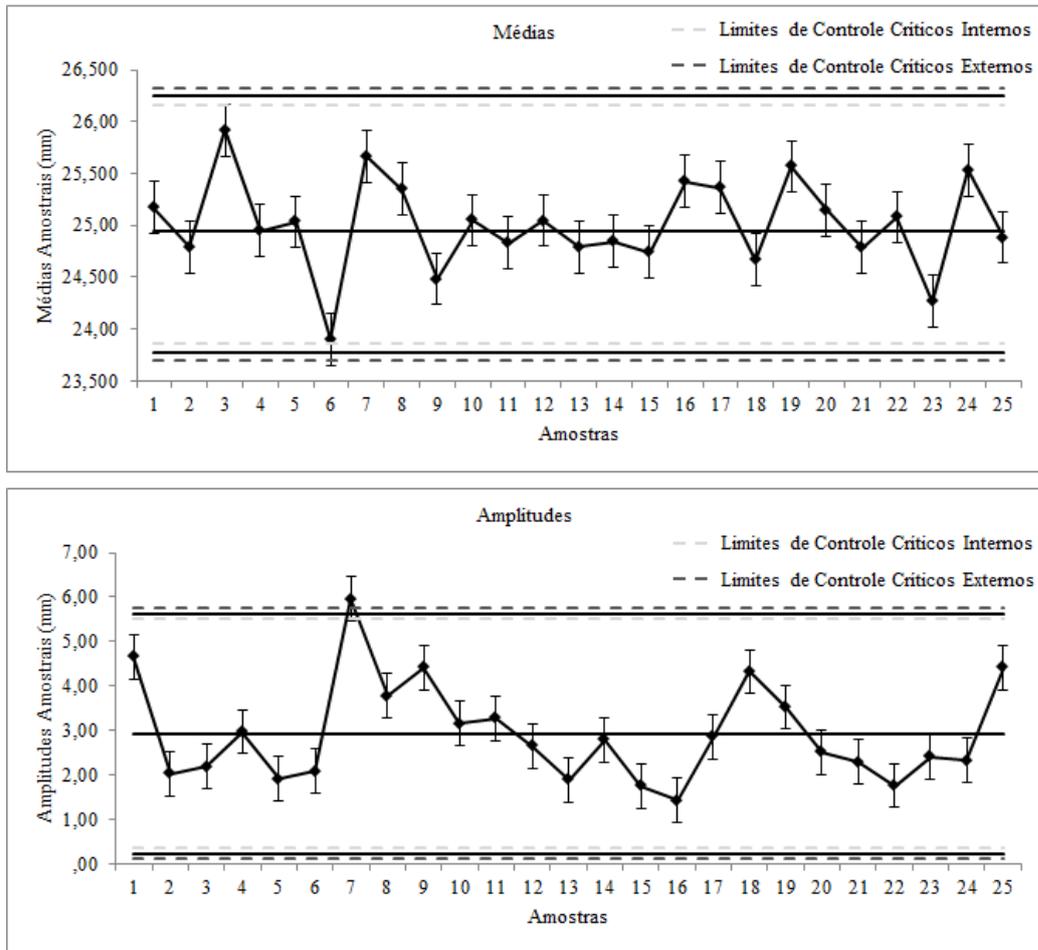


Figura 1 – Carta de Controle \bar{X} e R considerando a incerteza de medição

A região de incerteza dos limites de controle deve ser considerada para a escolha dos limites de controle críticos. Os limites críticos são os limites de controle acrescidos da sua parcela de incerteza expandida, que pode expandi-los ou encolhê-los, de acordo com a equação (1).

$$\begin{cases} LCS_{crit} = LCS \pm \frac{U_{95\%}(LC_{crit})}{2} \\ LCI_{crit} = LCI \pm \frac{U_{95\%}(LC_{crit})}{2} \end{cases} \quad (1)$$

Onde $U_{95\%}(LC_{crit})$ é a incerteza expandida do limite de controle, conforme definido por Hack e Caten (2012), LCS é o limite de controle superior e LCI o limite de controle inferior.

O usuário da carta de controle deve ponderar se serão utilizados os limites de controle críticos internos (pior caso da incerteza de medição) ou externos (melhor caso da incerteza) ponderando sobre seus efeitos no NMA_0 e NMA_1 . Os limites críticos externos aumentam a área sob controle, fazendo com que o processo acuse menos alarmes-falsos, porém aumenta o tempo de detecção de um processo fora de controle. Ao utilizar os limites críticos internos o efeito é o inverso, um processo instável é detectado mais rapidamente, porém ao custo de mais alarmes-falsos.

A probabilidade de uma determinada amostra indicar que o processo tenha saído de controle estatístico depende das regiões de incerteza dos pontos no gráfico de tendência central e variabilidade, e suas posições em relação aos limites de controle utilizados. Essa probabilidade total é apresentada na equação (2).

$$P_{OC,total} = 1 - (1 - P_{OC,TC})(1 - P_{OC,V}) \quad (2)$$

Onde $P_{OC,TC}$ e $P_{OC,V}$ representam respectivamente as probabilidades da carta de tendência central e variabilidade, decorrentes das parcelas das distribuições normais de incerteza dos pontos dos gráficos que estão dentro e fora dos limites de controle críticos utilizados.

Dessa forma o principal indicador da carta de controle considerando incertezas de medição passa a ser a probabilidade total de o processo estar fora de controle, contemplando tanto a tendência central quanto a variabilidade do processo.

O tamanho da amostra das cartas de controle tradicionais é muito importante para determinar seu desempenho (ZHANG; WU, 2005), porém a carta de controle com incerteza de medição possui outros parâmetros além do tamanho de amostra: a escolha dos limites de controle críticos e a probabilidade limite para considerar uma possível causa especial. Como o resultado da carta passa a ser uma probabilidade, cabe ao usuário determinar qual o limite de probabilidade para que uma amostra seja considerada indício de que o processo saio de controle estatístico. Cada combinação desses parâmetros irá alterar o NMA_0 e o NMA_1 da carta de controle (CARBONE *et al*, 2003), fazendo com que ela se torne mais ou menos adequada que a carta tradicional

dependendo da sua aplicação. Portanto, a seleção ótima dos parâmetros da carta de controle faz parte do planejamento para sua execução (VOMMI; SEETALA, 2007).

A necessidade de considerar a incerteza de medição nas cartas de controle depende do *test uncertainty ratio* (TUR) envolvido (CARBONE *et al*, 2003), que relaciona a variabilidade do processo e a variabilidade devido à incerteza de medição. Algumas normas técnicas definem limites para que a incerteza não ultrapasse 25% (razão de 4:1) da variabilidade do processo (ANSI/NCSL, 2006), mas para outras a razão de 3:1 ou mesmo 1:1 é aceitável (BENNET; ZION, 2005). Com um TUR suficientemente elevado, o efeito da incerteza sobre o processo pode ser desprezado (CARBONE *et al*, 2003), porém a partir de um determinado limite de TUR a incerteza começa a obter um papel importante nas ferramentas de avaliação utilizadas. Para o cálculo de TUR, a incerteza calculada deve ser a da ferramenta utilizada, e não apenas a do sistema de medição, portanto as cartas de controle necessitam ter as suas próprias incertezas calculadas, e essas sim comparadas à variabilidade do processo (HACK; CATEN, 2012). Como a incerteza do sistema de medição é apenas uma contribuição da incerteza total da carta de controle, ela ainda precisa ser propagada através da lei de propagação de incertezas (IEC-ISO, 2008), o que irá aumentar o seu valor final (HACK; CATEN, 2012). Por esse motivo, se o TUR for calculado utilizando apenas a incerteza do sistema de medição, ela será maior do que o valor real, o que pode mascarar o efeito da incerteza na utilização da carta de controle, pois equivocadamente o valor da TUR estará atendendo às normas.

4. Procedimentos Metodológicos

A pesquisa foi caracterizada como de natureza aplicada sobre incerteza de medição e cartas de controle. A abordagem foi quantitativa, baseada em cenários simulados computacionalmente cujos resultados são expressos numericamente. Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa foi classificada como explicativa, pois procura identificar os melhores parâmetros das cartas de controle para diferentes cenários e, do ponto de vista dos procedimentos, foi classificada como experimental, pois serão simulados todos os cenários propostos.

O desenvolvimento do trabalho é separado em quatro etapas: (i) identificação das variáveis que serão modificadas em cada cenário simulado; (ii) simulação das cartas de controle tanto para NMA_0 quanto para NMA_1 para todos os cenários decorrentes das combinações das variáveis levantadas na etapa anterior; (iii) identificação dos cenários simulados onde a consideração de incerteza não apresentou modificações nos resultados e; (iv) identificação dos parâmetros ótimos da construção da carta de controle para minimizar os efeitos de incerteza nos cenários onde ela não pode ser desprezada.

As variáveis identificadas na primeira etapa foram as seguintes: limites de controle (clássicos, críticos internos, críticos externos), coeficiente de variação do processo (0,5%, 1,0%, 2,0%, 4,0%), probabilidades limites para identificação de processo fora de controle (40%, 50%, 60%) e tamanho de amostra da carta de controle (3, 5, 7). Os limites de controle e as probabilidades limites foram escolhidos por serem parâmetros necessários da carta de controle com incertezas. O tamanho de amostra foi escolhido por influenciar no cálculo de incerteza, além de reduzir o erro tipo II, e o coeficiente de variação foi utilizado como forma de modificar o TUR para diferentes cenários.

As combinações de variáveis resultaram em 108 cenários, sendo que eles foram simulados para processos dentro e fora de controle, para que fosse possível avaliar o NMA_0 e o NMA_1 , totalizando 216 cenários simulados.

Para cada cenário, a simulação foi replicada 30.000 vezes e foram coletadas as médias de NMA_0 e o NMA_1 com seus respectivos intervalos de confiança para 95%.

5. Resultados

A carta de controle tradicional pode ter seus indicadores de desempenho NMA_0 e NMA_1 calculados analiticamente. Isso não é viável para a carta com incertezas devido à maneira como ela é construída levando em conta distribuições de probabilidade adicionais. Com isso, para que seja possível comparar os parâmetros de desempenho de ambas as cartas é necessário realizar uma simulação computacional para as diferentes situações de operação prática da carta de controle.

As distribuições dos parâmetros de desempenho (em especial o NMA_0) possuem uma variabilidade muito elevada, fazendo com que seja necessário um número grande de

replicações da simulação para que o sistema apresente um resultado estável e que seja possível obter um intervalo de confiança suficientemente pequeno para diferenciar os resultados entre si. Nesse sentido, foi necessário simular cada cenário 30.000 vezes. Esse valor foi obtido de forma iterativa simulando uma carta de controle tradicional de médias até que seu resultado de NMA_0 se estabilizasse ao redor do resultado calculado analiticamente de 370,37.

