



Ítalo Parente de Barros

**Controle estatístico de um processo multicanal com
médias variáveis**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eugenio Kahn Epprecht

Rio de Janeiro
Março de 2008



Ítalo Parente de Barros

**Controle estatístico de um processo multicanal
com médias variáveis**

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

Prof. Eugenio Kahn Epprecht

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Antonio Fernando de Castro Vieira

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Roberto Cintra Martins

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de março de 2008

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

Ítalo Parente de Barros

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Ceará em 2000.

Ficha Catalográfica

Barros, Ítalo Parente de

Controle estatístico de um processo multicanal com médias variáveis / Ítalo Parente de Barros ; orientador: Eugenio Kahn Epprecht. – 2008.

135 f. ; 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. Processos multicanal. 3. Médias variáveis. 4. Controle estatístico de processos. 5. Gráficos de controle. 6. Gráficos de controle agrupados. I. Epprecht, Eugenio Kahn. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Para meus pais, Glauco Barros e Ângela, pelo apoio e orientação dada ao longo de toda minha vida.

À minha namorada, Cláudia Paiva, pelo incentivo durante as dificuldades encontradas no decorrer deste estudo.

À toda minha família, Evelma, Igor e Juliana, pois são as fontes de amor que me fortalece.

Agradecimentos

Ao orientador e amigo Eugenio Kahn Epprecht pelo seu comportamento pró-ativo e descontraído no desenvolvimento deste trabalho, o que fez de nossos encontros momentos regidos por discussões empolgantes e de substancial aprendizado em resolução de problemas científicos.

À toda equipe de apoio do Departamento de Engenharia Industrial pela assistência e boa vontade.

Aos meus pais Glauco Barros e Ângela por me fornecerem subsídios para minha formação profissional, bem como para meu engrandecimento pessoal.

À minha irmã, meu irmão e minha mãe de criação pelo amor verdadeiro que me é fornecido.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Parente, Ítalo de Barros; Epprecht, Eugenio Kahn (Orientador). **Controle estatístico de um processo multicanal com médias variáveis**. Rio de Janeiro, 2008. 135p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho mostra a implantação de técnicas de Controle Estatístico de Processo (CEP) em uma indústria de cosméticos, em uma situação em que as técnicas convencionais não são aplicáveis. O processo a ser controlado é constituído de oito canais, que produzem em um mesmo instante de tempo oito unidades de um mesmo produto. Tal processo possui a peculiaridade de ter médias variáveis no tempo, mesmo em estado de controle estatístico. Como os métodos de controle propostos na literatura para processos com múltiplos canais têm como premissa médias constantes ao longo do tempo e os canais terem médias e variâncias semelhantes, tais métodos não são aplicáveis ao processo em questão. Para o CEP do processo, então, foi desenvolvida uma metodologia adaptada à realidade da empresa, que conjuga os princípios de “*group charts*” e de “gráficos de controle de aceitação”. Foi ainda realizada uma revisão bibliográfica de algumas técnicas de controle estatístico de processos com múltiplos canais, contemplando métodos tradicionais e não tradicionais.

Palavras-chave

Processos multicanal; Médias variáveis; Controle estatístico de processos; Gráficos de controle; Gráficos de controle agrupados.

Abstract

Parente, Ítalo de Barros; Epprecht, Eugenio Kahn (Advisor). **Statistical control of a multiple-stream process with variable means.** Rio de Janeiro, 2008. 135p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study shows the implantation of techniques of Statistical Process Control (SPC) in a cosmetics industry, in a situation in which conventional techniques are not applicable. The process to be controlled is composed of eight streams, which produce eight units of the product at a time. The process has the peculiarity that the means of the streams change in time, even in a condition of statistical control. The control schemes proposed in the literature hitherto for multiple-stream processes assume constant means, and streams with similar means and variance, and are therefore not applicable to this process. A new scheme was then developed for the statistical control of the process, which blends the principles of the “*group charts*” and of “*acceptance control charts*”. A review was also presented of some techniques of statistical control of multiple-stream processes, including traditional and more recent methods.

