UM PANORAMA SOBRE AS TÉCNICAS DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO MULTIVARIADO

Marcelo Gonçalves Trentin
Universidade Federal Tecnológica do Paraná – Campus Pato Branco
Via do conhecimento – km 1 – Pato Branco - PR
marcelo@utfpr.edu.br

Liane Werner
Departamento de Estatística – Instituto de Matemática – UFRGS
e Laboratório de Otimização de Produtos e Processos (LOPP) - PPGEP – EE - UFRGS
Av. Osvaldo Aranha, 99, Sala 508, Centro, Porto Alegre –RS
liane@producao.ufrgs.br

Resumo:
Nas últimas décadas a qualidade tem sido fortemente abordada. A indiscutível busca que as empresas realizam pela qualidade está sempre ligada à sobrevivência junto ao mercado que disputam ou pretendem ingressar. A evolução dos sistemas produtivos, produção em larga escala, tem proporcionado a evolução das formas de controle e monitoração, visando menores variabilidades e detecção mais precisa e rápida de falhas. Este estudo visa obter informações de como o Controle Estatístico de Processo, mais especificamente o multivariado, esta sendo empregado. Para realizar o levantamento das informações foram pesquisadas diversas fontes bibliográficas, sendo que estas foram classificadas segundo a aplicação dominante, ferramentas que estão sendo utilizadas, cronologia e origem dos dados utilizados nos trabalhos. Como resultado obteve-se um panorama de como se encontra a aplicação do Controle Estatístico de Processo multivariado.

Palavras-chave: qualidade, CEP, controle estatístico de processo multivariado.

AN OVERVIEW ON THE APPLICATION OF STATISTICAL PROCESS CONTROL MULTIVARIATE

Abstract:
Over the last decades, quality has been strongly approached. The unquestionable search that companies perform for quality is always linked to survival along the market they dispute or intend to enter. The evolution of productive systems, large scale production has provided the evolution of forms of control and monitoring, aiming at smaller variants and more precise and faster detection of failures. This study aims at obtaining information on how the Statistical Control Process, more specifically the multivariate, is being applied. To perform the collection of information several bibliographical sources were surveyed, and these were classified according to the dominant application, tools that have been used, chronology and origin of the data applied. As a result, a general view of the state of the application of multivariate Statistical Control Process was obtained.

Key words: quality, SPC, multivariate statistical process control.

1. Introdução

O mercado consumidor tem exigido das empresas um atendimento cada vez mais flexível, personalizado, rápido. Assim, as empresas precisam se adequar às necessidades dos clientes, sendo a satisfação do consumidor um dos objetivos mais importantes. Com esse intuito, tem-se aumentado a atenção dispensada à Qualidade. A qualidade de produtos e serviços tem se tornado um importante fator de decisão na maioria dos negócios. Independente de quem seja o consumidor, quanto este estiver fazendo decisões de compra, estará propenso a considerar a qualidade com a mesma importância que o custo e o prazo de entrega, conseqüentemente a melhoria da qualidade tem se tornado uma preocupação importante para as corporações (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

A evolução dos métodos produtivos para atingir os altos níveis de qualidade exigidos, deixa de ser um diferencial competitivo e passa a ser condição obrigatória. Com produções em larga escala, o Controle da Qualidade é buscado em seus mais altos graus de aplicação e está sendo utilizado em um número crescente de instituições. A velocidade que a produção seriada está atingindo tem exigido sistemas de monitoração e análise cada vez mais rigorosos com alto grau de sensibilidade.

Dentre as formas de monitoração e controle dos sistemas produtivos, o Controle Estatístico de Processo (CEP) tem se destacado. Um processo sob controle deve ser capaz de operar com pouca variabilidade em torno de um alvo, dimensão nominal. O controle estatístico em tempo real (*on-line*) proporciona encontrar e manter esta estabilidade. Os gráficos de controle são as principais ferramentas do CEP.

Os gráficos de Shewhart, como geralmente são denominados, e suas variações (como por exemplo, os gráficos CUSUM, EWMA), foram e ainda são muito empregados nas indústrias. Seus resultados têm auxiliado no controle da variabilidade nos mais diversos processos. Suas formas de implementação e interpretação fizeram com que fossem largamente disseminados.

Com a evolução dos processos produtivos, melhoria da tecnologia de máquinas e sistemas, os procedimentos de controle industriais também necessitaram avançar. O emprego de sensores, leitores, e outras formas de automação das máquinas, possibilitaram um avanço que não só aumentou a velocidade e volume de produção, como também permitiram ajustes e regulagens precisos, diminuindo a variabilidade da fabricação, bem como a obtenção dos dados de diversas variáveis, as quais puderam ser relacionadas entre as de entrada e as de saída do processo. Assim, o controle em tempo real de múltiplas variáveis se tornou uma grande alternativa. Ora, os gráficos de Shewhart são univariados, monitoram e controlam as variáveis de forma individual, com os avanços citados, para um mesmo processo, deseja-se monitorar e controlar diversas variáveis possibilitando melhores índices de produção (MASON e YOUNG, 1998).

Em muitas situações é necessário o monitoramento simultâneo ou controle de duas ou mais características de qualidade relacionadas. Para Montgomery (2004) o Controle Estatístico de Processo Multivariado, nos dias atuais, tem assumido elevada importância, principalmente com as facilidades advindas dos procedimentos de inspeção automática, os quais possibilitam medir e monitorar diversos parâmetros a cada unidade ou lote de produção.

Frente a este contexto, pretende-se classificar as técnicas propostas para o estabelecimento do Controle Estatístico de Processo Multivariado. Para obtenção das informações necessárias para tal classificação, diversos bancos de dados da literatura foram consultados. Os estudos encontrados foram classificados segundo a tendência e finalidade, aplicação dominante, ferramentas que estão sendo utilizadas, cronologia e origem dos dados utilizados nos trabalhos.

2. Procedimentos Metodológicos

A fim de realizar este estudo, o primeiro passo consiste em definir os critérios de classificação dos trabalhos. Estes foram estabelecidos com base nas abordagens de Palm et al (1997), Montgomery (2004) e Maccarthy e Wasusri (2002). Após, procedeu-se com o levantamento de trabalhos e publicações relacionados com o Controle Estatístico de Processo

Multivariado. As buscas consistiram das bases de dados de periódicos nacionais e internacionais, reconhecidos na área.

