

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

**CARTAS ADAPTATIVAS DE CONTROLE:
DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA
IMPLEMENTAÇÃO EM PROCESSOS DE
MANUFATURA**

Renato Michel

Porto Alegre, 2001

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

**CARTAS ADAPTATIVAS DE CONTROLE: DESENVOLVIMENTO DE
METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO EM PROCESSOS DE
MANUFATURA**

Renato Michel

Orientador: Professor Dr. Flávio Sanson Fogliatto

Banca Examinadora:

**Eugênio Kahn Epprecht, Ph. D.
Prof. Depto. Engenharia Industrial / PUC-RIO**

**Carla Schwengber ten Caten, Dra.
Prof. PPGEP / UFRGS**

**José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Prof. PPGEP / UFRGS**

**Álvaro Vigo, Ms.
Prof. Depto. Estatística / UFRGS**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção como requisito parcial à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Área de concentração: Qualidade

Porto Alegre, agosto de 2001.

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Ph. D.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Luís Afonso dos Santos Senna, Ph. D.

Coordenador PPGE/UFRGS

Banca Examinadora:

Eugênio Kahn Epprecht, Ph. D.

Prof. Depto. Engenharia Industrial / PUC-RIO

Carla Schwengber ten Caten, Dra.

Prof. PPGE / UFRGS

José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Prof. PPGE / UFRGS

Álvaro Vigo, Ms.

Prof. Depto. Estatística / UFRGS

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Flávio Sanson Fogliatto, pela competente orientação, disponibilidade e interesse apresentados durante o curso de mestrado e na realização desta dissertação.

Aos membros da Banca Examinadora, professores Eugênio Kahn Epprecht, Carla Schwengber ten Caten, José Luís Duarte Ribeiro e Álvaro Vigo, pela análise do trabalho e pelas valiosas sugestões e correções apresentadas.

Aos demais professores e funcionários do PPGE/UFGRS, com quem tive a oportunidade de conviver e aprender.

Aos profissionais da ATH – Albarus Transmissões Homocinéticas Ltda., André Marques Silva, Evandro da Rosa Saraiva, Ginésio Flesch, João Alexandre Cannis, José Natálio Cotliarenko, José Telmo Pacheco e outros, por todo o apoio e suporte disponibilizado para a realização do estudo de caso deste trabalho.

Aos colegas e amigos da turma de mestrado de 1998, Cíntia Paese, Cristiano Schuch, Cristina Dias Soares, Luís Filipe Trevisan, Janaína Macke, Luciane Xerxenevski Bergue, Roberta Adami, Rodrigo Souto e Rogério Bañolas, pela amizade e apoio.

Ao amigo Marcelo Hercílio Carvalho Moutinho Silva, um agradecimento especial pela inestimável ajuda oferecida para a conclusão deste trabalho.

À meus pais e familiares, Nelson, Dagmar, Marcos, Andréa, Emil e Daniel.

À Luciana Frantz, minha noiva e companheira de muitas conquistas, pelo carinho, amizade e amor incondicionais.

A todas as pessoas que não foram nominalmente mencionadas, mas que de alguma forma contribuíram para viabilizar este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 TEMA E JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.3 MÉTODO DE TRABALHO	4
1.4 DELIMITAÇÕES	6
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
2 REFERENCIAL TEÓRICO SOBRE CARTAS DE CONTROLE DE PROCESSO	9
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	9
2.2 AS PRINCIPAIS CARTAS DE CONTROLE PARA VARIÁVEIS	13
2.3 CARTAS ADAPTATIVAS DE CONTROLE	16
2.3.1 Cartas com Intervalo de Amostragem Adaptativo	21
2.3.2 Cartas com Tamanho de Amostra Adaptativo	25
2.3.3 Cartas com Intervalo de Amostragem e Tamanho de Amostra Adaptativos	28
2.3.4 Cartas com Intervalo de Amostragem, Tamanho de Amostra e Coeficiente dos Limites de Controle Adaptativos	29
2.4 PROJETO ECONÔMICO DAS CARTAS DE CONTROLE.....	31
2.4.1 Modelo econômico geral	31
2.4.2 Modelo econômico para cartas adaptativas de controle.....	35
3 PROPOSTA METODOLÓGICA PARA O PLANEJAMENTO DA IMPLEMENTAÇÃO DE CARTAS ADAPTATIVAS.....	44
3.1 SELEÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE	45
3.2 ESCOLHA DE UM MODELO A SER UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARTA ADAPTATIVA	49
3.3 COLETA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A OPERACIONALIZAÇÃO DO MODELO.....	50
3.3.1 Tempo médio em que o processo permanece sob controle, $1/I$	51
3.3.2 Tempo médio de busca quando da ocorrência de um alarme falso, T_f	54
3.3.3 Tempo necessário para coletar uma amostra, executar medições e plotar um ponto na carta, nE	55
3.3.4 Tempo médio de busca por causas especiais, T_S	56
3.3.5 Tempo médio de reparo das causas especiais, T_R	57
3.3.6 Custo/hora de operação do processo sob controle, C_0 , e fora de controle, C_1	57

3.3.7	Custo médio por alarme falso, Y	58
3.3.8	Custo médio para localizar e reparar uma causa especial, C_d	59
3.3.9	Custo de coleta, processamento e plotagem de um ponto amostral na carta de controle, $a_1 + a_2n$	59
3.4	APLICAÇÃO DO MODELO PARA A OBTENÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DA CARTA ADAPTATIVA	60
4	ESTUDO DE CASO	62
4.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	62
4.2	SELEÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE A SEREM MONITORADAS ATRAVÉS DAS CARTAS ADAPTATIVAS	63
4.3	ESCOLHA DE UM MODELO A SER UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARTA ADAPTATIVA	68
4.4	COLETA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A OPERACIONALIZAÇÃO DO MODELO	68
4.5	APLICAÇÃO DO MODELO PARA A OBTENÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DA CARTA ADAPTATIVA	74
4.5.1	Resultados	75
4.5.2	Análise dos resultados	76
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
5.1	CONCLUSÕES	81
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS		90
	ANEXO A – MATRIZ DO QFD PARA O ESTUDO DE CASO	91
	ANEXO B – OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO ECONÔMICO.....	94
	B1 – Planilha de cálculo e otimização dos parâmetros do modelo econômico, para $k = 1$	94
	B2 – Fórmulas para as variáveis calculadas do modelo econômico, em Microsoft Excel	95
	B3 – Resultados da otimização dos parâmetros w , n , h_l e h_b , para diferentes combinações de valores iniciais e $k = 1$	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – NÚMERO DE PONTOS E TEMPO (EM HORAS) ENTRE A OCORRÊNCIA DE DOIS PONTOS FORA DE CONTROLE.....	69
TABELA 4.2 - RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO E PARÂMETROS RESULTANTES NAS CARTAS ADAPTATIVAS DE CONTROLE E CARTAS DE CONTROLE COM PARÂMETROS FIXOS, LIMITES UNILATERAIS.....	76

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – EXEMPLO DE CARTA DE CONTROLE.....	11
FIGURA 2.2 – EXEMPLO DE CARTA DE CONTROLE COM INTERVALO DE AMOSTRAGEM ADAPTATIVO.	23
FIGURA 2.3 – EXEMPLO DE CARTA DE CONTROLE PADRONIZADA COM TAMANHO DE AMOSTRA ADAPTATIVO.	27
FIGURA 2.4 – EXEMPLO DE CARTA DE CONTROLE PADRONIZADA COM INTERVALO DE AMOSTRAGEM, TAMANHO DE AMOSTRA E COEFICIENTES DOS LIMITES DE CONTROLE ADAPTATIVOS (ADAPTADO DE COSTA, 1998).....	31
FIGURA 3.1 – ESQUEMA DA MATRIZ DE QFD.	47
FIGURA 4.1 – SEMI-EIXOS HOMOCINÉTICOS.	62
FIGURA 4.2 – JUNTA HOMOCINÉTICA.	63
FIGURA 4.3 – RESULTADOS PARCIAIS DA MATRIZ QFD DO ESTUDO DE CASO.	66
FIGURA 4.4 – ÍNDICE DE PRIORIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE NO ESTUDO DE CASO.....	67
FIGURA 4.5 – EXEMPLO DE GAIOLA (DAS JUNTAS HOMOCINÉTICAS).....	68
FIGURA 4.6 – CARTA DE CONTROLE \bar{X} COM INTERVALO DE AMOSTRAGEM ADAPTATIVO, PROPOSTA PARA O ESTUDO DE CASO, PARA $k = 1$	77
FIGURA 4.7 – TEMPOS MÉDIOS ATÉ UM ALARME FALSO, PARA CARTAS ADAPTATIVAS E TRADICIONAIS, COMO FUNÇÃO DO VALOR DE K.	78
FIGURA 4.8 – TEMPOS MÉDIOS ATÉ O SINAL, PARA CARTAS ADAPTATIVAS E TRADICIONAIS, COMO FUNÇÃO DO VALOR DE K.	79
FIGURA 4.9 – CUSTOS MÉDIOS HORÁRIOS, PARA CARTAS ADAPTATIVAS E TRADICIONAIS, COMO FUNÇÃO DO VALOR DE K.....	80

RESUMO

As cartas de controle estatístico têm sido utilizadas com sucesso no monitoramento do desempenho de processos industriais. Diversas modificações nas cartas tradicionais de Shewhart vêm sendo propostas na literatura. Tais modificações visam adaptar as cartas de controle ao monitoramento de processos com características especiais; entre elas, destacam-se as cartas de controle adaptativas. As cartas são ditas adaptativas quando pelo menos um de seus parâmetros (tamanho de amostra, intervalo de amostragem e coeficiente dos limites de controle) pode variar durante o monitoramento do processo. A determinação dos valores dos parâmetros das cartas de controle pode considerar aspectos estatísticos, econômicos ou uma combinação de ambos. Os modelos estatístico-econômicos consideram, além de indicadores de desempenho estatístico, os custos associados ao controle. A implementação de cartas adaptativas baseadas neste tipo de modelo, devido a sua complexidade, é melhor conduzida por meio de uma metodologia de planejamento. Neste trabalho, após uma revisão da literatura sobre cartas tradicionais e adaptativas, incluindo o projeto econômico das mesmas, propõe-se uma metodologia para o planejamento da implementação de cartas adaptativas de controle para monitorar processos onde cartas de controle tradicionais estão sendo utilizadas. A metodologia é composta de cinco passos gerais, detalhados na dissertação, e foi elaborada a partir de um estudo de caso em uma indústria do setor automotivo, no qual se utilizou um modelo estatístico-econômico. No estudo de caso, o significado e a forma de determinação dos parâmetros do modelo econômico são detalhados. Os resultados do estudo de caso são comparados quanto aos custos operacionais para as cartas adaptativas e tradicionais de controle de processo. Os resultados obtidos indicaram ser preferível o uso de cartas adaptativas ao uso de cartas tradicionais para monitorar o processo estudado, principalmente no caso de pequenas variações na média da característica de qualidade monitorada. Embora de natureza genérica, a metodologia proposta pode ser facilmente adaptada para contemplar diferentes aplicações industriais.

ABSTRACT

Statistical control charts have been widely and successfully used for monitoring the performance of industrial processes. Several modifications on the classic Shewhart charts have been proposed in the literature; they aim at providing better tools for monitoring processes with special characteristics. One such modification is the recently developed adaptive control charts. Control charts are said to be adaptive when one or more of its parameters (sample size, sampling frequency, and control limits coefficient) are allowed to vary during process monitoring. Determination of the best set of values for the chart parameters may be based on statistical issues, economic issues or on a combination of both. Economic-statistical models consider, in addition to statistical performance indices, costs associated with the control scheme represented by the chart. Designing of charts based on such models may be a complex task, which requires a structured design methodology. This thesis presents a methodology proposal for the design of adaptive control charts to monitor processes that are currently under the supervision of traditional control charts. The proposed methodology, comprised of five main steps, was devised based on knowledge gathered in a case study from the automotive parts industry. A detailed account of the meaning and determination of input parameters to an economic-statistical model used in the design methodology is also given. A comparison of operational costs under a traditional and adaptive control scheme is presented using case study data. Results obtained favor the use of adaptive control charts for process monitoring, particularly when small deviations from the mean are relevant in the quality characteristic under analysis. Although developed from the results of a case study, the methodology steps described may be easily adapted to suit a wide range of applications.

1 INTRODUÇÃO

As cartas de controle estatístico são ferramentas de monitoramento do desempenho de processos de manufatura. Essas cartas utilizam como dados de entrada medições de variáveis que influenciam na qualidade dos itens manufaturados, como, por exemplo, espessura, circunferência, largura, densidade, etc. As medições são realizadas em pontos espaçados no tempo e registradas nas cartas, resultando em gráficos temporais que apresentam os valores de medição da variável no eixo vertical e os pontos no tempo nos quais as medições foram efetuadas no eixo horizontal. A cada medição, compara-se o resultado obtido com limites de controle: medições fora dos limites indicam a presença de causas especiais de variabilidade, anômalas ao processo, que prejudicam a qualidade do produto manufaturado. Uma vez identificadas as causas especiais, pode-se atuar sobre elas, melhorando continuamente a qualidade do produto.

As cartas de controle permitem a redução sistemática da variabilidade nas características de qualidade do produto, representadas pelas variáveis monitoradas nas cartas. Assim, melhora-se a qualidade intrínseca, a produtividade, a confiabilidade e o custo do que está sendo produzido.

As cartas de controle são ferramentas simples e eficazes e, por este motivo, muito utilizadas na prática. Segundo Montgomery (1996), existem pelo menos cinco razões para sua popularidade: (1) são uma técnica comprovada de melhoria da produtividade, (2) são eficazes na prevenção de defeitos, (3) evitam ajustes desnecessários nos processos, (4) fornecem informações confiáveis para diagnóstico sobre o desempenho dos processos e (5) fornecem informações sobre a capacidade dos processos.

A intensa utilização das cartas de controle na indústria tem motivado a realização de pesquisas que buscam o aperfeiçoamento das cartas existentes. A partir do final da década de 80, uma nova classe de cartas de controle, as chamadas *cartas adaptativas de controle*, tem sido objeto de pesquisas e publicações na área da Engenharia da Qualidade. Uma carta de controle é dita adaptativa se ao menos um de seus parâmetros – intervalo de amostragem, tamanho da amostra ou coeficiente dos limites de controle – variar durante o monitoramento do processo produtivo como função de seu desempenho observado (Montgomery, 1996; Tagaras, 1998).

Nas cartas de controle, o estado atual do processo é definido pelo valor da estatística amostral plotada na carta. A idéia básica das cartas adaptativas consiste em intensificar o controle sobre o processo quando os pontos no gráfico se aproximarem dos limites de controle, e relaxar o controle quando os pontos estiverem próximos da linha central. A intensificação ou relaxamento no controle acontece através de mudanças adequadas nos valores dos parâmetros da carta.

Cartas adaptativas de controle podem apresentar vantagens, considerando-se aspectos estatísticos e econômicos, em relação às cartas com parâmetros fixos (Tagaras, 1998). Sob o ponto de vista estatístico, pode haver uma redução no tempo médio necessário até a sinalização da ocorrência de uma causa especial. Esta redução ocorre como consequência do aumento na taxa de amostragem, através da tomada de amostras maiores e/ou mais freqüentes, nos momentos em que a carta apresentar evidências de que o processo está fora de controle. Sob o ponto de vista econômico, pode haver uma redução nos custos relacionados ao controle do processo, causada pela redução na taxa de amostragem quando a carta estiver indicando um processo sob controle.

Como consequência do melhor desempenho estatístico das cartas adaptativas, verifica-se também uma redução nos custos relacionados à produção de itens de má qualidade, diretamente relacionada à redução do tempo até a sinalização das causas especiais.

1.1 TEMA E JUSTIFICATIVA

Esta dissertação tem como tema principal o estudo das cartas adaptativas de controle de processo. Este estudo compreende um levantamento dos aspectos teóricos referentes a essas cartas, bem como o desenvolvimento de uma metodologia de planejamento para a sua implementação no controle de processos já monitorados através de cartas de controle com parâmetros fixos. A metodologia aqui proposta foi desenvolvida a partir de um estudo de caso em um processo produtivo de uma empresa de componentes automotivos.

O tema proposto nesta dissertação tem sua relevância fundamentada em alguns fatores importantes. Cartas adaptativas de controle constituem-se em desenvolvimento teórico recente, iniciado há pouco mais de uma década e, conseqüentemente, ainda pouco explorado sob diversos aspectos, principalmente aqueles relacionados à sua aplicação prática, tais como vantagens e desvantagens do uso das cartas adaptativas.

Sendo as cartas adaptativas um tema de pesquisa recente e pouco difundido no meio acadêmico e industrial, sua utilização prática ainda é pequena no Brasil, apesar de seu potencial impacto econômico no monitoramento de processos. Tal impacto econômico deve-se não somente à redução nos custos de amostragem, mas também à redução nas perdas ocasionadas pela má qualidade dos itens manufaturados, conforme mencionado anteriormente. A redução destas perdas, obtida através da sinalização mais rápida do descontrole do processo, pode ser bastante significativa, principalmente em processos onde pequenos desvios da meta estabelecida para a característica de qualidade impliquem em grandes prejuízos materiais.

Por fim, cabe mencionar que o trabalho mostra-se relevante também por auxiliar na criação de um referencial teórico-prático brasileiro no assunto.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal desta dissertação consiste em elaborar uma metodologia de implementação de cartas adaptativas a partir da investigação de aspectos práticos e teóricos relacionados ao planejamento da implementação destas cartas.

Os objetivos secundários deste trabalho são os seguintes:

- Revisar a literatura sobre cartas adaptativas de controle, suas peculiaridades e aplicações;
- Revisar a literatura sobre modelos econômicos para o planejamento de cartas de controle tradicionais e de cartas de controle adaptativas;
- Analisar modelos econômicos propostos na literatura para o projeto de cartas adaptativas, com vistas a viabilizar a sua aplicação prática;
- Realizar uma experimentação prática, através de um estudo de caso, a fim de dar subsídios ao desenvolvimento da metodologia proposta e verificar as diferenças entre a utilização de cartas adaptativas e tradicionais.

1.3 MÉTODO DE TRABALHO

Nesta seção é descrito o método de trabalho adotado para o desenvolvimento desta dissertação. O método de trabalho consiste, de acordo com Lakatos e Marconi (1991), em um conjunto de atividades sistemáticas e racionais que orientam a geração de conhecimentos válidos e verdadeiros, indicando um caminho a ser seguido.

O método de trabalho adotado foi o estudo de caso. O estudo de caso é uma estratégia de pesquisa que tem como foco o entendimento da dinâmica presente dentro de um cenário específico (Eisenhardt, 1989). Estudos de caso tipicamente combinam métodos de coleta de dados, tais como arquivos, entrevistas, questionários e observações. O conjunto de dados coletados pode ser composto de dados qualitativos ou quantitativos. Desta forma, “o estudo de caso reúne informações tão numerosas e tão detalhadas quanto possível com vistas a apreender a totalidade de uma situação.” (Bruyne *et al.*, citado por Roese, 1998 p. 191).

Segundo Eisenhardt (1989), os estudos de caso podem ser utilizados para alcançar vários objetivos: descrever uma situação, testar teorias ou gerar teorias. No que se refere à descrição de uma dada situação, utiliza-se uma experimentação prática com o objetivo de explicar como se dá a inter-relação dos seus fatores na construção de uma

realidade específica. Neste caso, é importante observar as limitações da descrição quando não se possui um referencial teórico consolidado para explicar essa realidade. De acordo com Roese (1998), parte das críticas aos estudos de caso dirigem-se, na verdade, aos trabalhos meramente descritivos, estendendo-se ao método uma crítica que deveria restringir-se a sua má utilização.

