



Laura França Marques Barbosa

**Contribuições para o Controle Estatístico de
Processos com Múltiplos Canais.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Eugenio Kahn Epprecht

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2008

Laura França Marques Barbosa

**Contribuições para o Controle Estatístico de
Processos com Múltiplos Canais.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Eugenio Kahn Epprecht

Orientador

Departamento de Engenharia de Produção - PUC-Rio

Dra. Linda Lee Ho

Departamento de Engenharia de Produção - Poli / USP

Dra. Mônica Barros

Departamento de Engenharia de Produção - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador (a) Setorial do Centro Técnico Científico – PUC - Rio

Rio de Janeiro, 28 de fevereiro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Laura França Marques Barbosa

Graduou-se em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2005. Obteve o Título de Especialista em Métodos Estatísticos Computacionais pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2006.

Ficha Catalográfica

Barbosa, Laura França Marques

Contribuições para o Controle Estatístico de Processos com Múltiplos Canais./ Laura França Marques Barbosa ; orientador: Eugenio Kahn Epprecht. – 2008.

124 f. : il. (col.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui Bibliografia.

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Controle Estatístico de Processos. 3. Processos Multicanal. 4. Gráfico de Controle de Grupos. 5. Medidas de Desempenho. I. Epprecht, Eugênio Kahn. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III Título.

CDD 658.5

Aos meus pais, Maurício e Malu,
ao meu irmão Villy e à minha avó
Belkiss.

Agradecimentos

Ao orientador Eugênio Kahn Epprecht, pela confiança, dedicação, disponibilidade, e sugestões. Pela contribuição em minha formação e pela oportunidade de uma excepcional orientação.

A todos os funcionários do DEI e à CAPES, pelo suporte financeiro.

À professora Jane Azevedo da Silva pelo incentivo à iniciação ao curso de Mestrado.

Ao Léo, pela incansável ajuda, pelo companheirismo e, principalmente, pela paciência.

A todos os meus tios que sempre participaram de todas as minhas conquistas e, um agradecimento especial à tia Teres e ao Tio Simas, fundamentais para a concretização do Mestrado.

Ao meu irmão e aos meus pais, pelo amor, carinho. Pela formação que me proporcionaram e pelo apoio em todas as minhas decisões. Pela confiança, pelo otimismo que sempre me passaram. Por tudo que vocês representam pra mim.

A todos os meus amigos pela força de sempre.

Resumo

Barbosa, Laura França Marques; Epprecht, Eugênio Kahn (Orientador). **Contribuições para o Controle Estatístico de Processos com Múltiplos Canais**. Rio, 2008. 124 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Processos com diversos canais em paralelo são muito comuns na indústria; um exemplo são operações de enchimento, encontradas nas indústrias farmacêutica, alimentícia, cosmética e de bebidas. O método clássico para o controle estatístico desse tipo de processos, as *group charts* (Boyd, 1950), é pouco eficiente, por não considerar que uma parcela da variação nestes processos é comum a todos os canais. Mortell e Runger, em 1995, propuseram um esquema alternativo que leva este fato em conta. No ano seguinte, Runger, Alt e Montgomery propuseram um outro esquema. A presente dissertação propõe um terceiro esquema para o controle de tais processos. O seu modelo formal detalhado, as expressões para cálculo dos limites de controle e a análise de seu desempenho são contribuições originais. As probabilidades de sinal e o número esperado de amostras até a sinalização de alterações na média da parcela individual de um dos canais foram obtidas analiticamente e/ou por simulação, e utilizadas para comparação de desempenho com o esquema de Mortell e Runger. Os resultados demonstram a superioridade do esquema proposto para a detecção de variações superiores a um desvio-padrão na média da parcela individual de um canal do processo. Para detectar variações menores, nenhum dos dois esquemas é eficiente. O esquema de Runger *et al.* (1996) tem, para o caso de alteração em um canal apenas, desempenho igual ou inferior a ambos. Assim, o esquema aqui proposto revela-se o mais eficiente de todos. Uma série de extensões e questões em aberto para pesquisa futura são indicadas.

Palavras-chave

Controle Estatístico de Processos; Processos Multicanal; Gráfico de Controle de Grupos; Medidas de Desempenho.