Tomando-se como base Palm et al (1997), em um primeiro momento os estudos foram classificados de acordo com suas tendências em relação às abordagens, ou seja, quanto à finalidade do uso da técnica adotada, critérios apresentados na Tabela 1. Esta classificação visa identificar as finalidades e as tendências que estão sendo dadas ao Controle Estatístico de Processo Multivariado. Nesta primeira designação, os estudos serão separados em cinco linhas: emprego básico para atualidade mesmo em outras áreas que não a industrial, de revisão, processos complexos com novas abordagens ou modificações metodológicas, integração com outras áreas do conhecimento ou técnicas, e comparação de desempenho com outros métodos. Com esta informação poderá ser visto para quais finalidades estão sendo empregados os conhecimentos do controle estatístico de processo multivariado.

Tabela 1 – Critério de Classificação 1: Tendência / Finalidade

Classificação	Finalidade
Grupo 1	Abordagem Tradicional: aplicações básicas em processos produtivos, ou outras áreas, visando à melhoria da qualidade.
Grupo 2	Abordagem de revisão: trabalhos com finalidade específica de revisão e promoção do controle estatístico multivariado.
Grupo 3	Abordagem aplicada – processos complexos e novas abordagens: trabalhos avançados, dados *on-line*, grande quantidade de informações, sistemas de monitoramento avançados, proposição de modificações em outros métodos.
Grupo 4	Abordagem de integração com outras áreas do conhecimento ou técnicas: trabalhos que buscam integrar o controle estatístico de processo multivariado com outras áreas ou ferramentas ou aplicações.
Grupo 5	Comparação com outros métodos: trabalhos que realizaram comparações de desempenho entre o controle estatístico de processo e outras metodologias.

Fonte: Adaptado de Palm (1997)

O segundo critério de classificação se deu conforme a método utilizado para os gráficos de controle, tradicionais ou baseados em métodos de projeção, seguindo a seqüência apresentada em Montgomery (2004). A classificação foi realizada de acordo com o emprego dos mesmos pelos autores nos estudos publicados, identificados separadamente na Tabela 2. Com esta fase poderão ser percebidos quais métodos tem sido mais usados.

Tabela 2 – Critério de Classificação 2: Método empregado para os gráficos de controle

Método	Classificação segundo o Tipo de Gráfico de Controle
Gráfico de Controle Tradicional	T^2 Hotelling – média de processos
	MCUSUM - soma acumulada
	MEWMA - Média móvel exponencialmente ponderada
Gráfico de Controle Baseada em Métodos de Projeção	Análise de Componentes Principais Multivariadas – ACP
	Mínimos Quadrados Parciais – MQP

Fonte: Adaptado de Montgomery (2004)

Como terceiro critério, a classificação respeitou a aplicação dominante do trabalho. Estes puderam ser designados segundo quatro grupos: engenharia e processos, ambiental, saúde e outras aplicações (ver Tabela 3). Este critério tomou como base a metodologia de Maccarthy e Wasusri (2002). Com esta informação poderá ser visto para quais aplicações os estudos estão se dirigindo.

Tabela 3 – Critério de Classificação 3: Aplicação dominante do trabalho

Classificação	Aplicação
1	Engenharia e processos: abordagens que visam melhorias, aplicação e desenvolvimento de procedimentos, técnicas ligadas à engenharia e processos.
2	Ambiental: abordagens de aplicações ligadas ao contexto ambiental e sua preservação.
3	Saúde: Trabalhos relacionados à saúde, diagnóstico e prevenção.
4	Outras aplicações: demais aplicações não enquadradas nas anteriores.

Fonte: Adaptado de Maccarthy e Wasusri (2002)

No quarto critério, buscou-se o tipo da fonte dos dados utilizados nas publicações como demonstrações e comprovações. Os dados foram classificados em reais e provenientes de simulações numéricas. Estão representados na Tabela 4. Poderá ser verificada qual é a origem dos dados empregados nos trabalhos.

Tabela 4 – Critério de Classificação 4: Origem dos dados

Classificação	Origem
1	Dados reais de processo ou sistema: estudos que utilizaram base de dados provenientes de sistemas e processos reais obtidos junto a empresas, setores e linhas de produção ou outras fontes.
2	Simulação numérica: trabalhos que utilizaram dados para exemplificar, demonstrar e comprovar suas abordagens se fazendo valer de dados de simulação numérica ou outras fontes não reais.

Em adição a esses critérios, utilizou-se uma quinta classificação, a de seqüência cronológica dos trabalhos, oficialmente declaradas nas suas referências. Os trabalhos foram estratificados obtendo-se assim uma visão cronológica das publicações dos trabalhos analisados.

Em situações onde a publicação possuísse mais de uma característica, permitindo ser classificada em mais de uma opção dentro do mesmo critério, esta foi realizada segundo a predominante, exceto no segundo critério. Os trabalhos foram classificados apenas nos critérios pertinentes a sua abordagem e abrangência, ou seja, não houve a obrigatoriedade de serem classificados em todos os critérios.

3. Resultados

Foram analisadas sessenta referências, sendo que destas, duas foram livros (MONTGOMERY e RUNGER, 2003; MONTGOMERY, 2004) e uma publicação (PALM et al, 1997), as quais foram utilizadas somente para a elaboração dos critérios de classificação. Efetivamente foram classificados cinqüenta e sete trabalhos provenientes de periódicos.

O levantamento consistiu da busca de publicações de 1996 até 2008 em base de dados aos quais os autores tinham acesso, não sendo, portanto, todo o universo de publicações disponíveis no período do estudo. Dois trabalhos datados de 1995, devido a sua importância e serem referenciados por diversos artigos atuais, excepcionalmente foram incluídos na classificação compondo também a base de dados.

Em um primeiro momento foram coletadas mais de cem publicações, sendo que após uma análise criteriosa e individual, foram reduzidos para os já citados cinqüenta e sete. As eliminações ocorreram devido às abordagens utilizadas nos estudos não poderem ser classificadas em nenhum dos critérios pré-estabelecidos ou mesmo por serem muito antigas.