Keywords

Multiple-stream processes; Variable means; Statistical process control; Control charts; Group control charts.

Sumário

1. Introdução	14
2. Fundamentação Teórica	17
3. Descrição do Processo e Análises Preliminares	26
4. Proposta Metodológica para o CEP	87
5. Validação do Esquema Proposto e Avaliação do seu Desempenho no CEP do Processo em Questão	100
6. Aplicação do Esquema Proposto a Novos Dados	126
7. Conclusão	130
8. Referências bibliográficas	134

Lista de figuras

Figura 1 – Processo produtivo	27
Figura 2 – Linha de produção	28
Figura 3 – Máquina de envase	28
Figura 4 – Tanque de armazenamento	29
Figura 5 – Série de observações para o conjunto 1 de amostras	30
Figura 6 – <i>Boxplot</i> para o conjunto 1 de amostras	31
Figura 7 – Série de observações para o conjunto 2 de amostras	32
Figura 8 – <i>Boxplot</i> para o conjunto 2 de amostras	33
Figura 9 – Série de observações para o conjunto 3 de amostras	34
Figura 10 – <i>Boxplot</i> para o conjunto 3 de amostras	35
Figura 11 – Série de observações para o conjunto 4 de amostras	36
Figura 12 – <i>Boxplot</i> para o conjunto 4 de amostras	37
Figura 13 – Série de observações para o conjunto 5 de amostras	38
Figura 14 – <i>Boxplot</i> para o conjunto 5 de amostras	39
Figura 15 – Série de observações para o conjunto 6 de amostras	40
Figura 16 – Série de 26 primeiras observações para o conjunto 6 de amostras	41
Figura 17 – <i>Boxplot</i> para o conjunto 6 de amostras considerando as 26 primeiras amostras	42
Figura 18 – Plotagem do peso médio para o bico 1 nos conjuntos de amostras válidos	56
Figura 19 – Plotagem do peso médio para o bico 2 nos conjuntos de amostras válidos	56
Figura 20 – Plotagem do peso médio do bico 2 para os diversos conjuntos de amostras	57
Figura 21 – Plotagem do peso médio do bico 4 para os diversos conjuntos de amostras	57
Figura 22 – Plotagem do peso médio do bico 5 para os diversos conjuntos de amostras	58
Figura 23 – Plotagem do peso médio do bico 6 para os diversos conjuntos de amostras	58
Figura 24 – Plotagem do peso médio do bico 7 para os diversos conjuntos de amostras	59
Figura 25 – Plotagem do peso médio do bico 8 para os diversos conjuntos de amostras	59
Figura 26 – Plotagem do peso médio do nível-base para os diversos conjuntos de amostras	60
Figura 27 – Plotagem dos pesos médios dos bicos para o conjunto 1 de amostras	62
Figura 28 – Plotagem dos pesos médios dos bicos para o conjunto 3 de amostras	63
Figura 29 – Plotagem dos pesos médios dos bicos para o conjunto 4 de amostras	63
Figura 30 – Plotagem dos pesos médios dos bicos para o conjunto 5 de amostras	64
Figura 31 – Plotagem dos pesos médios dos bicos para o conjunto 6.1 de amostras	64
Figura 32 – Plotagem dos pesos médios dos bicos para o conjunto 6.2 de amostras	65