Abstract

Barbosa, Laura França Marques; Epprecht, Eugênio Kahn (Advisor). **Contributions to Statistical Control of Multiple Stream Processes**. Rio, 2008. 124 p. M.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Processes with several streams in parallel are very common in industry. Filling operations, such as the ones found in the pharmaceutical, cosmetics, or food and beverage industries are a typical example. The classical scheme for the statistical control of multiple-stream processes (MSP) is the group chart (Boyd, 1950). Its efficiency is impaired by its underlying model of the process not considering that part of the variation in MSP is common to all streams. In 1995, Mortell and Runger (M&R) proposed an alternative scheme which takes this fact into account. In the next year, Runger, Alt and Montgomery proposed another scheme. This dissertation proposes a third scheme for statistical control of MSP. The detailed mathematical model, the expressions for establishing the control limits, and the performance analysis here are original contributions. The probabilities of a signal and average run lengths in the case of shifts in the mean of one individual stream were obtained either analytically or by simulation and compared with the ones of M&R's scheme. The results show the superiority of the proposed scheme for signaling shifts greater or equal to one standard deviation. For smaller shifts, neither scheme can be said to be really efficient. As to the scheme proposed by Runger et al. (1996), it is in some cases slower and in some cases just as fast as M&R's, so the proposed scheme is the fastest of all. A number of extensions and open issues are indicated for future research.

Keywords

Multiple Stream Processes; Statistical Process Control; Group Charts; Performance Analysis.

Sumário

1 Introdução	13
1.1. Estrutura do Trabalho	17
2 Técnicas de CEP para Processos Multicanal.....	19
2.1. <i>Group Charts</i>	19
2.2. Métodos Alternativos às <i>Group Charts</i>	24
2.2.1. <i>Método de Mortell e Runger</i>	24
2.2.2. <i>Runger, Alt e Montgomery</i>	28
2.2.3. <i>Colbeck</i>	29
2.2.4. <i>Passos</i>	35
3 Esquema Proposto.....	39
3.1. Modelo do Processo.....	39
3.2. Decomposição das Observações	40
3.3. Tipo de Causa Especial Considerada	43
3.4. Medidas de Desempenho	44
3.5. Gráficos de Controle para o Nível-Base	45
3.6. Gráficos de Controle para as Diferenças em Relação ao Nível-Base	49
3.6.1. <i>Considerações Iniciais</i>	49
3.6.2. <i>Distribuições em Controle das Diferenças Calculadas</i>	50
3.6.3. <i>Limites de Controle</i>	52
3.7. Medidas de Desempenho sob Presença de Causa Especial.....	57
4 Análise de Desempenho.....	63
4.1. Definição dos Eventos de Interesse	63
4.2. Obtenção de Medidas de Desempenho	65
4.3. Resultados	71
4.4. Precisão dos Resultados da Simulação	88
4.5. Desempenho em Relação ao Esquema de Runger <i>et al.</i> (1996).....	89
5 Conclusões	91
6 Referências	95
7 Apêndice A – Detalhamento do Método de Fatores de Correção.....	97
8 Apêndice B – Covariância entre e_{ti} · e e_{t-}.....	100

9 Apêndice C – Correlação ρ_{ij} entre duas diferenças calculadas quaisquer $\hat{\epsilon}_{ti}$ e $\hat{\epsilon}_{tj}$. (para $i \neq j$).	102
10 Apêndice D – Gerador de Números Aleatórios Independentes e Normalmente Distribuídos	104
11 Apêndice E – Programa e Sub-Rotinas Utilizadas na Simulação	107
12 Apêndice F – Comparação dos NMA_1's para os Gráficos das Diferenças em Relação ao Nível Base e R_t de M&R.	114
13 Apêndice G – Comparação das Probabilidades de Sinal verdadeiro, porém “incorreto”, para o Esquema de M&R ($P(B \cap \bar{R})$) e pelo Esquema Proposto ($P(O \cup B) \cap \bar{A}$)	119