Através da classificação realizada percebeu-se que 47% das fontes pesquisadas empregaram gráficos de controle multivariados em aplicações consideradas básicas. Somente 7% tiveram com finalidade a realização de revisão sobre o tema ou alguma forma de incentivo ao uso das técnicas multivariadas. Novas abordagens, emprego em sistemas complexos ou mesmo novas técnicas ou modificações de métodos apareceram em 21% dos estudos. A integração com outras áreas ou ferramentas apareceu em 16% dos itens classificados. Foi realizada comparação de desempenho entre algum método de controle estatístico multivariado e outra metodologia em 9%.

Com relação aos tipos de gráficos de controle utilizados, 70% das publicações utilizaram algum gráfico baseado em Métodos de Projeção contra 55% dos Tradicionais. De forma individual, destacam-se os de Análise de Componentes Principais (49%) seguido do tradicional baseado na estatística T^2 de Hotelling aparecendo em 32% dos trabalhos. Os demais gráficos utilizados seguiram a ordem: Mínimos Quadrados Parciais em 21%, MEWMA em 16%, MCUSUM em 7%. Lembra-se que, neste critério, uma publicação pôde ser classificada em mais de uma opção em função de se poder utilizar mais de um tipo de gráfico em uma pesquisa.

Na aplicação dominante, dos materiais classificados, a utilização para o Controle da Engenharia e de Processos foi verificada em 82% dos casos. Outras aplicações que não as de Processo, Ambientais ou ligadas à área de Saúde, foram relacionadas em 12% dos itens disponíveis. Aplicações Dominantes ligadas ao contexto ambiental e sua preservação ocorreram em 4%. Como menos empregada foi, a classificação da Saúde, diagnóstico e prevenção (2%).

Do total de trabalhos, 61% utilizaram dados reais para demonstrações e verificações. A utilização de dados obtidos via simulação numérica apareceram em 28%. Pode-se perceber que a maior fonte é advinda de sistemas reais visando maior aproximação possível com a realidade.

Observa-se na Figura 1, que a maior parte dos trabalhos classificados é datada de 2008 (16% do total de trabalhos). Outros dois períodos tiveram grande representação na classificação, o ano de foi 2007 responsável por 12%, e o de 2003 com 11% dos estudos.

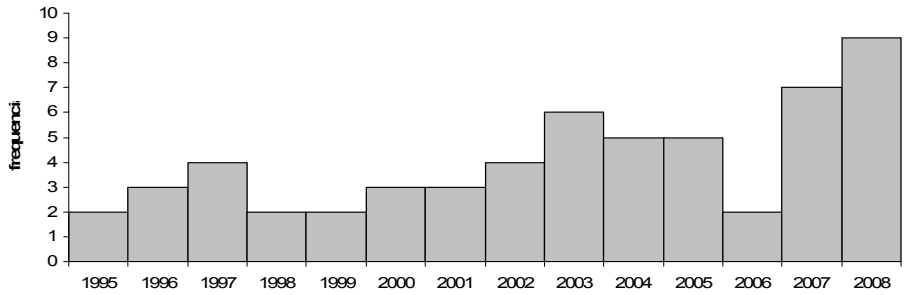

Figura 1 - Cronologia dos Trabalhos

Conforme a figura 2 se observa que pelo levantamento realizado, a simulação de dados está sendo mais empregada nos últimos anos. Nos trabalhos levantados, a simulação só foi utilizada a partir de 1999, com um destaque para o início de 2008.

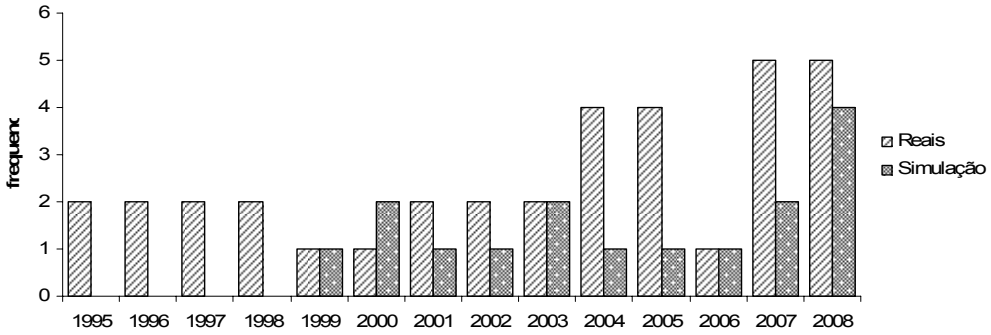

Figura 2 – Origem de dados em Relação à Cronologia

A aplicação dominante é da Engenharia e Processos, como pode ser verificada na Figura 3. Aplicações ligadas à parte Ambiental e Saúde tiveram pouca participação no decorrer dos anos, sendo que apareceram em um período relativamente recente. Aplicações do Controle Estatístico Multivariado em outras áreas tiveram uma participação inconstante, mas em proporção não desprezíveis, indicando que ainda existem muitas possibilidades de exploração em outras áreas de conhecimento.

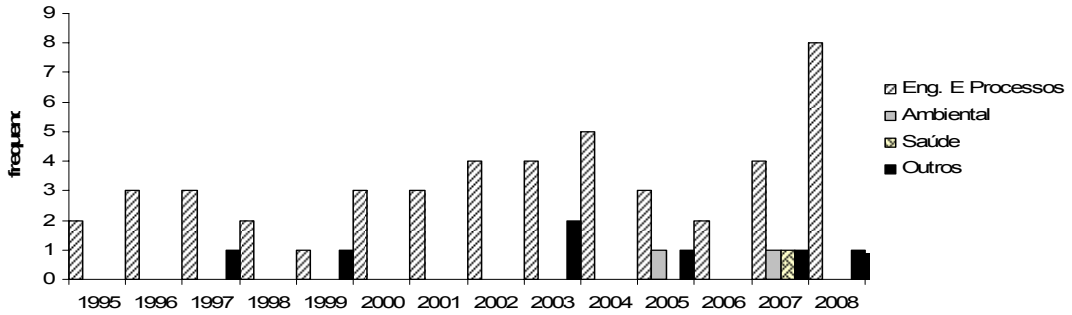

Figura 3 - Aplicação Dominante em relação à cronologia

A figura 4 apresenta a utilização dos gráficos de controle, sendo que os de Análise de Componentes Principais (ACP) mantiveram uma participação constante no período analisado. Os baseados na estatística T^2 de Hotelling apresentaram variação, porém sua utilização cresceu de forma considerável nos últimos anos do levantamento realizado. Os dos Mínimos Quadrados Parciais (MQP) mostrou-se presente de forma expressiva.

