

Lorena Drumond Loureiro

**Efeito do Número e Tamanho das Amostras Iniciais sobre o
Desempenho do Gráfico de S e sobre a Estimativa da
Capacidade do Processo**

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
Março de 2008

Lorena Drumond Loureiro

**Efeito do Número e Tamanho das Amostras Iniciais sobre o
Desempenho do Gráfico de S e sobre a Estimativa da
Capacidade do Processo**

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

Dr. Hélio Côrtes Lopes

Departamento de Matemática – PUC-Rio

Dr^a. Flávia Cesar Teixeira Mendes

Departamento de Engenharia de Produção - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro

Tecnológico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 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.

Lorena Drumond Loureiro

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Pará em 2004. Obteve o Título de Especialista em Controle Estatístico da Qualidade pela Universidade Federal do Pará em 2006.

Ficha Catalográfica

Loureiro, Lorena Drumond

Efeito do Número e Tamanho das Amostras Iniciais sobre o Desempenho do Gráfico de S e sobre a Estimativa da Capacidade do Processo/ Lorena Drumond Loureiro; Orientador: Eugenio Kahn Epprecht. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Industrial, 2008.

208 f.: il. ; 30cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Gráficos de Controle de S. 3. Estimção de Parâmetros. 4. Medidas de Desempenho de Gráficos de Controle. 5. Capacidade do Processo. I. Epprecht, Eugenio Kahn. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Aos meus pais, Eduardo e Conceição, às minhas irmãs Kelly, Luciana e Karine e ao meu marido, Hilbert, pelo apoio e incentivo. A toda minha família.

Agradecimentos

A Deus que, com Sua infinita bondade, permitiu que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, Eduardo e Conceição, e irmãs, Kelly, Luciana e Karine, pelo incentivo e por estarem sempre presentes em minha vida.

Ao meu marido Hilbert, meu parceiro de jornada, pelo carinho e apoio incondicional.

Ao meu Professor e Orientador Eugenio Kahn Epprecht, pelos ensinamentos, pela dedicação e parceria neste trabalho, em todos os momentos.

A toda minha família, em especial à minha tia Thereza e minha prima e amiga, Juliana, que me receberam com carinho e me deram todo o apoio que precisei.

Aos amigos Laura, Isabel e Júlio, que compartilharam comigo esta etapa tão importante de nossas vidas, pelos momentos de amizade e companheirismo.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio, pelos ensinamentos e assistência prestada durante a realização do Mestrado.

Ao CNPq e à PUC-Rio pelo apoio financeiro concedido a mim durante o curso.

Resumo

Loureiro, Lorena Drumond; Epprecht, Eugenio Kahn. **Efeito do Número e Tamanho das Amostras Iniciais sobre o Desempenho do Gráfico de S e sobre a Estimativa da Capacidade do Processo**. Rio de Janeiro, 2008. 208p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A probabilidade de alarme falso, α , e o poder dos gráficos de controle de processos dependem dos seus limites de controle, que, por sua vez, dependem de estimativas dos parâmetros do processo. A análise de capacidade de processos também depende de tais estimativas. Esta dissertação apresenta inicialmente uma revisão — ao nosso conhecimento, a primeira em português — dos principais trabalhos sobre o efeito dos erros de estimação dos parâmetros do processo sobre α . Todos os trabalhos citados buscam determinar, com base na distribuição de probabilidades das estimativas dos parâmetros do processo (parametrizada pelo número de amostras iniciais, m , e do tamanho delas, n) o valor esperado de α ou, equivalentemente, o valor esperado da distribuição marginal do número de amostras até um alarme falso. Nossa abordagem é distinta: obter (parametrizada por n e m) a distribuição de α e seus percentis ou, equivalentemente, a distribuição do valor esperado do número de amostras até um alarme falso, de modo a fornecer orientação sobre o número de amostras iniciais a serem utilizadas antes de fixar definitivamente os valores dos limites de controle dos gráficos. A análise foi conduzida para o gráfico de S . Foi analisada também a influência da estimação do desvio-padrão do processo sobre o poder do gráfico. Finalmente, foi obtida a distribuição dos erros na estimativa da capacidade do processo em função de m e n , para fornecer orientação sobre o número de amostras necessário para garantir uma precisão especificada nessa estimativa, com um grau de confiança também especificado.