Foi escolhida para a simulação a carta de controle \bar{X} e R , pois é uma carta simples, de fácil cálculo de incerteza e TUR, e uma das mais utilizadas na indústria (MONTGOMERY, 2004).

Em todos os cenários simulados foi utilizado o mesmo *uncertainty budget* apresentado por Hack e Caten (2012), calculado de acordo com o *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (IEC-ISO, 2008) que resulta em uma incerteza padrão u^2 de 0,0115. Essa incerteza foi inserida nas regiões de incerteza das cartas de controle conforme o referido trabalho.

A região de incerteza dos limites de controle para a carta de médias e para a carta de amplitude gera limites de controle críticos externos e internos. Todas as situações foram consideradas utilizando tanto ambos os limites críticos quanto os limites de controle clássicos.

Para analisar as respostas aos diferentes valores de TUR de cada carta, a incerteza padrão foi mantida fixa e apenas o desvio padrão do processo foi alterado, gerando quatro diferentes coeficientes de variação (razão do desvio padrão pela média): 0,5%, 1,0%, 2,0%, 4,0%. Esses valores correspondem aos valores de TUR da carta de média e da carta de amplitude apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação de Coeficiente de Variação com TUR para os diferentes cenários simulados

Coeficiente de Variação	TUR (Média)			TUR (Amplitude)		
	n=3	n=5	n=7	n=3	n=5	n=7
0,5%	2,01	2,60	3,07	0,82	0,82	0,82
1,0%	4,03	5,20	6,16	1,65	1,65	1,65
2,0%	8,06	10,40	12,31	3,29	3,29	3,29
4,0%	16,12	20,81	24,62	6,58	6,58	6,58

Observa-se que o TUR da carta de amplitude não depende do tamanho da amostra. Isso se deve ao fato de que o tamanho de amostra não é levado em consideração no cálculo

da incerteza da carta de amplitude, ao contrário da carta de média (HACK; CATEN, 2012). Os baixos valores de TUR para a carta de amplitudes justificam o fato de ela ser potencialmente mais sensível à presença da incerteza de medição do que a carta de médias. Por esse motivo, os resultados das simulações não podem ser analisados isoladamente, sendo necessário realizar o estudo simultaneamente com a carta de média e amplitude.

Como a carta de controle com incertezas apresenta seu resultado em forma de probabilidade, é necessário atribuir o valor da probabilidade limite para que uma determinada amostra seja considerada uma causa especial. No estudo foram consideradas as probabilidades de 40%, 50% e 60%. É importante ressaltar que o cenário cuja probabilidade limite é 50% e são utilizados os limites de controle clássico, equivale à carta de controle tradicional, tanto para o NMA_0 quanto para o NMA_1 . Isso se deve ao fato de que para que a probabilidade seja maior que 50%, a amostra deve estar obrigatoriamente fora dos limites de controle, que é a condição da carta de controle tradicional.

Além do efeito direto sobre o NMA_1 , o tamanho da amostra também incide sobre o cálculo de incerteza da carta de controle, modificando as regiões de incerteza tanto dos limites de controle quanto dos pontos no gráfico. Tamanhos de amostra maiores reduzem o tempo para detecção de um processo fora de controle e também reduzem a região de incerteza, diminuindo a taxa de alarmes falsos. Foram simulados cenários considerando tamanhos de amostra 3, 5 e 7, pois são os mais usualmente utilizados.

Para estimar os indicadores de desempenho foi simulada computacionalmente uma carta de controle cujos dados de entrada seguiam uma distribuição normal com média 25 e desvio padrão variável entre 0,125 e 1,00. Para analisar o NMA_0 , a cada replicação era indicada a primeira amostra a sair dos limites de controle utilizados no cenário simulado. Posteriormente, para avaliar o NMA_1 , foi adicionado sistematicamente aos dados de entrada um deslocamento da média igual a um desvio padrão, e então se seguiu um procedimento análogo ao do NMA_0 .

Utilizando as três probabilidades limite, os quatro diferentes coeficientes de variação, os três limites de controle, e três tamanhos de amostra, foram gerados 108 diferentes cenários para cada indicador de desempenho, totalizando 216 cenários simulados. Os

resultados da simulação foram obtidos considerando a carta de média e a carta de amplitude simultaneamente, e podem ser observados nas Figuras 2 e 3 e no Apêndice A.

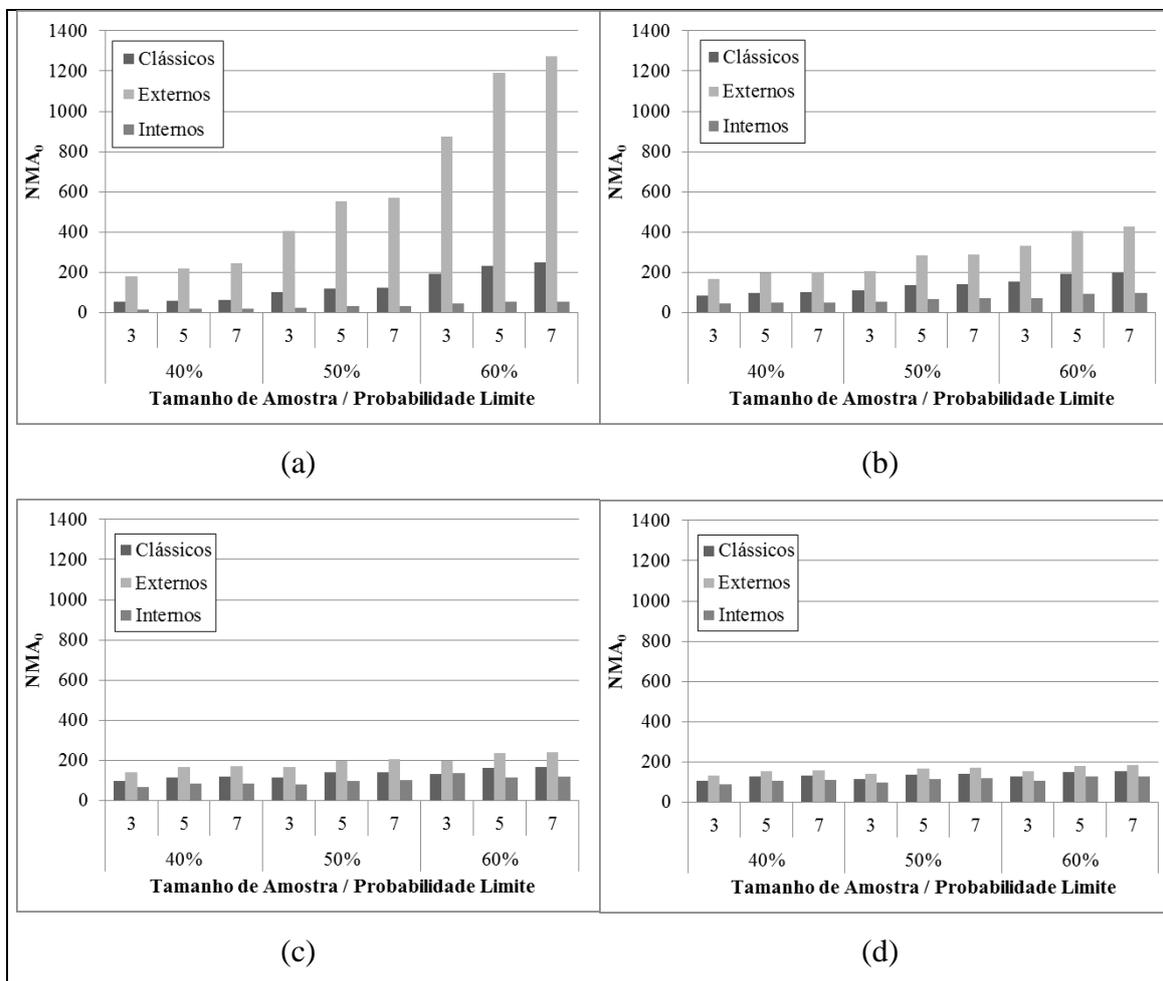


Figura 2 – NMA_0 em função do tamanho de amostra e da probabilidade limite adotada para os coeficientes de variação 0,5% (a), 1% (b), 2% (c) e 4% (d)

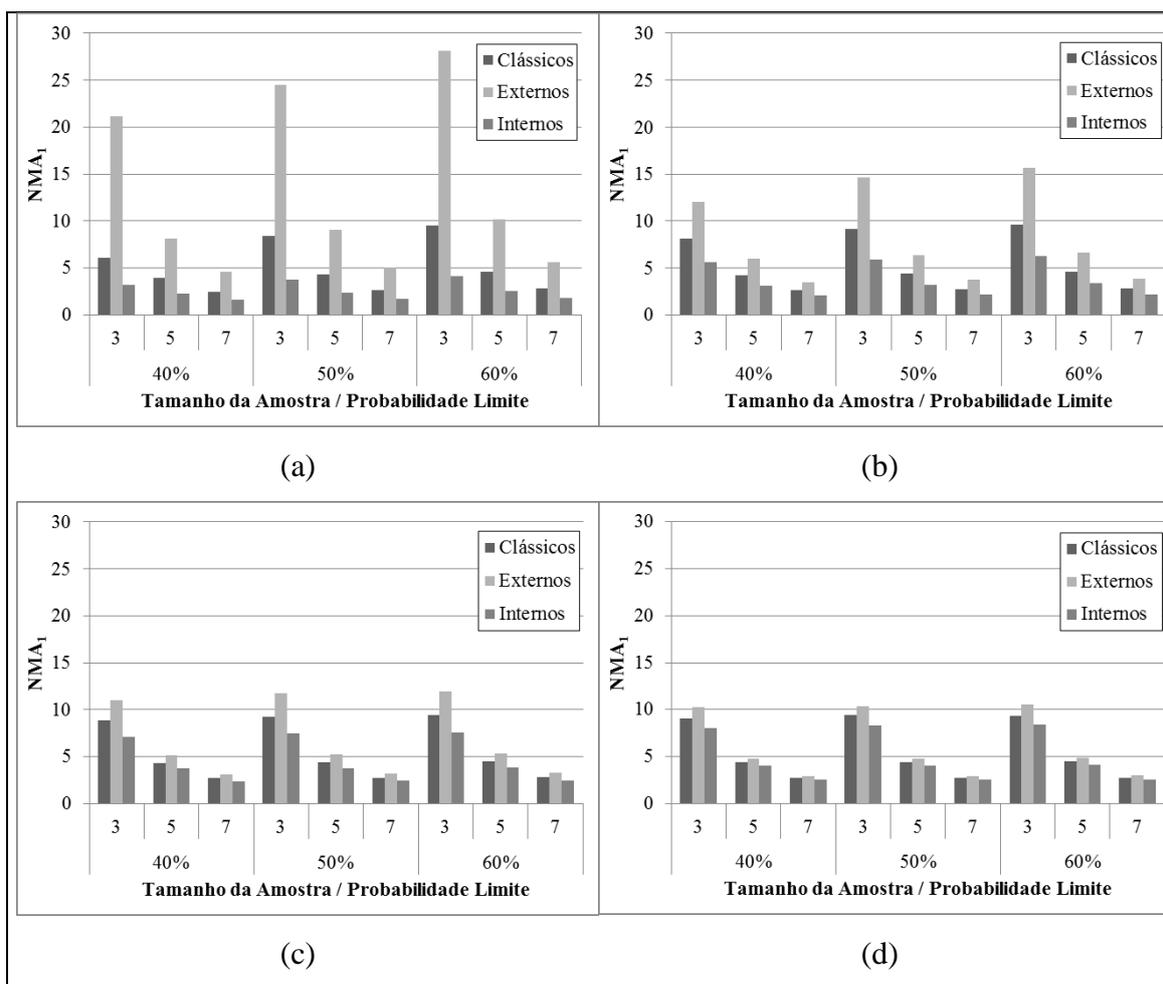


Figura 3 – NMA_1 em função do tamanho de amostra e da probabilidade limite adotada para os coeficientes de variação 0,5% (a), 1% (b), 2% (c) e 4% (d)

Os cenários cuja probabilidade limite utilizada foi de 50% e o limite utilizado foi o clássico representam cartas de controle tradicionais (para os diferentes tamanhos de amostra e coeficientes de variação). Os resultados desses cenários devem ser utilizados na comparação entre os cenários para concluir sobre os efeitos de utilizar ou não a incerteza de medição na carta de controle.