Lista de Figuras

Figura 4.1 – Representação Esquemática para o Modelo de Simulação Utilizado.	71
Figura 4.2 - Comportamento do NMA_1 para o Gráfico R_t e das Diferenças ($NMA_0 = 100$).....	75
Figura 4.3– Comportamento do NMA_1 para o Gráfico R_t e das Diferenças ($NMA_0 = 200$).....	76
Figura 4.4– Comportamento do NMA_1 para o Gráfico R_t e das Diferenças ($NMA_0 = 370,38$).....	77
Figura 10.1 – Geração de Números Aleatórios do Excel.....	105
Figura 10.2 – Geração de Números Aleatórios: Sequência de Halton (base 2).....	105

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Comprimento de Corrida significativo (número de valores máximos ou mínimos consecutivos) para um único canal de um PMC.....	20
Tabela 2.2 – NMA_0 para Processos sob Controle com Critério de Corridas em PMC.....	23
Tabela 2.3 – Limites de Controle para os Quatro Métodos.....	32
Tabela 2.4 – Comparação dos Limites de Controle obtidos por Simulação (Método 4) e Limites de Controle exatos (obtido por 2.10).....	35
Tabela 3.1– Erro da Expressão (3.22b) no cálculo do NMA_0 global e valores de k que levam aos valores nominais de NMA_0 's para processo com três canais ($s = 3$).	55
Tabela 4.1 – Justificativa para o cálculo dos NMA_1 's associados aos eventos (probabilidades) de interesse.	66
Tabela 4.2 – Metodologia de Cálculo para as Probabilidades Consideradas.....	68
Tabela 4.3- NMA_1 's para os Gráficos da Diferença em Relação ao Nível-Base e Gráfico R_i de M&R com uma observação por canal ($n = 1$).....	73
Tabela 4.4 – Diferença percentual entre os NMA_1 's para Gráficos das Diferenças e R_i de M&R.....	80
Tabela 4.5– Probabilidade de algum canal não afetado sinalizar sem que o próprio canal afetado sinalize	83
Tabela 4.6 – Probabilidade de qualquer canal sinalizar ou nível-base sinalizar, sem que o canal afetado sinalize.....	85
Tabela 4.7 – Probabilidade de o nível-base sinalizar sem que o Gráfico R_i sinalize.....	87
Tabela 4.8– Limites para NMA 's simulados.....	89
Tabela 4.9 – NMA_1 's para os Esquemas de Mortell e Runger (1995) e de Runger <i>et al</i> (1996) para alterações em apenas um dos canais do processo e $NMA_0 = 200$	89
Tabela 7.1 – Detalhamento para o cálculo correto do LSC_s^4	99
Tabela 9.1 – Cálculo da Correlação entre \hat{e}_{ii} . e \hat{e}_{ij} . para processos com diferentes números de canais.	103

Tabela 10.1 – Comparação das Funções de Inversão da Normal Padrão.....	106
Tabela 12.1- Comparação dos NMA_1 's para os Gráficos da Diferença em Relação ao Nível-Base e Gráfico de R_t de M&R (n = 2)	115
Tabela 12.2 - Comparação dos NMA_1 's para os Gráficos da Diferença em Relação ao Nível-Base e Gráfico de R_t de M&R (n = 3)	116
Tabela 12.3 - Comparação dos NMA_1 's para os Gráficos da Diferença em Relação ao Nível-Base e Gráfico de R_t de M&R (n = 4)	117
Tabela 12.4 - Comparação dos NMA_1 's para os Gráficos da Diferença em Relação ao Nível-Base e Gráfico de R_t de M&R (n = 5)	118
Tabela 13.1 – Probabilidade de Sinal Verdadeiro, porém “incorreto”, para o Esquema de M&R e pelo Esquema Proposto (n=2)	120
Tabela 13.2 - Probabilidade de Sinal Verdadeiro, porém “incorreto”, para o Esquema de M&R e pelo Esquema Proposto (n=3)	121
Tabela 13.3 - Probabilidade de Sinal Verdadeiro, porém “incorreto”, para o Esquema de M&R e pelo Esquema Proposto (n=4)	122
Tabela 13.4 - Probabilidade de Sinal Verdadeiro, porém “incorreto”, para o Esquema de M&R e pelo Esquema Proposto (n=5)	123