Palavras-chave

Gráficos de S ; índices de capacidade de processos; probabilidade de alarme falso; poder; fase I; estimação de parâmetros; limites de controle; NMA; desempenho; número de amostras; tamanho de amostras; medidas de desempenho.

Abstract

Loureiro, Lorena Dumond; Epprecht, Eugenio Kahn (Advisor). **Effect of the Number and Size of the Initial Samples on the Performance of the S Chart and on the Process Capability Estimate.** Rio de Janeiro, 2008. 208p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The false-alarm probability, α , and the power of process control charts depend on their control limits, which, in turn, depend on process parameters estimates. Process capability analyses also depend on those estimates. This dissertation initially presents a review — to our knowledge, the first in Portuguese — of the main research articles about the effect upon α of the estimation errors of the process parameters. All the works reviewed aim to determine, based on the probability distribution of the process parameters estimates (which is a function of the number of initial samples, m , and of their size, n), the expected value of α , or, equivalently, the expected value of the marginal distribution of the number of samples until a false alarm occurs. Our approach is different: to get (parameterized by m and n) the distribution of α and their percentiles or, equivalently, the distribution of the expected number of samples until a false alarm, in order to provide guidance on the initial number of samples to be used before setting the chart definitive control limits. The analysis was conducted for the S chart. The influence of the estimation errors on the power of the S chart was also examined. Finally, the distribution function was obtained, parameterized by m and n , of the estimation errors of the process capability index C_p , to provide guidance on the initial number of samples required to ensure, with a specified confidence level, a specified accuracy of the estimate.

Keywords

S control chart; process capability indexes; false-alarm probability; power; phase I; parameter estimation; control limits; ARL; performance; number of samples; sample size; performance measures.

Sumário

1 Introdução	27
2 Fundamentos Conceituais e Trabalhos Precedentes	31
2.1. Fundamentos Conceituais	31
2.2. Trabalhos Precedentes	42
3 Modelo Matemático	57
3.1. Definições Iniciais	57
3.2. Distribuição do Risco α e do poder Pd do gráfico de S sob erros de estimação	59
3.3. Distribuição dos índices de capacidade Cp e Cpk sob erros de estimação	63
4 Metodologia de Análise, Resultados e Discussão	65
4.1. Metodologia da Análise 1: Determinação da distribuição acumulada complementar do risco α , $P(\alpha > a)$, parametrizada pelo tamanho de amostra n e pelo número de amostras iniciais m	66
4.1.1. Resultados e Discussão da Análise 1	69
4.2. Metodologia da Análise 2: Percentis do risco α real em função do tamanho de amostras n e do número de amostras m	71
4.2.1. Resultados e Discussão da Análise 2	72
4.3. Metodologia da Análise 3: Determinação do número mínimo de amostras m para cada tamanho de amostra n que garante com um	92

percentual de probabilidade que o risco α real não é maior que $\varepsilon\%$ em relação ao risco α nominal	
4.3.1. Resultados e Discussão da Análise 3	95
4.4. Análise 4: O poder Pd do Gráfico de S	107
4.5 Metodologia da Análise 5: Determinação da distribuição acumulada do fator $1/k$, de erro na estimação dos índices de capacidade Cp e Cpk , parametrizada pelo tamanho de amostra n e pelo número de amostras iniciais m	111
4.5.1. Resultados e Discussão da Análise 5	113
4.6. Metodologia da Análise 6: Obtenção de intervalos de confiança para Cp e Cpk a partir de intervalos de probabilidade para o fator k , em função do tamanho de amostras n e do número de amostras m	114
4.6.1. Resultados e Discussão da Análise 6	115
4.7. Metodologia da Análise 7: Determinação do número mínimo de amostras m que, para cada tamanho de amostra n dado, garante que $(1-\varepsilon/100) \leq k \leq (1+\varepsilon/100)$ com probabilidade c , para valores de ε e de c especificados	125
4.7.1. Resultados e Discussão da Análise 7	127
5 Considerações Finais e Recomendações	132
6 Referências Bibliográficas	138
Apêndice A – Tabelas e Gráficos da Análise 1 sobre o Risco α do Gráfico de S com limites de três-sigma	140
Apêndice B – Tabelas e Gráficos da Análise 1 sobre o Risco α do Gráfico de S com Limites de Probabilidade	157

Apêndice C – Tabelas e Gráficos da Análise 5 sobre o fator $1/k$, de erro na estimação dos índices de capacidade C_p e C_{pk} 190