Desta forma, o segundo objetivo do estudo de caso, qual seja, o de testar teorias, pressupõe a adoção de um referencial teórico inicial para o qual se deseja comprovar a validade prática. O estudo de caso, então, é planejado e conduzido de modo a criar um cenário capaz de dar subsídios para refutar ou validar as hipóteses iniciais, ou seja, rejeitar ou aceitar as teorias. Todavia, deve-se ter em vista que o fato de um estudo de caso apresentar dados que contrariam uma teoria não a invalida, apenas lança dúvidas que suscitem novas questões (genéricas e não específicas) para referir a teoria (Roese, 1998).

Embora Eisenhardt (1989) apresente a possibilidade de gerar teorias a partir de estudos de caso (terceiro objetivo), pode-se encontrar algumas limitações. De acordo com Westbrook (citado por Macke, 1999, p. 8), embora o estudo de caso permita a integração de variáveis relevantes para o entendimento da realidade, traz consigo a dificuldade de obter generalizações válidas; isto porque os resultados alcançados estão sempre restritos ao estudo realizado. Segundo Roese (1998), um estudo de caso (ou mesmo muitos estudos sucessivos) serve especialmente para o detalhamento, para a exemplificação, para questionar a abrangência de um conceito, mas não serve por si só para gerar uma nova teoria.

Tendo em vista o exposto acima, considera-se que o estudo de caso é aplicável nesta dissertação, pelos seguintes motivos: a) está-se testando a teoria de controle de processos por meio de cartas adaptativas em uma situação prática; b) está-se descrevendo o estudo para demonstrar como os resultados foram alcançados e, c) o estudo de caso está servindo de suporte para a elaboração de uma metodologia de implementação de cartas adaptativas, que poderá ser utilizada em novas situações reais, para as quais novos estudos de caso serão necessários.

A metodologia desenvolvida neste trabalho segue os moldes descritivos, uma vez que retrata as ações tomadas para contornar os problemas que surgiram no estudo de

caso. O cenário específico, ou seja, a situação em estudo é o processo de manufatura de componentes automotivos, para o qual se propõe a utilização de cartas adaptativas de controle.

1.4 DELIMITAÇÕES

As delimitações desta dissertação referem-se à revisão da literatura e ao estudo de caso. No que diz respeito à revisão da literatura, deu-se maior ênfase à descrição e entendimento das cartas adaptativas de controle \bar{X} com intervalo de amostragem adaptativo, com tamanho de amostra adaptativo e com ambos, simultaneamente. As cartas com todos os parâmetros adaptativos (tamanho de amostra, intervalo de amostragem e coeficientes dos limites de controle) foram tratadas de forma breve, especificamente para o caso da carta \bar{X} - R. Também foram descritas brevemente as cartas adaptativas CUSUM e EWMA para o caso de intervalo de amostragem adaptativo.

Dentre o conteúdo teórico relacionado às cartas de controle adaptativas, não foram exploradas, por serem secundárias ao estudo, as:

- cartas com regras de corrida;
- cartas para atributos (por exemplo, cartas p , np , c e u), pois o foco do estudo está nas cartas de controle para variáveis;
- cartas com intervalo de amostragem e coeficiente dos limites de controle adaptativos.

No que diz respeito ao estudo de caso, por restrições de tempo e para manter a exequibilidade e o foco nos objetivos propostos, este ficou limitado ao planejamento da implementação das cartas adaptativas. O estudo de caso apresentado nesta dissertação centrou-se na definição e projeto das cartas adaptativas a serem utilizadas no monitoramento do processo selecionado. A implementação propriamente dita não foi realizada, visto que necessitaria de um prazo maior de acompanhamento e avaliação. É importante ressaltar que o projeto das cartas adaptativas não se constitui em tarefa trivial. Um projeto dessa natureza implica no levantamento e determinação de um

grande número de parâmetros, tanto dos processos quanto das cartas que porventura estejam sendo utilizadas no seu monitoramento, visando determinar planos adaptativos de amostragem que justifiquem a utilização das novas cartas.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, que se encontram estruturados da seguinte forma.

No Capítulo 1 é feita uma introdução ao assunto da dissertação, onde é fornecida uma visão global do contexto em que o trabalho está inserido e são apresentados os objetivos, justificativas, método e delimitações do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico sobre cartas de controle de processo. Na seção 2.1 são apresentados os princípios básicos de construção e operação das cartas de controle tradicionais. Também são introduzidos outros tipos de cartas de controle, como a carta para a soma acumulada (*cumulative sum control chart – CUSUM*) e a carta para a média móvel ponderada exponencialmente (*exponentially weighted moving-average control chart – EWMA*). A seção 2.2 traz uma revisão sobre as principais cartas de controle para variáveis. A seção 2.3 introduz o conceito de cartas adaptativas de controle, apresentando seus princípios básicos de operação e algumas medidas de desempenho estatístico e econômico para sua avaliação. Também é feita uma revisão da bibliografia existente sobre cartas adaptativas de controle no que se refere aos parâmetros tratados como adaptativos (intervalo de amostragem, tamanho de amostra e coeficiente dos limites de controle). A seção 2.4 trata do projeto econômico das cartas de controle, descrevendo os conceitos gerais de modelos econômicos e suposições necessárias, os tipos de custos envolvidos no controle de processos e um modelo geral para o projeto econômico. A seguir, são apresentados os modelos econômicos para cartas adaptativas, tratando-se especificamente do modelo econômico para o projeto de cartas adaptativas \bar{X} com intervalo de amostragem adaptativo.

O Capítulo 3 apresenta a proposta metodológica para o planejamento da implementação de cartas adaptativas, objetivo principal deste trabalho; esta proposta é desdobrada em cinco passos gerais, detalhados no capítulo.

O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso realizado com o objetivo de dar subsídios ao desenvolvimento da metodologia de implementação. Na seção 4.1 é feita uma breve descrição da empresa onde foi realizado o estudo. A seção 4.2 descreve como foram selecionadas as características de qualidade mais indicadas para o controle através das cartas adaptativas. A seção 4.3 trata do modelo escolhido para a determinação dos valores dos parâmetros da carta adaptativa e a seção 4.4 descreve a forma de coleta das informações necessárias para a operacionalização deste modelo. Por fim, na seção 4.5, são descritos os resultados e realizadas as análises pertinentes.

No Capítulo 5 encontram-se as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO SOBRE CARTAS DE CONTROLE DE PROCESSO

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As cartas de controle estatístico foram inicialmente desenvolvidas por Walter A. Shewhart, em 1924. Seu trabalho é considerado o início formal do controle estatístico de qualidade. O objetivo das cartas de controle é monitorar a variabilidade existente nos processos, distinguindo causas comuns (causadoras de pequenas variações aleatórias e, via de regra, inofensivas ao desempenho do processo) de causas especiais (fontes de variações significativas e não-aleatórias, que podem atuar negativamente sobre o desempenho do processo). Causas especiais devem ser identificadas e corrigidas para que o processo permaneça dentro de um padrão esperado de desempenho, ou seja, para que o processo permaneça sob controle estatístico.

Algumas cartas de controle monitoram características de qualidade que podem ser medidas e expressas em uma escala contínua de valores, como por exemplo diâmetro, comprimento, temperatura e volume. Outras cartas de controle monitoram características como o número de produtos conformes ou não-conformes (defeituosos) ou o número de não-conformidades (defeitos) em uma unidade do produto. Estas cartas, conhecidas como cartas de controle para variáveis e cartas de controle para atributos, respectivamente, são apresentadas na seqüência.

As cartas de controle para variáveis mais utilizadas são as cartas \bar{X} e R . Elas monitoram, respectivamente, a localização (através da média amostral) e a variabilidade

(através da amplitude) do processo em estudo. A variabilidade também pode ser monitorada pela carta S , que utiliza o desvio-padrão amostral. Outros tipos de cartas de controle utilizadas para monitorar a média do processo são a carta para a soma acumulada ($CUSUM$) e a carta para a média móvel ponderada exponencialmente ($EWMA$; Montgomery, 1996).

As cartas de controle para atributos são a carta p (monitora a fração de produtos não-conformes), a carta np (monitora o número de produtos não-conformes), a carta c (monitora o número de não-conformidades em uma unidade do produto) e a carta u (monitora o número médio de não-conformidades por unidade do produto) (Montgomery, 1996).

Todas as cartas de controle, independente do tipo, baseiam-se nos mesmos princípios fundamentais de construção e operação. Elas constituem-se de gráficos temporais onde pontos amostrais, com medições de uma determinada característica de qualidade, são plotados no eixo vertical; o eixo horizontal apresenta sua evolução temporal. Estes gráficos possuem uma linha central que representa a média da variável de interesse quando o processo está sob controle (ou livre de causas especiais) e duas outras linhas que representam os limites de controle do processo. Limites de controle são definidos de forma a compreender a maior parte dos valores da estatística amostral plotada, estando o processo sob controle. O processo é dito fora de controle quando algum ponto da carta cair acima do limite de controle superior ou abaixo do limite de controle inferior, ou ainda quando os pontos apresentarem um comportamento sistemático ou não aleatório atípico. Um exemplo deste comportamento pode ser uma série de pontos consecutivos ocorrendo de um mesmo lado da carta, acima ou abaixo da linha central, mesmo que nenhum ponto caia fora dos limites de controle. O conjunto de regras que determinam o que é um comportamento sistemático ou não aleatório é chamado de regras de corrida (*run rules*), sendo que a política de controle pode ou não considerá-las para monitorar o processo (Montgomery, 1996; Das *et al.*, 1997; Tagaras, 1998).

A Figura 2.1 apresenta um exemplo de uma carta de controle, obtida utilizando o pacote computacional Procep® (1999). Nessa carta, pontos além dos limites de controle

e com comportamento sistemático não-aleatório aparecem assinalados como “Causas Especiais”.

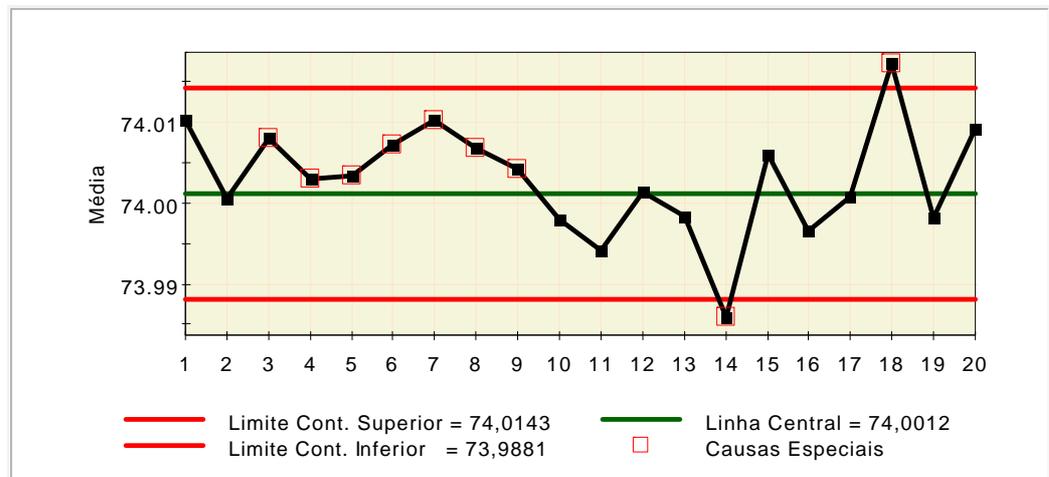


Figura 2.1 – Exemplo de carta de controle \bar{X} .

A determinação da linha central e dos limites de controle segue um modelo geral, onde W é a estatística amostral que representa a característica de qualidade de interesse, m_w é a média de W e s_w é o desvio-padrão de W . O limite de controle superior (LCS), a linha central (LC) e o limite de controle inferior (LCI) são dados por (Montgomery, 1996):

$$\text{LCS} = m_w + Ls_w$$

$$\text{LC} = m_w \tag{2.1}$$

$$\text{LCI} = m_w - Ls_w$$

onde L é a distância, em desvios-padrão, entre os limites de controle e a linha central.

Um caso específico de carta de controle deve ser utilizado quando a característica de qualidade monitorada é classificada como sendo do tipo “menor é melhor” ou “maior é melhor”. Uma característica de qualidade do tipo “menor é melhor” tem como alvo o menor valor possível, enquanto o alvo de uma característica de qualidade do tipo “maior é melhor” é o maior valor possível. Nestes casos as cartas de controle devem apresentar apenas um limite de controle: superior para o caso “menor é melhor” e inferior para o caso “maior é melhor”. A determinação do limite de controle único segue o mesmo princípio do modelo geral, apresentado na equação (2.1). As

cartas que possuem somente um limite de controle, superior ou inferior, podem ser chamadas de cartas de controle unilaterais; em contrapartida, cartas que possuem os dois limites de controle são denominadas cartas de controle bilaterais.

Além do valor de L , que determina os limites de controle, é indispensável ao planejamento de uma carta de controle a determinação do tamanho da amostra e da frequência de amostragem. Estas escolhas devem levar em consideração aspectos estatísticos como a minimização do número de alarmes falsos (sinalização da ocorrência de uma causa especial quando na verdade não houve alteração no processo) e maximização da capacidade de detecção de mudanças reais. Também podem ser considerados aspectos econômicos como o custo de amostragem, perdas pela produção de produtos de baixa qualidade e custo da localização de causas especiais, considerando aqui a localização de causas especiais como sendo o diagnóstico da causa que provocou o desvio do processo (Das *et al.*, 1997; Montgomery, 1996; Park e Reynolds, 1994).

A escolha dos limites de controle influencia diretamente as probabilidades de ocorrência dos erros tipo I e tipo II. O erro tipo I é caracterizado pela ocorrência de um alarme falso. O erro tipo II é caracterizado pela não detecção de uma situação real de processo fora de controle. Quanto mais distantes da linha central estiverem os limites, menor será a probabilidade de erro tipo I, aumentando, todavia, a probabilidade de erro tipo II. Por outro lado, aproximar os limites de controle da linha central provoca uma situação inversa, ou seja, aumento da probabilidade de erro tipo I e diminuição da probabilidade de erro tipo II.

O valor de L mais comumente utilizado em cartas de controle com vistas à determinação de limites de controle é $L = 3$, o que pode ser justificado pelos bons resultados obtidos na prática (Montgomery, 1996). No Reino Unido e em parte da Europa Ocidental, porém, utiliza-se uma probabilidade de erro tipo I igual a 0,002, o que resulta em um $L = 3,09$. Na prática, se a distribuição da característica de qualidade se aproximar da distribuição Normal, a diferença entre estas duas formas de definição dos limites de controle será muito pequena.

De acordo com Montgomery (1996), o tamanho da amostra e a frequência de amostragem devem ser definidos tendo em vista (i) o tamanho da mudança no processo que se deseja detectar mediante a utilização da carta de controle e (ii) a rapidez com que

se deseja detectar esta mudança, devendo-se considerar, em contrapartida, os custos relativos à amostragem. A situação ideal para se detectar rapidamente pequenas mudanças no processo seria a utilização de grandes amostras tomadas mais freqüentemente, o que, no entanto, tende a ser economicamente inviável. Uma prática mais adequada neste caso é a escolha entre pequenas amostras tomadas freqüentemente (política mais utilizada pela indústria) ou grandes amostras tomadas em intervalos de tempo maiores.

2.2 AS PRINCIPAIS CARTAS DE CONTROLE PARA VARIÁVEIS

Cartas de controle para variáveis são utilizadas com o objetivo de monitorar, simultaneamente, a localização e a variabilidade do processo. Para tanto, utilizam-se as cartas de controle do tipo \bar{X} e R ou \bar{X} e S . A carta \bar{X} monitora a média do processo através da plotagem no gráfico das médias de amostras de tamanho n , coletadas em intervalos de tempo h . Os limites de controle e a linha central da carta são obtidos a partir dos valores de $m_{\bar{X}} = m$ e $s_{\bar{X}} = S/\sqrt{n}$, conforme apresentado na equação (2.1). Esses parâmetros são, via de regra, desconhecidos, devendo ser estimados a partir de amostragem preliminar. Essas amostras, compostas de pelo menos 20 a 25 observações, devem ser tomadas de um processo em estado de controle estatístico (Montgomery, 1996).

A média amostral pode ser determinada a partir da expressão

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (2.2)$$

Uma estimativa de $m_{\bar{X}}$ pode ser obtida calculando a média das médias, ou seja,

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{x}_i}{k}, \quad (2.3)$$

onde k indica o número de amostras utilizadas. A estimativa de $s_{\bar{X}}$ pode ser obtida através dos desvios-padrão ou das amplitudes das k amostras. O método da amplitude é

muito utilizado devido a sua simplicidade e eficiência, principalmente no caso de amostras pequenas ($n = 4$ ou 5). Por esse método, o estimador é dado por

$$\hat{\mathbf{s}}_{\bar{x}} = \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}}, \quad (2.4)$$

onde d_2 é a média da amplitude relativa, que é uma relação entre a amplitude e o desvio-padrão de uma variável com distribuição de probabilidades normal, dada por $W = R/\mathbf{s}$, e \bar{R} é a média das amplitudes das k amostras. A partir da relação dada pela amplitude relativa, estima-se \mathbf{s} através de $\hat{\mathbf{s}} = \bar{R}/d_2$ e, conseqüentemente, $\mathbf{s}_{\bar{x}}$ é estimado pela equação (2.4). Os valores de d_2 dependem de n e são tabelados (Montgomery, 1996). A partir da estimativa de $\mathbf{s}_{\bar{x}}$, e utilizando um valor de $L = 3$, os parâmetros da carta \bar{X} são

$$\text{LCS} = \bar{\bar{x}} + \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \bar{R} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad (2.5)$$

$$\text{LC} = \bar{\bar{x}} \quad (2.6)$$

$$\text{LCI} = \bar{\bar{x}} - \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \bar{R} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \quad (2.7)$$

Os valores de $A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}}$ são tabelados para vários tamanhos de amostra; ver, por exemplo, Duncan (1986) e Montgomery (1996).

Os procedimentos para a construção da carta R , que plota as amplitudes de amostras de tamanho n , são os mesmos da carta \bar{X} . As estimativas de \mathbf{m}_R e \mathbf{s}_R são calculadas por

$$\hat{\mathbf{m}}_R = \bar{R} \quad (2.8)$$

e

$$\hat{\mathbf{s}}_R = d_3 \frac{\bar{R}}{d_2}, \quad (2.9)$$

onde d_3 é o desvio-padrão de W . Os parâmetros da carta R , para $L = 3$, são

$$\text{LCS} = \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = D_4 \bar{R} \quad (2.10)$$

$$\text{LC} = \bar{R} \quad (2.11)$$

$$\text{LCI} = \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = D_3 \bar{R} . \quad (2.12)$$

Os valores de $D_3 = 1 - 3 \frac{d_3}{d_2}$ e $D_4 = 1 + 3 \frac{d_3}{d_2}$ também encontram-se tabelados; ver Duncan (1986).

Segundo Montgomery (1996), a carta \bar{X} é bastante efetiva para detectar grandes mudanças na média do processo, em geral a partir de $1,5\sigma$ a 2σ . Quando mudanças menores precisam ser detectadas com rapidez, outros modelos de cartas de controle surgem como alternativas. Entre elas, destacam-se a *CUSUM* e a *EWMA*.