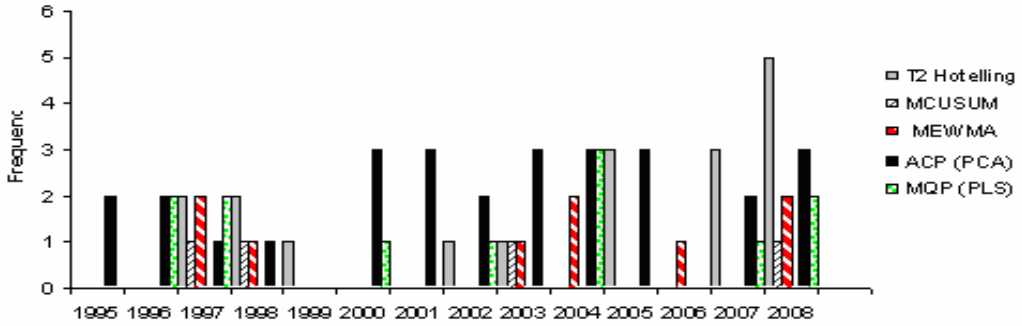

Figura 4 – Tipo de Gráfico de Controle em relação à cronologia

As aplicações básicas, ferramentas foram utilizadas ao longo de todos os anos do levantamento. Pela Figura 5, percebe-se que o emprego em processos mais complexos ou novas abordagens foram encontrados em um número crescente de trabalhos, com destaque para o ano de 2008. Os trabalhos de revisão foram em situações pontuais e os de integração ou mesmo de comparação com outras metodologias foram encontrados em publicações da segunda metade do período estudado.

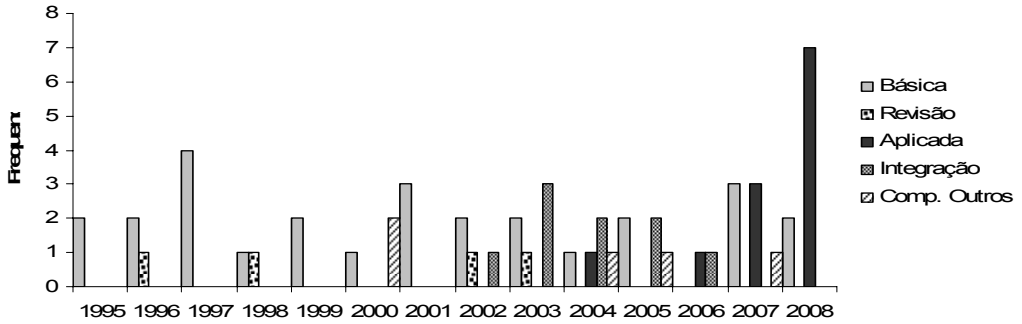

Figura 5 – Tendência/Aplicação em relação à cronologia

Para a Aplicação Dominante em Engenharia e Processos, que consiste em 82% do total estudado, verificou-se quais gráficos de controle foram os mais utilizados. Pode ser constatado na Figura 6, que a Análise de Componentes Principais (ACP) foi utilizada em 47% das classificações desta aplicação dominante, sendo o tipo de gráfico de controle mais utilizado. Na seqüência, T^2 de Hotelling ficou em segundo com 28 % em terceiro o dos Mínimos Quadrados Parciais (MQP) com 23%, MEWMA com 17% e MCUSUM com 6%.

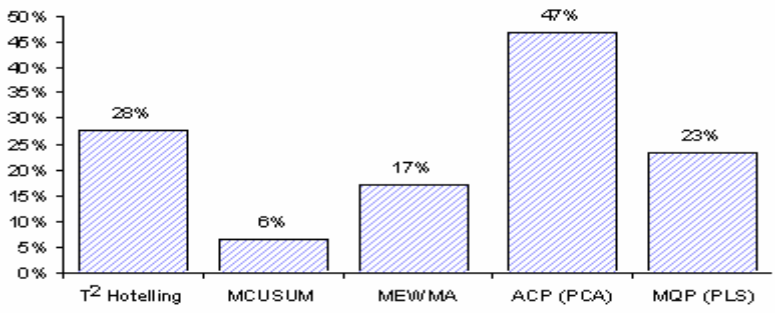

Figura 6 – Aplicação Dominante: Engenharia e Processos x Tipos de gráficos de controle utilizados

A distribuição dos Tipos de Gráficos de Controle em relação às Tendências/Finalidades das publicações disponibilizadas pode ser vista na Figura 7. Nota-se que as maiores proporções de todos os Tipos de Gráficos de Controle destinam-se a abordagem básica. Exemplificando, 25% das aplicações dos Gráficos de Controle de Análise de Componentes Principais, encontrados no material referenciado, foram utilizados em abordagens Básicas, o mesmo acontecendo com 16% dos T^2 de Hotelling, 14% dos Baseados nos Mínimos Quadrados Parciais, 7% dos MEWMA, 4% dos MCUSUM.

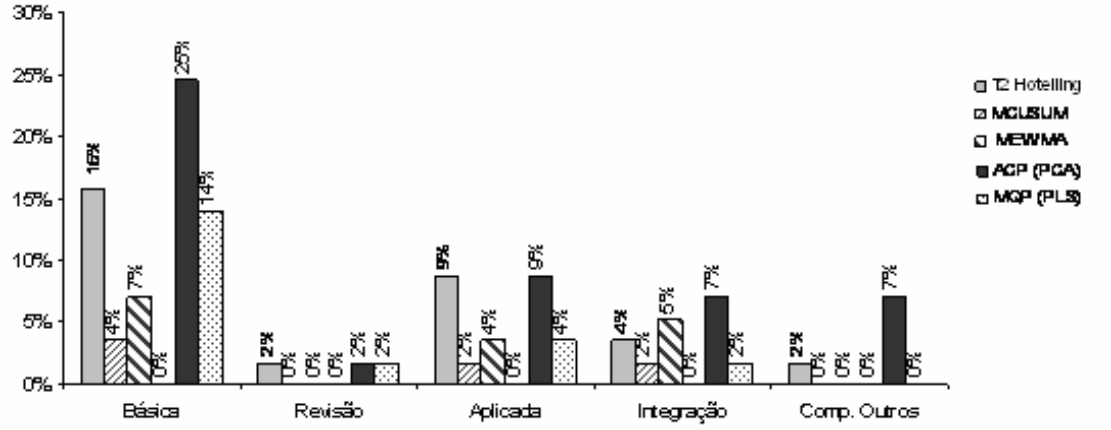

Figura 7 - Tipos de gráficos de controle utilizados X Tendência/Finalidade

Para a Finalidade/Tendência que mais se destacou entre os trabalhos classificados, a de abordagens Básicas (47%), foi elaborada a Figura 8 a qual relaciona as proporções que cada tipo de gráfico de controle obteve nesta opção específica. Verificou-se que 52% dos estudos desta classificação utilizaram técnicas de Análise de Componentes Principais (ACP), 33% T2 de Hotelling, 30% os de Mínimos Quadrados Parciais (PLS). Os menores índices de participação ficaram com os gráficos MEWMA (15%), MCUSUM (7%).