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Percentis de 95% do risco α real do gráfico de S com limites de três-sigma em função de n e m	73
Tabela 4.2 - Percentis de 90% do risco α real do gráfico de S com limites de três-sigma em função de n e m	75
Tabela 4.3 - Percentis de 85% do risco α real do gráfico de S com limites de três-sigma em função de n e m	77
Tabela 4.4 – Risco α do Gráfico de S com limites de três-sigma quando $k = 1$	79
Tabela 4.5 - Percentis de 95% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom} = 0,005$, em função de n e m	80
Tabela 4.6 – Percentis de 90% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom} = 0,005$, em função de n e m	82
Tabela 4.7 – Percentis de 85% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom} = 0,005$, em função de n e m	84
Tabela 4.8 - Percentis de 95% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom} = 0,0027$, em função de n e m	86
Tabela 4.9 - Percentis de 90% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom} = 0,0027$, em função de n e m	88
Tabela 4.10 - Percentis de 85% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom} = 0,0027$, em função de n e m	90
Tabela 4.11 – Número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de três-sigma, com $p = 5, 10$ e 15%	97

e $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50%

Tabela 4.12 – Número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de probabilidade, com $p = 5, 10$ e 15% , $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% , e $\alpha_{nom} = 0,005$	101
Tabela 4.13 – Número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de probabilidade, com $p = 5, 10$ e 15% , $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% , e $\alpha_{nom} = 0,0027$	104
Tabela 4.14a – Intervalos de 80% de probabilidade para o fator de erro k para diferentes n e $m = 10, 15, 20, 25, 30, 40$ e 50 : limites k_{inf} e k_{sup} para construção de IC de 80% para Cp e Cpk	116
Tabela 4.14b – Intervalos de 80% de probabilidade para o fator de erro k para diferentes n e $m = 60, 70, 80, 90, 100, 150$ e 200 : limites k_{inf} e k_{sup} para construção de IC de 80% para Cp e Cpk	117
Tabela 4.15a – Intervalos de 90% de probabilidade para o fator de erro k para diferentes n e $m = 10, 15, 20, 25, 30, 40$ e 50 : limites k_{inf} e k_{sup} para construção de IC de 90% para Cp e Cpk	119
Tabela 4.15b – Intervalos de 90% de probabilidade para o fator de erro k para diferentes n e $m = 60, 70, 80, 90, 100, 150$ e 200 : limites k_{inf} e k_{sup} para construção de IC de 90% para Cp e Cpk	120
Tabela 4.16a – Intervalos de 95% de probabilidade para o fator de erro k para diferentes n e $m = 10, 15, 20, 25, 30, 40$ e 50 : limites k_{inf} e k_{sup} para construção de IC de 95% para Cp e Cpk	122
Tabela 4.16b – Intervalos de 95% de probabilidade para o fator de erro k para diferentes n e $m = 60, 70, 80, 90, 100, 150$ e 200 : limites k_{inf} e k_{sup} para construção de IC de 95% para Cp e Cpk	123

Tabela 4.17 – Número mínimo de amostras iniciais m em função de n para $c = 80, 90$ e 95% e $\varepsilon = 5, 10, 20$ e 30%	128
--	-----

Tabelas do Apêndice A

Tabela A.1 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 2, 3$ e 4	141
---	-----

Tabela A.2 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 5, 6$ e 8	145
---	-----

Tabela A.3 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 10, 12$ e 15	149
--	-----

Tabela A.4 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 20, 25$ e 30	153
--	-----

Tabelas do Apêndice B

Tabela B.1 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 2, 3$ e 4 e $\alpha_{nom} = 0,0050$	158
---	-----

Tabela B.2 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$ para $n = 5, 6$ e 8 e $\alpha_{nom} = 0,0050$	162
---	-----

Tabela B.3 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$ para $n = 10, 12$ e 15 e $\alpha_{nom} = 0,0050$	166
--	-----

Tabela B.4 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$ para n $= 20, 25$ e 30 e $\alpha_{nom} = 0,0050$	170
--	-----

Tabela B.5 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$ para $n = 2, 3$ e 4 e $\alpha_{nom} = 0,0027$	174
---	-----

Tabela B.6 – Distribuição Acumulada Complementar $P(\alpha > a)$ para	178
---	-----