A carta *CUSUM* plota a soma acumulada dos desvios entre os valores amostrais e o valor alvo. Desta forma, ela incorpora toda a informação presente na seqüência de amostras. O valor

$$c_i = \sum_{j=1}^i (\bar{x}_j - m_0) \quad (2.13)$$

é a soma acumulada até a amostra i ; \bar{x}_j é a média da j -ésima amostra e m_0 é o alvo para a média do processo. Não havendo mudanças na média, os valores de C apresentam um comportamento aleatório em torno de zero. Se, por outro lado, a média do processo mudar para algum valor $m_1 \neq m_0$, os valores de C apresentarão uma certa tendência; esta será crescente se $m_1 > m_0$, ou decrescente se $m_1 < m_0$. A carta *CUSUM* é particularmente eficaz para monitorar observações individuais ($n = 1$), situação na qual seu uso é mais freqüente, podendo também ser aplicada a outras variáveis, além da média amostral.

Outra alternativa para aprimorar a detecção de pequenas mudanças na média do processo é a carta de controle para a média móvel ponderada exponencialmente (*EWMA*). Assim como a carta *CUSUM*, a carta *EWMA* é freqüentemente utilizada com observações individuais. Neste caso, o valor plotado na carta é (Montgomery, 1996)

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) z_{i-1} \quad (2.14)$$

onde $0 < \lambda \leq 1$ é uma constante que determina o peso dado à observação atual, e x_i é o valor observado na amostra i . O valor inicial z_0 , que deve ser utilizado junto com a observação x_1 , pode ser o valor alvo do processo ($z_0 = \mathbf{m}_0$) ou a média de observações preliminares ($z_0 = \bar{x}$).

Examinando a equação (2.14), é possível verificar que a carta *EWMA* permite favorecer pontos coletados mais recentemente do processo, dando-lhes maior peso de importância. Desta forma, mudanças ocorridas no processo passariam a ser detectadas com maior rapidez; em contrapartida, a carta tornaria-se mais vulnerável à ocorrência de alarmes falsos.

2.3 *CARTAS ADAPTATIVAS DE CONTROLE*

Por ser uma das ferramentas da Engenharia da Qualidade mais utilizadas na indústria, o Controle Estatístico de Processo (CEP) tem sido objeto frequente de interesse em pesquisa acadêmica. A partir do final dos anos 80, o estudo de uma nova classe de cartas de controle, as cartas adaptativas, tem sido amplamente divulgado na literatura especializada. As cartas adaptativas permitem parâmetros variáveis, definidos de acordo com o estado atual do processo, o qual é determinado pelo valor da estatística amostral plotada na carta. Os parâmetros “adaptáveis” nessas cartas compreendem (Tagaras, 1998): (i) a frequência de amostragem, (ii) o tamanho da amostra, e (iii) o coeficiente dos limites de controle. A mudança nos valores dos parâmetros ocorre em tempo real, durante o monitoramento do processo.

O princípio de funcionamento das cartas adaptativas pode ser assim descrito: suponha uma carta de controle com estatísticas (pontos) amostrais plotadas em uma região entre limites de advertência (situados entre a linha central da carta e os limites usuais de controle) e os limites $\mathbf{m}_w \pm L\mathbf{S}_w$ de controle. Por encontrarem-se nessa região, chamada de região de advertência, esses pontos amostrais levam à suspeita de que o processo possa ter-se deslocado para um estado fora de controle. Neste caso, é razoável tomar-se uma nova amostra de maior tamanho e/ou após um intervalo menor

de tempo, podendo também ser utilizado um valor menor para L . Se, ao contrário, a estatística for plotada em uma região mais próxima à linha central da carta, toma-se uma nova amostra de menor tamanho e/ou após um intervalo maior de tempo, podendo, neste caso, ser utilizado um valor maior para L . Espera-se com isso uma redução (i) no tempo médio até a sinalização de uma causa especial e (ii) no custo médio de inspeção, enquanto o processo estiver sob controle.

Teoricamente, a área entre os limites de controle pode ser dividida em uma região central e múltiplas regiões de advertência. Por exemplo, uma primeira região de advertência pode ser formada pela região entre os limites dados por $\mathbf{m}_w - 1\mathbf{s}_w$ e $\mathbf{m}_w + 1\mathbf{s}_w$, e outros limites de advertência, dados por $\mathbf{m}_w - 2\mathbf{s}_w$ e $\mathbf{m}_w + 2\mathbf{s}_w$. Uma segunda região de advertência, neste exemplo, pode ser formada pela região entre os limites de advertência $\mathbf{m}_w - 2\mathbf{s}_w$ e $\mathbf{m}_w + 2\mathbf{s}_w$ e os limites usuais de controle. Aqui \mathbf{m}_w denota a média da estatística amostral W e \mathbf{s}_w seu desvio-padrão. A região central da carta é a região localizada entre os primeiros limites de advertência. Cada região corresponderia a um conjunto diferente de valores para os parâmetros da carta. Assim, cada vez que um ponto é plotado em uma dessas regiões, uma dentre múltiplas combinações dos valores de n (tamanho da amostra), h (intervalo entre as amostras) e L (coeficiente dos limites de controle) seria escolhida para a seleção da próxima amostra.

Apesar da possibilidade de utilização destas múltiplas combinações, diversos trabalhos sobre cartas adaptativas, como Reynolds *et al.* (1988), Reynolds (1989), Reynolds e Arnold (1989), Runger e Pignatiello (1991) e Reynolds (1995), demonstraram que o uso de somente dois conjuntos de valores dos parâmetros n , h e L , um valor mínimo e um valor máximo, produz melhores resultados em termos da minimização do tempo médio até a sinalização de uma causa especial. Tal simplificação do procedimento adaptativo facilita bastante a aplicação prática dessas cartas.

O conceito de parâmetros adaptativos tem sido aplicado à maior parte das cartas de controle de processo constantes na literatura. Tagaras (1998) traz uma extensa compilação de trabalhos publicados sobre o assunto até o ano de 1997. Segundo esse autor, o maior número de publicações por tipo de carta adaptativa concentra-se nas cartas \bar{X} tradicionais de Shewhart, bem como em outras cartas para a média como as

cartas *CUSUM* e *EWMA*. Quanto aos parâmetros adaptativos investigados, a maior parte das publicações estuda o efeito de modificações no intervalo entre as amostras h , seguido do tamanho da amostra n e destes dois parâmetros, h e n , modificados em conjunto. Nenhum dos trabalhos sobre cartas adaptativas para médias citados por Tagaras (1998) investiga o efeito de modificações no coeficiente dos limites de controle L . Todavia, Costa (1998) apresenta uma análise conjunta das cartas \bar{X} e R , onde os três parâmetros, n , h e L , são tratados como adaptativos.

A avaliação e comparação de diferentes tipos de cartas adaptativas é feita mediante a utilização de indicadores de desempenho estatísticos e econômicos. O indicador estatístico mais utilizado é o Tamanho Médio de Corrida (ARL – *Average Run Length*), definido como o número médio de amostras coletadas antes da carta sinalizar um estado fora de controle ou emitir um alarme falso. O ARL é adequado para comparação entre cartas onde o intervalo entre amostras é fixo e idêntico. Como esta condição não é válida para cartas adaptativas, onde um intervalo adaptativo entre amostras é bastante comum, outros indicadores de desempenho foram desenvolvidos.

Reynolds *et al.* (1988) introduziram dois indicadores de desempenho para cartas adaptativas, posteriormente adotados por diversos autores, e apresentados a seguir. O primeiro desses indicadores, o Número Médio de Amostras até o Sinal (ANSS – *Average Number of Samples to Signal*), é definido como o número esperado de amostras tomadas entre o início do processo (ou a partir da ocorrência de uma mudança no mesmo) e o momento em que a carta sinaliza um estado fora de controle. Este indicador é tratado em Das *et al.* (1997) como o número esperado de amostras coletadas entre a ocorrência de uma mudança no processo e o momento em que a carta sinaliza um estado fora de controle; ou seja, é o número médio de amostras estando o processo fora de controle, definição esta que será adotada no modelo econômico apresentado na seção 2.4.2. Embora o ANSS e o ARL compartilhem da mesma definição, o ARL está tradicionalmente relacionado ao número de amostras coletadas e ao tempo transcorrido até o sinal, não sendo, assim, adequados às cartas adaptativas, onde estes dois conceitos devem ser tratados separadamente.

Mantendo os limites de controle fixos, a probabilidade q de um ponto amostral estar além dos limites de controle independe do intervalo entre amostras ser fixo ou

variável. Assim, não ocorrendo mudanças no processo, a variável aleatória N , que representa o número de amostras até o sinal, apresenta uma distribuição geométrica com parâmetro q . Logo, o ANSS pode ser definido como (Reynolds *et al.*, 1988)

$$\text{ANSS} = E(N) = 1/q. \quad (2.15)$$

O segundo indicador proposto por Reynolds *et al.* (1988) é o Tempo Médio até o Sinal (ATS – *Average Time to Signal*), que corresponde ao tempo esperado entre o início do processo e o momento em que a carta emite um sinal. Se o estado do processo permanecer inalterado, os intervalos entre as amostras h_1, h_2, \dots serão independentes e identicamente distribuídos (iid), e o ATS será definido por

$$\text{ATS} = E(N).E(H) = \text{ANSS}.E(H), \quad (2.16)$$

supondo que h_1 (intervalo entre o início do processo e o momento da seleção da primeira amostra) tenha a mesma distribuição dos outros h_i 's.

O ATS possui uma importante restrição de ordem prática, dada pela suposição de que o processo inicia em um determinado estado e segue sempre neste mesmo estado. Na realidade, o processo inicia sob controle e então passa, em algum momento no tempo, para um estado fora de controle. Uma maneira de trabalhar com esta restrição é diferenciar o cálculo do ATS nas duas situações existentes. Assim, na primeira situação, o ATS_1 é o tempo esperado entre o início do processo e o momento em que a carta emite um sinal, estando o processo ainda sob controle. Neste caso, o sinal emitido pela carta representa um alarme falso. Na segunda situação, o ATS_2 é o tempo esperado entre a ocorrência de uma mudança no processo até a carta sinalizar, corretamente, o estado fora de controle. Reynolds *et al.* (1988) introduziram o indicador Tempo Médio Ajustado até o Sinal (AATS – *Adjusted Average Time to Signal*), ou ATS ajustado, que na verdade é o mesmo ATS_2 . No caso de uma carta adaptativa com H variável e L fixo, o AATS (ou ATS_2) é

$$\text{AATS} = E(Y) + E(H)(\text{ANSS} - 1), \quad (2.17)$$

onde Y é o intervalo de tempo entre a mudança no processo e a próxima amostra.

Outros indicadores de desempenho estatístico utilizados para as cartas adaptativas são:

- Número Médio de Observações até o Sinal (ANOS – *Average Number of Observations to Signal*), definido como o número esperado de itens inspecionados entre o início do processo (ou a ocorrência de uma causa especial) e o momento em que a carta emite um sinal. Este indicador foi simultaneamente apresentado por Costa (1994) e Park e Reynolds (1994) para análise de cartas adaptativas onde o tamanho da amostra n é variável. Sua fórmula é dada por

$$\text{ANOS} = E(n) \cdot \text{ANSS}. \quad (2.18)$$

O indicador de desempenho ANOS pode ser aplicado a cartas com coeficiente de limites de controle L fixo e processo sem mudanças de estado. O indicador também supõe que o primeiro tamanho de amostra n_1 tem a mesma distribuição de probabilidade dos demais n_i 's. Quando n_1 é definido “a priori”, sua fórmula de cálculo é

$$\text{ANOS} = n_1 + E(n) \cdot (\text{ANSS} - 1). \quad (2.19)$$

- Número Médio de Trocas (ANSW – *Average Number of Switches*), definido como o número esperado de trocas entre os diferentes valores dos parâmetros adaptativos, entre o início do processo e a sinalização da carta. Este indicador foi proposto por Amin e Letsinger (1991) para o caso de cartas com o intervalo de amostragem adaptativo, sendo dado por:

$$\text{ANSW} = \frac{\text{ARL}}{\text{ANSSW}}, \quad (2.20)$$

onde o ANSSW (*Average Number of Samples until a Switch*) é o número médio de amostras até a troca. Dado que o número de amostras até a troca (NSSW – *Number of Samples until a Switch*) segue uma distribuição geométrica, com parâmetro $p = P(\text{troca})$, o ANSSW é definido por

$$\text{ANSSW} = \frac{1}{P(\text{troca})}. \quad (2.21)$$

- Taxa Média de Trocas (ASWR – *Average Switching Rate*), definido como o número esperado de trocas entre os diferentes valores dos parâmetros adaptativos entre o início do processo e a sinalização da carta, dividido pelo número médio de amostras até o sinal.

$$ASWR = \frac{ANSW}{ANSS}. \quad (2.22)$$

O objetivo destes dois últimos indicadores é controlar a ocorrência de um número muito grande de trocas nos valores dos parâmetros, o que é indesejável sob o ponto de vista da aplicação prática das cartas adaptativas.

Além dos critérios estatísticos, as cartas de controle adaptativas também podem ser avaliadas por critérios econômicos, tendo como base os custos associados ao controle estatístico de processos. Os seguintes indicadores de desempenho econômico têm sido adotados em trabalhos sobre cartas adaptativas (Das *et al.*, 1997; Prabhu *et al.*, 1997):

- Custo Esperado Total (ETC – *Expected Total Cost*), definido como o valor total esperado dos custos relacionados ao controle do processo, para uma produção de tamanho especificado e finito.
- Custo Esperado por Unidade de Tempo (ECTU – *Expected Cost per Time Unit*), definido como o valor esperado dos custos relacionados ao controle do processo por unidade de tempo.

O ECTU é especialmente indicado quando o processo de produção opera continuamente e por um tempo praticamente infinito. Para produções curtas de tamanho pré-determinado, a utilização de uma ou de outra medida para avaliar o desempenho econômico das cartas é indiferente. Neste caso as duas medidas são proporcionais, sendo a constante de proporcionalidade igual à duração do ciclo de produção.

2.3.1 Cartas com Intervalo de Amostragem Adaptativo

- *Carta Adaptativa \bar{X}*

A carta adaptativa \bar{X} com intervalo de amostragem adaptativo tem sido bastante estudada, e seus princípios apresentados em publicações como as de Reynolds *et al.*

(1988), Reynolds e Arnold (1989), Reynolds (1989), Runger e Pignatiello (1991), Runger e Montgomery (1993), Amin e Miller (1993), Reynolds (1995), Reynolds *et al.* (1996), Reynolds (1996^a) e Reynolds (1996^b).

O funcionamento da carta adaptativa \bar{X} pode ser assim descrito: suponha uma característica de qualidade seguindo uma distribuição Normal com média m e variância conhecida s^2 , onde m_0 é o valor alvo para a média. A linha central da carta é dada por m_0 e os limites de controle por $m_0 \pm Ls/\sqrt{n}$. A área entre os limites de controle é dividida em r regiões I_1, I_2, \dots, I_r , cada uma delas correspondendo a um certo intervalo de amostragem h . Se a média da amostra i (\bar{x}_i) cair em uma determinada região I_j , então a amostra $i + 1$ será tomada após um intervalo h_j .

O menor intervalo de amostragem possível, h_{\min} , é determinado levando em conta considerações físicas como o tempo mínimo necessário para se tomar uma amostra. O maior intervalo de amostragem possível, h_{\max} , corresponde ao maior intervalo de tempo para o qual os engenheiros consideram razoável deixar o processo sem amostragem. Ainda que possível, a utilização de r intervalos diferentes para casos onde a média do processo está em um valor $m \neq m_0$ resulta em um índice de desempenho ATS_2 maior do que utilizando somente dois intervalos de amostragem, h_{\min} e h_{\max} ; ver Reynolds *et al.* (1988), Reynolds e Arnold (1989), Reynolds (1989), Runger e Pignatiello (1991) e Reynolds (1995). Conforme esses autores, uma política ótima de amostragem é dada por

$$h_{\min} \text{ quando } \begin{cases} m_0 - L \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \bar{x} < m_0 - w \frac{s}{\sqrt{n}} \\ m_0 + w \frac{s}{\sqrt{n}} < \bar{x} \leq m_0 + L \frac{s}{\sqrt{n}} \end{cases} \text{ ou } \begin{cases} m_0 - L \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \bar{x} < m_0 - w \frac{s}{\sqrt{n}} \\ m_0 + w \frac{s}{\sqrt{n}} < \bar{x} \leq m_0 + L \frac{s}{\sqrt{n}} \end{cases} \quad (2.23)$$

$$h_{\max} \text{ quando } m_0 - w \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \bar{x} \leq m_0 + w \frac{s}{\sqrt{n}}$$

onde w é um parâmetro, escolhido convenientemente, que divide a área entre os limites de controle em uma região central e duas regiões de advertência, próximas aos limites de controle (ver exemplo na Figura 2.2).

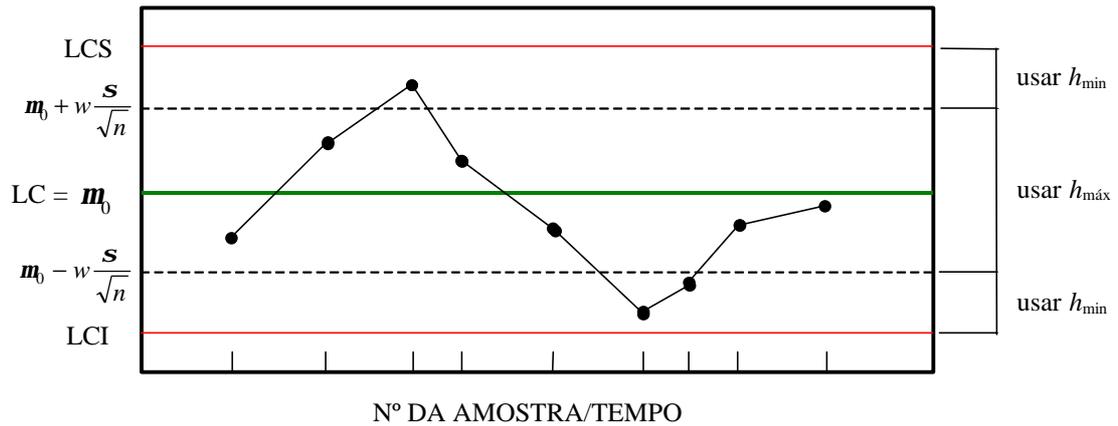


Figura 2.2 – Exemplo de carta de controle com intervalo de amostragem adaptativo.