Através da Figura 2 pode-se observar que há pouca diferença entre os resultados obtidos utilizando limites de controle diferentes para valores mais elevados de TUR, demonstrando que o efeito do NMA_0 é pouco afetado pela incerteza de medição nesses casos, porém a partir de coeficiente de variação de 1% é possível observar maiores diferenças entre a utilização dos limites críticos e dos limites tradicionais, cujo efeito é ampliado reduzindo mais o TUR. Com coeficiente de variação de 0,5% (TUR de 0,82 para a carta de amplitudes) o NMA_0 resultante foi de $119,10 \pm 1,34$ utilizando tamanho

de amostra 5 e 50% de probabilidade limite com limites de controle clássicos (carta de controle tradicional) e de $553,49 \pm 6,24$ utilizando a mesma carta, porém com limites de controle críticos externos. Esse aumento no NMA_0 está associado a um aumento no NMA_1 . Como se pode observar na Figura 3 o NMA_1 salta de $4,27 \pm 0,04$ para $9,09 \pm 0,10$ nas cartas mencionadas acima.

Para minimizar o efeito sobre NMA_1 devido às incertezas é possível aumentar o tamanho de amostra. Utilizando tamanho de amostra igual a sete reduz-se o NMA_1 para $5,09 \pm 0,05$ no exemplo citado acima. Para todos os demais casos o aumento do tamanho de amostra melhorou o NMA_1 significativamente, porém o seu efeito sobre a incerteza de medição é mais acentuado nos casos de menor TUR.

Aumentar o tamanho de amostra também possui um pequeno efeito positivo sobre o NMA_0 quando a incerteza de medição é considerada. Isso se deve ao fato de o tamanho de amostra ser considerado no cálculo de incerteza e conseqüentemente no tamanho das regiões de incerteza da amostra e dos limites de controle. Esse efeito também é mais acentuado para valores de TUR menores, conforme a Figura 2.

De acordo com a Figura 3, as diferentes probabilidades limites tem pouco efeito sobre o NMA_1 . Apenas em valores de TUR muito baixos o seu efeito foi significativo. Utilizando limites internos, o NMA_1 subiu de $3,16 \pm 0,03$ para $4,17 \pm 0,04$ utilizando coeficiente de variação 0,5%, tamanho de amostra três e probabilidades limites 40% e 60% respectivamente. Nos demais casos a diferença não passou de uma unidade no NMA_1 entre os limites de controle escolhidos.

No NMA_0 o efeito da probabilidade limite também se torna mais visível com a redução do TUR. Utilizando coeficiente de variação 0,5%, tamanho de amostra 5 e limites críticos externos, o NMA_0 utilizando 40% de probabilidade limite foi $219,09 \pm 2,47$ e utilizando 60% foi $1190,51 \pm 13,45$. Utilizando limites de controle tradicionais os resultados foram de $58,11 \pm 0,66$ e $233,35 \pm 2,62$ respectivamente. Esses resultados também mostram que a probabilidade limite tem um efeito maior quando a incerteza de medição é considerada.

Os limites de controle críticos internos devem ser utilizados com cautela, pois mesmo que para os maiores coeficientes de variação seus resultados de NMA_0 tenham sido próximos dos limites tradicionais, para coeficientes de variação menores que 1% o

resultado foi muito inferior ao da carta de controle tradicional. Para o coeficiente de variação de 0,5%, tamanho de amostra cinco e probabilidade limite de 50%, o NMA_0 utilizando limites de controle críticos internos foi de apenas $29,95 \pm 0,33$ e com coeficiente de variação de 4% a mesma carta apresentou NMA_0 de $115,11 \pm 1,29$.

O NMA_1 utilizando limites de controle críticos internos foi igual, ou melhor, em todos os casos quando comparado aos limites de controle tradicionais, obtendo efeitos maiores nos menores valores de TUR.

Embora os limites críticos inferiores tenham obtido melhor desempenho no NMA_1 , a sua redução no NMA_0 não compensa sua utilização na maioria dos casos de valores baixos de TUR. Nessas situações o número de alarmes falsos pode ser elevado demais, mesmo que a velocidade de detecção de causas especiais seja rápida o suficiente.

6. Conclusão

O efeito da incerteza de medição pode modificar a estrutura das cartas de controle, alterando suas probabilidades de apresentarem alarmes falsos e também a sua velocidade de detecção de processos fora de controle. Porém, não são todos os casos práticos em que a incerteza do sistema de medição será alta o suficiente para influenciar a carta de controle e, devido à grande flexibilidade de aplicação dos gráficos de controle, essa resposta não é a mesma para todos os cenários. Com isso, o objetivo do presente trabalho foi construir e apresentar uma simulação computacional da carta de controle com incertezas de medição contemplando os cenários mais usuais de aplicação e variando os parâmetros das cartas de controle.

Foram variados os seguintes parâmetros da simulação: tamanho de amostra, coeficientes de variação do processo, probabilidades limites da carta de controle e limites de controle utilizados. Todas as combinações dentre esses parâmetros variáveis geraram 216 cenários simulados de uma carta de controle baseada nos gráficos de média e amplitude.

Nos resultados das simulações, foi observado que para valores mais elevados de *test uncertainty ratio* (TUR) a inserção das incertezas de medição na carta de controle não alteraram de maneira expressiva o desempenho da carta de médias e amplitudes. Ao reduzir o coeficiente de variação e trazendo o valor de TUR das cartas para valores menores, as respostas de NMA_0 e NMA_1 começam a diferir entre os diferentes limites de controle utilizados. Para valores de TUR a partir de 1,65 (para a carta de amplitudes)

as respostas utilizando limites de controle crítico começaram a se distanciar demasiadamente das respostas dos limites de controle clássicos. Dessa forma, é aconselhável que para processos com TUR inferiores a esse valor sejam devidamente considerados limites de controle com incertezas de medição incluídas.

Ao utilizar limites de controle críticos externos com o intuito de aumentar o NMA_0 , deve-se atentar para o aumento do NMA_1 . Esse efeito pode ser minimizado utilizando amostras com tamanho maior. Nesse caso, o aumento no tamanho de amostra contribui para a redução da incerteza da carta de controle, o que diminui a taxa de alarmes falsos e aumenta ainda mais o NMA_0 . Isso faz com que o aumento do tamanho de amostra seja recomendado não somente pelo seu efeito positivo sobre o erro tipo II, mas também pelo seu efeito sobre o erro tipo I devido às incertezas de medição. Além disso, para todos os cenários simulados o menor tamanho de amostra obteve desempenho muito inferior aos demais tanto para o NMA_0 quanto para o NMA_1 .

Para simplificar a utilização das cartas de controle com incertezas, é possível utilizar apenas a probabilidade tradicional de 50%, considerando como causas especiais os pontos fora dos limites de controle críticos. Como foi apresentado acima, apenas a utilização de limites críticos externos já pode melhorar significativamente o NMA_0 e, utilizando tamanhos de amostra maiores, o efeito no NMA_1 pode ser minimizado. Outra medida pode ser não considerar o erro tipo II na construção da carta, simplificando o cálculo das probabilidades de cada amostra.

Como sugestão de trabalhos futuros recomenda-se estudar os efeitos da incerteza de medição sobre a carta de controle com regras suplementares para detecção de alarmes falsos. Também podem ser simulados níveis adicionais aos parâmetros já simulados, como valores de TUR ainda menores por exemplo. Por fim, a aplicação das cartas de controle com incertezas em um processo real com valores baixos de TUR corroboraria com os resultados já apresentados.

7. Bibliografia

1. ANSI-NCSL Z540.3, Requirements for the Calibration of Measuring and Test Equipment, NCSL Publishing, 2006
2. Bennet, K., Zion, H. Metrology Concepts: Understanding Test Uncertainty Ratio (TUR) [White Paper], 2005.

3. Carbone, P.; Macii, D.; Petri, D. Measurement uncertainty and metrological confirmation in quality-oriented organizations, *Measurement*, v. 34, p. 263-271, 2003.
4. Chen, T. On reducing false alarms in multivariate statistical process control. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 88, p. 430-436, 2010.
5. El-Haik, B. S. *Axiomatic Quality: Integrating Axiomatic Design with Six-Sigma, Reliability, and Quality Engineering*. Wiley, 2005.
6. Eppe, G.; De Pauw, E. Advances in quality control for dioxins monitoring and evaluation of measurement uncertainty from quality control data. *Journal of Chromatography B*, v. 877, p. 2380-2387, 2009.
7. Gülbay, M.; Kahraman, C. An alternative approach to fuzzy control charts: Direct fuzzy approach. *Information Sciences*, v. 177, p. 1463-1480, 2007.
8. Hack, P.S.; Caten, C.S. Effect of Measurement Uncertainty in Control Charts, in: XVIII International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Portugal, 2012 (em avaliação).
9. IEC-ISO, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – GUM*, ISO Publishing, 2008.
10. Montgomery, D. C. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.
11. Pendrill, L. R. Optimized measurement uncertainty and decision-making when sampling by variables or by attribute, *Measurement*, v. 39, p. 829-840, 2006.
12. Rossi, G.; Crenna, F. A probabilistic approach to measurement-based decisions. *Measurement*, v. 39, p. 101-119, 2006.
13. Valcarcel, M., Cardenas, S. Metrology of the binary yes/no response in environmental analysis, *European Conference Environment, health, safety, a challenge for measurement*, Paris, June, 2001.
14. Vargas, V. C.; Lopes, L. F.; Souza, A. M. Comparative study of the performance of the CuSum and EWMA control charts. *Computers & Industrial Engineering*, v. 46, p. 707-724, 2004.
15. Vommi, V. B., Seetala, M. S. N. A new approach to robust economic design of control charts. *Applied Soft Computing*, v. 7, p. 211-228, 2007.
16. Wong, W. What TUR do you really need? Putting statistical theory into practice, in: *Proc. Measurement Science Conference*, Anaheim, CA, USA, January 28-29, 1999.
17. Zarandi, M.H. F., Alaeddini, A., Turksen, I. B. A hybrid fuzzy adaptive sampling – Run rules for Shewhart control charts, *Information Sciences*, v. 178, p. 1152-1170, 2008.
18. Zhang, S.; Wu, Z. Design of control charts with supplementary runs rules. *Computer and Industrial Engineering*, v. 49, p. 76-97, 2005.