$n = 5, 6$ e 8 e $\alpha_{nom} = 0,0027$

Tabela B.7 – Distribuição Acumulada Complementar P ($\alpha > a$) para $n = 10, 12$ e 15 e $\alpha_{nom} = 0,0027$ 182

Tabela B.8 – Distribuição Acumulada Complementar P ($\alpha > a$) para $n = 20, 25$ e 30 e $\alpha_{nom} = 0,0027$ 186

Tabelas do Apêndice C

Tabela C.1 – Distribuição acumulada do fator $1/k$, de erro na estimação dos índices de capacidade C_p e C_{pk} , para $n = 2$ e 3 191

Tabela C.2 – Distribuição acumulada do fator $1/k$, de erro na estimação dos índices de capacidade C_p e C_{pk} , para $n = 4$ e 5 194

Tabela C.3 – Distribuição acumulada do fator $1/k$, de erro na estimação dos índices de capacidade C_p e C_{pk} , para $n = 6$ e 8 197

Tabela C.4 – Distribuição acumulada do fator $1/k$, de erro na estimação dos índices de capacidade C_p e C_{pk} , para $n = 10$ e 12 200

Tabela C.5 – Distribuição acumulada do fator $1/k$, de erro na estimação dos índices de capacidade C_p e C_{pk} , para $n = 15$ e 20 203

Tabela C.6 – Distribuição acumulada do fator $1/k$, de erro na estimação dos índices de capacidade C_p e C_{pk} , para $n = 25$ e 30 206

Lista de figuras

Figura 4.1 - Gráfico dos percentis de 95% do risco α real do gráfico de S com limites de três-sigma em função de n e m	74
Figura 4.2 - Gráfico dos percentis de 90% do risco α real do gráfico de S com limites de três-sigma em função de n e m	76
Figura 4.3 – Gráfico dos percentis de 85% do risco α real do gráfico de S com limites de três-sigma em função de n e m	78
Figura 4.4 - Gráfico dos percentis de 95% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom}= 0,0050$, em função de n e m	81
Figura 4.5 - Gráfico dos percentis de 90% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom}= 0,0050$, em função de n e m	83
Figura 4.6 – Gráfico dos percentis de 85% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom}= 0,0050$, em função de n e m	85
Figura 4.7 - Gráfico dos percentis de 95% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom}= 0,0027$, em função de n e m	87
Figura 4.8 - Gráfico dos percentis de 90% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom}= 0,0027$, em função de n e m	89
Figura 4.9 - Gráfico dos percentis de 85% do risco α real do gráfico de S com limites probabilidade e $\alpha_{nom}= 0,0027$, em função de n e m	91
Figura 4.10 - Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de três-sigma, com $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% e $p= 5\%$	98

Figura 4.11 - Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de três-sigma, com $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% e $p = 10\%$	98
Figura 4.12 - Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de três-sigma, com $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% e $p = 15\%$	99
Figura 4.13 – Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de probabilidade, com $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% , $p = 5\%$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	102
Figura 4.14 - Gráfico do número mínimo de amostras inicial m em função de n para o gráfico de S com limites de probabilidade, com $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% , $p = 10\%$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	102
Figura 4.15 - Gráfico do número mínimo de amostras inicial m em função de n para o gráfico de S com limites de probabilidade, com $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% , $p = 15\%$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	103
Figura 4.16 - Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de probabilidade, com $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% , $p = 5\%$ e $\alpha_{nom} = 0,0027$	105
Figura 4.17 - Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de probabilidade, com $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% , $p = 10\%$ e $\alpha_{nom} = 0,0027$	105
Figura 4.18 - Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para o gráfico de S com limites de probabilidade, com $\varepsilon = 10, 20, 30, 40$ e 50% , $p = 15\%$ e $\alpha_{nom} = 0,0027$	106
Figura 4.19 – Gráfico dos Intervalos de 80% de probabilidade para o fator de erro k para diferentes n e m : limites k_{inf} e k_{sup} para	118

construção de IC de 80% para C_p e C_{pk}

Figura 4.20 – Gráfico dos Intervalos de 90% de probabilidade para o fator de erro k para diferentes n e m : limites k_{inf} e k_{sup} para construção de IC de 90% para C_p e C_{pk} 121

Figura 4.21 – Gráfico dos Intervalos de 95% de probabilidade para o fator de erro k para diferentes n e m : limites k_{inf} e k_{sup} para construção de IC de 95% para C_p e C_{pk} 124