O valor de w pode ser calculado de forma a permitir que o desempenho da carta adaptativa seja comparado ao desempenho de uma carta com intervalo de amostragem fixo. Para tanto, as duas cartas devem estar “emparelhadas”, ou seja, devem ter o mesmo ANSS, o mesmo ATS_1 e a mesma taxa de amostragem, quando $m = m_0$. O mesmo valor de ANSS é obtido usando-se o mesmo coeficiente dos limites de controle L . O valor do ATS_1 depende dos intervalos de amostragem e do valor de w utilizados. Se o intervalo da carta fixa é h_f , os intervalos da carta adaptativa devem satisfazer a condição $E(H) = h_f$. Assim, sendo utilizados dois intervalos de amostragem para a carta adaptativa, denotados por h_b (intervalo breve) e h_l (intervalo longo), e sendo a média amostral normalmente distribuída, w pode ser calculado por

$$w = \Phi^{-1} \left[\frac{2\Phi(L)(h_f - h_b) + h_l - h_f}{2(h_l - h_b)} \right] \quad (2.24)$$

onde $\Phi(\cdot)$ é a função de distribuição da normal padrão e $h_b < h_f < h_l$. Se o intervalo da carta fixa é definido como sendo igual a uma unidade de tempo ($h_f = 1$, o que é uma prática conveniente), então $E(H) = 1$, e a expressão em (2.24) é reescrita como

$$w = \Phi^{-1} \left[\frac{2\Phi(L)(1 - h_b) + h_l - 1}{2(h_l - h_b)} \right]. \quad (2.25)$$

Esta forma de emparelhamento permite que os valores do ATS_2 para as duas cartas sejam comparados para diversos valores de $m_1 \neq m_0$, para determinar qual delas detecta

melhor uma mudança em \mathbf{m} . É conveniente expressar a mudança de \mathbf{m}_0 para \mathbf{m}_1 em termos de desvios-padrão do processo, ou seja, considerar $\mathbf{m}_1 = \mathbf{m}_0 + k\mathbf{s}$ e então calcular os valores de ATS_2 como funções de k .

- *Cartas Adaptativas CUSUM e EWMA*

A utilização de uma carta \bar{X} para a soma acumulada com intervalo de amostragem adaptativo foi introduzida por Reynolds *et al.* (1990). A carta proposta por esses autores segue os mesmos conceitos e suposições utilizados por Reynolds *et al.* (1988) para a carta adaptativa \bar{X} de Shewhart, utilizando dois valores para o intervalo de amostragem, um intervalo breve ($h_b = h_{\min}$) e um intervalo longo (h_l), não necessariamente igual a h_{\max} (o maior intervalo possível). A carta *CUSUM* adaptativa também foi estudada por Amin e Letsinger (1991), Reynolds (1995) e Reynolds (1996^b).

As estatísticas utilizadas na carta adaptativa *CUSUM* para detectar, respectivamente, um aumento (carta unilateral superior) ou uma redução (carta unilateral inferior) na média do processo, são as seguintes:

$$U_i = \max\{U_{i-1}, 0\} + (z_i - k_r) \quad \text{e} \quad (2.26)$$

$$L_i = \min\{L_{i-1}, 0\} + (z_i + k_r), \quad (2.27)$$

onde $z_i = \frac{\bar{x}_i - \mathbf{m}_0}{\mathbf{s}/\sqrt{n}}$ é o valor padronizado da média amostral e $k_r \geq 0$ é um parâmetro da

carta, que pode ser escolhido para tornar a mesma sensível a determinados tamanhos de mudança na média do processo. Valores pequenos de k_r tornam a carta sensível a pequenas mudanças na média e valores grandes de k_r tornam a carta sensível a grandes mudanças. Segundo Reynolds (1996^b), o melhor valor de k_r para detectar uma mudança

de \mathbf{m}_0 para \mathbf{m}_1 é aproximadamente $k_r = r/2$, onde $r = \frac{\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_0}{\mathbf{s}/\sqrt{n}}$ é a mudança em termos

do desvio-padrão da média. Os valores iniciais para as estatísticas definidas nas

equações (2.26) e (2.27), U_0 e L_0 , são freqüentemente escolhidos como iguais a zero (Amin e Letsinger, 1991).

O funcionamento da carta adaptativa *CUSUM* com intervalo de amostragem adaptativo, utilizando dois intervalos de amostragem, é o seguinte (Reynolds *et al.*, 1990):

$$\text{se } \begin{cases} U_i > H, \text{ então sinalize um estado fora de controle} \\ G < U_i \leq H, \text{ então use } h_{i+1} = h_b \\ U_i \leq G, \text{ então use } h_{i+1} = h_l \end{cases}, \quad (2.28)$$

para o caso unilateral superior, e

$$\text{se } \begin{cases} L_i < -H, \text{ então sinalize um estado fora de controle} \\ -H \leq L_i < -G, \text{ então use } h_{i+1} = h_b \\ L_i \geq -G, \text{ então use } h_{i+1} = h_l \end{cases}, \quad (2.29)$$

para o caso unilateral inferior. $H \geq 0$ é o parâmetro de decisão para a sinalização da carta e G define o limite entre as regiões de utilização dos dois intervalos de amostragem. A carta de controle bilateral é construída utilizando, simultaneamente, as duas estratégias unilaterais.

O primeiro trabalho que apresentou as propriedades e o desempenho da carta \bar{X} para a média móvel ponderada exponencialmente (*EWMA*) com o intervalo de amostragem adaptativo foi Saccucci *et al.* (1992). Antes disso, Amin e Letsinger (1991) haviam estudado a freqüência de mudança entre os dois valores de intervalo de amostragem, para o caso da carta *EWMA*. Outros trabalhos sobre a carta adaptativa do tipo *EWMA* incluem Reynolds (1995), Baxley (1995) e Reynolds (1996^a e 1996^b).

2.3.2 Cartas com Tamanho de Amostra Adaptativo

- *Carta Adaptativa \bar{X}*

A carta de controle \bar{X} com o tamanho de amostra adaptativo é objeto de estudo nos trabalhos de Prabhu *et al.* (1993), Costa (1994), Flaig (1991) e Park e Reynolds

(1994). A operação desta carta segue o mesmo princípio das cartas com intervalo de amostragem adaptativo. Com exceção do trabalho de Flaig (1991), onde a utilização de três possíveis tamanhos de amostra é proposta, as publicações consideram o uso de uma carta com dois tamanhos de amostra, denotados por n_p (amostra pequena) e n_g (amostra grande). A mudança de um tamanho para outro é definida pela existência de uma região central e duas regiões de advertência, delimitadas pelo coeficiente w . Desta forma, a política de amostragem para a carta \bar{X} com o tamanho de amostra adaptativo é, para a amostra $i + 1$, dada por

$$\begin{aligned}
 & n_g \text{ quando } \begin{cases} \mathbf{m}_0 - L \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}} \leq \bar{x} < \mathbf{m}_0 - w \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}} \\ \text{ou} \\ \mathbf{m}_0 + w \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}} < \bar{x} \leq \mathbf{m}_0 + L \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}}, \end{cases} \\
 & n_p \text{ quando } \mathbf{m}_0 - w \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}} \leq \bar{x} \leq \mathbf{m}_0 + w \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}}
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

onde n_i é o tamanho da amostra i ($i = 1, 2, 3, \dots$).

Um inconveniente na utilização do esquema acima é que a mudança no tamanho de amostra implica em mudança nos limites de advertência e de controle da carta, visto que a razão $\frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}}$ varia. Isto faz com que a carta de controle tenha dois conjuntos de limites de advertência e de controle, dificultando sua leitura. Uma maneira de evitar problemas de interpretação é padronizar os valores plotados na carta, ou seja, plotar os valores de $z_i = \frac{\bar{x} - \mathbf{m}}{\mathbf{S}/\sqrt{n_i}}$, garantindo que os limites de advertência e de controle permaneçam fixos em $\pm w$ e $\pm L$, respectivamente (ver exemplo na Figura 2.3). Assim, a política de amostragem, para a amostra $i + 1$, toma a seguinte forma

$$\begin{aligned}
 & n_g \text{ quando } \begin{cases} -L \leq z_i < -w \\ \text{ou} \\ w < z_i \leq L \end{cases} \\
 & n_p \text{ quando } -w \leq z_i \leq w
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

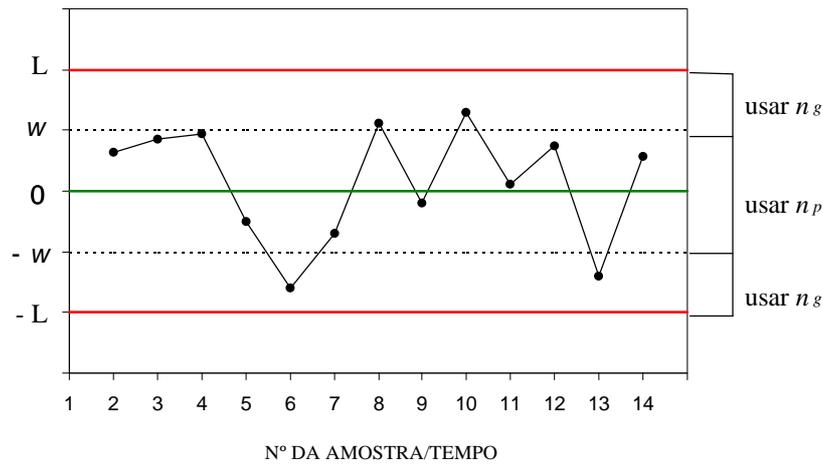


Figura 2.3 – Exemplo de carta de controle padronizada com tamanho de amostra adaptativo.

A comparação entre esta carta e outros tipos de cartas de controle, como a carta \bar{X} de Shewhart com parâmetros fixos e a carta \bar{X} de Shewhart com intervalo de amostragem adaptativo, é feita emparelhando-se a medida de desempenho ARL (ou o ATS_1 no caso de cartas com intervalo adaptativo) e o tamanho de amostra fixo (n_f) ou médio ($E(n)$) quando $m = m_0$. Assim, o desempenho das cartas pode ser comparado para diferentes valores de $m_1 \neq m_0$. Aqui, como no caso da comparação entre a carta com intervalo de amostragem adaptativo e a carta com parâmetros fixos, é conveniente expressar a mudança de m_0 para m_1 em termos de desvios-padrão do processo e, então, calcular os valores de ARL (ou ATS_2) e de ANOS como funções de k .

Prabhu *et al.* (1993) apresentam uma discussão sobre esta comparação. Resumidamente, o coeficiente dos limites de advertência (w) para a comparação entre a carta de controle com tamanho de amostra adaptativo e a carta de controle com parâmetros fixos é calculado de forma similar à Equação (2.24), utilizando-se no lugar de h_b , h_l e h_f os tamanhos de amostra n_g , n_p e n_f , respectivamente. Assim, w é dado por

$$w = \Phi^{-1} \left[\frac{2\Phi(L)(n_f - n_g) + n_p - n_f}{2(n_p - n_g)} \right]. \quad (2.32)$$

2.3.3 Cartas com Intervalo de Amostragem e Tamanho de Amostra Adaptativos

- *Carta Adaptativa \bar{X}*

A carta \bar{X} com os parâmetros h e n adaptativos, introduzida por Prabhu *et al.* (1994), utiliza dois intervalos de amostragem (h_b e h_l) e dois tamanhos de amostra (n_p e n_g). O coeficiente dos limites de controle é mantido fixo e as duas regiões de advertência são delimitadas pelo coeficiente w . A política de amostragem adotada é utilizar, na amostra $i + 1$:

$$(h_b, n_g) \text{ quando } \begin{cases} \mathbf{m}_0 - L \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}} \leq \bar{x} < \mathbf{m}_0 - w \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}} \\ \text{ou} \\ \mathbf{m}_0 + w \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}} < \bar{x} \leq \mathbf{m}_0 + L \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}}. \end{cases} \quad (2.33)$$

$$(h_l, n_p) \text{ quando } \mathbf{m}_0 - w \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}} \leq \bar{x} \leq \mathbf{m}_0 + w \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{n_i}}$$

Analogamente à carta \bar{X} com tamanho de amostra adaptativo, é conveniente a representação da carta \bar{X} com parâmetros h e n adaptativos na forma padronizada. Para comparar o desempenho da carta \bar{X} , com h e n adaptativos, com as cartas tradicionais de Shewhart (parâmetros fixos), \bar{X} com h adaptativo e \bar{X} com n adaptativo, Prabhu *et al.* (1994) propõem que o tamanho médio de amostra e o intervalo médio de amostragem da carta adaptativa sejam iguais ao tamanho de amostra e intervalo de amostragem da carta com parâmetros fixos, quando $\mathbf{m} = \mathbf{m}_0$. Ou seja, $E(H) = h_f$ e $E(n) = n_f$, fazendo com que as cartas tenham o mesmo ATS_1 e ANOS quando o processo estiver sob controle. Para isso, o coeficiente dos limites de advertência (w) é escolhido atendendo-se, simultaneamente, às equações (2.24) e (2.32). O valor de w pode ser determinado a partir da seleção de um par de tamanhos de amostra ou de intervalos de amostragem – (n_p, n_g) ou (h_b, h_l) – e de um dos valores do outro par. Os autores sugerem

selecionar os dois tamanhos de amostra e o intervalo de amostragem h_b , calculando então o intervalo h_l por

$$h_l = \frac{h_f(n_p - n_g) - b - h_b c}{n_p - n_g - c}, \quad (2.34)$$

onde $b = 2(h_f - h_b)(n_p - n_g)\Phi(LCS)$ e $c = 2(n_f - n_g)\Phi(LCS) + (n_p - n_f)$.

O trabalho de Costa (1997), também sobre cartas \bar{X} com h e n adaptativos, utilizou o mesmo princípio de funcionamento apresentado acima. Com a suposição de que o processo inicia sob controle e permanece neste estado, por um tempo exponencialmente distribuído, até a ocorrência de uma causa especial, o autor propôs a utilização de uma Cadeia de Markov para calcular a medida de desempenho AATS. Costa (1997) comparou o AATS da carta com tamanho de amostra e intervalo de amostragem adaptativos com o AATS das cartas que consideram estes parâmetros adaptativos de forma individual e com o AATS de cartas com parâmetros fixos.

2.3.4 Cartas com Intervalo de Amostragem, Tamanho de Amostra e Coeficiente dos Limites de Controle Adaptativos

- *Cartas Adaptativas \bar{X} e R*

Costa (1998) propõe o uso conjunto das cartas $\bar{X}-R$ adaptativas. Nesta proposta, todos os parâmetros – intervalo de amostragem, tamanho da amostra e coeficiente dos limites de controle – são considerados adaptativos, variando entre dois possíveis valores (um valor máximo e um valor mínimo).

Estas cartas utilizam o seguinte esquema de funcionamento. Se um ponto cair na região próxima aos limites de controle da carta \bar{X} ou da carta R , então o controle é intensificado através da utilização de h_{\min} , n_{\max} e L_{\min} em ambas as cartas. Se, por outro lado, o ponto cair na região próxima à linha central da carta \bar{X} e da carta R , então o controle é relaxado através da utilização de h_{\max} , n_{\min} e L_{\max} , também em ambas as cartas.

Assim como nas cartas $\bar{X}-R$ com parâmetros fixos, as cartas adaptativas propostas por Costa (1998) sinalizam um estado fora de controle quando um ponto for plotado fora dos limites de controle, em pelo menos uma das duas cartas (\bar{X} ou R). Estas cartas são utilizadas para monitorar processos cujas observações da característica de qualidade de interesse, X , são independentes e normalmente distribuídas com média \mathbf{m} e desvio-padrão \mathbf{s} . Assume-se que o processo inicia-se sob controle, com $\mathbf{m} = \mathbf{m}_0$ e $\mathbf{s} = \mathbf{s}_0$, e, em algum momento, passa para um estado fora de controle, com uma mudança na média, para $\mathbf{m}_1 = \mathbf{m}_0 + k\mathbf{s}$, com $k > 0$, ou no desvio-padrão, para $\mathbf{s}_1 = p\mathbf{s}_0$, com $p > 1$.

Os limites de controle e advertência para a carta \bar{X} , na amostra $i + 1$, são dados por $\mathbf{m}_0 \pm L_i \frac{\mathbf{s}}{\sqrt{n_i}}$ e $\mathbf{m}_0 \pm w_i \frac{\mathbf{s}}{\sqrt{n_i}}$, respectivamente. Para a carta R , os limites de controle e advertência são $L_{R_i} \mathbf{s}$ e $w_{R_i} \mathbf{s}$, respectivamente. Em ambos os casos, o tamanho de amostra assume os valores n_p e n_g .

Para evitar a plotagem de dois conjuntos de limites de advertência e de controle ou a utilização de duas cartas \bar{X} e duas cartas R , uma para cada tamanho de amostra, Costa (1998) sugere o uso de uma carta com duas escalas, uma do lado esquerdo e outra do lado direito, para que esses limites coincidam graficamente. Todavia, ao ajustar as escalas para coincidir os limites de advertência, os limites de controle não coincidirão, e vice-versa. Para solucionar este problema, Costa (1998) sugere que uma das escalas não seja contínua. A Figura 2.4 apresenta um exemplo da carta \bar{X} com a quebra de continuidade na região de advertência na escala da esquerda. A carta R segue o mesmo modelo, devendo-se somente substituir os limites de advertência e de controle pelos respectivos valores de L_{R_i} e w_{R_i} nas escalas da direita e da esquerda.

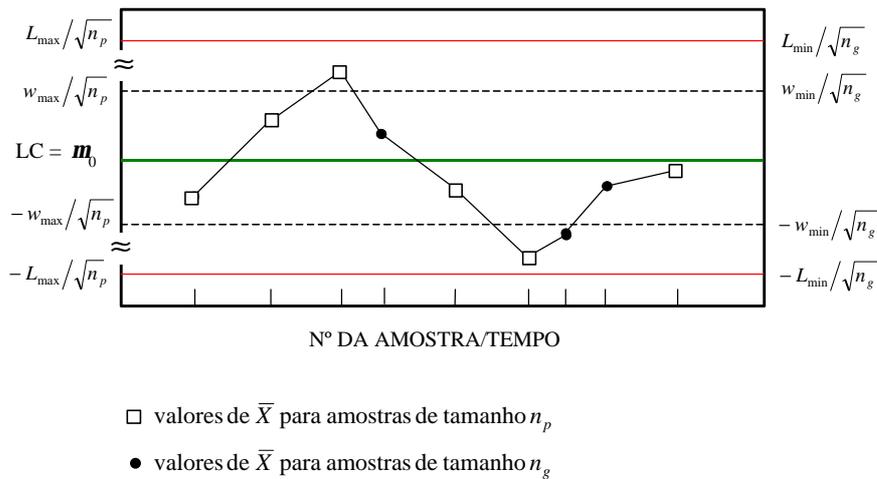


Figura 2.4 – Exemplo de carta de controle padronizada com intervalo de amostragem, tamanho de amostra e coeficientes dos limites de controle adaptativos (Adaptado de Costa, 1998).

2.4 PROJETO ECONÔMICO DAS CARTAS DE CONTROLE

2.4.1 Modelo econômico geral

O projeto de cartas de controle consiste na determinação do plano de amostragem (isto é, tamanho de amostra e frequência de amostragem) a ser utilizado no monitoramento da característica da qualidade de interesse, bem como na determinação de limites adequados de controle, tendo em vista os erros de tipo I e II admissíveis (Montgomery, 1996). Tradicionalmente, este projeto considera apenas aspectos estatísticos. No entanto, os diversos custos associados à utilização das cartas de controle são fortemente influenciados pela escolha de seus parâmetros. Assim, o uso de critérios econômicos tem recebido crescente atenção por parte de estatísticos e engenheiros da qualidade, como mostram Lorenzen e Vance (1986) e Montgomery (1996).