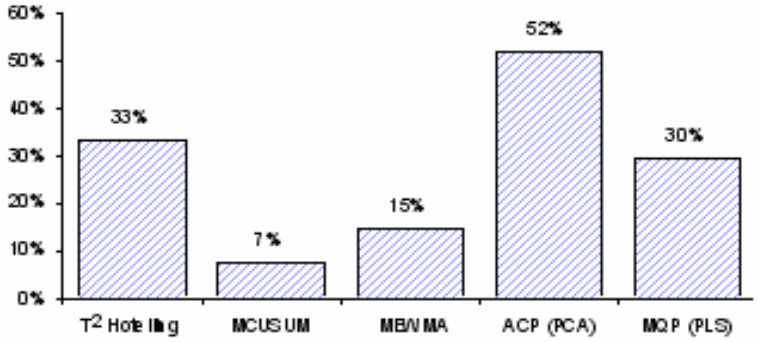

Figura 8 – Tendência/Finalidade Básica X Tipos de gráficos de controle utilizados

4.Descrição dos estudos e a relação com os critérios de classificação

Tomando-se por base os resultados apresentados anteriormente, pôde-se constatar que com relação às tendências e finalidades dos trabalhos, o emprego em situações básicas dos métodos multivariados de controle estatístico de processo ainda tem sido bastante usuais. Em condições onde o domínio do método é corriqueiro para o controle em processos ou em outras áreas do conhecimento, pode este ferramental ser encontrado como forma de monitoração e controle. Em Chen et al (2008) é introduzido o controle estatístico multivariado na indústria de LCD. Pode ser visto em Rosa et al. (2007) uma aplicação de métodos para monitorar a produção de fármacos, sendo considerado pelos autores eficaz para o controle de qualidade. Uma aplicação dos gráficos de controle multivariados T^2 de Hotelling para processos estatísticos econômicos é divulgada e Rahim (2005). Nijhuis et al. (1999) controlaram a análise cromatográfica de óleos vegetais utilizando gráfico de controle multivariado. Bons resultados com as técnicas de controle multivariadas tradicionais e baseadas em análise de componentes principais em um processo de eletrólise foi obtido por Wikstro et al. (1998).

Através das publicações com a finalidade específica de revisão como: Stuart et al. (1996); Maccarthy e Wasusri (2002); Mason e Young (1998) e mesmo pelas revisões bibliográficas dos trabalhos, a importância, aplicação, vantagens, limitações e principais problemas quanto ao uso do CEP multivariado são amplamente difundidas e conhecidas. Inclusive em Venkatasubramanian et al (2003) é realizada uma revisão sobre os métodos de diagnóstico de falhas que são baseados em conhecimentos de processos históricos. Dentre estes estão os quantitativos de onde se destacaram a análise de componentes principais multivariadas e o método dos mínimos quadrados parciais.

Novas abordagens têm surgido a exemplo de Alghazzawi e Lennox (2008); Hu e Yuan (2008); Doan e Srinivasan (2008) e Aguado et al. (2007). Pomerantsev et al. (2006) propõem a otimização de processo e não somente o seu controle e monitoração. Alguns trabalhos se preocuparam com novas formas de identificação de quais variáveis são responsáveis por instabilidades detectadas (LI et al. (2008); GONZÁLEZ e SÁNCHEZ (2008); YU e XI (2007); CHEN e HSIEH (2007)).

Pela quantidade de trabalhos recentes (ver Figura 1), inclusive em processos complexos com novas abordagens e modificações, verificou-se e tornou-se claro que o controle estatístico de processo multivariado é um assunto ainda em pauta no meio acadêmico e em prática em sistemas reais. Alguns destaques: Alghazzawi e Lennox (2008); Hu e Yuan, (2008); Doan e Srinivasan (2008); Aguado et al (2007) e Colosimo, Semeraro e Pacella (2008).

A integração dos métodos de controle estatístico de processo multivariado com os de outras áreas do conhecimento tem aumentado, alguns exemplos são os trabalhos de Tokatli et al. (2005); Souza et al. (2004); Kullaa (2003) e Moro (2003). Esta integração visa aumentar a aplicabilidade das ferramentas na solução de problemas e encontrar ferramental para melhorar a sensibilidade e rapidez de identificação de possíveis falhas. Souza et al. (2004a); Yang e Sheu (2006) integraram a Análise de Componentes Principais com o Controle de Engenharia (CEnP). A integração com o princípio de sistemas baseados em conhecimentos é defendida por Skoglund et al. (2005); Leung e Romagnoli (2002); Ündey et al.(2003).

Um menor número de publicações foi encontrado com a finalidade de comparação da eficiência e desempenho de monitoração e controle de processos multivariados através de gráficos de controle com outras metodologias. Pode-se citar Albazzaz et al. (2005) que realizaram comparações com coordenadas paralelas, Treasure et al. (2004) com modelo linear dinâmico para processos contínuos. Cho et al. (2007) propõem um método on-line baseado em índices de influencia variável para diagnosticar processos descontínuos.

Percebe-se, através da observação da Figura 2, que os estudos que foram realizados com dados obtidos de simulação numérica, têm crescido e, exemplo disto são os estudos de: Wang e Tsung (2008); Souza e Rigão (2005); Louwerse e Smilde (2000) e Martin et al. (1999). As simulações crescem em função da necessidade de se testar novos cenários com as abordagens cada vez mais complexas. Porém, dados reais continuam sendo a principal forma de testar,

comprovar e demonstrar as novas abordagens, teorias e desempenhos, sendo que também aparenta indícios de crescimento.