Figura 4.22 – Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para $c = 80\%$ e $\varepsilon = 5, 10, 20$ e 30% 129

Figura 4.23 – Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para $c = 90\%$ e $\varepsilon = 5, 10, 20$ e 30% 129

Figura 4.24 – Gráfico do número mínimo de amostras iniciais m em função de n para $c = 95\%$ e $\varepsilon = 5, 10, 20$ e 30% 130

Figuras do Apêndice A

Figura A.1 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 2$ 142

Figura A.2 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 3$ 143

Figura A.3 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 4$ 144

Figura A.4 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 5$ 146

Figura A.5 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 6$ 147

Figura A.6 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 148
 $P(\alpha > a)$, para $n = 8$

Figura A.7 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 150
 $P(\alpha > a)$, para $n = 10$

Figura A.8 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 151
 $P(\alpha > a)$, para $n = 12$

Figura A.9 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 152
 $P(\alpha > a)$, para $n = 15$

Figura A.10 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 154
 $P(\alpha > a)$, para $n = 20$

Figura A.11 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 155
 $P(\alpha > a)$, para $n = 25$

Figura A.12 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 156
 $P(\alpha > a)$, para $n = 30$

Figuras do Apêndice B

Figura B.1 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 159
 $P(\alpha > a)$, para $n = 2$ e $\alpha_{nom} = 0,005$

Figura B.2 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 160
 $P(\alpha > a)$, para $n = 3$ e $\alpha_{nom} = 0,005$

Figura B.3 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 161
 $P(\alpha > a)$, para $n = 4$ e $\alpha_{nom} = 0,005$

Figura B.4 – Gráfico da distribuição acumulada complementar 163
 $P(\alpha > a)$, para $n = 5$ e $\alpha_{nom} = 0,005$

Figura B.5 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 6$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	164
Figura B.6 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 8$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	165
Figura B.7 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 10$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	167
Figura B.8 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 12$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	168
Figura B.9 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 15$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	169
Figura B.10 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 20$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	171
Figura B.11 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n=25$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	172
Figura B.12 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n=30$ e $\alpha_{nom} = 0,005$	173
Figura B.13 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 2$ e $\alpha_{nom} = 0,0027$	175
Figura B.14 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 3$ e $\alpha_{nom} = 0,0027$	176
Figura B.15 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 4$ e $\alpha_{nom} = 0,0027$	177
Figura B.16 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 5$ e $\alpha_{nom} = 0,0027$	179

Figura B.17 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 6$ e $\alpha_{nom}=0,0027$	180
Figura B.18 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n = 8$ e $\alpha_{nom}= 0,0027$	181
Figura B.19 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n=10$ e $\alpha_{nom}= 0,0027$	183
Figura B.20 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n=12$ e $\alpha_{nom}= 0,0027$	184
Figura B.21 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n=15$ e $\alpha_{nom}= 0,0027$	185
Figura B.22 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n=20$ e $\alpha_{nom}= 0,0027$	187
Figura B.23 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n=25$ e $\alpha_{nom}= 0,0027$	188
Figura B.24 – Gráfico da distribuição acumulada complementar $P(\alpha > a)$, para $n=30$ e $\alpha_{nom}= 0,0027$	189

Figuras do apêndice C

Figura C.1 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 2$	192
Figura C.2 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 3$	193
Figura C.3 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 4$	195

Figura C.4 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 5$	196
Figura C.5 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 6$	198
Figura C.6 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 8$	199
Figura C.7 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 10$	201
Figura C.8 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 12$	202
Figura C.9 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 15$	204
Figura C.10 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 20$	205
Figura C.11 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 25$	207
Figura C.12 – Gráfico da Distribuição Acumulada do Fator de Erro $1/k$, para $n = 30$	208

Lista de abreviaturas e símbolos

$1/k$	Fator de erro na estimação de C_p ou C_{pk}
a	valores máximos para o risco α do gráfico de controle
A_2	Constante tabelada em função do tamanho de amostra n
b	Razão entre o desvio-padrão para o processo fora de controle e o desvio-padrão-alvo
c	Percentual de confiança do intervalo de probabilidade para k
c_4	Constante tabelada em função do tamanho de amostra n
CEP	Controle estatístico do processo
CEQ	Controle estatístico da qualidade
C_p	Índice de capacidade
C_{p_a}	Índice de capacidade C_p aparente
C_{pk}	Índice de capacidade
$C_{p_{k_a}}$	Índice de capacidade $C_{p_{k_a}}$ aparente
C_{pm}	Índice de capacidade
D_3	Constante tabelada em função do tamanho de amostra n
D_4	Constante tabelada em função do tamanho de amostra n
$F_{1/k}$	Densidade de probabilidade acumulada para $1/k$
$Fase I$	1ª fase dos gráficos de controle
$Fase II$	2ª fase dos gráficos de controle
F_k	Densidade de probabilidade acumulada para k
$F_{\alpha a}$	Densidade de probabilidade acumulada para o risco α