Figura 33 – Gráfico de probabilidade normal	66
Figura 34 – Série temporal dos níveis-base para os conjuntos 3, 5, e 6 de amostras	67
Figura 35 – Regressão linear para o nível-base do conjunto 3 de amostras	68
Figura 36 – Plotagem de probabilidade normal dos resíduos padronizados da regressão	68
Figura 37 – Regressão linear para o nível-base do conjunto 5 de amostras	69
Figura 38 – Plotagem de probabilidade normal dos resíduos padronizados da regressão	70
Figura 39 – Regressão linear para o nível-base do conjunto 6 de amostras	71
Figura 40 – Plotagem de probabilidade normal dos resíduos padronizados da regressão	72
Figura 21 – Correlogramas de todos os bicos e nível-base para o conjuntos 1 de amostras	78
Figura 42– Correlogramas de todos os bicos e nível-base para o conjuntos 3 de amostras	79
Figura 43 – Correlogramas de todos os bicos e nível-base para o conjuntos 4 de amostras	81
Figura 44 – Correlogramas de todos os bicos e nível-base para o conjuntos 5 de amostras	82
Figura 45 – Correlogramas de todos os bicos e nível-base para o conjuntos 6.1 de amostras	83
Figura 46 – Correlogramas de todos os bicos e nível-base para o conjuntos 6.2 de amostras	85
Figura 47 – Cálculo do desvio-padrão combinado: saída do MINITAB	90
Figura 48 – Plotagem das médias dos bicos em cada conjunto de amostras	91
Figura 49 – Distribuição ilustrativa dos bicos	98
Figura 50 – Análise de capacidade, estatísticas descritivas e desempenho observado para o conjunto 1 de amostras	101
Figura 51 – Análise de capacidade, estatísticas descritivas e desempenho observado para o conjunto 3 de amostras	103
Figura 52 – Análise de capacidade, estatísticas descritivas e desempenho observado para o conjunto 4 de amostras	105
Figura 53 – Análise de capacidade, estatísticas descritivas e desempenho observado para o conjunto 5 de amostras	107
Figura 54 – Análise de capacidade, estatísticas descritivas e desempenho observado para o conjunto 6.1 de amostras	109
Figura 55 – Análise de capacidade, estatísticas descritivas e desempenho observado para o conjunto 6.2 de amostras	111
Figura 56 – Correlogramas para o nível-base dos conjuntos de amostras 1, 3, 4, 5, 6.1 e 6.2	119
Figura 57 – Saída do MINITAB para estimar o desvio-padrão combinado	120
Figura 58 – Gráfico de MR para o nível-base do conjunto 1 de amostras	121
Figura 59 – Gráfico de série temporal para o nível-base do conjunto 1 de amostras	121
Figura 60 – Gráfico de MR para o nível-base do conjunto 3 de amostras	122
Figura 61 – Gráfico de série temporal para o nível-base do conjunto 3 de amostras	122
Figura 62 – Gráfico de MR para o nível-base do conjunto 4 de amostras	123

Figura 63 – Gráfico de série temporal para o nível-base do conjunto 4 de amostras	123
Figura 64 – Gráfico de MR para o nível-base do conjunto 5 de amostras	124
Figura 65 – Gráfico de série temporal para o nível-base do conjunto 5 de amostras	124
Figura 66 – Gráfico de MR para o nível-base do conjunto 6 de amostras	125
Figura 67 – Gráfico de série temporal para o nível-base do conjunto 6 de amostras	125
Figura 68 – Série temporal do nível-base	129