A formulação de um modelo econômico para o projeto de cartas de controle utiliza suposições acerca do comportamento do processo em estudo. A maior parte dos modelos econômicos encontrados na literatura, tanto para as cartas de controle

tradicionais quanto para as cartas adaptativas, considera as seguintes suposições (Montgomery, 1996):

- s1) o processo possui um único estado sob controle, onde o valor da medida de interesse (por ex., a média) da característica de qualidade controlada não é influenciado por causas especiais de variabilidade;
- s2) o processo possui, em geral, $s \geq 1$ estados fora de controle, estando cada estado associado a um tipo de causa especial;
- s3) as causas especiais ocorrem segundo um processo de Poisson, ou seja, o processo permanece sob controle, dado que iniciou sob controle, por um período de tempo exponencialmente distribuído;
- s4) a transição entre os estados é instantânea;
- s5) o processo não é autocorrigível, só retornando a um estado sob controle após intervenção gerencial.

Os custos associados ao controle dos processos podem ser divididos em três categorias principais (Montgomery, 1996):

- a) custos de amostragem e medição;
- b) custos de investigação e correção de causas especiais; e
- c) custos decorrentes da produção de itens não-conformes.

Fazem parte dos custos de amostragem e medição as despesas com salários de inspetores e técnicos realizando estas atividades, custos de testes de equipamentos e custo unitário dos itens amostrados, no caso de testes destrutivos. É comum considerar o custo total dessa categoria como sendo composto por uma parte fixa e outra variável; ou seja:

$$\text{Custo total de (a)} = a_1 + a_2n \quad (2.35)$$

onde a_1 representa o custo fixo, a_2 representa o custo adicional por unidade amostrada, n é o tamanho da amostra e a_2n é o custo variável.

Os custos de investigação e correção de causas especiais têm sido tratados de forma diferenciada. Uma delas considera que a investigação de alarmes falsos e correção de causas especiais consomem diferentes quantidades de recursos. Além disso, cada tipo de causa especial tem um custo de correção diferente. Assim, modelos com s estados fora de controle necessitam de $s + 1$ coeficientes de custo (correspondente aos custos de correção de s causas especiais mais o custo de investigação de alarmes falsos). Estes coeficientes devem ser fixados de acordo com o tamanho da mudança ocorrida no processo, pois grandes mudanças requerem custos mais altos de reparo (Montgomery, 1996).

Outro ponto de vista considera desnecessário tal nível de detalhamento, defendendo que os custos decorrentes de pequenas e grandes mudanças se equiparam. Isso ocorreria porque pequenas mudanças seriam de difícil localização (diagnóstico da causa que provocou o desvio do processo) mas de fácil solução, enquanto grandes mudanças seriam de fácil localização mas de difícil solução. Desta maneira, seria possível utilizar um único coeficiente de custo que representasse os custos médios de identificação e correção de causas especiais (Montgomery, 1996).

Estão incluídos na terceira categoria de custos os custos de refugo ou retrabalho por falhas internas, os custos de troca ou conserto de unidades cobertas por garantia no caso de falhas externas e os custos indiretos por insatisfação dos clientes, que pode levar a uma queda nas vendas futuras do produto ou de outros produtos da empresa.

A partir da definição dos custos envolvidos, os modelos econômicos são formulados de forma a expressar a relação existente entre estes custos e os parâmetros da carta de controle. Os modelos partem da premissa de que o funcionamento de um processo produtivo pode ser visto como uma série de ciclos independentes (Lorenzen e Vance, 1986). Cada ciclo inicia com a produção sob controle e continua até que as cartas de controle sinalizem um estado fora de controle. Neste ponto é feito um ajuste que deixa o processo novamente sob controle, iniciando-se um novo ciclo. Assim, um modelo econômico pode ser definido, de uma forma geral, como

$$E(A) = \frac{E(C)}{E(T)} \quad (2.36)$$

onde $E(A)$ representa o custo esperado por unidade de tempo, $E(C)$ representa o custo total esperado durante um ciclo e $E(T)$ representa o tamanho esperado de um ciclo. A etapa seguinte no projeto das cartas de controle consiste na aplicação de técnicas de otimização à equação acima, visando determinar o projeto econômico ótimo das cartas.

As formas de determinar os custos citados acima não vinham sendo sistematicamente tratadas na literatura, utilizando diferentes suposições e pontos de vista. A partir do trabalho de Lorenzen e Vance (1986), que apresenta um modelo geral para o projeto econômico de cartas de controle tradicionais, as notações e formulações utilizadas passaram a apresentar uma certa unificação. Este modelo geral, que pode ser aplicado a todas as cartas de controle de parâmetros fixos, independente da estatística utilizada, apresenta as seguintes idéias principais.

Um ciclo de processo, ou ciclo de qualidade, é a soma dos tempos de um período onde o processo encontra-se sob controle e de um período onde o processo encontra-se fora de controle. O período sob controle vai do início do ciclo até o momento em que ocorre uma causa especial de variabilidade no processo. Neste período devem ser contabilizados custos devidos à amostragem do processo, à produção de não-conformidades e à ocorrência de alarmes falsos. O período fora de controle inicia-se no momento da ocorrência da causa especial e termina no momento em que esta causa é reparada, passando pela detecção de que houve mudança no processo e pela identificação da causa desta mudança. Neste período também ocorrem custos devidos à amostragem do processo e à produção de não-conformidades. Além disso, ocorrem custos devidos à busca pela causa especial, ao reparo desta causa e à interrupção da produção, se for o caso.

O objetivo do modelo econômico é minimizar o custo/hora de controle do processo, calculado pela razão entre o custo esperado por ciclo e o tempo esperado de ciclo. O tempo de ciclo é formado pela soma dos seguintes tempos:

- i)* tempo até a ocorrência da causa especial;
- ii)* tempo até a tomada da próxima amostra;
- iii)* tempo para analisar a amostra e plotar o resultado no gráfico;

- iv) tempo até o gráfico sinalizar a situação fora de controle;
- v) tempo para identificar e reparar a causa especial.

A função apresentada por Lorenzen e Vance (1986) para o custo/hora de controle do processo não será detalhada neste trabalho visto que refere-se às cartas tradicionais, sendo que o foco aqui está nas cartas adaptativas. Tal função, todavia, será utilizada como base para o modelo econômico para cartas adaptativas descrito a seguir.

2.4.2 Modelo econômico para cartas adaptativas de controle

Partindo do modelo econômico geral, proposto por Lorenzen e Vance (1986) para cartas tradicionais, diversos trabalhos foram publicados tratando especificamente do projeto econômico de cartas adaptativas. Entre estes, pode-se citar os artigos de Park e Reynolds (1994), Prabhu *et al.* (1997) e Das *et al.* (1997).

Prabhu *et al.* (1997) propõem a utilização de um modelo estatístico-econômico para determinar os valores ótimos de h_b , h_l , n_p e n_g , em uma carta de controle \bar{X} com tamanho de amostra e intervalo de amostragem adaptativos, de forma a minimizar o custo médio por unidade de tempo (ECTU) de controle do processo. Ao minimizar o ECTU, o modelo estatístico-econômico considera que deve existir um limite inferior para o ATS_1 ($ATS_1 \geq v$) e um limite superior para o ATS_2 ($ATS_2 \leq k$). Estas restrições procuram garantir o desempenho estatístico da carta.

Park e Reynolds (1994) propõem um modelo econômico para a carta \bar{X} com tamanho de amostra adaptativo e adotam o ECTU como o principal indicador de desempenho da carta. Esse modelo considera que o processo está sujeito a múltiplas causas especiais, que ocorrem em tempos que são variáveis aleatórias independentes e exponencialmente distribuídas (com médias dadas por $1/I_1, 1/I_2, 1/I_3, \dots$), produzindo diferentes mudanças na média do processo.

Basicamente, as diferenças entre os dois tipos de projetos (para cartas tradicionais e para cartas adaptativas) encontram-se nas fórmulas de cálculo dos custos

associados ao controle dos processos. Dado que no estudo de caso desta dissertação adotou-se uma carta adaptativa \bar{X} com intervalo de amostragem adaptativo, e dadas as variações possíveis de cálculo dos custos conforme o tipo de carta adaptativa, as fórmulas apresentadas a seguir referem-se unicamente a esse tipo de carta.

O modelo econômico para o projeto de cartas adaptativas \bar{X} , com intervalo de amostragem adaptativo e tamanho de amostra fixo, apresentado a seguir, foi proposto por Das *et al.* (1997) e complementado pelo autor desta dissertação com base em Prabhu *et al.* (1997). O modelo é constituído por uma função objetivo e várias restrições, apresentadas na seqüência.

2.4.2.1 Função Objetivo

O modelo econômico busca minimizar, através da utilização de um algoritmo de otimização, o custo médio do controle de qualidade do sistema por unidade de tempo. Esse custo, designado por C_T , é dado por (Das *et al.*, 1997):

$$C_T = \frac{1}{T}(C_a + C_b + C_c + C_d + C_e), \quad (2.37)$$

onde:

T é o tempo de ciclo do processo,

C_a é o custo médio de operação do processo sob controle,

C_b é o custo médio de operação do processo fora de controle (na presença de causas especiais),

C_c é o custo médio por ocorrência de alarme falso,

C_d é o custo médio de localização e reparo de uma causa especial, e

C_e é o custo médio de amostragem do processo, independente do seu estado.

Estes elementos são detalhados na seqüência, para o caso de cartas com limites unilaterais e, em seguida, para cartas com limites bilaterais.

Para entender os elementos da função objetivo, é conveniente considerar que os pontos plotados nas cartas são valores padronizados, dados por $z_i = \frac{\bar{x}_i - \mathbf{m}}{\mathbf{s}/\sqrt{n}}$, e que um ciclo de processo é constituído de quatro fases distintas:

- (i) sob controle (com ocorrências eventuais de alarmes falsos);
- (ii) fora de controle;
- (iii) sob investigação para determinação de causas especiais;
- (iv) sofrendo reparo.

O tempo de ciclo T , que é o somatório dos tempos de permanência do processo em cada uma destas fases, é dado por:

a) cartas com limites unilaterais:

$$T = 1/I + (1 - \mathbf{d}_1)P(Z > L)sT_f + ATS_2 + nE + T_S + T_R \quad (2.38)$$

b) cartas com limites bilaterais

$$T = 1/I + (1 - \mathbf{d}_1)[P(Z < -L) + P(Z > L)]sT_f + ATS_2 + nE + T_S + T_R. \quad (2.39)$$

O primeiro termo do somatório nas equações (2.38) e (2.39), $1/I$, corresponde ao tempo médio em que o processo permanece sob controle (média de uma variável aleatória que segue uma distribuição exponencial com parâmetro λ ; ver suposição s3. Cabe observar que o modelo de Das *et al.* (1997) pressupõe que existe somente um tipo de causa especial atuando no processo. Para utilizar este modelo quando existem múltiplas causas especiais atuando simultaneamente, com tempos médios de ocorrência distintos, pode-se fazer uma aproximação, considerando-se um mesmo tempo médio $1/I$ para todas as causas.

O segundo termo do somatório, a) $(1 - \mathbf{d}_1)P(Z > L)sT_f$ na eq. (2.38) ou b) $(1 - \mathbf{d}_1)[P(Z < -L) + P(Z > L)]sT_f$ na eq. (2.39), considera a ocorrência de alarmes falsos e duas situações possíveis:

- (i) quando $d_1 = 1$, situação em que o processo continua em funcionamento durante a busca por causas especiais inexistentes, o tempo da busca sobrepõe-se ao tempo de operação sob controle e o termo em questão é cancelado;
- (ii) quando $d_1 = 0$, situação em que o processo pára durante a busca por causas especiais inexistentes, o tempo de busca, adicionado ao tempo total de ciclo, é dado pelo produto da probabilidade de ocorrência de erro tipo I, a) $P(Z > L)$ na eq. (2.38) ou b) $P(Z < -L) + P(Z > L)$ na eq. (2.39), pelo número médio de amostras coletadas do processo sob controle (s) e pelo tempo médio de busca quando da ocorrência de um alarme falso (T_f).

O número médio de amostras coletadas do processo sob controle (s) é obtido pela equação:

a) cartas com limites unilaterais:

$$s = \frac{e^{-1h_b}}{(1-\Gamma)^2} \left\{ \left(1 - e^{-1h_i}\right) \frac{P(Z < w)}{P(Z < L)} + \left(1 - e^{-1h_b}\right) \left(\frac{P(w < Z < L)}{P(Z < L)} \right) \right\} \quad (2.40)$$

sendo

$$\Gamma = e^{-1h_i} \frac{P(Z < w)}{P(Z < L)} + e^{-1h_b} \frac{P(w < Z < L)}{P(Z < L)}. \quad (2.41)$$

b) cartas com limites bilaterais

$$s = \frac{e^{-1h_b}}{(1-\Gamma)^2} \left\{ \left(1 - e^{-1h_i}\right) \frac{P(-w < Z < w)}{P(-L < Z < L)} + \left(1 - e^{-1h_b}\right) \left(\frac{P(-L < Z < -w)}{P(-L < Z < L)} + \frac{P(w < Z < L)}{P(-L < Z < L)} \right) \right\} \quad (2.42)$$

sendo

$$\Gamma = e^{-1h_i} \frac{P(-w < Z < w)}{P(-L < Z < L)} + e^{-1h_b} \frac{P(-L < Z < -w)}{P(-L < Z < L)} + e^{-1h_b} \frac{P(w < Z < L)}{P(-L < Z < L)}. \quad (2.43)$$

O terceiro termo do somatório nas equações (2.38) e (2.39), ATS_2 , corresponde ao tempo médio até ocorrência de um sinal quando o processo encontra-se fora de controle. O quarto termo do somatório nas equações (2.38) e (2.39), nE , corresponde ao tempo para coletar uma amostra, executar medições e plotar um ponto na carta (n é o tamanho da amostra e E é o tempo médio de processamento por observação amostral). O quinto termo do somatório nas equações (2.38) e (2.39), T_S , corresponde ao tempo médio de busca quando ocorre uma causa especial. O último termo do somatório, T_R , corresponde ao tempo médio necessário para reparo da causa especial.

O custo médio de operação do processo sob controle, C_a , é dado pelo produto entre o custo/hora de operação do processo sob controle (C_0) e o tempo médio em que o processo permanece neste estado ($1/\mathbf{I}$); isto é, $C_a = C_0/\mathbf{I}$.

O custo médio de operação do processo fora de controle, C_b , é dado por:

$$C_b = C_1(AT S_2 + nE + \mathbf{d}_1 T_S + \mathbf{d}_2 T_R), \quad (2.44)$$

onde C_1 é o custo/hora de operação fora de controle e \mathbf{d}_2 é uma variável binária, tal que

$$\mathbf{d}_2 = \begin{cases} 0 & \text{se a produção é interrompida durante o reparo de causas especiais;} \\ 1 & \text{se a produção não é interrompida durante o reparo de causas especiais.} \end{cases}$$

O custo médio devido à ocorrência de alarmes falsos, C_c , é dado por:

$$\text{a) } C_c = P(Z > L)sY, \text{ ou} \quad (2.45)$$

$$\text{b) } C_c = [P(Z < -L) + P(Z > L)]sY, \quad (2.46)$$

onde Y é o custo médio da ocorrência de um alarme falso. A eq. (2.45) é utilizada em associação à eq. (2.38), ao passo que a eq. (2.46) é utilizada em associação à eq. (2.39).

O custo médio para localizar e reparar uma causa especial, C_d , é estimado tendo em vista os tipos mais comuns de causas especiais incidentes sobre o processo.

O custo médio de amostragem do processo, C_e , é dado por:

$$C_e = (a_1 + a_2n)s + \left[\left(\frac{a_1 + a_2n}{\mathbf{g}} \right) (ATS_2 + nE + \mathbf{d}_1T_S + \mathbf{d}_2T_R) \right], \quad (2.47)$$

onde $a_1 + a_2n$ representa o custo associado à coleta, processamento e plotagem de um ponto amostral na carta de controle, e \mathbf{g} é o tempo médio entre amostras quando o processo está fora de controle (a expressão para cálculo de \mathbf{g} será apresentada mais adiante, na seção 2.4.2.3).

2.4.2.2 Restrições

As restrições para o modelo econômico, inicialmente propostas por Das *et al.* (1997) e complementadas neste trabalho, são listadas a seguir:

$$h_b \geq nE \quad (2.48)$$

$$h_b \leq h_l \quad (2.49)$$

$$h_l \leq \mathbf{q} \quad (2.50)$$

$$w \geq 0 \quad (2.51)$$

$$w \leq L \quad (2.52)$$

$$n \geq \mathbf{h} \quad (2.53)$$

$$L = 3 \quad (2.54)$$

$$ATS_1 \geq \mathbf{v} \quad (2.55)$$

$$ATS_2 \leq \mathbf{k} \quad (2.56)$$

A restrição (2.48) estabelece como limite inferior do menor intervalo de amostragem, o tempo estimado para coletar, medir e plotar uma amostra na carta de controle. A restrição (2.49) estabelece como limite superior do menor intervalo de amostragem, o maior intervalo de amostragem. A restrição (2.50) limita em \mathbf{q} horas o maior intervalo de amostragem, com \mathbf{q} estabelecido a partir de considerações de caráter prático. As restrições (2.51) e (2.52) estabelecem limites inferior e superior,

respectivamente, para o início da região de advertência na carta adaptativa de controle. A restrição (2.53) estabelece um limite inferior (h) para o tamanho de amostra, a partir de considerações práticas. A restrição (2.54), acrescentada pelo autor deste trabalho, fixa o valor de L em 3 (ver equação 2.1), dado que, na maioria das aplicações de cartas de controle, este é o valor utilizado. As restrições (2.55) e (2.56) foram acrescentadas ao modelo de Das *et al.* (1997) pelo autor desta dissertação, com base em Prabhu *et al.* (1997), e estabelecem que a função custo será minimizada garantindo que certas propriedades estatísticas requeridas para a carta sejam satisfeitas. A restrição (2.55) impõe um limite inferior para o tempo médio até a ocorrência de um alarme falso, e a restrição (2.56) impõe um limite superior para o tempo médio até a sinalização de um estado fora de controle, a partir da ocorrência de uma causa especial. A restrição (2.48) não foi apresentada por Das *et al.* (1997) na mesma forma que é colocada nesta dissertação. Naquele trabalho os autores estabelecem um limite inferior para o menor intervalo de amostragem igual a 0,1 hora, sem relacionar este valor ao tempo nE . Nas restrições (2.50) e (2.53), Das *et al.* (1997) estabeleceram os limites em 30 e 5, respectivamente, mas o autor desta dissertação sugere que se adotem valores de acordo com a realidade prática que está sendo tratada.

2.4.2.3 Variáveis de decisão e indicadores de desempenho calculados pelo modelo

As variáveis de decisão (vds) do modelo econômico definem as características da carta adaptativa de controle resultante da otimização; são elas: w , n , L , h_l e h_b (todas definidas anteriormente).

Três indicadores de desempenho da carta adaptativa de controle têm seus valores determinados a partir dos resultados da otimização (Das *et al.*, 1997). Seguindo a forma utilizada na seção 2.4.2.1, as expressões de cálculo destes indicadores são apresentadas para o caso de (a) cartas com limites unilaterais e, em seguida, para (b) cartas com limites bilaterais.