h	Intervalo de tempo entre amostras
$h'_{\gamma,m,k,v}$	Valores críticos da distribuição normal k -variada das diferenças $\bar{X}_i - \bar{\bar{X}}$.
H_0	Hipótese inicial
H_1	Hipótese alternativa
k	Fator de erro na estimação do desvio-padrão do processo
k_a	valor de k que corresponde a um valor para o risco α igual a a .
k_{inf}	Limite inferior do intervalo de probabilidade para k
k_p	Valor de k correspondente a p
k_{sup}	Limite superior do intervalo de probabilidade para k
$L\hat{C}L$	Limite inferior de controle estimado na <i>Fase I</i>
LIC	Limite inferior de controle
LIC_S	Limite inferior do gráfico de controle do desvio-padrão amostral S
LIE	Limite inferior de especificação
LSC	Limite superior de controle
LSC_S	Limite superior do gráfico de controle do desvio-padrão amostral S
LSE	Limite superior de especificação
m	Número de amostras
n	Tamanho da amostra
NMA ou NMA_1 ou ARL	Número médio de amostras até o sinal
NMA_0 ou ARL_0	Número médio de amostras até um alarme falso

p	Probabilidade de o risco α ultrapassar o valor máximo a
Pd	Probabilidade de detecção
R	Amplitude amostral
RL	Número de amostras até o sinal
S	Desvio-padrão amostral
\bar{S}	média dos m desvios-padrão $S_j, j = 1, 2, \dots, m$
S^2	Variância amostral
$SDRL$	desvio-padrão do RL
TES	Tempo esperado até o sinal
$TMAF$	Tempo médio até um alarme falso
$U\hat{C}L$	Limite superior de controle estimado na <i>Fase I</i>
V	número de amostras até que o primeiro sinal ocorra para o caso em que σ é conhecido
v, w	Valores possíveis das estimativas dos parâmetros
W	número de amostras até que o primeiro sinal ocorra para o caso em que σ é estimado
X	variável aleatória
\bar{X}	Média amostral
$\bar{\bar{X}}$	Valor médio das médias das amostras
$\chi^2_{n-1, \alpha}$	quantil de $(1 - \alpha)$ da variável qui-quadrado com $n - 1$ graus de liberdade
$\chi^2_{n-1, \alpha_{real}}$	Valor qui-quadrado real correspondente ao limite superior de controle do gráfico de S , dado que existe um erro na estimação e/ou deslocamento do desvio-padrão do processo

$\chi_{n-1, \alpha_{nom}}^2$	Valor qui-quadrado nominal correspondente ao limite superior de controle do gráfico de S quando o desvio-padrão do processo é conhecido
z	valores mínimos para o poder do gráfico de controle
α	Probabilidade de alarme falso ou erro do tipo I
α_{nom}	Probabilidade de alarme falso ou erro do tipo I nominal
α_{real}	Probabilidade de alarme falso ou erro do tipo I dado que existe um erro na estimação e/ou deslocamento do desvio-padrão do processo
β	Probabilidade de não-detecção ou erro do tipo II
Δ	Semi-largura do intervalo de confiança para C_p e C_{pk}
μ	Média do processo
μ_k	Média de k
σ	Desvio-padrão do processo
σ_0	Desvio-padrão do processo em controle
$\hat{\sigma}_0$	Estimativa do desvio-padrão do processo σ_0
σ_1	Desvio-padrão do processo após ter sofrido um aumento (deslocamento)
σ^2	Variância populacional
σ_k	Desvio-padrão de k
ε	Diferença percentual de α_{real} em relação ao α_{nom} e semi-largura do intervalo de probabilidade para k
γ	Razão entre o desvio padrão do processo após um aumento (σ_1) e o desvio-padrão do processo em controle
γ'	Fator γ aparente

“Não se pode melhorar o que não se mede”

Autor desconhecido