Apêndice A – Resultados das Simulações

Tabela A.1 – NMA₀ utilizando limites de controle clássicos

Coef. De Variação	N	Prob. Limite	NMA ₀ (Total)	NMA ₀ (Médias)	NMA ₀ (Amplitude)
0,5%	3	40%	52,60 ± 0,59	225,94 ± 2,56	81,04 ± 0,92
		50%	100,44 ± 1,13	362,35 ± 4,13	165,19 ± 1,88
		60%	192,47 ± 2,15	536,53 ± 6,04	350,96 ± 3,94
	5	40%	58,11 ± 0,66	233,68 ± 2,64	97,97 ± 1,11
		50%	119,10 ± 1,34	371,51 ± 4,20	218,27 ± 2,45
		60%	233,35 ± 2,62	562,37 ± 6,33	503,20 ± 5,66
	7	40%	60,90 ± 0,68	230,48 ± 2,62	102,73 ± 1,15
		50%	123,55 ± 1,40	372,73 ± 4,23	229,15 ± 2,62
		60%	247,77 ± 2,78	579,87 ± 6,56	543,22 ± 6,05
1,0%	3	40%	81,88 ± 0,92	292,90 ± 3,32	117,73 ± 1,32
		50%	111,74 ± 1,26	366,04 ± 4,13	167,22 ± 1,89
		60%	152,92 ± 1,73	450,80 ± 5,08	244,58 ± 2,77
	5	40%	96,99 ± 1,09	293,38 ± 3,32	147,51 ± 1,65
		50%	137,34 ± 1,54	373,72 ± 4,23	220,96 ± 2,48
		60%	190,21 ± 2,13	459,92 ± 5,18	327,44 ± 3,71
	7	40%	99,72 ± 1,12	293,82 ± 3,30	153,03 ± 1,74
		50%	140,29 ± 1,58	369,49 ± 4,17	230,03 ± 2,59
		60%	196,87 ± 2,22	464,39 ± 5,22	346,15 ± 3,90
2,0%	3	40%	98,86 ± 1,12	328,22 ± 3,73	142,43 ± 1,61
		50%	114,54 ± 1,30	367,58 ± 4,14	169,39 ± 1,91
		60%	133,51 ± 1,52	406,11 ± 4,62	202,21 ± 2,29
	5	40%	115,33 ± 1,30	332,64 ± 3,76	177,25 ± 2,02
		50%	138,80 ± 1,57	373,89 ± 4,22	219,27 ± 2,46
		60%	161,28 ± 1,83	414,64 ± 4,68	263,79 ± 2,97
	7	40%	118,73 ± 1,35	327,92 ± 3,74	184,84 ± 2,08
		50%	140,57 ± 1,58	366,17 ± 4,15	228,78 ± 2,61
		60%	168,22 ± 1,92	416,03 ± 4,71	282,68 ± 3,20
4,0%	3	40%	106,62 ± 1,20	347,32 ± 3,96	156,70 ± 1,77
		50%	115,88 ± 1,31	367,12 ± 4,18	170,06 ± 1,92
		60%	126,38 ± 1,44	386,51 ± 4,34	187,13 ± 2,11
	5	40%	126,66 ± 1,43	348,98 ± 3,95	198,56 ± 2,24
		50%	137,66 ± 1,55	371,33 ± 4,19	217,54 ± 2,50
		60%	149,57 ± 1,68	394,25 ± 4,48	241,50 ± 2,71
	7	40%	130,33 ± 1,46	350,83 ± 3,98	206,12 ± 2,30
		50%	141,91 ± 1,61	370,84 ± 4,17	227,81 ± 2,59
		60%	154,52 ± 1,74	393,86 ± 4,46	253,27 ± 2,87

Tabela A.2 – NMA₀ utilizando limites de controle críticos externos

Coef. De Variação	N	Prob. Limite	NMA ₀ (Total)	NMA ₀ (Médias)	NMA ₀ (Amplitude)
0,5%	3	40%	178,16 ± 2,02	1158,25 ± 13,21	292,35 ± 3,30
		50%	403,51 ± 4,57	2078,68 ± 23,49	665,05 ± 7,53
		60%	873,85 ± 10,00	3278,06 ± 37,50	1518,89 ± 17,60
	5	40%	219,09 ± 2,47	1241,15 ± 14,09	310,86 ± 3,49
		50%	553,49 ± 6,24	2138,11 ± 24,09	864,28 ± 9,79
		60%	1190,51 ± 13,45	3390,86 ± 39,01	2111,51 ± 23,84
	7	40%	246,39 ± 2,78	1373,53 ± 15,51	334,38 ± 3,78
		50%	569,21 ± 6,45	2375,25 ± 26,65	836,42 ± 9,57
		60%	1273,49 ± 14,52	3981,94 ± 45,28	2098,53 ± 23,96
1,0%	3	40%	164,90 ± 1,86	687,77 ± 7,72	236,26 ± 2,67
		50%	207,54 ± 2,35	879,07 ± 10,00	332,67 ± 3,77
		60%	332,39 ± 3,75	1102,32 ± 12,54	517,41 ± 5,82
	5	40%	196,59 ± 2,21	679,97 ± 7,68	281,38 ± 3,17
		50%	281,72 ± 3,19	865,38 ± 9,78	426,76 ± 4,86
		60%	404,75 ± 4,60	1077,63 ± 12,22	651,97 ± 7,38
	7	40%	200,34 ± 2,26	705,68 ± 8,02	281,73 ± 3,21
		50%	289,07 ± 3,25	912,18 ± 10,25	428,56 ± 4,87
		60%	425,87 ± 4,82	1160,71 ± 13,10	675,71 ± 7,65
2,0%	3	40%	142,34 ± 1,61	509,47 ± 5,79	203,35 ± 2,31
		50%	166,83 ± 1,88	571,30 ± 6,47	243,86 ± 2,77
		60%	197,88 ± 2,24	632,47 ± 7,15	296,01 ± 3,35
	5	40%	167,04 ± 1,87	495,79 ± 5,63	249,82 ± 2,81
		50%	198,52 ± 2,22	562,22 ± 6,37	308,49 ± 3,50
		60%	234,33 ± 2,63	628,35 ± 7,08	373,59 ± 4,23
	7	40%	169,93 ± 1,91	512,38 ± 5,75	253,72 ± 2,88
		50%	205,69 ± 2,35	580,52 ± 6,52	313,81 ± 3,53
		60%	241,07 ± 2,71	649,05 ± 7,36	383,35 ± 4,35
4,0%	3	40%	130,68 ± 1,47	434,43 ± 4,93	188,08 ± 2,13
		50%	139,21 ± 1,58	456,45 ± 5,19	203,33 ± 2,31
		60%	152,69 ± 1,71	484,85 ± 5,44	222,56 ± 2,48
	5	40%	151,47 ± 1,71	433,93 ± 4,86	231,21 ± 2,60
		50%	165,81 ± 1,85	457,94 ± 5,16	257,61 ± 2,89
		60%	179,81 ± 2,04	479,98 ± 5,44	285,73 ± 3,21
	7	40%	156,21 ± 1,76	435,12 ± 4,91	240,27 ± 2,68
		50%	169,19 ± 1,90	463,88 ± 5,26	265,76 ± 3,00
		60%	184,96 ± 2,08	491,78 ± 5,51	296,16 ± 3,35

Tabela A.3 – NMA₀ utilizando limites de controle críticos internos

Coef. De Variação	N	Prob. Limite	NMA ₀ (Total)		NMA ₀ (Médias)		NMA ₀ (Amplitude)	
0,5%	3	40%	14,74	± 0,16	52,08	± 0,58	24,67	± 0,27
		50%	25,11	± 0,28	76,05	± 0,86	45,76	± 0,51
		60%	42,68	± 0,47	107,28	± 1,20	88,40	± 0,99
	5	40%	16,62	± 0,18	55,94	± 0,63	32,64	± 0,36
		50%	29,95	± 0,33	83,10	± 0,93	65,98	± 0,74
		60%	52,93	± 0,60	120,00	± 1,34	137,06	± 1,56
	7	40%	16,91	± 0,19	50,58	± 0,57	35,56	± 0,40
		50%	30,14	± 0,34	75,19	± 0,84	73,53	± 0,83
		60%	53,73	± 0,60	110,31	± 1,24	160,12	± 1,82
1,0%	3	40%	44,14	± 0,51	137,60	± 1,55	66,70	± 0,77
		50%	55,36	± 0,62	161,84	± 1,82	85,35	± 0,95
		60%	72,85	± 0,82	195,73	± 2,18	121,40	± 1,38
	5	40%	50,99	± 0,57	137,47	± 1,54	81,56	± 0,91
		50%	67,72	± 0,75	167,87	± 1,90	116,26	± 1,32
		60%	92,30	± 1,04	208,04	± 2,33	170,29	± 1,93
	7	40%	50,85	± 0,57	128,93	± 1,46	86,10	± 0,97
		50%	70,21	± 0,79	161,20	± 1,80	125,50	± 1,41
		60%	95,64	± 1,08	199,53	± 2,26	188,83	± 2,13
2,0%	3	40%	67,20	± 0,75	217,65	± 2,49	99,05	± 1,11
		50%	79,76	± 0,89	241,11	± 2,72	120,25	± 1,34
		60%	135,74	± 1,51	408,80	± 4,61	203,67	± 2,29
	5	40%	82,71	± 0,93	224,40	± 2,55	131,19	± 1,47
		50%	97,26	± 1,08	248,46	± 2,77	158,34	± 1,77
		60%	113,36	± 1,28	276,88	± 3,13	192,87	± 2,18
	7	40%	84,95	± 0,96	218,27	± 2,46	138,09	± 1,54
		50%	100,81	± 1,13	242,50	± 2,71	170,04	± 1,91
		60%	117,63	± 1,33	272,83	± 3,09	207,23	± 2,34
4,0%	3	40%	88,40	± 0,99	282,57	± 3,20	130,67	± 1,47
		50%	97,06	± 1,08	300,21	± 3,37	145,40	± 1,65
		60%	105,46	± 1,18	315,18	± 3,57	158,60	± 1,78
	5	40%	107,55	± 1,21	288,89	± 3,27	170,59	± 1,92
		50%	115,11	± 1,29	302,42	± 3,37	184,58	± 2,10
		60%	125,98	± 1,43	321,39	± 3,65	206,29	± 2,34
	7	40%	110,24	± 1,24	281,53	± 3,18	176,89	± 1,99
		50%	118,49	± 1,34	294,46	± 3,34	196,23	± 2,23
		60%	127,70	± 1,44	314,43	± 3,58	216,56	± 2,42