O primeiro desses indicadores é o número médio de amostras até a carta sinalizar um estado fora de controle, a partir do momento em que ocorre uma mudança no processo, ANSS, dado por:

$$\text{a) } ANSS = \frac{1}{P[Z > (L - k\sqrt{n})]}; \text{ ou} \quad (2.57)$$

$$\text{b) } ANSS = \frac{1}{P[Z < -(L + k\sqrt{n})] + P[Z > (L - k\sqrt{n})]}, \quad (2.58)$$

onde k indica a mudança na média do processo, em desvios-padrão, de \mathbf{m}_0 para $\mathbf{m}_0 + k\mathbf{s}$. O segundo indicador é o tempo médio até a carta sinalizar erroneamente um estado fora de controle, resultante de um alarme falso (ATS_1); isto é:

$$\text{a) } ATS_1 = \frac{\mathbf{f}}{P(Z > L)}; \text{ ou} \quad (2.59)$$

$$\text{b) } ATS_1 = \frac{\mathbf{f}}{P(Z < -L) + P(Z > L)}. \quad (2.60)$$

Nas equações (2.59) e (2.60), \mathbf{f} designa o tempo médio entre amostras quando o processo está sob controle, sendo dado por:

$$\text{a) } \mathbf{f} = h_l \frac{P(Z < w)}{P(Z < L)} + h_b \frac{P(w < Z < L)}{P(Z < L)}; \text{ ou} \quad (2.61)$$

$$\text{b) } \mathbf{f} = h_l \frac{P(-w < Z < w)}{P(-L < Z < L)} + h_b \frac{P(-L < Z < -w) + P(w < Z < L)}{P(-L < Z < L)}. \quad (2.62)$$

O terceiro indicador de desempenho é o tempo médio até a carta sinalizar corretamente um estado fora de controle (ATS_2), dado por:

$$\text{a) } ATS_2 = \left[(h_l - \mathbf{t}_{h_l}) \frac{P(Z < w)h_l}{P(Z < L)\mathbf{f}} \right] + \left[(h_b - \mathbf{t}_{h_b}) \frac{P(w < Z < L)h_b}{P(Z < L)\mathbf{f}} \right] \quad (2.63)$$

ou

$$\begin{aligned} \text{b) } ATS_2 = & \left[(h_l - \mathbf{t}_{h_l}) \frac{P(-w < Z < w)h_l}{P(-L < Z < L)\mathbf{f}} \right] + \\ & + \left[(h_b - \mathbf{t}_{h_b}) \frac{[P(-L < Z < -w) + P(w < Z < L)]h_b}{P(-L < Z < L)\mathbf{f}} \right] + \mathbf{g}(ANSS - 1), \end{aligned} \quad (2.64)$$

onde t_{h_l} designa o tempo médio de ocorrência de uma mudança na média do processo, dado que a mesma ocorre dentro do intervalo de amostragem h_l . Considerando s3 (seção 2.4.1), t_{h_l} é igual a (Lorenzen e Vance, 1986):

$$t_{h_l} = \frac{1 - (1 + I h_l) e^{-I h_l}}{I (1 - e^{-I h_l})}. \quad (2.65)$$

Analogamente, t_{h_b} designa o tempo médio de ocorrência de uma mudança na média do processo, dado que a mesma ocorre dentro do intervalo de amostragem h_b ; t_{h_b} é dado por:

$$t_{h_b} = \frac{1 - (1 + I h_b) e^{-I h_b}}{I (1 - e^{-I h_b})}. \quad (2.66)$$

Finalmente, γ é o tempo médio entre amostras quando o processo está fora de controle, considerando um desvio da média de m_0 para $m_0 + ks$ (dado em unidades padronizadas):

$$a) \ g = h_l \frac{P[Z < (w - k\sqrt{n})]}{P[Z < (L - k\sqrt{n})]} + h_b \frac{P[(w - k\sqrt{n}) < Z < (L - k\sqrt{n})]}{P[Z < (L - k\sqrt{n})]} \quad (2.67)$$

$$b) \ g = h_l \frac{P[-(w + k\sqrt{n}) < Z < (w - k\sqrt{n})]}{P[-(L + k\sqrt{n}) < Z < (L - k\sqrt{n})]} +$$

$$+ h_b \frac{P[(w - k\sqrt{n}) < Z < (L - k\sqrt{n})]}{P[-(L + k\sqrt{n}) < Z < (L - k\sqrt{n})]} +$$

$$+ h_b \frac{P[-(L + k\sqrt{n}) < Z < -(w + k\sqrt{n})]}{P[-(L + k\sqrt{n}) < Z < (L - k\sqrt{n})]} \quad (2.68)$$

3 PROPOSTA METODOLÓGICA PARA O PLANEJAMENTO DA IMPLEMENTAÇÃO DE CARTAS ADAPTATIVAS

Neste capítulo propõe-se uma metodologia para o planejamento da implementação de cartas adaptativas no controle de processos industriais. O pressuposto para a utilização desta metodologia é que os processos selecionados para a implementação sejam processos já monitorados por cartas de controle tradicionais.

O planejamento da implementação de cartas adaptativas compreende as etapas necessárias desde a seleção das características de qualidade que serão monitoradas pelas cartas até o momento em que essas cartas estiverem com seus parâmetros determinados e prontas para serem utilizadas no controle dos processos. O objetivo da metodologia aqui proposta é fornecer subsídios para implementação de cartas adaptativas que possam ser utilizados em situações específicas de aplicação (tipo de indústria, processo, características de qualidade controladas, etc.), sendo para isso necessárias somente pequenas adaptações pertinentes a cada situação.

De maneira geral, o planejamento da implementação do controle de processos através de cartas adaptativas requer a observância das seguintes etapas, que serão detalhadas na seqüência:

- i) seleção das características de qualidade a serem monitoradas através das cartas adaptativas;
- ii) escolha de um modelo a ser utilizado na determinação dos parâmetros da carta adaptativa;

- iii) coleta das informações necessárias para a operacionalização do modelo selecionado na etapa (ii);
- iv) aplicação do modelo para a obtenção dos valores dos parâmetros da carta adaptativa;
- v) implementação das cartas.

3.1 SELEÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE

A seleção das características de qualidade pode ser feita em uma ou mais etapas. Um exemplo de seleção em mais de uma etapa é a situação onde a produção da empresa está organizada em unidades ou minifábricas. Neste caso, a primeira etapa consiste na escolha de uma ou mais unidades onde será feita a implementação das cartas. Como o objetivo das cartas adaptativas é, em geral, aprimorar o controle de processos já controlados através de cartas tradicionais, o primeiro critério de seleção poderia ser a escolha de unidades fabris que já tenham cartas de controle tradicionais implementadas. Este pressuposto também irá possibilitar a obtenção dos dados necessários ao planejamento das cartas adaptativas. A segunda etapa é a escolha das características de qualidade, dentro de cada unidade pré-selecionada. Estas características devem ser listadas de acordo com o tipo de carta utilizada no seu controle (por variáveis, como a $\bar{X} - R$, por atributos, como a p ou a np , etc.).

Obtida a lista das características de qualidade, recomenda-se sua análise utilizando-se o QFD (*Quality Function Deployment* ou Desdobramento da Função Qualidade), conforme proposto em Caten *et al.* (2000) para o projeto da implantação de cartas de controle tradicionais. Aqui, os critérios utilizados para análise das características de qualidade são particularizados para as cartas adaptativas de controle. A diferença principal está no fato de que neste trabalho se utilizam itens de custo na priorização das características de qualidade, enquanto que Caten *et al.* (2000) não os utilizam.

O princípio do QFD, neste caso, é fazer o cruzamento de itens de qualidade demandada e itens de custo com as características de qualidade através de uma matriz

com i linhas e j colunas. Os itens de qualidade demandada são aspectos desejáveis dos produtos, importantes para garantir a sua perfeita utilização e que, conseqüentemente, garantam a satisfação dos consumidores. Exemplos de itens de qualidade demandada incluem a montagem perfeita de uma peça, a ausência de ruído durante a operação de um equipamento, a durabilidade, a facilidade de substituição, etc. Itens de custo dizem respeito aos custos relacionados ao controle do processo, dependentes da estratégia de controle utilizada; ou seja, são custos que podem ser reduzidos através da utilização de cartas adaptativas de controle. Exemplos de itens de custo são: custo de operação do processo fora de controle, custo de alarmes falsos, custo de localização e reparo de causas especiais, custo de amostragem, etc.

Nas linhas da matriz do QFD são listadas as características de qualidade selecionadas anteriormente, uma por linha. Nas colunas da matriz, são colocados os itens de qualidade demandada e os itens de custo, também um por coluna. A estes itens são dados pesos relativos de importância, denominados por W_j , que indicam a importância relativa do $j^{\text{ésimo}}$ item. Na maioria das aplicações, seria razoável esperar que o somatório dos pesos W_j atribuídos a cada grupo de elementos (ou seja, itens de qualidade demandada e itens de custo) aproxime-se de 50%, configurando, assim, uma situação onde existe um balanceamento entre a importância atribuída à qualidade e custos no produto em estudo.

Depois de montada a estrutura da matriz, o seu preenchimento é feito com base na opinião de especialistas (por exemplo, a equipe técnica de projeto), que procura identificar a intensidade da relação entre uma característica de qualidade i e um item de qualidade demandada ou de custo j . Esta intensidade, denominada por R_{ij} , é medida através de uma escala contínua de valores que pode variar, por exemplo, de 0 a 5. Valores próximos de zero indicam baixa intensidade da relação, enquanto valores próximos de 5 indicam uma alta intensidade. Cabe ressaltar que os valores aqui citados, tanto as medidas de intensidade de relacionamento, R_{ij} , quanto os pesos, W_j , são resultantes de uma avaliação subjetiva (ou qualitativa) da equipe técnica e que, portanto, os resultados obtidos com a matriz do QFD não devem ser analisados de forma rígida, podendo aceitar ajustes quando necessário.

Concluído o preenchimento da matriz, é calculado um índice de priorização das características de qualidade, denominado ICQ_i , através da fórmula

$$ICQ_i = \sum_{j=1}^J (W_j R_{ij}), \quad (3.1)$$

onde J é o número de itens de qualidade demandada e de custo listados nas colunas da matriz. A Figura 3.1 apresenta o esquema da matriz do QFD descrita acima, com seus componentes.

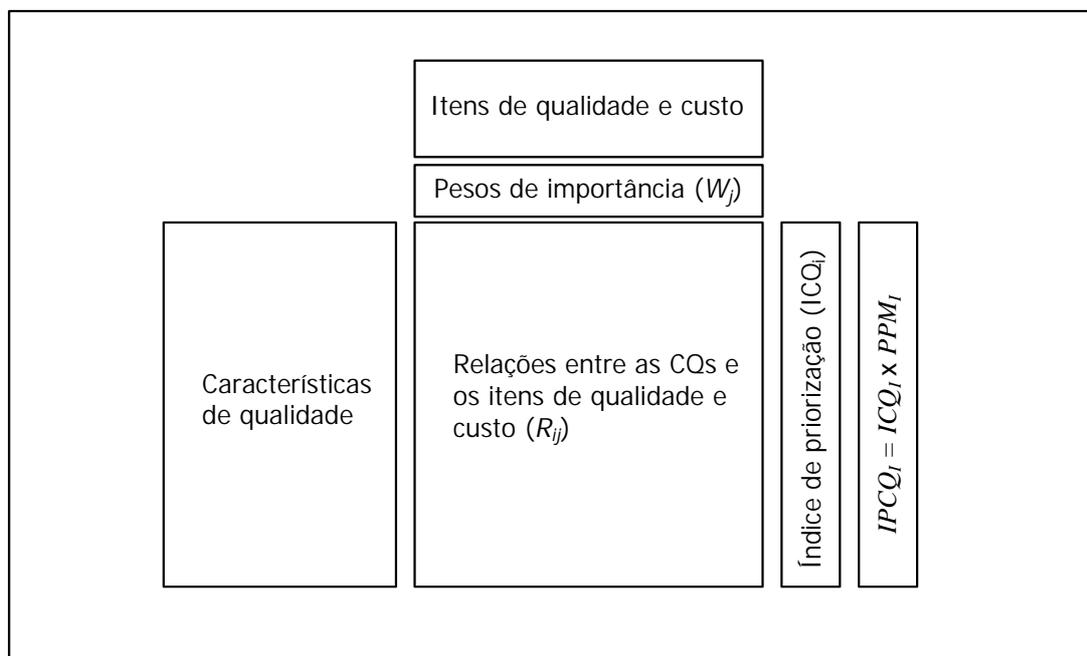


Figura 3.1 – Esquema da Matriz de QFD.

Outro fator que deve ser levado em consideração na priorização das características de qualidade é a capacidade do processo em atender os limites de especificação definidos em projeto. Esta capacidade pode ser medida através dos índices de capacidade C_p e C_{pk} , ou ainda através de medidas como a geração de defeitos em PPM (partes por milhão). Os índices C_p e C_{pk} são calculados considerando que o processo está sob controle, ou seja, somente atuam no processo causas comuns de variação (Ribeiro, 1997). O cálculo do C_p é dado por

$$C_p = \frac{LES - LEI}{6\hat{\sigma}}, \quad (3.2)$$

onde LES é o limite de especificação superior, LEI é o limite de especificação inferior e \hat{s} é a estimativa do desvio-padrão do processo, dado por $\hat{s} = \frac{\bar{R}}{d_2}$, sendo d_2 e \bar{R} já definidos na equação (2.4). O cálculo do C_{pk} é dado por

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{LES - \bar{\bar{x}}}{3\hat{s}}, \frac{\bar{\bar{x}} - LEI}{3\hat{s}} \right\}, \quad (3.3)$$

onde $\bar{\bar{x}}$ é a média das médias, definida na equação (2.3).

O *PPM* indica a quantidade total de partes (ou peças) não-conformes produzidas por um processo. Esta medida tem a vantagem, em relação aos outros índices, de mostrar de forma mais direta o significado de um processo pouco capaz e o ganho que pode ser obtido com o aumento desta capacidade.

Como através da utilização de cartas adaptativas busca-se reduzir o tempo até a detecção de causas especiais e, com isso, reduzir a produção de não-conformes, os processos com baixa capacidade tendem a ser mais beneficiados com a utilização destas cartas. Por isso, características de qualidade relacionadas a processos pouco capazes devem ser priorizadas.

A forma recomendada para agregar a informação da capacidade dos processos ao índice de priorização das características de qualidade (*ICQ_i*) é estimar o *PPM* para cada característica de qualidade (neste caso teremos o $PPM_i = PPM$ da característica de qualidade *i*) e calcular um novo índice de priorização que leve em consideração o valor de ambos (*ICQ_i* e *PPM_i*). O cálculo do *PPM_i* assume que a característica de qualidade tem distribuição normal e, no caso de especificações bilaterais, que a média do processo está centrada entre os limites de especificação superior e inferior. Uma das formas de calcular o *PPM_i* utiliza o índice C_p para determinar a proporção de peças não-conformes produzidas, multiplicando então esta proporção por 10^6 . Desta forma, o *PPM_i* é calculado por

$$PPM_{unilat} = \Phi(-3C_p) \times 10^6 \quad (3.4)$$

para o caso do limite de especificação ser unilateral, onde $\Phi(\cdot)$ denota a função de distribuição normal padrão. No caso de especificações bilaterais, o índice *PPM_i* dado

acima deve ser multiplicado por dois, para considerar as peças não-conformes produzidas tanto abaixo do limite de especificação inferior quanto acima do limite de especificação superior. Assim sendo, a fórmula para o caso de especificações bilaterais é

$$PPM_{bilat} = \left[\Phi(-3C_p) \times 10^6 \right] \times 2. \quad (3.5)$$

Obtidos os valores do PPM para as características de qualidade presentes na matriz do QFD, é calculado um novo índice de priorização, denominado $IPCQ_i$. Este índice agrega as informações do índice ICQ_i e do PPM_i , priorizando características de qualidade com valores altos de ambos. A fórmula para o cálculo do $IPCQ_i$ é

$$IPCQ_i = ICQ_i \times PPM_i \quad (3.6)$$

O próximo procedimento para a seleção das características de qualidade é a ordenação das mesmas, de acordo com o valor do $IPCQ_i$; aquelas características com os maiores valores devem ser priorizadas na implementação das cartas adaptativas.

3.2 ESCOLHA DE UM MODELO A SER UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARTA ADAPTATIVA

A determinação dos parâmetros (o chamado projeto) de uma carta adaptativa, assim como de uma carta tradicional, deve seguir algum tipo de critério ou modelo. Tradicionalmente, as cartas de controle têm sido planejadas através da utilização de considerações estatísticas como, por exemplo, os erros tipo I e II. Estas considerações, em conjunto com a experiência adquirida ao longo dos anos pela utilização das cartas de controle tradicionais, acabaram por estabelecer algumas regras e procedimentos gerais para a determinação dos parâmetros das cartas (Montgomery, 1996). Mais recentemente, como já citado no Capítulo 2, seção 2.4, o uso de critérios econômicos no projeto de cartas de controle tem recebido crescente atenção por parte de estatísticos e engenheiros da qualidade.

Assim sendo, o projeto de uma carta adaptativa de controle deve passar, inicialmente, pela definição dos critérios a serem utilizados na determinação de seus

parâmetros. Estes critérios podem ser estritamente estatísticos, estritamente econômicos ou ainda considerar ambos, sendo então chamados critérios estatístico-econômicos. Seguindo a tendência atual e considerando que estes são os modelos que melhor contemplam os aspectos envolvidos no controle estatístico de processos, sugere-se a utilização de um modelo estatístico-econômico para o projeto de cartas adaptativas de controle.

Os modelos estatístico-econômicos propostos na literatura variam de acordo com a medida de interesse (média, amplitude, desvio-padrão, proporção, etc.) da característica de qualidade a ser controlada, e com os parâmetros que serão tratados como adaptativos. Na prática, deve-se considerar, também, a característica de qualidade a ser controlada, visto que esta irá determinar se a carta terá limites de controle e advertência unilaterais ou bilaterais. Assim, para a escolha do modelo estatístico-econômico é importante considerar a característica de qualidade a ser controlada, a medida de interesse dessa característica de qualidade e os parâmetros adaptativos do modelo. As considerações feitas a seguir, nesta proposta de metodologia, pressupõem a utilização do modelo de Das *et al.* (1997), acrescido de modificações, conforme apresentado na seção 2.4.2.

3.3 COLETA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A OPERACIONALIZAÇÃO DO MODELO

Modelos econômicos para cartas adaptativas de controle demandam informações sobre um grande número de parâmetros de entrada. Parte desses parâmetros diz respeito a custos de monitoramento do processo mediante cenários distintos; por exemplo, processo sob controle ou sob incidência de causas especiais. Outros parâmetros estão relacionados a tempos; por exemplo, tempo médio necessário para coletar uma amostra ou para identificar uma causa especial.

Parece evidente, a partir dos trabalhos sobre modelos econômicos para o projeto de cartas adaptativas consultados nesta dissertação, que a maior dificuldade para a aplicação destes modelos é a estimação dos valores dos parâmetros de entrada; tome-se, por exemplo, as dificuldades reportadas em Das *et al.* (1997). Para auxiliar nesta tarefa

são apresentados, a seguir, passos para a estimativa dos parâmetros utilizados no modelo econômico proposto nesta dissertação. As recomendações aqui apresentadas foram traçadas a partir de considerações práticas, sendo, na sua totalidade, ilustradas no estudo de caso apresentado no Capítulo 4. Como os parâmetros de entrada necessários no modelo econômico aqui utilizado são comuns à maior parte dos modelos econômicos apresentados na literatura, espera-se que os procedimentos aqui propostos possam ser utilizados em um grande número de situações.

Os parâmetros de entrada, e os procedimentos gerais para estimar os seus valores, são descritos nas seções seguintes.