Lista de tabelas

Tabela 1 – CMS ₀ para diversos valores de r e fluxos	44
Tabela 2 – Estatísticas descritivas do conjunto 1 de amostras	44
Tabela 3 – Estatísticas descritivas do conjunto 3 de amostras	45
Tabela 4 – Estatísticas descritivas do conjunto 4 de amostras	45
Tabela 5 – Estatísticas descritivas do conjunto 5 de amostras	45
Tabela 6 – Estatísticas descritivas do conjunto 6.1 de amostras	46
Tabela 7 – Estatísticas descritivas do conjunto 6.2 de amostras	46
Tabela 8 – Teste de normalidade para o conjunto 1 de amostras	47
Tabela 9 – Teste de normalidade para o conjunto 3 de amostras	47
Tabela 10 – Teste de normalidade para o conjunto 4 de amostras	47
Tabela 11 – Teste de normalidade para o conjunto 5 de amostras	47
Tabela 12 – Teste de normalidade para o conjunto 6.1 de amostras	48
Tabela 13 – Teste de normalidade para o conjunto 6.2 de amostras	48
Tabela 14 – Teste de homogeneidade de variância para os conjuntos de amostras	49
Tabela 15 – ANOVA para o conjunto 1 de amostras	49
Tabela 16 – ANOVA para o conjunto 3 de amostras	49
Tabela 17 – ANOVA para o conjunto 4 de amostras	50
Tabela 18 – ANOVA para o conjunto 5 de amostras	50
Tabela 19 – ANOVA para o conjunto 6.1 de amostras	50
Tabela 20 – ANOVA para o conjunto 6.2 de amostras	50
Tabela 21 – Bicos com médias estatisticamente semelhantes no conjunto 1 de amostras	51
Tabela 22 – Bicos com médias estatisticamente semelhantes no conjunto 3 de amostras	51
Tabela 23 – Bicos com médias estatisticamente semelhantes no conjunto 4 de amostras	51
Tabela 24 – Bicos com médias estatisticamente semelhantes no conjunto 5 de amostras	52
Tabela 25 – Bicos com médias estatisticamente semelhantes no conjunto 6.1 de amostras	52
Tabela 26 – Bicos com médias estatisticamente semelhantes no conjunto 6.2 de amostras	53
Tabela 27 – Teste de homogeneidade de variâncias entre os conjuntos de amostras	54
Tabela 28 – ANOVA para o Conjunto de Amostras	55
Tabela 29 – Teste de Kruskal-Wallis para os bicos e nível-base	60
Tabela 30 – Teste robusto de igualdade de médias	61
Tabela 31 – Diferença entre as médias dos bicos antes e após a mudança no lote	66
Tabela 32 – Sumário do modelo de regressão do conjunto 3 de amostras	68
Tabela 33 – Coeficientes do modelo de regressão para o conjunto 3 de amostras	69
Tabela 34 – Sumário do modelo de regressão do conjunto 5 de amostras	60

Tabela 35 – Coeficientes do modelo de regressão para o conjunto 5 de amostras	70
Tabela 36 – Sumário do modelo de regressão do conjunto 6 de amostras	71
Tabela 37 – Coeficientes do modelo de regressão para o conjunto 6 de amostras	72
Tabela 38 - Matriz de correlação para o conjunto 1 de amostras	74
Tabela 39 - Matriz de correlação para o conjunto 3 de amostras	75
Tabela 40 - Matriz de correlação para o conjunto 4 de amostras	75
Tabela 41 - Matriz de correlação para o conjunto 5 de amostras	76
Tabela 42 - Matriz de correlação para o conjunto 6.1 de amostras	76
Tabela 43 - Matriz de correlação para o conjunto 6.2 de amostras	77
Tabela 44 – Teste de homogeneidade de variâncias entre os conjuntos 1, 3, 4, 5, 6.1, 6.2 de amostras	88
Tabela 45 – Teste de homogeneidade de variância entre todos os bicos e conjuntos de amostras	89
Tabela 46 – Tamanho de amostras para α , β , γ , e δ especificados	96
Tabela 47 – Diversas possibilidades para o gráfico sugerido	97
Tabela 48 – Economia estimada proporcionada pelo modelo proposto	113
Tabela 49 – Aplicação dos limites ao conjunto 1 de amostras	114
Tabela 50 – Aplicação dos limites ao conjunto 3 de amostras	115
Tabela 51 – Aplicação dos limites ao conjunto 4 de amostras	116
Tabela 52 – Aplicação dos limites ao conjunto 5 de amostras	117
Tabela 53 – Aplicação dos limites ao conjunto 6 de amostras	118
Tabela 54 – Cep aplicados aos dados do processo	128