Tabela A.4 – NMA₁ utilizando limites de controle clássicos

Coef. De Variação	N	Prob. Limite	NMA ₁ (Total)		NMA ₁ (Médias)		NMA ₁ (Amplitude)	
0,5%	3	40%	6,05	± 0,06	9,14	± 0,10	23,46	± 0,26
		50%	8,40	± 0,09	9,65	± 0,10	163,06	± 1,84
		60%	9,53	± 0,10	10,51	± 0,11	349,47	± 3,97
	5	40%	3,89	± 0,04	4,20	± 0,04	98,35	± 1,11
		50%	4,27	± 0,04	4,52	± 0,05	220,80	± 2,49
		60%	4,62	± 0,05	4,81	± 0,05	496,91	± 5,63
	7	40%	2,46	± 0,02	2,60	± 0,02	103,24	± 1,17
		50%	2,65	± 0,02	2,76	± 0,02	230,16	± 2,62
		60%	2,86	± 0,03	2,96	± 0,03	540,51	± 6,13
1,0%	3	40%	8,14	± 0,09	9,45	± 0,10	62,78	± 0,71
		50%	9,14	± 0,10	9,78	± 0,10	165,72	± 1,86
		60%	9,61	± 0,10	10,09	± 0,11	244,43	± 2,77
	5	40%	4,23	± 0,04	4,34	± 0,04	149,00	± 1,67
		50%	4,38	± 0,04	4,48	± 0,04	219,47	± 2,47
		60%	4,62	± 0,05	4,69	± 0,05	327,95	± 3,70
	7	40%	2,65	± 0,02	2,70	± 0,02	152,67	± 1,72
		50%	2,74	± 0,02	2,76	± 0,02	227,30	± 2,55
		60%	2,84	± 0,03	2,86	± 0,03	347,12	± 3,89
2,0%	3	40%	8,91	± 0,10	9,71	± 0,10	112,00	± 1,27
		50%	9,28	± 0,10	9,79	± 0,10	169,99	± 1,92
		60%	9,47	± 0,10	9,93	± 0,11	203,11	± 2,31
	5	40%	4,33	± 0,04	4,41	± 0,04	180,38	± 2,05
		50%	4,39	± 0,04	4,48	± 0,04	219,89	± 2,46
		60%	4,52	± 0,05	4,58	± 0,05	267,31	± 3,03
	7	40%	2,71	± 0,02	2,74	± 0,02	183,67	± 2,07
		50%	2,77	± 0,03	2,79	± 0,03	225,35	± 2,54
		60%	2,79	± 0,03	2,80	± 0,03	282,45	± 3,21
4,0%	3	40%	9,09	± 0,10	9,63	± 0,10	146,74	± 1,67
		50%	9,38	± 0,10	9,87	± 0,10	171,77	± 1,93
		60%	9,37	± 0,10	9,82	± 0,11	187,01	± 2,10
	5	40%	4,41	± 0,04	4,50	± 0,04	197,80	± 2,24
		50%	4,42	± 0,04	4,50	± 0,04	217,11	± 2,44
		60%	4,46	± 0,04	4,53	± 0,05	241,28	± 2,72
	7	40%	2,70	± 0,02	2,72	± 0,02	204,04	± 2,35
		50%	2,74	± 0,02	2,76	± 0,03	227,91	± 2,59
		60%	2,75	± 0,02	2,77	± 0,03	253,55	± 2,89

Tabela A.5 – NMA₁ utilizando limites de controle críticos externos

Coef. De Variação	N	Prob. Limite	NMA ₁ (Total)	NMA ₁ (Médias)	NMA ₁ (Amplitude)
0,5%	3	40%	21,15 ± 0,23	24,24 ± 0,27	291,78 ± 3,33
		50%	24,55 ± 0,27	26,54 ± 0,29	673,00 ± 7,54
		60%	28,11 ± 0,31	29,48 ± 0,33	1582,21 ± 17,86
	5	40%	8,09 ± 0,09	8,71 ± 0,09	310,24 ± 3,52
		50%	9,09 ± 0,10	9,56 ± 0,10	870,25 ± 9,82
		60%	10,21 ± 0,11	10,65 ± 0,11	2116,23 ± 24,04
	7	40%	4,58 ± 0,05	4,83 ± 0,05	332,11 ± 3,78
		50%	5,09 ± 0,05	5,29 ± 0,05	834,71 ± 9,43
		60%	5,64 ± 0,06	5,82 ± 0,06	2117,42 ± 23,56
1,0%	3	40%	12,06 ± 0,13	15,10 ± 0,17	77,35 ± 0,87
		50%	14,68 ± 0,16	15,75 ± 0,17	334,92 ± 3,77
		60%	15,64 ± 0,17	16,42 ± 0,18	515,59 ± 5,86
	5	40%	6,03 ± 0,06	6,15 ± 0,06	279,60 ± 3,18
		50%	6,33 ± 0,07	6,43 ± 0,07	424,72 ± 4,79
		60%	6,64 ± 0,07	6,71 ± 0,07	651,04 ± 7,33
	7	40%	3,50 ± 0,03	3,54 ± 0,03	277,97 ± 3,13
		50%	3,72 ± 0,04	3,75 ± 0,04	433,87 ± 4,93
		60%	3,85 ± 0,04	3,88 ± 0,04	666,49 ± 7,59
2,0%	3	40%	11,04 ± 0,12	12,05 ± 0,13	143,78 ± 1,62
		50%	11,76 ± 0,13	12,38 ± 0,13	243,26 ± 2,75
		60%	11,98 ± 0,13	12,49 ± 0,14	294,39 ± 3,33
	5	40%	5,14 ± 0,05	5,22 ± 0,05	250,31 ± 2,81
		50%	5,26 ± 0,05	5,33 ± 0,05	303,43 ± 3,42
		60%	5,36 ± 0,06	5,43 ± 0,06	373,05 ± 4,23
	7	40%	3,13 ± 0,03	3,15 ± 0,03	256,87 ± 2,93
		50%	3,19 ± 0,03	3,21 ± 0,03	312,17 ± 3,56
		60%	3,25 ± 0,03	3,26 ± 0,03	387,59 ± 4,39
4,0%	3	40%	10,28 ± 0,11	10,90 ± 0,12	171,31 ± 1,92
		50%	10,35 ± 0,11	10,87 ± 0,12	202,21 ± 2,27
		60%	10,58 ± 0,11	11,06 ± 0,12	225,03 ± 2,51
	5	40%	4,76 ± 0,05	4,84 ± 0,05	232,27 ± 2,62
		50%	4,82 ± 0,05	4,89 ± 0,05	257,60 ± 2,91
		60%	4,84 ± 0,05	4,91 ± 0,05	283,34 ± 3,23
	7	40%	2,92 ± 0,03	2,95 ± 0,03	240,24 ± 2,70
		50%	2,96 ± 0,03	2,98 ± 0,03	267,92 ± 3,03
		60%	2,98 ± 0,03	3,00 ± 0,03	293,70 ± 3,31

Tabela A.6 – NMA₁ utilizando limites de controle críticos internos

Coef. De Variação	N	Prob. Limite	NMA ₁ (Total)	NMA ₁ (Médias)	NMA ₁ (Amplitude)
0,5%	3	40%	3,16 ± 0,03	4,15 ± 0,04	15,06 ± 0,16
		50%	3,79 ± 0,04	4,40 ± 0,04	44,97 ± 0,50
		60%	4,17 ± 0,04	4,63 ± 0,05	86,84 ± 0,97
	5	40%	2,22 ± 0,02	2,43 ± 0,02	33,15 ± 0,37
		50%	2,39 ± 0,02	2,55 ± 0,02	66,31 ± 0,74
		60%	2,53 ± 0,02	2,66 ± 0,02	137,97 ± 1,54
	7	40%	1,59 ± 0,01	1,68 ± 0,01	35,42 ± 0,39
		50%	1,69 ± 0,01	1,76 ± 0,01	73,20 ± 0,83
		60%	1,77 ± 0,01	1,83 ± 0,01	161,33 ± 1,82
1,0%	3	40%	5,63 ± 0,06	6,13 ± 0,06	60,95 ± 0,68
		50%	5,89 ± 0,06	6,30 ± 0,07	84,55 ± 0,95
		60%	6,29 ± 0,07	6,60 ± 0,07	120,47 ± 1,35
	5	40%	3,09 ± 0,03	3,19 ± 0,03	80,60 ± 0,90
		50%	3,21 ± 0,03	3,28 ± 0,03	116,80 ± 1,31
		60%	3,34 ± 0,03	3,40 ± 0,03	171,65 ± 1,93
	7	40%	2,07 ± 0,02	2,11 ± 0,02	85,87 ± 0,97
		50%	2,13 ± 0,02	2,15 ± 0,02	125,72 ± 1,42
		60%	2,20 ± 0,02	2,22 ± 0,02	183,87 ± 2,09
2,0%	3	40%	7,13 ± 0,07	7,72 ± 0,08	85,69 ± 0,95
		50%	7,43 ± 0,08	7,87 ± 0,08	118,75 ± 1,34
		60%	7,59 ± 0,08	7,98 ± 0,08	142,47 ± 1,60
	5	40%	3,71 ± 0,04	3,78 ± 0,04	131,01 ± 1,48
		50%	3,72 ± 0,04	3,79 ± 0,04	157,48 ± 1,76
		60%	3,85 ± 0,04	3,91 ± 0,04	191,51 ± 2,16
	7	40%	2,37 ± 0,02	2,39 ± 0,02	136,93 ± 1,55
		50%	2,40 ± 0,02	2,42 ± 0,02	167,49 ± 1,89
		60%	2,43 ± 0,02	2,45 ± 0,02	204,94 ± 2,31
4,0%	3	40%	8,05 ± 0,08	8,57 ± 0,09	122,83 ± 1,39
		50%	8,30 ± 0,09	8,75 ± 0,09	143,88 ± 1,60
		60%	8,41 ± 0,09	8,84 ± 0,09	155,77 ± 1,76
	5	40%	4,01 ± 0,04	4,08 ± 0,04	167,69 ± 1,89
		50%	4,07 ± 0,04	4,12 ± 0,04	186,45 ± 2,12
		60%	4,16 ± 0,04	4,23 ± 0,04	205,70 ± 2,33
	7	40%	2,55 ± 0,02	2,57 ± 0,02	176,13 ± 2,00
		50%	2,57 ± 0,02	2,59 ± 0,02	194,55 ± 2,19
		60%	2,57 ± 0,02	2,59 ± 0,02	217,12 ± 2,45

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as conclusões da dissertação e posteriormente aponta sugestões de trabalhos futuros, identificados no decorrer da pesquisa realizada.