3.3.1 Tempo médio em que o processo permanece sob controle, $1/I$

Para a estimação do tempo médio em que o processo permanece sob controle, é essencial a existência de dados históricos a respeito do processo. Estes dados podem ser obtidos a partir da análise de cartas de controle tradicionais, utilizadas até o momento no controle do processo. A partir das cartas é possível obter uma série de valores de tempos entre a ocorrência de causas especiais e, com esta série, calcular o tempo médio em que o processo permanece sob controle. É importante que exista um período razoável de registro do controle do processo, pois quanto maior a série de valores históricos disponíveis, melhor será a estimativa do parâmetro. Todavia, deve-se dar atenção ao fato de que os registros armazenam os pontos fora dos limites da carta, sem diferenciar os alarmes falsos das causas reais de variabilidade, podendo levar a uma estimativa tendenciosa de $1/I$. O ideal é, sempre que possível, excluir os alarmes falsos para estimar o valor deste tempo.

Após a obtenção da série de valores deve-se verificar:

- a) se algum valor da série pode ser considerado discrepante (conhecido pelo termo *outlier*) em relação aos demais valores;

- b) se o processo permanece sob controle por um tempo exponencialmente distribuído, que é uma das suposições do modelo econômico (ver suposição s3, na seção 2.4.1).

Um valor discrepante é um valor muito maior, ou muito menor, que todos os outros valores de um conjunto de dados. Este valor deve ser retirado da série, pois provavelmente é resultante de uma situação anormal. Elsayed (1996) apresenta um procedimento para testar valores discrepantes em uma distribuição exponencial; este procedimento é descrito a seguir.

A partir de uma seqüência ordenada de valores, ou variáveis aleatórias $(t_{(1)}, t_{(2)}, \dots, t_{(r)})$, independentes e identicamente distribuídas segundo uma distribuição exponencial, as estatísticas utilizadas para testar o menor valor $t_{(1)}$ e o maior valor $t_{(r)}$ da seqüência de dados são, respectivamente

$$F_1 = \frac{\sum_{i=2}^r t_{(i)}}{(r-1)t_{(1)}} \quad (3.7)$$

e

$$F_2 = \frac{(r-1)t_{(r)}}{\sum_{i=1}^{r-1} t_{(i)}} \quad (3.8)$$

A estatística F_1 segue uma distribuição F de Snedecor com $(2r - 2)$ graus de liberdade no numerador e 2 graus de liberdade no denominador. Assim, o valor $t_{(1)}$ será considerado discrepante, para um nível de significância α , se $F_{\alpha, 2r-2, 2} < F_1$. A estatística F_2 segue uma distribuição F de Snedecor com 2 graus de liberdade no numerador e $(2r - 2)$ graus de liberdade no denominador. Desta forma, se $F_{\alpha, 2, 2r-2} < F_2$ o valor $t_{(r)}$ será considerado discrepante, para um nível de significância α . Se algum valor do conjunto de dados for considerado discrepante, este deve ser excluído e o próximo valor (menor ou maior) deve ser testado. Este procedimento deve prosseguir até que nenhum valor seja considerado discrepante, sendo os valores restantes mantidos na série final de dados.

Após esta etapa verifica-se a suposição de que o processo permanece sob controle por um tempo exponencialmente distribuído, ou seja, se os valores de tempo entre a ocorrência de causas especiais seguem uma distribuição de probabilidades exponencial.

Um dos testes utilizados para este fim é o teste de Bartlett, também apresentado em Elsayed (1996), cuja estatística é

$$B_r = \frac{2r \left[\ln \left(\frac{T}{r} \right) - \frac{1}{r} \left(\sum_{i=1}^r \ln t_i \right) \right]}{1 + (r+1)/6r} \quad (3.9)$$

onde

t_1 é o tempo da primeira ocorrência fora de controle;

t_i é o tempo entre a $(i-1)$ -ésima e a i -ésima ocorrência ($i = 1, 2, 3, \dots$);

r é o número total de ocorrências durante o período observado;

T é a soma dos tempos entre ocorrências, isto é, $T = \sum_{i=1}^r t_i$.

A estatística de teste, B_r , segue uma distribuição Qui-quadrado com $r-1$ graus de liberdade. Portanto, se o valor de B_r estiver entre os valores críticos dados por $\mathbf{C}_{(1-\alpha/2), r-1}^2$ e $\mathbf{C}_{\alpha/2, r-1}^2$, a hipótese de que os dados podem ser modelados por uma distribuição exponencial não é rejeitada, para um nível de significância α .

Outros testes também podem ser utilizados para verificar a hipótese de que os dados observados seguem uma determinada distribuição de probabilidades, entre elas a exponencial. Pode-se citar, por exemplo, os testes de Kolmogorov-Smirnov e de Anderson-Darling (Stephens, 1974; D'Agostino e Stephens, 1986). O teste de Anderson-Darling é uma modificação do teste de Kolmogorov-Smirnov, sendo mais sensível à desvios nas caudas da distribuição. Outra característica que diferencia estes dois testes é o fato de que os valores críticos do teste de Anderson-Darling dependem da distribuição que está sendo testada, enquanto que o de Kolmogorov-Smirnov é um teste de distribuição livre (ou não-paramétrico). Por este motivo o teste de Anderson-Darling

tem a vantagem de ser mais sensível e a desvantagem de que valores críticos diferentes devem ser calculados para cada distribuição.

Sendo confirmada a suposição de distribuição exponencial, calcula-se a média dos valores obtidos, que será a estimativa do tempo médio em que o processo permanece sob controle. Relacionando esta média, dada por \bar{x} , com o parâmetro da distribuição exponencial, tem-se que $\bar{x} = 1/\hat{\lambda}$ e, portanto, $\hat{\lambda} = 1/\bar{x}$.

3.3.2 Tempo médio de busca quando da ocorrência de um alarme falso, T_f

Um alarme falso caracteriza uma situação onde, apesar de não haver a ação de alguma causa especial sobre o processo, a carta de controle sinaliza esta ocorrência por meio de um ponto fora dos limites de controle. Neste caso, assim como ocorre sempre que a carta sinalizar a existência de uma causa especial, o procedimento usual é tentar identificar esta causa. No caso de um alarme falso, obviamente, ela não será encontrada, pois simplesmente não existe. Desta forma, o tempo de busca (ou da tentativa de identificação) de uma causa especial quando da ocorrência de um alarme falso depende exclusivamente do procedimento adotado até se chegar à conclusão de que não existe nenhuma causa especial atuando no processo.

Uma vez identificado tal procedimento, o tempo necessário para executá-lo deve ser medido junto a quem o realiza. Esta pessoa pode ser, por exemplo, o próprio operador da máquina que está sendo monitorada através da carta de controle ou alguém responsável por sua manutenção. A medição deste tempo deve ser repetida um número suficiente de vezes, de preferência utilizando-se operadores diferentes, para se obter uma boa estimativa do tempo médio.

Para o cálculo do número de medições necessárias para a estimativa deste tempo médio, pode-se adotar o método de estudo de tempos apresentado por Krajewski e Ritzman (1999). Segundo o método, primeiramente identificam-se as atividades que compõem um procedimento de trabalho. Essas atividades devem ter pontos de início e de fim bem definidos. Atividades com menos de 3 segundos de duração devem ser

desconsideradas. Uma vez determinadas as atividades, realiza-se uma série de medições do tempo para a execução de cada uma delas com o objetivo de obter um conjunto inicial de observações. Valores significativamente diferentes dos demais (*outliers*) devem ter suas causas investigadas e devem ser excluídos, se anomalias forem constatadas. O próximo passo consiste em verificar se o conjunto inicial de observações é suficiente para fornecer uma estimativa confiável de tempo médio. A fórmula, baseada na distribuição normal, para a determinação do tamanho de amostra é dada por

$$n = \left(\frac{z s}{e \bar{t}} \right)^2 \quad (3.10)$$

onde

n é o tamanho da amostra;

e é o erro relativo (proporção do real valor da média);

s é o desvio-padrão, obtido a partir do conjunto inicial de observações;

\bar{t} é o tempo médio do conjunto inicial de observações;

z é o valor da distribuição normal padrão, correspondente ao nível de confiança desejado.

O tamanho de amostra n deve ser calculado para cada atividade e o maior deles utilizado para que todas as estimativas de tempo alcancem ou excedam a precisão desejada.

O tempo médio de busca quando da ocorrência de um alarme falso é a média do somatório dos tempos de cada atividade.

3.3.3 Tempo necessário para coletar uma amostra, executar medições e plotar um ponto na carta, nE .

Este tempo é obtido junto ao responsável pelo preenchimento da carta de controle, normalmente o operador da máquina, através da medição do tempo que o mesmo despense para executar a tarefa. Também aqui é recomendável utilizar o método

de estudo de tempos de Krajewski e Ritzmann (1999), descrito na seção 3.3.2, para estimar o valor de nE com maior precisão.

Sendo n o tamanho da amostra e \bar{t} o tempo médio obtido através das medições, tem-se que $\hat{E} = \bar{t}/n$ é o tempo médio de processamento por observação amostral.

3.3.4 Tempo médio de busca por causas especiais, T_S

A determinação do valor deste tempo depende da identificação dos principais tipos de causas especiais que incidem sobre o processo. Isto significa que devem ser identificadas as causas especiais que ocorrem com maior frequência, sendo consideradas desprezíveis outras possíveis causas existentes. Estas diferentes causas especiais, que ocorrem em diferentes proporções e demandam diferentes tempos de busca, devem ser consideradas em conjunto no cálculo do tempo médio de busca. Para isso, deve ser feita uma média ponderada dos tempos de busca, dados por b_i , com ponderação dada pelas proporções de ocorrência de cada causa, ou p_i . Assim, para um conjunto de n causas especiais, a estimativa de T_S é dada por:

$$\hat{T}_S = \sum_{i=1}^n b_i p_i \quad (3.11)$$

Os tempos de busca (b_i), neste caso, dependem dos procedimentos adotados a partir da sinalização da carta até a identificação da causa especial que causou a sinalização. Definidos estes procedimentos, os tempos são medidos junto a quem os realiza, seguindo o procedimento apresentado na seção 3.3.2.

As proporções de ocorrência (p_i) podem ser obtidas através dos registros históricos da empresa, se nestes constarem as causas especiais identificadas em cada situação fora de controle observada. Outra forma de obter os valores p_i utiliza a opinião dos técnicos da empresa, de acordo com a sua experiência. Ressalta-se que esta última é uma forma subjetiva de obtenção dos valores e que, por isso, deve ser considerada com cuidado.

3.3.5 Tempo médio de reparo das causas especiais, T_R

O tempo de reparo das causas especiais é o tempo necessário, a partir do momento da identificação da causa especial, para corrigir o problema e recolocar o processo no chamado estado sob controle. O tempo médio de reparo também é calculado através de uma média ponderada das principais causas especiais. As ponderações são dadas pelos mesmos valores p_i descritos acima e os tempos são, agora, os tempos de reparo, ou r_i . Desta forma, para um conjunto de n causas especiais, a estimativa de T_R é dada por:

$$\hat{T}_R = \sum_{i=1}^n r_i p_i \quad (3.12)$$

A obtenção dos tempos de reparo, assim como dos tempos de busca, é feita através da medição do tempo de trabalho necessário para esta tarefa. Sugere-se adotar o método descrito na seção 3.3.2.

3.3.6 Custo/hora de operação do processo sob controle, C_0 , e fora de controle, C_1

Estes custos são resultado da produção de peças não-conformes, estando o processo sob controle e fora de controle, respectivamente. Para a sua estimação, é preciso obter informações sobre o custo unitário da peça não-conforme, o número de peças produzidas por hora e o percentual de peças não-conformes produzidas sob controle e fora de controle. Com estas informações, os custos C_0 e C_1 são calculados por:

C_0 = custo unitário da peça não-conforme \times n° de peças produzidas/h \times fração de peças não-conformes produzidas sob controle;

C_1 = custo unitário da peça não-conforme \times n° de peças produzidas/h \times fração de peças não-conformes produzidas fora de controle.

Os dois primeiros valores (custo unitário da peça não-conforme e nº de peças produzidas/h) em geral são bem conhecidos e de fácil identificação, podendo ser obtidos diretamente dos registros da empresa. O percentual total de peças não-conformes produzidas em cada processo, também é normalmente de conhecimento dos técnicos da empresa. A dificuldade que aqui se apresenta é identificar, deste percentual total, qual o percentual produzido sob controle e fora de controle.

Na falta de dados históricos discriminando as peças não-conformes produzidas nas situações sob controle e fora de controle, uma forma de obter uma aproximação destes percentuais é através dos índices C_p ou C_{pk} do processo. Como estes índices são calculados estando o processo sob controle, a partir do valor de um deles pode-se estimar o percentual de não-conformes produzido sob controle. Para isso, é necessário que a média do processo esteja centrada entre os limites inferior e superior de especificação, caso em que estes dois índices são iguais, e que a característica de qualidade tenha distribuição normal. Assim, obtém-se o valor de PPM , de acordo com as equações (3.4) e (3.5) apresentadas anteriormente. Obtido o valor de PPM , calcula-se o percentual de peças não-conformes produzidas sob controle, através de:

$$\% \text{ de peças não-conformes produzidas sob controle} = \frac{PPM \times 100}{1.000.000} \quad (3.13)$$

Finalmente, o percentual de peças não-conformes produzidas fora de controle é calculado pela diferença entre o percentual total e o percentual produzido sob controle.

3.3.7 Custo médio por alarme falso, Y

O custo médio por alarme falso é decorrente da interrupção na produção, durante a busca por causas especiais, após um alarme falso. Como o tempo médio de busca quando da ocorrência de um alarme falso, representado por T_f , já foi identificado, resta ainda determinar o custo gerado pela interrupção na produção. Sendo devido principalmente às peças que deixam de ser produzidas durante certo tempo, este custo normalmente é facilmente identificado e conhecido. O mesmo será aqui chamado de custo/h da máquina parada. Desta forma, o custo médio por alarme falso é dado por:

$$\hat{Y} = \hat{T}_f \times \text{custo}/h \text{ da máquina parada .} \quad (3.14)$$

3.3.8 Custo médio para localizar e reparar uma causa especial, C_d

A estimação deste custo utiliza o mesmo procedimento descrito acima, para o custo Y , porém considerando os tempos médios de busca e reparo de causas especiais, T_S e T_R , respectivamente. Quando houver uma equipe especialmente destinada a realizar o reparo, seu custo deve ser incorporado ao cálculo de C_d . Porém, quando o reparo for executado pelo próprio operador da máquina, este custo é igualado a zero. Assim, o custo médio para localizar e reparar uma causa especial é dado por:

$$\hat{C}_d = (\hat{T}_S + \hat{T}_R) \times \text{custo}/h \text{ da máquina parada} + \text{custo da equipe de reparo} \quad (3.15)$$

3.3.9 Custo de coleta, processamento e plotagem de um ponto amostral na carta de controle, $a_1 + a_2n$

Para a determinação do custo fixo de amostragem (a_1), deve-se considerar todos os gastos realizados (por exemplo, gastos para adquirir e aferir instrumentos de medição) para possibilitar a coleta e medição das peças amostradas, bem como a plotagem do ponto amostral na carta de controle. Estes gastos podem ser diferentes para cada empresa, não sendo prático definir uma equação para o seu cálculo.

Para o cálculo do custo variável (a_2n), sugere-se a utilização do custo horário do responsável pela tarefa (salário mais encargos sociais), em geral o operador da máquina, proporcionalmente ao tempo destinado à mesma. Este tempo já foi definido anteriormente e é representado por nE . Também deve ser considerado o custo/h da máquina parada quando houver a interrupção na produção durante a execução das medições e o custo das peças destruídas, quando os ensaios forem destrutivos. Desta forma, o cálculo de a_2n é feito através de:

$$\hat{a}_2n = (\text{custo horário do executor da tarefa} + \text{custo}/h \text{ da máquina parada} \times \mathbf{d}_3) \times n\hat{E} + \text{custo unitário da peça} \times n \times \mathbf{d}_4 \quad (3.16)$$

onde:

$$d_3 = \begin{cases} 0 & \text{se a produção não é interrompida durante o processo de coleta, processamento e} \\ & \text{plotagem de um ponto amostral na carta;} \\ 1 & \text{se a produção é interrompida durante o processo de coleta, processamento e} \\ & \text{plotagem de um ponto amostral na carta.} \end{cases}$$

$$d_4 = \begin{cases} 0, & \text{para ensaios não - destrutivos} \\ 1, & \text{para ensaios destrutivos} \end{cases}$$

3.4 APLICAÇÃO DO MODELO PARA A OBTENÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DA CARTA ADAPTATIVA

Após a determinação dos valores dos parâmetros de entrada do modelo, deve ser feita a aplicação de um algoritmo de otimização. Este algoritmo irá determinar os valores ótimos das variáveis de decisão do modelo, que são os parâmetros da carta adaptativa (tamanho da amostra, intervalo de amostragem e coeficiente dos limites de controle). Como a função objetivo do modelo é não-linear, é preciso utilizar um algoritmo não-linear, tal como o *generalized reduced gradient algorithm* (GRG). (Lasdon *et al.*, 1978). Este algoritmo está implementado em programas computacionais como, por exemplo, o What's Best!, da Lindo Systems Inc. (What's Best!, 1998) e o Microsoft Excel (Microsoft Excel, 1997).

Para a utilização destes algoritmos, valores iniciais são atribuídos às variáveis de decisão, dando início à busca por seus valores ótimos, que minimizem o custo na função objetivo do modelo. Uma dificuldade que se apresenta neste ponto é o fato do algoritmo de busca ser sensível aos valores iniciais das variáveis de decisão. Isto significa que valores iniciais distintos podem levar a diferentes resultados ótimos. Este fato acontece porque, ao contrário dos modelos de otimização linear, onde uma solução ótima global pode ser sempre encontrada, os modelos de otimização não-linear podem chegar a várias soluções candidatas, chamadas soluções ótimas locais, algumas substancialmente melhores que outras. A melhor dentre as soluções locais é selecionada como solução global para o problema, dificilmente podendo-se assegurar que uma completa investigação do espaço não-linear de soluções viáveis foi realizada. Assim, um determinado conjunto de valores iniciais atribuídos às variáveis de decisão irá levar à

uma solução ótima local. Porém, não há nenhuma garantia de que outro conjunto de valores iniciais não possa levar a outra solução ótima local, melhor do que a primeira.

Para lidar com este problema, uma opção seria escolher valores iniciais próximos à solução ótima global. Porém, quando não há nenhum conhecimento prévio sobre a provável localização da solução ótima global, a opção indicada é executar a otimização várias vezes, sempre com valores iniciais diferentes, em busca de uma melhor solução ótima local. Esta solução passa, então, a ser considerada a solução ótima global (Winston, 1994; What's Best!, 1998).

O procedimento acima descrito deve ser repetido, ainda, para diferentes valores de k , que representa a mudança no valor alvo do processo, em desvios-padrão. Isto permite que sejam projetadas cartas de controle distintas (com diferentes valores de parâmetros), de acordo com a magnitude de mudança que se deseja detectar no processo. Ou seja, para detectar pequenas mudanças no valor alvo (por exemplo, a partir de 0,5 desvio-padrão) será projetada uma carta com maior sensibilidade em relação à alterações no processo. Por outro lado, se pequenas mudanças no processo não forem muito problemáticas, é possível projetar uma carta com média sensibilidade à alterações (que detecte, por exemplo, mudanças a partir de 1,5 desvios-padrão). Esta sensibilidade é determinada pelos valores dos parâmetros da carta. Assim, cada grau de sensibilidade desejado irá produzir cartas de controle com valores diferentes de seus parâmetros.