Aplicação dominante da maioria das publicações ainda é a de Engenharia e Processos. Conforme o comportamento sugerido na Figura 3, esta aplicação dominante vem crescendo ainda mais nos últimos anos. Como a principal aplicação do controle estatístico é mesmo a engenharia e processo, a sua larga vantagem não causa espanto. Sua crescente utilização se deve ao fato de cada vez mais estarem surgindo novas abordagens e variações. A classificação designada como outros têm assumido valores mais expressivos com o passar do tempo, podendo até se admitir que os métodos dos gráficos de controle multivariados estão gradativamente sendo utilizados para novas áreas do conhecimento. Os trabalhos de Wu e Makis (2008); Yang e Rahim (2005) e Nijhuis et al. (1997) são alguns dos trabalhos que corroboram com esta idéia.

Pela Figura 4, nota-se que os gráficos de controle baseados na estatística T^2 de Hotelling continuam sendo muito utilizados, principalmente pela sua simplicidade, destaque para os últimos quatro anos. Os gráficos de Análise de Componentes Principais têm mantido seu uso estável com o passar do tempo, até mesmo porque em processos mais complexos favorece a análise. Os gráficos MCUSUM e PLS oscilaram sua utilização no decorrer dos anos. Os gráficos de controle tradicionais ainda continuam tendo grande participação nas aplicações, solução de problemas de processos e consequentemente nas publicações. Os baseados na estatística T^2 de Hotelling têm ainda uma grande aceitação devido a sua maior facilidade de aplicação. Os baseados em métodos de projeção como os de Análise de Componentes Principais e os dos Mínimos Quadrados Parciais são também bastante empregados, grande destaque para ACP com crescente utilização, tais como os trabalhos de: Kano et al. (2000); Wang e Kruger (2003); Kourti et al. (1996); Lopes e Menezes (2004); Kourti e Macgregor (1995) e Yoon e Macgregor (2001). Alguns dos trabalhos classificados como Tradicionais foram: Chen et al (2008); Rosa et al (2007); Monteiro et al. (2002); Mason et al.(1997) e Werner (1997). Com métodos de projeção: Jiji et al (2003); Reinikainen e Hoskuldsson (2007); Zhu et al (2007) Macgregor e Kourtl (1995) e Martin et al. (1996).

A classificação segundo a tendência do material e relacionada com o ano da publicação, Figura 5, permitiu concluir que as finalidades básicas oscilaram durante os períodos, porém continuam sendo empregadas. Para novas abordagens, modificações e processos complexos, a figura sugere um grande crescimento em um curto espaço de tempo. A integração com outras áreas e comparação de desempenho como outros métodos tem sido abordados recentemente. As aplicações básicas sempre existirão, até mesmo porque novas áreas do conhecimento e novos processos a utilizarão num primeiro momento. O controle estatístico multivariado ainda está buscando: novas formas de controle e monitoração, novas abordagens para utilização nos mais distintos tipos de processo e formas de controle. Isso promove o crescimento das novas abordagens e aplicações conforme indicado na figura referenciada.

Na Figura 6, observa-se que para a aplicação dominante Engenharia e Processos, se pode citar dentre os diversos trabalhos os seguintes: Albert e Kinley (2001); Kano et al. (2001); Simoglou (2000) e Singh e Gilbreath (2002). Percebeu-se que o tipo de gráfico de controle mais utilizado para esta aplicação foi o gráfico de Análise de Componentes Principais. Com menores proporções segui-se a utilização de T^2 de Hotelling e MQP. Os gráficos MEWMA e CUSUM foram menos utilizados, porém ainda apresentam proporções representativas, abordando estes gráficos encontram-se os estudos de Aparisi e Díaz (2004); Prabhu e Runger (1997). A maior utilização da Análise de Componentes Principais se deve ao fato do crescente número de variáveis a serem monitoradas, e este método, por ser um método redutor de dimensões, possui vantagens sobre os demais neste quesito.

Com relação aos tipos de gráficos de controle e as finalidades para as quais foram utilizados, o destaque ficou com a Básica. Todos os tipos de gráficos possuíram maior proporção para classificação conforme Figura 7. Acredita-se que isto ocorreu por esta aplicação ser a mais difundidas e também a que já está sendo empregada há mais tempo. Na segunda posição em crescente expansão estão as novas abordagens e modificações.

A Figura 8 que relaciona a finalidade Básica, maior destaque de sua classificação,

com os tipos de gráficos de controle, apresenta uma aparência muito semelhante à Figura 6. Este comportamento comprova a coerência das classificações realizadas uma vez que tendo como maior finalidade a Básica ou a maior aplicação predominante a Engenharia e Processo, as ferramentas utilizadas nos trabalhos do período investigado estão em proporções bem próximas.

5. Conclusões

Os avanços nos processos industriais; globalização; aumento de consumo e da exigência do mercado fizeram com que as ferramentas de controle estatístico multivariado fossem de sua importância para os dias atuais.

O controle estatístico de processo multivariado passou a ter um papel essencial nas organizações devido aos avanços tecnológico nos processos, evolução de máquinas e equipamentos e posicionamento exigente do mercado consumidor. A partir das informações, obtidas neste estudo, se pôde visualizar como as empresas, pesquisadores e acadêmicos estão utilizando estas metodologias.

Uma vez que este estudo visava classificar vários estudos para se obter informações de como o controle estatístico de processo multivariado está sendo empregado, entende-se que, com os resultados obtidos, o objetivo proposto foi alcançado. A coleta de material de forma abrangente proporcionou acesso a informações importantes. A classificação das publicações segundo a tendência e finalidade, aplicação dominante, ferramentas utilizadas, cronologia e origem dos dados utilizados nos trabalhos, possibilitou a geração do panorama pretendido.

Os trabalhos tendo como finalidade situações básicas representaram a maior parte dos estudos, bem como, a aplicação dominante do controle estatístico multivariado de processo voltado para Engenharia e Processos. O emprego de dados reais é muito utilizado, sobressaindo-se aos simulados. Os gráficos de controle multivariados baseados em métodos de projeção sinalizaram maior utilização que os tradicionais, com destaque para Análise de Componentes Principais. Como as técnicas avançaram muito, sendo que recentemente novas abordagens e modificações foram propostas, seria interessante a realização de um estudo detalhado e específico dos métodos de projeção e suas novas abordagens.