3.1. Conclusões

Durante esta dissertação foi discutido de que forma a incerteza de medição pode modificar o desempenho das cartas de controle, tendo como objetivos principais propor um método para incorporar as incertezas do sistema de medição às cartas de controle, e posteriormente estudar as situações de maior e menor aplicação desta metodologia proposta. Para atingir o objetivo principal e os objetivos específicos da dissertação, foram elaborados três artigos.

O primeiro artigo contemplou uma revisão da literatura contendo um mapeamento dos artigos publicados sobre incerteza de medição entre os anos de 2004 e 2010, visando analisar as principais abordagens apresentadas pelos autores sobre incerteza de medição e identificar potenciais lacunas que permitissem estudos futuros. Com o mapeamento realizado foram cruzados os dados de abordagem, ano de publicação e método para cálculo de incerteza. Foi identificado que o método mais utilizado para cálculo de incerteza ainda é o descrito pelo GUM, apesar de outros métodos estarem ganhando espaço recentemente. Também foi apresentado que a incerteza de medição foi mais utilizada como parâmetro de qualidade para comparar dois diferentes métodos de calibração ou ensaio. Houve poucos artigos publicados utilizando incerteza de medição abordando análise de risco na tomada de decisão e nenhum artigo estudando como a incerteza pode influenciar as demais ferramentas da qualidade, incluindo cartas de controle. Essa deficiência de artigos sobre o tema justificou o objetivo principal da dissertação.

Seguindo a lacuna na literatura identificada no primeiro artigo e dentro dos objetivos do trabalho, o segundo artigo apresentou um método para considerar a incerteza do sistema de medição nas cartas de controle tradicionais. Essa mudança altera as probabilidades de erro tipo I e tipo II e demonstram que, se a incerteza do sistema de medição não for devidamente considerada, processos podem ter sua estabilidade verificada por cartas de controle ineficientes. Os resultados do artigo apresentam que considerando as incertezas de medição, processos fora de controle passam a possuir uma probabilidade de estarem na verdade sob controle, e vice versa.

No artigo 3 foi realizado um estudo de simulação computacional para averiguar em quais situações a incerteza de medição afeta mais as cartas de controle e em quais ela pode ser negligenciada. Nesse artigo foram simulados 216 diferentes cenários de cartas de controle, com 30.000 replicações por cenário. O resultado demonstrou que para valores onde a variância do processo é muito próxima da variância da incerteza de medição, as respostas dos indicadores de desempenho da carta de controle são fortemente alterados, significando que a incerteza deve ser devidamente quantificada na carta de controle. Também foi demonstrado que aumentar o tamanho de amostra da carta, além de diminuir os erros do tipo II, reduz o efeito da incerteza sobre a carta.

Com o conjunto dos três artigos, considera-se que o objetivo principal e os secundários foram alcançados.

3.2.Sugestões para trabalhos futuros

Conforme foi descrito no decorrer do trabalho, o estudo e a pesquisa sobre incerteza de medição é comumente muito restrita à área de metrologia, a qual serve de apoio a diversas áreas da ciência. É nessa interface com as demais áreas que foram identificadas oportunidades para futuras pesquisas. Além de estudos complementares sobre cartas de controle utilizando incerteza de medição, como aplicação em processos reais de fabricação e estudos de caso e estudos de sensibilidade sobre a utilização de parâmetros da carta, um estudo sobre a consideração da incerteza de medição em estudos de capacidade de processo é uma pesquisa interessante. Um último estudo reunindo a influência da incerteza simultaneamente nas cartas de controle e no estudo de capacidade também é uma sugestão para pesquisas futuras.

4. REFERÊNCIAS

1. Acko, B. Calibration of electronic levels using a special sine bar. *Precision Engineering*, vol. 29, pp. 48-55, 2005.
2. Al-Othman, A.K. A fuzzy state estimator based on uncertain measurements. *Measurement*, vol. 42, pp. 628-637, 2009.
3. Angrisani, L.; D'Apuzzo, M.; Lo Moriello, R.S. Unscented Transform: A Powerful Tool for Measurement Uncertainty Evaluation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 737-743, 2006.
4. Angrisani, L.; Lo Moriello, R.S.; D'Apuzzo, M. New Proposal for Uncertainty Evaluation in Indirect Measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 1059-1064, 2006.
5. ANSI-NCSL Z540.3, Requirements for the Calibration of Measuring and Test Equipment, NCSL Publishing, 2006
6. Attivissimo, F.; Giaquinto, N.; Savino, M. Uncertainty evaluation in dithered ADC-based instruments. *Measurement*, vol. 41, pp. 364-370, 2008.
7. Augustyn, J. Some LMS-based algorithms for impedance measurements. *Measurement*, vol. 41, pp. 178-185, 2008.

8. B. D. Hall, Propagating Uncertainty in Instrumentation Systems. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 2376-2380, 2005.
9. Bachmanna, J.; Linares, J.M.; Sprauel, J. M.; Bourdet, P. Aide in decision-making: contribution to uncertainties in three-dimensional measurement. *Precision Engineering*, vol. 28, pp. 78–88, 2004.
10. Barini, E. M.; Tosello, G.; Chiffre, L. Uncertainty analysis of point-by-point sampling complex surfaces using touch probe CMMs DOE for complex surfaces verification with CMM. *Precision Engineering*, vol. 34, pp. 16–21, 2010.
11. Bastiaensen, C.; Deprez, W.; Symens, W.; Driesen, J. Parameter Sensitivity and Measurement Uncertainty Propagation in Torque-Estimation Algorithms for Induction Machines. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, pp. 2727-2732, 2008.
12. Batista, E.; Pinto, L.; Filipe, E.; Veen, A.M.H. Calibration of micropipettes: Test methods and uncertainty analysis. *Measurement*, vol. 40, pp. 338–342, 2007.
13. Bennet, K., Zion, H. Metrology Concepts: Understanding Test Uncertainty Ratio (TUR) [White Paper], 2005.
14. Bertocco, M.; Sona, A.; Zanchetta, P. An Improved Method for the Evaluation of Uncertainty of Channel Power Measurement With a Spectrum Analyzer. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, pp. 1165-1170, 2007.
15. Betta, G.; Liguori, C.; Pietrosanto, A. Uncertainty Evaluation in Algorithms With Conditional Statement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 969-976, 2004.
16. Bitou, Y. High-accuracy displacement metrology and control using a dual Fabry-Perot cavity with an optical frequency comb generator. *Precision Engineering*, vol. 33, pp. 187-193, 2009.
17. Bono, M. J.; Seugling, R. M.; Kroll, J. J.; Nederbragt, W. W. An uncertainty analysis of tool setting methods for a precision lathe with a B-axis rotary table. *Precision Engineering*, vol. 32, pp. 242-252, 2010.
18. Braudaway, D. W. Uncertainty Specification for Data Acquisition (DAQ) Devices. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 74-78, 2006.
19. Bringmann, B.; Knapp, W. Machine tool calibration: Geometric test uncertainty depends on machine tool performance. *Precision Engineering*, vol. 33, pp. 524-529, 2009.
20. Carbone, P.; Macii, D.; Petri, D. Measurement uncertainty and metrological confirmation in quality-oriented organizations, *Measurement*, v. 34, p. 263-271, 2003.
21. Cataldo, A.; Tarricone, L.; Vallone, M.; Attivissimo, F.; Trotta, A. Uncertainty Estimation in Simultaneous Measurements of Levels and Permittivities of Liquids Using TDR Technique. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, pp. 454-466, 2008.
22. Cataldo, A.; Vallone, M.; Tarricone, L.; Attivissimo, F. An evaluation of performance limits in continuous TDR monitoring of permittivity and levels of liquid materials. *Measurement*, vol. 41, pp. 719-730, 2008.
23. Chakrabarti, S.; Kyriakides, E.; Albu, M. Uncertainty in Power System State Variables Obtained Through Synchronized Measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 2452-2458, 2009.
24. Chen, H.; Wu, P.; Huang, J.; Chen, L. Uncertainty analysis for measurement of measurand. *Measurement*, vol. 43, pp. 1250–1254, 2010.
25. Chen, T. On reducing false alarms in multivariate statistical process control. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 88, p. 430–436, 2010.
26. Chen, X.; Wan, Y.; Koenders, L.; Schilling, M. Measurements of dimensional standards and etalons with feature size from tens of micrometres to millimetres by using sensor strengthened nanomeasuring machine. *Measurement*, vol. 43, pp. 1369–1375, 2010.
27. Choi, H.M.; Park, K.A.; Oh, Y.K.; Choi, Y.M. Improvement and uncertainty evaluation of mercury sealed piston prover using laser interferometer. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 20, pp. 200-205, 2009.
28. D'Antona, G. Measurement Data Processing Using Random Matrices: A Generalized Formula for the Propagation of Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 537-545, 2004.
29. D'Errico, G. E. Paradigms for uncertainty treatments: A comparative analysis with application to measurement. *Measurement*, vol. 42, pp. 494-500, 2009.
30. De Capua, C.; Romeo, E. A Smart THD Meter Performing an Original Uncertainty Evaluation Procedure. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, pp. 1257-1264, 2007.
31. De Capua, C.; Romeo, E. A t-Norm-Based Fuzzy Approach to the Estimation of Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 350-355, 2009.
32. De Cecco, M.; Pertile, M.; Baglivo, L.; Lunardelli, M.; Setti, F.; Tavernini, M. A Unified Framework for Uncertainty, Compatibility Analysis, and Data Fusion for Multi-Stereo 3-D Shape Estimation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 2834-2842, 2010.