Referências

AGUADO, D.; FERRER, A. ; FERRER, J.; SECO, A. Multivariate SPC of a sequencing batch reactor for wastewater treatment. **Chemom. Intell. Lab. Syst**., v. 85, p. 82–93, 2007.

ALBAZZAZ, H.; WANG, X. Z.; MARHOON, F.. Multidimensional visualisation for process historical data analysis: a comparative study with multivariate statistical processc control. **Journal of Process Control**, v. 15, p. 285–294, 2005.

ALBERT, S.; KINLEY, R. D. Multivariate statistical monitoring of batch processes: an industrial case study of fermentation supervision. **Trends in Biotechnology**, Vol.19, No.2, fevereiro, 2001.

ALGHAZZAWI, A.; LENNOX. B. Monitoring a complex refining process using multivariate statistics. **Control Engineering Practice**, v..16, p. 294–307, 2008.

APARISI, F.; DÍAZ, J. C. G. Optimization of univariate and multivariate exponentially weighted moving-average control charts using genetic algorithms. **Computers & Operations Research**. v. 31, p. 1437–1454, 2004.

CHEN, Y. K.; HSIEH, K. L. Hotelling's T2 charts with variable sample size and control limit. **European Journal of Operational Research**, v. 182, p. 1251–1262, 2007.

CHEN, S.; YANG, C.; LIN, W.; YEH, T. Performance evaluation for introducing statistical process control to the liquid crystal display industry**. Int. J. Prod. Econ**., v.111, p. 80–92 ,2008.

CHO, H. W.; KIM, K. J.; JEONG, M. K. Determination of influential factors and diagnostics using multivariate statistical relationships between variables and faults. **Expert Systems with Applications**, doi:10.1016/j.eswa.2007.06.020, 2007.

COLOSIMO, B. M.; SEMERARO, Q.; PACELLA, M. Statistical process control for geometric specifications: on the monitoring of roundness profiles. **J. Qual. Technol.**, v. 40, nr. 1, pg. 1-18, jan 2008.

DOAN, X. T.; SRINIVASAN, R.; Online monitoring of multi-phase batch processes using phase-based multivariate statistical process control, **Computers and Chemical Engineering**, v. 32, p. 230–243, 2008.

GONZÁLEZ, I.; SÁNCHEZ, I. Principal Alarms in Multivariate Statistical Process Control. **Journal of**

Quality Technology, v. 40, nr1, p.19-30, Jan 2008.

HU, K.; YUAN, J.. Statistical monitoring of fed-batch process using dynamic multiway neighborhood preserving embedding . **Chemom. Intell. Lab. Syst.,** v. 90, p. 195–203, 2008.

JIJI, R. D.; HAMMOND, M.H.; WILLIAMS, F. W.; PEHRSSON, S. L.. Multivariate statistical process control for continuous monitoring of networked early warning fire detection (EWFD) systems, **Sensors and Actuators**, v. B 93, p. 107–116, 2003.

KANO, M.; HASEBE, S.; HASHIMOTO, I.; OHNO, H. A new multivariate statistical process monitoring method using principal component analysis. . **Comput. Chem. Eng.,**, v. 25, p. 1103–1113, 2001.

KANO, M.; NAGAO, K.; HASEBE, S.; HASHIMOTO, I.; OHNO, H.; STRAUSS, R.; BAKSHI, B. Comparison of statistical process monitoring methods: application to the Eastman challenge problem **Comput. Chem. Eng**., v. 24, pg. 175-181, 2000.

KOURTI, T.; LEE, J ; MACGREGOR, J. F. Experiences with industrial applications of projection methods for multivariate statistical process control. **Comput. Chem. Eng**., v. 20. Suppl., p. 745-750, 1996.

KOURTI, T., MACGREGOR, J. F. Process analysis, monitoring and diagnosis, using multivariate projection methods. **Chemom. Intell. Lab. Syst,** v. 28, p. 3-21, 1995.

KULLAA, J. Damage detection of the z24 bridge using control charts. **Mech. Syst. Sig. Process**., v. 17(1), p. 163–170, 2003.

LEUNG, D.; ROMAGNOLI, J. An integration mechanism for multivariate knowledge-based fault diagnosis. Journal of Process Control, v. 12, p.15-26, 2002.

LI, J.; JIN, J.; SHI, J. Causation-Based T2 Decomposition for Multivariate Process Monitoring and Diagnosis. **journal of quality technology**, v. 40, nr. 1, p. 46-58, 2008.

LOPES, J.A.; MENEZES, J.C. Multivariate monitoring of fermentation processes with non-linear modelling methods**. Analytica Chimica Acta**, v.515, p. 101–108, 2004.

LOUWERSE, D. J.; SMILDE, A. K. Multivariate statistical process control of batch based on three-way models. **Chemical Engineering Science**, v. 55, p. 1225-1235 , 2000.

MACCARTHY, B. L.; WASUSRI, T. A review of non-standard applications of statistical process control (SPC) charts. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.19, nr. 3, 295-320, 2002.

MACGREGOR, J.F.; KOURTL, T. Statistical process control of multivariate processes. **Control Eng. Practice**, vol. 3, no. 3, pp. 403-414, 1995.

MARTIN, E. B.; MORRIS, A. J.; KIPARISSIDES, C.. Manufacturing Performance Enhancement Through Multivariate Statistical Process Control. **Annual Reviews in Control**, v. 23, p. 35-44, 1999.

MARTIN, E. B.; MORRIS, A. J.; ZHANG, J. Process performance monitoring using multivariate statistical process control. **IEE Proc.-Control Theory Appl.**, v. 143, nr. 2, 1996.

MASON, R. L.; CHAMP, C. W.; TRACY, N. D.; WIERDA, S. J.; YOUNG, J. C. Assessment of Multivariate Process Control Techniques. **Journal of Quality Technology**, v. 29, p. 140-143, 1997.

MASON, R. L; YOUNG, J. C. Why multivariate statistical process control?, **Quality Progress**; 31, 12; ABI/INFORM Global, pg. 88-93, Dec. 1998.