33. De Santo, M.; Liguori, C.; Paolillo, A.; Pietrosanto, A. Standard uncertainty evaluation in image-based measurements. *Measurement*, vol. 36, pp. 347–358, 2004.
34. Désenfant, M.; Priel, M. Road map for measurement uncertainty evaluation. *Measurement*, vol. 39, pp. 841-848, 2006.
35. Dey, D.; Chatterjee, B.; Chakravorti, S.; Munshi, S. Importance of denoising in dielectric response measurements of transformer insulation: An uncertainty analysis based approach. *Measurement*, vol. 43, pp. 54–66, 2010.
36. Dull, R. B.; Tegarden, D. P. Using control charts to monitor financial reporting of public companies. *International Journal of Accounting Information Systems*, v. 5, p. 109– 127, 2004.
37. El-Haik, B. S. Axiomatic Quality: Integrating Axiomatic Design with Six-Sigma, Reliability, and Quality Engineering. Wiley, 2005.
38. Ellis, J.D.; Smith, S.T.; Hocken, R.J. Alignment uncertainties in ideal indentation styli. *Precision Engineering*, vol. 32, pp. 207–214, 2008.
39. Eppe, G.; De Pauw, E. Advances in quality control for dioxins monitoring and evaluation of measurement uncertainty from quality control data. *Journal of Chromatography B*, v. 877, p. 2380–2387, 2009.
40. Farooqui, S.A.; Doiron, T.; Sahay, C. Uncertainty analysis of cylindricity measurements using bootstrap method. *Measurement*, vol. 42, pp. 524-531, 2009.
41. Feng, C.J.; Saal, A.L.; Salsbury, J.G.; Ness, A.R.; Lin, G.C.S. “Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study. *Precision Engineering*, vol. 31, pp. 94–101, 2007.
42. Ferrero, A. Measuring electric power quality: Problems and perspectives. *Measurement*, vol. 41, pp. 121-129, 2008.
43. Ferrero, A.; Gamba, R.; Salicone, S. A Method Based on Random-Fuzzy Variables for Online Estimation of the Measurement Uncertainty of DSP-Based Instruments. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 1362-1369, 2004.
44. Ferrero, A.; Salicone, S. Fully Comprehensive Mathematical Approach to the Expression of Uncertainty in Measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 706-712, 2006.
45. Ferrero, A.; Salicone, S. The Construction of Random–Fuzzy Variables From the Available Relevant Metrological Information. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 365-374, 2009.
46. Ferrero, A.; Salicone, S. The Use of Random-Fuzzy Variables for the Implementation of Decision Rules in the Presence of Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* Vol. 54, 1482-1488, 2005.
47. Ferrero, A; Salicone, S. The Random-Fuzzy Variables: A New Approach to the Expression of Uncertainty in Measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 1370-1377, 2004.
48. Ferrero, A.; Salicone, S. A Comparative Analysis of the Statistical and Random-Fuzzy Approaches in the Expression of Uncertainty in Measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 1475-1481, 2005.
49. Fischer, A.; Pfister, T.; Czarske, J. Derivation and comparison of fundamental uncertainty limits for laser-two-focus velocimetry, laser Doppler anemometry and Doppler global velocimetry. *Measurement*, vol. 43, pp. 1556–1574, 2010.
50. Forbes, A.B. Measurement uncertainty and optimized conformance assessment. *Measurement*, vol. 39, pp. 808-814, 2006.
51. Forbes, A.B.; Hughes, B.; Sun, W. Comparison of measurements in co-ordinate metrology. *Measurement*, vol. 42, pp. 1473-1477, 2009.
52. Fotowicz, P. A method of approximation of the coverage factor in calibration. *Measurement*, vol. 35, pp. 251-256, 2004.
53. Furuichi, N.; Sato, H.; Terao, Y.; Takamoto, M. A new calibration facility for water flowrate at high Reynolds number. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 20, pp. 38-47, 2009.
54. Gadelmawla, E. S. Development of a microscopic computer aided measurement system and its uncertainty *Measurement*, vol. 41, pp. 1152–1161, 2008.
55. Galliana, F.; Capra, P.P.; Gasparotto, E. Metrological management of the high dc resistance scale at INRIM. *Measurement*, vol. 42, pp. 314-321, 2009.
56. Gauri, S. K.; Chakraborty, S. Recognition of control chart patterns using improved selection of features. *Computers & Industrial Engineering*, v. 56, p. 1577-1588, 2009.
57. Ghiani, E.; Locci, N.; Muscas, C. Auto-Evaluation of the Uncertainty in Virtual Instruments. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 672-677, 2004.
58. Gil, A.C. Como elaborar projetos de pesquisa, 3. ed. São Paulo: Atlas, 159p. 1991.
59. Giniotis, V.; Grattan, K.T.V.; Rybokas M.; Kulvietiene, R. Uncertainty and indeterminacy of measurement data. *Measurement*, vol. 36, pp. 195-202, 2004.

60. Giniotis, V.; Rybokas, M. Traceability enhancement in angle measurements. *Measurement*, vol. 42, pp. 1516-1521, 2009.
61. Godina, A.; Acko, B.; Druzovec, M. New approach to uncertainty evaluation in the calibration of gauge block comparators. *Measurement*, vol. 40, pp. 607-614, 2007.
62. Gülbay, M.; Kahraman, C. An alternative approach to fuzzy control charts: Direct fuzzy approach. *Information Sciences*, v. 177, p. 1463-1480, 2007.
63. Hack, P.S.; Caten, C.S. Effect of Measurement Uncertainty in Control Charts, in: XVIII International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Portugal (em avaliação), 2012a.
64. Hack, P.S.; Caten, C.S. Measurement Uncertainty: literature review and research trends, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (aguardando publicação), 2012b.
65. Hale, P.D.; Wang, C.M.J. Calculation of Pulse Parameters and Propagation of Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 639-648, 2009.
66. Hanslik, T.; Boelle, P. Y.; Flahault, A. The control chart: an epidemiological tool for public health monitoring. *Public Health*, v. 115, p. 277-281, 2001.
67. Haycocks, J.; Jackson, K. Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy. *Precision Engineering*, vol. 29, pp. 168-175, 2005.
68. Heping, P.; Xiangqian, J. Evaluation and management procedure of measurement uncertainty in new generation geometrical product specification (GPS). *Measurement*, vol. 42, pp. 653-660, 2009.
69. Hernandez, W. Optimal estimation of the relevant information coming from a rollover sensor placed in a car under performance tests. *Measurement*, vol. 41, pp. 20-31, 2008.
70. Hsu, K.; Chen, C.S. The effect of calibration equations on the uncertainty of UV-Vis spectrophotometric measurements. *Measurement*, vol. 49, pp. 1525-1531, 2010.
71. IEC-ISO, *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, 2008.
72. IEC-ISO, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – GUM*, ISO Publishing, 2008.
73. Iida, H.; Shimada, Y.; Komiyama, K. Noise Temperature and Uncertainty Evaluation of a Cryogenic Noise Source by a Sliding Short Method. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 1090-1096, 2009.
74. ISO. *International vocabulary of basic and general terms in metrology* (2nd ed.). Geneva, Switzerland: ISO Publishing, 1993.
75. Jokinen, H.; Ritala, R. Value of measurement information: A simple case study on grade change decisions. *Measurement*, vol. 43, pp. 122-134, 2010.
76. Jornada, D. Calculation of measurement uncertainty: a comparative study of GUM, Monte Carlo and numerical integration. In *Congresso da Qualidade em Metrologia*, São Paulo, Brasil, 2007.
77. Jornada, D. H.; Caten, C. S. Uma revisão sobre abordagens e métodos de cálculo de incerteza. V *Congresso Latino Americano de Metrologia*, Paraná, Brasil, 2007.
78. Jornada, D. Uso de Planilhas Eletrônicas para Implementação do Método de Monte Carlo para Estimativa de Incerteza de Medição. In *Encontro para a Qualidade de Laboratórios*, São Paulo, Brasil, 2005.
79. Jornada, D.; Caten, C.S. A review of approaches and methods for calculating uncertainty. In V *Congresso Latino Americano de Metrologia*, Paraná, Brasil, 2007.
80. Jornada, D.; Caten, C.S.; Pizzolato, M. Guidance documents on measurement uncertainty: an overview and critical analysis. *Journal of Measurement Science*, vol. 1, pp. 68-76, 2010.
81. Kobayoshi, M.; Chui, Q.S.H. The positioning influence of dial gauges on their calibration results. *Measurement*, vol. 38, pp. 67-76, 2005.
82. Korpelainen, V.; Seppa, J.; Lassila, A. Design and characterization of MIKES metrological atomic force microscope. *Precision Engineering*, vol. 34, pp. 735-744, 2010.
83. Kurokawa, S.; Hirose, M.; Komiyama, K. Measurement and Uncertainty Analysis of Free-Space Antenna Factors of a Log-Periodic Antenna Using Time-Domain Techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 1120-1125, 2009.
84. Lampasi, D.A. An alternative approach to measurement based on quantile functions. *Measurement*, vol. 41, pp. 994-1013, 2008.
85. Lampasi, D.A.; Di Nicola, F.; Podestà, L. Generalized Lambda Distribution for the Expression of Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 1281-1287, 2006.
86. Lazzari, A.; Iuculano, G. Evaluation of the uncertainty of an optical machine with a vision system for contact-less three-dimensional measurement. *Measurement*, vol. 36, pp. 215-231, 2004.
87. Lee, J.; Kim, J.; Park, J.; Kang, U. Uncertainty Evaluation of a Broadband Attenuation Standard. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 705-708, 2005.
88. Liebrich, T.; Bringmann, B.; Knapp, W. Calibration of a 3D-ball plate. *Precision Engineering*, vol. 33, pp. 1-6, 2009.

89. Link, A.; Täubner, A.; Wabinski, W.; Bruns, T.; Elster, C. Modelling accelerometers for transient signals using calibration measurements upon sinusoidal excitation. *Measurement*, vol. 40, pp. 928–935, 2007.
90. Lira, I.; Cargill, G. Uncertainty analysis of positional deviations of CNC machine tools. *Precision Engineering*, vol. 28, pp. 232–239, 2004.
91. Locci, N.; Muscas, C.; Ghiani, E. Evaluation of uncertainty in measurements based on digitized data. *Measurement*, vol. 32, pp. 265–272, 2002.
92. Locci, N.; Muscas, C.; Sulis, S. Modeling ADC Nonlinearity in Monte Carlo Procedures for Uncertainty Estimation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 1671–1676, 2006.
93. Lorefice, S. Traceability and uncertainty analysis in volume measurements. *Measurement*, vol. 42, pp. 1510–1515, 2009.
94. Lovett, T. E.; Ponci, F.; Monti, A. A Polynomial Chaos Approach to Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 729–736, 2006.
95. Lu, T.; Chen, C. Uncertainty evaluation of humidity sensors calibrated by saturated salt solutions. *Measurement*, vol. 40, pp. 591–599, 2007.
96. Mao, J.; Cao, Y.; Yang, J. Implementation uncertainty evaluation of cylindricity errors based on geometrical product specification (GPS). *Measurement*, vol. 42, pp. 742–747, 2009.
97. Margavio, T. M.; Conerly, M. D.; Woodall, W. H.; Drake, L. G. Alarm rates for quality control charts. *Statistics and Probability Letters*, v. 24, p. 219–224, 1995.
98. Mari, L. The problem of foundations of measurement. *Measurement*, vol. 38, pp. 259–266, 2005.
99. Mariscotti, A. Measurement Procedures and Uncertainty Evaluation for Electromagnetic Radiated Emissions From Large-Power Electrical Machinery. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, pp. 2452–2463, 2007.
100. Martens, H. Evaluation of uncertainty in measurements – problems and tools. *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 38, pp. 185–206, 2002.
101. Mauris, G.; Lasserre, V.; Foulloy, L. A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement. *Measurement*, vol. 29, pp. 165–177, 2001.
102. Mayor, T.S.; Pinto, A.M.F.R.; Campos, J.B.L.M. An image analysis technique for the study of gas–liquid slug flow along vertical pipes—associated uncertainty. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 18, pp. 139–147, 2007.
103. Mekid, S.; Vaja, D. Propagation of uncertainty: Expressions of second and third order uncertainty with third and fourth moments. *Measurement*, vol. 41, pp. 600–609, 2008.
104. Melo, C.F.; Araújo, R.L.; Ardjomand, L.M.; Quoirin, N.S.R.; Ikeda, M.; Costa, A.A. Calibration of low frequency magnetic field meters using a Helmholtz coil. *Measurement*, vol. 42, pp. 1330–1334, 2009.
105. Merkac, T. P.; Acko, B. Comparising measuring methods of pitch diameter of thread gauges and analysis of influences on the measurement results. *Measurement*, vol. 43, pp. 421–425, 2010.
106. Miao, J.J.; Yeh, C.F.; Hu, C.C.; Chou, J.H. On measurement uncertainty of a vortex flowmeter. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 16, pp. 397–404, 2005.
107. Misumi, I.; Gonda, S.; Kurosawa, T.; Azuma, Y.; Fujimoto, T.; Kojima, I.; Sakurai, T.; Ohmi, T.; Takamasu, K. Reliability of parameters of associated base straight line in step height samples: Uncertainty evaluation in step height measurements using nanometrological AFM. *Precision Engineering*, vol. 30, pp. 13–22, 2006.
108. Montgomery, D. C. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.
109. Monti, A.; Ponci, F. Uncertainty Evaluation Under Dynamic Conditions Using Polynomial Chaos Theory. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 2825–2833, 2010.
110. Novotny, M.; Sedlacek, M. Measurement of active power by time domain digital signal processing. *Measurement*, vol. 42, pp. 1139–1152, 2009.
111. Oliveira, S.P.; Rocha, A.C.; Filho, J.T.; Couto, P.R.G. Uncertainty of measurement by Monte-Carlo simulation and metrological reliability in the evaluation of electric variables of PEMFC and SOFC fuel cells. *Measurement*, vol. 42, pp. 1497–1501, 2009.
112. Oota, A.; Usuda, T.; Nozato, H. Correction and evaluation of the effect due to parasitic motion on primary accelerometer calibration. *Measurement*, vol. 43, pp. 719–725, 2010.
113. Patel, K.; Negi, P.S.; Kothari, P.C. Complex S-parameter measurement and its uncertainty evaluation on a vector network analyzer. *Measurement*, vol. 42, pp. 145–149, 2009.
114. Pavese, F. On the degree of objectivity of uncertainty evaluation in metrology and testing. *Measurement*, vol. 42, pp. 1297–1303, 2009.
115. Pendrill, L. Optimised measurement uncertainty and decision-making when sampling by variables or bay attribute. *Measurement*, v. 39, p. 829–840, 2006.

116. Peretto, L.; Sasdelli, R.; Tinarelli, R. On Uncertainty in Wavelet-Based Signal Analysis. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 1593-1599, 2005a.
117. Peretto, L.; Sasdelli, R.; Tinarelli, R. Uncertainty Propagation in the Discrete-Time Wavelet Transform. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 2474-2480, 2005b.
118. Pertile, M.; De Cecco, M.; Baglivo, L. Uncertainty Evaluation in Two-Dimensional Indirect Measurement by Evidence and Probability Theories. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 2816-2824, 2010.
119. Pertile, M.; De Cecco, M.; Baglivo, L. Uncertainty Evaluation in Two-Dimensional Indirect Measurement by Evidence and Probability Theories. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 2816-2824, 2010.
120. Pogliano, U. Evaluation of the Uncertainties in the Measurement of Distorted Power by Means of the IEN Sampling System. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 620-624, 2006.
121. Pogliano, U. Traceability of electrical quantities obtained by sampling. *Measurement*, vol. 42, pp. 1439-1442, 2009.
122. Reznik, L.; Dabke, K.P. Measurement models: applications of intelligent methods. *Measurement*, vol. 35, pp. 47-58, 2004.
123. Roberts, M. L.; Stevens, J. W.; Luck, R. Evaluation of parameter effects in estimating non-linear uncertainty propagation. *Measurement*, vol. 40, pp. 15-20, 2007.
124. Rosa, J.J.G.; Moreno, A.; Lloret, I.; Pallare's, V.; Liñán, M. Characterisation of frequency instability and frequency offset using instruments with incomplete data sheets. *Measurement*, vol. 39, pp. 664-673, 2006.
125. Rossi, G.B.; Crenna, F. A probabilistic approach to measurement-based decisions. *Measurement*, vol. 39, pp. 101-119, 2006.
126. Salicone, S.; Tinarelli, R. An Experimental Comparison in the Uncertainty Estimation Affecting Wavelet-Based Signal Analysis by Means of the IEC-ISO Guide and the Random-Fuzzy Approaches. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 691-699, 2006.
127. Santana, M.A.A.; Santos, F.S.N.; Sousa, V.C.; Chui, Q.S.H. Variability sources of DC voltage-current measurements in the study of TiO₂-based varistors. *Measurement*, vol. 41, pp. 1105-1112, 2008.
128. Shahanaghi, K.; Nakhjiri, P. A new optimized uncertainty evaluation applied to the Monte-Carlo simulation in platinum resistance thermometer calibration. *Measurement*, vol. 43, pp. 901-911, 2010.
129. Shimada, T.; Mahadeva, D.V.; Baker, R.C. Further investigation into a water flow rig related to calibration. *Flow Meas. and Instrum.*, vol. 21, pp. 462-475, 2010.
130. Silva, E.L.; Menezes, E.M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação, UFSC/PPGEP/LED, Florianópolis-SC, 2000.
131. Sklyar, R. Suppression of low-frequency interferences in the induction sensor of magnetic field. *Measurement*, vol. 39, pp. 634-642, 2006.
132. Smith, A.H.C.; Monti, A.; Ponci, F. Uncertainty and Worst-Case Analysis in Electrical Measurements Using Polynomial Chaos Theory. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 58-67, 2009.
133. Smołalski, G. Measurability conditions of the signal parameter for a given prior knowledge. *Measurement*, vol. 42, pp. 583-603, 2009.
134. Souza, F.S. Índices de Capacidade para Gráficos de Controle baseados em Modelos de Regressão. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
135. Stratakis, D. I.; Miaoudakis, A. I.; Zacharopoulos, V. G.; Xenos, T. D. On the Spatial Averaging of Multiple Narrowband Electromagnetic Field Measurements: Methods and Uncertainty Estimation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, pp. 1520-1536, 2010.
136. Stratakis, D.I.; Miaoudakis, A.I.; Xenos, T.D.; Zacharopoulos, V.G. Overall Uncertainty Estimation in Multiple Narrow-Band In Situ Electromagnetic Field Measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 2767-2779, 2009.
137. Tiemann, I.; Spaeth, C.; Wallner, G.; Metz, G.; Israel, W.; Yamaryo, Y.; Shimomura, T.; Kubo, T.; Wakasa, T.; Morosawa, T.; Köning, R.; Flügge, J.; Bosse, H. An international length comparison using vacuum comparators and a photoelectric incremental encoder as transfer standard. *Precision Engineering*, vol. 32, pp. 1-6, 2008.
138. Vabson, V.; Kübarsepp, T.; Vendt, R.; Noorma, M. Traceability of mass measurements in Estonia. *Measurement*, vol. 43, pp. 1127-1133, 2010.
139. Valcarcel, M., Cardenas, S. Metrology of the binary yes/no response in environmental analysis, European Conference Environment, health, safety, a challenge for measurement, Paris, June, 2001.

140. Vargas, V. C.; Lopes, L. F.; Souza, A. M. Comparative study of the performance of the CuSum and EWMA control charts. *Computers & Industrial Engineering*, v. 46, p 707–724, 2004.
141. Velychko, O.; Gordiyenko, T. The use of metrological terms and SI units in environmental guides and international standards. *Measurement*, vol. 40, pp. 202-212, 2007.
142. Vilbaste, M.; Slavin, G.; Saks, O.; Pihl, V.; Leito, I. Can coverage factor 2 be interpreted as an equivalent to 95% coverage level in uncertainty estimation? Two case studies. *Measurement*, vol. 43, pp. 392-399, 2010.
143. Vommi, V. B., Seetala, M. S. N. A new approach to robust economic design of control charts. *Applied Soft Computing*, v. 7, p. 211-228, 2007.
144. Wang, C.M.; Iyer, H. K. A generalized confidence interval for a measurand in the presence of type-A and type-B uncertainties. *Measurement*, vol. 39, pp. 856–863, 2006.
145. Wegener, G.; Andrae, J. Measurement uncertainty of torque measurements with rotating torque transducers in power test stands. *Measurement*, vol. 40, pp. 803–810, 2007.
146. Willink, R.; Lira, I. A united interpretation of different uncertainty intervals. *Measurement*, vol. 38, pp. 61–66, 2005.
147. Wilrich, P. Rounding of measurement values or derived values. *Measurement*, vol. 37, pp. 21–30, 2005.
148. Wirandi, J.; Chen, J.; Kulesza, W. J. An Adaptive Quality Assessment System—Aspect of Human Factor and Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, pp. 68-75, 2009.
149. Wirandi, J.; Lauber, A. Uncertainty and traceable calibration- how modern measurement concepts improve product quality in process industry. *Measurement*, vol. 39, pp. 612-620, 2006.
150. Wirandi, J.; Lauber, A.; Kulesza, W. J. Problem of Applying Modern Uncertainty Concepts to the Measurement of Instrument-Specific Parameters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, pp. 700-705, 2006.
151. Wong, W, What TUR do you really need? Putting statistical theory into practice, in: Proc. Measurement Science Conference, Anaheim, CA, USA, January 28-29, 1999.
152. Xintao, X.; Xiaoyang, C.; Yongzhen, Z.; Zhongyu, W. Grey bootstrap method of evaluation of uncertainty in dynamic measurement. *Measurement*, vol. 41, pp. 687–696, 2008.
153. Yhland, K.; Stenarson, J. Measurement Uncertainty in Power Splitter Effective Source Match. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, pp. 669-672, 2007.
154. Zarandi, M.H. F., Alaeddini, A., Turksen, I. B. A hybrid fuzzy adaptive sampling – Run rules for Shewhart control charts, *Information Sciences*, v. 178, p. 1152-1170, 2008.
155. Zhang, S.; Wu, Z. Design of control charts with supplementary runs rules. *Computer and Industrial Engineering*, v. 49, p. 76-97, 2005.