MONTEIRO, D. A.; FERREIRA, D. F.; CARDOSO, M. G.; MENDONÇA, M. C. A. Controle estatístico de qualidade multivariado aplicado ao processo de produção. **Revista Brasileira de Agroinformática**, v. 4, n.2, p.116-129, 2002.

MONTGOMERY,D.C.**Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MORO, L. F. L. Process technology in the petroleum refining industry current situation and future trends. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 1303-1305 , 2003.

NIJHUIS, A.; JONG, S.;. VANDEGINSTE, B.G.M. Multivariate statistical process control in chromatography. **Chemom. Intell. Lab. Syst.**. V. 38, p. 51-62, 1997.

NIJHUIS, A. ; JONG, V; VANDEGINSTE, B. G .M. The application of multivariate quality control in gás chromatography. **Chemom. Intell. Lab. Syst**. v. 47, p. 107–125 , 1999.

PALM, A. C.; RODRIGUEZ, R. N.; SPIRING, F.A.; WHEELER, D. J. Some Perspectives and Challenges for Control Chart Methods, **Journal of Quality Technology.** v. 29, p.122-7, Ap 1997.

POMERANTSEV, A.; RODIONOVA, O.; HÖSKULDSSON, A. Process control and optimization with simple interval calculation method. **Chemom. Intell. Lab. Syst.**, v. 81, p. 165–179, 2006.

PRABHU, S. S.; RUNGER, G. C. Designing a Multivariate EWMA Control Chart. **Journal of Quality**

Technology, v. 29, p. 8-15, 1997.

REINIKAINEN, S. P. ; HOSKULDSSON, A. Multivariate statistical analysis of a multi-step industrial processes. **Analytica Chimica Acta**, v. 595, p. 248–256, 2007.

ROSA, A. L.; ROCHA, W. F. C.; MARTINS, J. A.; POPPI, R. J. Cartas de Controle Multivariada baseada no Sinal Analítico Líquido. In.: **30ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química,** Águas de Lindóia –SP, 2007.

SIMOGLOU, A.; MARTIN, E. B.; MORRIS, A. J. Multivariate statistical process control of an industrial fuidised-bed reactor. **Control Engineering Practice**,v. 8, p. 893-909, 2000.

SINGH, R.; GILBREATH, G. A real-time information system for multivariate statistical process control. **Int. J. Production Economics**, v. 75, p. 161–172, 2002.

SKOGLUND, A.; BRUNDIN, A.; MANDENIUS, C. Applying process monitoring with multivariate analysis through a knowledge-based systems approach to a paperboard machine. **Computers in Industry**,v. 56, p. 472–478, 2005.

SOUZA, A. M.; RIGÃO, M. H Identificação de variáveis fora de controle em processos produtivos multivariados. **Revista Produção**, v. 15, n. 1, p. 074-086, Jan./Abr. 2005.

SOUZA, A.M.; SAMOHYL, R. W.; MALAVÉ, C. O. Aplicação de um modelo paramétrico multivariado para o controle da temperatura de fornos de túnel. **Revista Produção,** v. 14, n. 2, 2004a.

SOUZA, A. M.; SAMOHYL, R. W.; MALAVÉ, C. O. Multivariate feed back control: an application in a productive process. **Computers & Industrial Engineering**, v. 46, p. 837–850, 2004b.

STUART, M.; MULLINS, E.; DREW, E.. Statistical quality control and improvement. **European Journal of Operational Research**, v. 88, p. 203-214, 1996.

TOKATLI, F.; CINAR, A; SCHLESSER, J. E. HACCP with multivariate process monitoring and fault diagnosis techniques: application to a food pasteurization process. **Food Control**, v. 16, p. 411–422, 2005.

TREASURE, R. J.; KRUGER, U.; COOPER, J. E. Dynamic multivariate statistical process control using subspace identification. **Journal of Process Control**, v. 14, p. 279–292, 2004.

ÜNDEY, C.; TATARA, E ; ÇINAR, A. Real-time batch process supervision by integrated knowledge-based systems and multivariate statistical methods**. Eng. Appl. Artif. Intell**., v. 16, p. 555–566, 2003.

VENKATASUBRAMANIAN, V.; RENGASWAMY, R.; KAVURI, S. N.; YIN, K. A review of process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 327-346, 2003.

WANG, X.; KRUGER, U.; Lennox, B. Recursive partial least quares algorithms for monitoring complex industrial processes. **Control Engineering Practice**, v. 11, p. 613–632, 2003.

WANG, K.; TSUNG, F. An Adaptive T2 Chart for Monitoring Dynamic Systems. **Journal of Quality Technology**, v. 40, nr.1, pg. 109-123, Jan. 2008.

WERNER, L. . Controle Estatístico do Processo: Abordagem Multivariada para Medidas Individuais. In: **XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Gramado - RS. 1997.

WIKSTRO, C.; ALBANO, C.; ERIKSSON, L.; FRIDÉN, H.; JOHANSSON, E.; NORDAHL, A.; RANNAR, S.; SANDBERG, WOLD, M. N. K., WOLD . S. Multivariate process and quality monitoring applied to na electrolysis process Part I. Process supervision with multivariate control charts. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 42, p. 221–231, 1998.

WU, J.; MAKIS, V. Economic and economic-statistical design of a chi-square chart for CBM. **European Journal of Operational Research**, v. 188, p. 516–529, 2008.

YANG, S.F.; RAHIM, M.A. Economic statistical process control for multivariate quality characteristics under Weibull shock model. **International Journal of Production Economics**, v. 98, p. 215–226, 2005.

YANG, L.; SHEU, S.H. Integrating multivariate engineering process control and multivariate statistical process control**. Int. J. Adv. Manuf. Technol**., v.29, p.129–136, 2006.

YOON, S.; MACGREGOR, J. F. Fault diagnosis with multivariate statistical models part I: using steady state fault signatures. **Journal of Process Control**, v. 11, p.387-400, 2001.

YU, J.; XI, L. A neural network ensemble-based model for on-line monitoring and diagnosis of out-of-control signals in multivariate manufacturing processes. **Expert Systems with Applications**, doi:10.1016/j.eswa.2007.10.003, 2007.

ZHU, L.; BRERETON, R. G.; THOMPSON, D. R.; HOPKINS, P. L.; ESCOTT, R. E.A. On-line HPLC combined with multivariate statistical process control for the monitoring of reactions. **Analytica Chimica Acta**, v. 584, p. 370–378, 2007.