A determinação das variáveis de decisão, ou parâmetros da carta, encerra o processo de planejamento da implementação do controle de processos através de cartas adaptativas, que é o enfoque deste trabalho. A próxima fase é a implementação propriamente dita das cartas de controle no controle dos processos. Esta implementação daria início a um seguimento natural deste trabalho, onde seriam avaliados, na prática, os resultados da utilização das cartas adaptativas de controle.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

O estudo de caso aqui apresentado foi realizado na empresa ATH – Albarus Transmissões Homocinéticas Ltda. Com origem na Albarus & Cia. Ltda., fundada no ano de 1947 em Porto Alegre – RS, a empresa associou-se em 1957 à Dana Corporation – USA e em 1974 com a GKN Industries da Inglaterra. Operando desde 1988 com o nome atual, a ATH conta hoje com unidades em Porto Alegre e Charqueadas, onde são produzidos os Semi-eixos Homocinéticos (Figura 4.1). Este produto tem como principal objetivo permitir a transmissão de torque do motor para as rodas de veículos automotores e é composto por duas juntas homocinéticas, duas sanfonas (também chamadas de mangas ou coifas) e um eixo interconector. Os veículos possuem um semi-eixo para cada roda motriz. No lado da roda dos veículos com tração dianteira são montadas as juntas fixas, que transmitem torque e rotações em ângulos de até 47°. No lado do diferencial de veículos com tração dianteira e nos lados da roda e do diferencial de veículos de tração traseira ficam as juntas deslizantes. As juntas são compostas de uma ponta de eixo, um anel interno e uma gaiola (Figura 4.2).



Figura 4.1 – Semi-eixos homocinéticos.

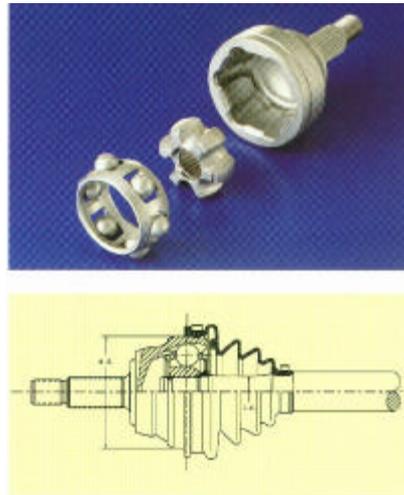


Figura 4.2 – Junta homocinética.

A produção da ATH está organizada em minifábricas, ou unidades de manufatura. São elas: UMC – Unidade de Manufatura de Componentes, que produz a gaiola e o anel interno R; UMPE – Unidade de Manufatura da Ponta de Eixo; UMJD – Unidade de Manufatura da Junta Deslizante; UME – Unidade de Manufatura de Eixos; UMF – Unidade de Manufatura de Forjados; a Montagem e a Hytrel, onde são confeccionadas as mangas ou coifas.

O estudo de caso durou aproximadamente oito meses e envolveu seis pessoas da equipe de especialistas da empresa.

4.2 SELEÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE A SEREM MONITORADAS ATRAVÉS DAS CARTAS ADAPTATIVAS

Como o enfoque deste estudo é a aplicação das cartas adaptativas no controle de processos já monitorados através de cartas de controle $\bar{X} - R$ com parâmetros fixos, a unidade escolhida para condução do estudo de caso foi a UMC. Esta unidade apresenta o maior número de características de qualidade monitoradas por cartas $\bar{X} - R$, dentre todas as unidades, o que justifica a escolha. Além disso, a unidade UMC possui dados

históricos sobre o controle dos processos, por estar utilizando o CEP de forma consolidada há mais tempo; tais dados são essenciais no planejamento das cartas adaptativas.

Escolhida a unidade onde seria realizado o estudo de caso, a próxima etapa foi a obtenção da lista de características de qualidade monitoradas nesta unidade. Estas características estão divididas por linha de produtos (gaiola e anel interno R), sendo identificadas pelo nome e número da máquina onde ocorre o monitoramento e pelo número da estação, quando há mais de uma. Uma estação pode ter dois significados: ou é a responsável pela produção de toda uma peça ou é responsável por uma determinada parte da peça. No primeiro caso, uma máquina com duas estações pode produzir duas peças simultaneamente e, no segundo caso, pode realizar duas operações na mesma peça. Assim, por exemplo, na produção do “anel interno R” é utilizada a máquina Russo de número 029. Esta máquina possui estações numeradas de 1 a 6, cada uma delas executando uma operação diferente na mesma peça. Em cada uma das estações é monitorada a característica de qualidade chamada concentricidade.

As cartas de controle utilizadas na empresa são as $\bar{X} - R$, cartas individuais e cartas de média móvel. Algumas características de qualidade são controladas por inspeção 100%. Das características de qualidade listadas na primeira etapa, foram selecionadas aquelas monitoradas através de cartas $\bar{X} - R$. As demais características de qualidade (monitoradas por cartas individuais, de média móvel ou por inspeção 100%) não foram consideradas no estudo.

A partir da listagem das características de qualidade monitoradas através de cartas $\bar{X} - R$, foi iniciado um novo processo de seleção. Este processo teve como objetivo determinar as características de qualidade mais importantes em termos de qualidade demandada pelos clientes e custos relacionados ao controle do processo. Assim, foram identificadas as características de qualidade mais indicadas para a implementação das cartas adaptativas.

A ferramenta de análise utilizada nesta etapa foi o Desdobramento da Função Qualidade (QFD), apresentada no Capítulo 3. O QFD auxiliou na identificação dos fatores importantes em termos de qualidade demandada e custos e na determinação de

seu grau de relação com as características de qualidade. O Anexo A apresenta a Matriz do QFD obtida neste estudo de caso, representada parcialmente na Figura 4.3. Os itens de qualidade demandada considerados foram: montagem perfeita, segurança, desempenho (relacionado à ausência de ruído e capacidade de torque), durabilidade e intercambiabilidade. Os itens de custo considerados foram: custo de operação fora de controle, custo de alarmes falsos, custo de localização e reparo de causas especiais e custo de amostragem.

O cálculo dos pesos de cada item (W_j) foi feito da seguinte maneira: em uma primeira etapa foram atribuídos pesos para os itens de qualidade e de custo separadamente, totalizando 100 para cada um dos dois grupos de itens. Em uma segunda etapa, estes pesos foram redistribuídos de maneira a totalizar 100 para os dois grupos em conjunto, porém dando uma importância maior para os itens de custo (60%) do que para os itens de qualidade (40%). Este procedimento foi adotado para facilitar a atribuição dos pesos aos diferentes itens.

Na fase de preenchimento da matriz com os valores R_{ij} , duas adaptações foram necessárias, sempre com o objetivo de facilitar a atribuição dos valores. A primeira adaptação consistiu em uniformizar a escala de valores utilizada, já que em alguns itens a escala variou entre 0 e 5 e em outros entre 0 e 10. Isto ocorreu porque em certos casos a equipe da empresa considerou mais intuitivo trabalhar com valores entre 0 e 10. A segunda adaptação foi recalcular os valores dados ao item “custo de operação fora de controle” de acordo com o valor agregado à produção, na operação em questão. Assim, características de qualidade relacionadas a operações com maior valor agregado (operações executadas mais ao final da produção) recebiam um peso maior no item “custo de operação fora de controle”.

				Qualidade demandada					Custos											
				mont. perfeita	segurança	desempenho	durabilidade	intercambiabilidade			op. fora de controle	alarmes falsos	local. e reparo de C.E.	amostragem						
				10	45	25	15	5	100			40	5	20	35	100				
				4	18	10	6	2				24	3	12	21	100				
No	Máquina	Nº	OP-Charact. de Qualidade	Controle											ICQ	Capacidade	PPM	IPCQ		
2	Maixon	654	10-Paralelismo	X, R	2	0,5	1	1	0			0,2	0,5	1,5	0,5	67	1,34	58,226	3922,327	
4	Dmec	341-1	30-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,4	0,5	2,5	0,5	84	1,45	13,624	1140,714	
5	Dmec	341-2	30-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,4	0,5	2,5	0,5	84	1,58	2,140	179,157	
27	XLO	170-3	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,9	3	4	4	300	1,71	0,290	86,999	
66	Gildemeiser	259-6	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,3	2	4	3,5	143	1,82	0,048	6,827	
61	Gildemeiser	259-1	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,3	2	4	3,5	143	1,84	0,034	4,861	
3	Weisser	153	30-Ø Externo	X, R	2	0,5	1	1	0			0,4	0,5	0,5	0,5	60	1,81	0,056	3,374	
64	Gildemeiser	259-4	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,3	2	4	3,5	143	1,91	0,010	1,441	
17	Georg	243	40-Erro de divisão	X, R	3	0,8	1	1	0			0,9	0,5	3	2,5	154	1,94	0,006	0,978	
18	Georg	466	40-Erro de divisão	X, R	3	0,8	1	1	0			0,9	0,5	3	2,5	154	2,00	0,002	0,335	
42	XLO	461-6	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,9	3	4	4	300	2,11	0,000	0,080	
7	Promecor	442	30-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,4	0,5	2,5	0,5	84	2,17	0,000	0,006	
53	Russo	030-5	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,3	2	4	3,5	143	2,22	0,000	0,004	
38	XLO	461-2	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,9	3	4	4	300	2,26	0,000	0,004	
39	XLO	461-3	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,9	3	4	4	300	2,32	0,000	0,001	
63	Gildemeiser	259-3	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,3	2	4	3,5	143	2,31	0,000	0,001	
40	XLO	461-4	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,9	3	4	4	300	2,38	0,000	0,000	
62	Gildemeiser	259-2	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,3	2	4	3,5	143	2,39	0,000	0,000	
78	Meccanodora	840	80-Ø de Pista	X, R	5	0,5	2	2	0,5			4	1	1	1,5	205	2,44	0,000	0,000	
49	Russo	030-1	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,3	2	4	3,5	143	2,43	0,000	0,000	
50	Russo	030-2	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,3	2	4	3,5	143	2,47	0,000	0,000	
54	Russo	030-6	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,3	2	4	3,5	143	2,47	0,000	0,000	
41	XLO	461-5	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,9	3	4	4	300	2,52	0,000	0,000	
16	Georg	91	40-Erro de divisão	X, R	3	0,8	1	1	0			0,9	0,5	3	2,5	154	2,50	0,000	0,000	

Figura 4.3 – Resultados parciais da Matriz QFD do Estudo de Caso.

Concluído o preenchimento da matriz e calculado o índice de priorização $IPCQ_i$, foram selecionadas as dez características de qualidade mais indicadas para a implementação das cartas adaptativas (destacadas em negrito na Figura 4.3 e apresentadas no gráfico da Figura 4.4).

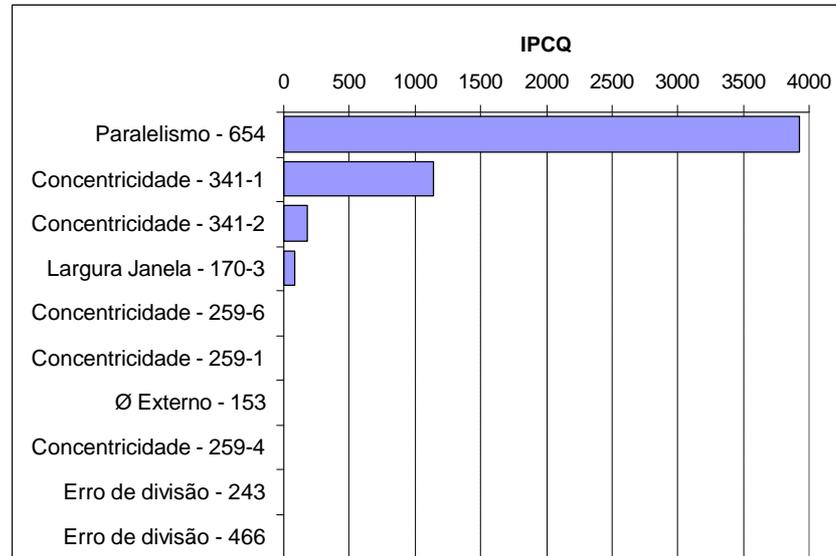


Figura 4.4 –Índice de Priorização das Características de Qualidade no Estudo de Caso.

A lista das dez características foi então apresentada à equipe técnica da empresa. Desta lista a equipe destacou a “concentricidade”, característica de qualidade associada às peças produzidas pela máquina Dmec nº 341. Este destaque deveu-se ao fato de estar sendo observado, na empresa, um grande número de peças não-conformes provenientes desta operação e, em particular, desta máquina.

A característica de qualidade concentricidade pode ser definida da seguinte maneira: a máquina Dmec nº 341 produz as gaiolas (Figura 4.5). Estas gaiolas possuem uma circunferência interna e uma circunferência externa, que devem ter o mesmo centro e raios diferentes. Ou seja, devem ser concêntricas. A concentricidade é a medida da distância existente entre os centros das duas circunferências. Seu valor alvo é zero.

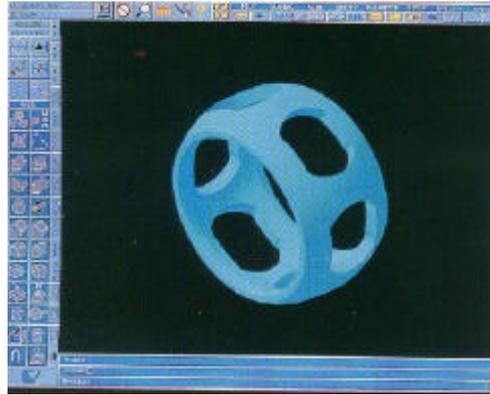


Figura 4.5 – Exemplo de gaiola (das juntas homocinéticas).

4.3 ESCOLHA DE UM MODELO A SER UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARTA ADAPTATIVA

Definida a concentricidade como característica de qualidade a ser controlada, foi feita a escolha do modelo estatístico-econômico e, a partir desse modelo, a determinação dos parâmetros [tamanho(s) de amostra, intervalo(s) de amostragem e coeficiente(s) dos limites de controle] da carta adaptativa a ser implantada. O modelo selecionado encontra-se descrito na seção 2.4.2, tendo sido observadas, para sua escolha, as considerações feitas na seção 3.2. A escolha do modelo considerou o fato de a média ter sido selecionada como medida de interesse para a concentricidade. Assim, a carta projetada é do tipo \bar{X} .

4.4 COLETA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A OPERACIONALIZAÇÃO DO MODELO

A seguir, são apresentados os procedimentos utilizados para a determinação dos valores dos parâmetros que irão compor a função objetivo do modelo econômico e que não são calculados pelo próprio modelo.

Para o cálculo do tempo de ciclo T , apresentado nas equações (2.38) e (2.39), estima-se o tempo médio que o processo permanece sob controle, $1/\lambda$. O modelo supõe

que o processo permanece sob controle por um tempo exponencialmente distribuído (ver suposição s3, seção 2.4.1). Por este motivo foi realizado um teste para verificar se esta suposição poderia ser aceita neste caso.

Para a realização deste teste e para obter uma estimativa da média deste tempo, foram utilizados dados históricos disponíveis. Os dados foram obtidos através da análise de cartas \bar{X} provenientes do controle do processo em questão, considerando um período de 8 meses (dezembro de 1998 a julho de 1999). Estas cartas forneceram uma série de valores da variável “número de pontos, plotados no gráfico, entre dois sinais de estado fora de controle”. Considerou-se como sinal de um estado fora de controle qualquer ponto acima ou abaixo dos limites de controle ou o último ponto de uma seqüência de sete pontos acima ou abaixo da linha central da carta. Os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 4.1**, abaixo.

Tabela 4.1 – Número de pontos e tempo (em horas) entre a ocorrência de dois pontos fora de controle.

Observação	Nº de pontos no gráfico	Tempo em horas (nº de pontos x 4 horas)
1	140	560
2	21	84
3	40	160
4	17	68
5	22	88
6	10	40
7	84	336
8	15	60
9	12	48
10	29	116
11	10	40
12	9	36
13	2	8
14	54	216
15	7	28

Obtidos os dados históricos, procurou-se verificar se:

- a) alguns destes valores deveriam ser considerados discrepantes (ou *outliers*, como já citado nas seções 3.3.1 e 3.3.2) em relação aos outros valores do conjunto de dados e, portanto, excluídos da análise;

b) a hipótese de que o processo permanece sob controle por um tempo exponencialmente distribuído poderia ser aceita.

Para verificar a presença de valores discrepantes foram utilizados os testes apresentados em Elsayed (1996) e descritos no Capítulo 3.

Seguindo os procedimentos do teste, para testar se o menor valor (em horas) do conjunto de dados da Tabela 4.1 ($t_{(1)} = 8$) era discrepante, obteve-se:

$$F_1 = \frac{\sum_{i=2}^r t_{(i)}}{(r-1)t_{(1)}} = \frac{\sum_{i=2}^{15} t_{(i)}}{(15-1).8} = \frac{1880}{112} = 16,786.$$

O valor crítico da distribuição F para um nível de significância $\alpha = 5\%$ é $F_{0,05;28;2} = 19,46$. Portanto, o valor $t_{(1)} = 8$ não pôde ser considerado discrepante e foi mantido na análise ($p = 0,058$).

Para testar o maior valor do conjunto de dados ($t_{(15)} = 560$), obteve-se:

$$F_2 = \frac{(r-1)t_{(r)}}{\sum_{i=1}^{r-1} t_{(i)}} = \frac{(15-1).560}{\sum_{i=1}^{14} t_{(i)}} = \frac{7840}{1328} = 5,904.$$

O valor crítico da distribuição F para $\alpha = 5\%$, neste caso, é $F_{0,05;2;28} = 3,34$. Assim, o valor $t_{(15)} = 560$ foi considerado discrepante em relação ao restante dos dados e excluído da análise ($p = 0,007$).

Após a exclusão do valor $t_{(15)} = 560$, o conjunto de dados passou a ter 14 observações e o maior valor passou a ser $t_{(14)} = 336$. Repetindo o teste para verificar este valor, obteve-se agora

$$F_2 = \frac{(r-1)t_{(r)}}{\sum_{i=1}^{r-1} t_{(i)}} = \frac{(14-1).336}{\sum_{i=1}^{13} t_{(i)}} = \frac{4368}{992} = 4,4032.$$

O valor crítico da distribuição F para $\alpha = 5\%$ é $F_{0,05;2;26} = 3,369$. Como este valor crítico é menor que F_2 , o valor $t_{(14)} = 336$ também foi considerado discrepante e excluído do conjunto de dados ($p = 0,022$).

Novamente o procedimento de teste foi realizado, agora para testar o tempo $t_{(13)} = 216$, que passou a ser o maior valor. A estatística F_2 forneceu o seguinte resultado:

$$F_2 = \frac{(r-1)t_{(r)}}{\sum_{i=1}^{r-1} t_{(i)}} = \frac{(13-1) \cdot 216}{\sum_{i=1}^{12} t_{(i)}} = \frac{2592}{776} = 3,3402.$$

Desta vez, o valor crítico para $\alpha = 5\%$ é $F_{0,05;2;24} = 3,403$ e $t_{(13)} = 216$ não foi considerado discrepante ($p = 0,052$). Desta forma, foram mantidos 13 valores no conjunto de dados.

Definidos os valores que seriam mantidos na análise, passou-se a verificar a hipótese de que os tempos podem ser modelados por uma distribuição exponencial. Um dos testes utilizados para este fim é o teste de Bartlett, também apresentado em Elsayed (1996) e descrito no Capítulo 3.

A aplicação deste teste às 13 observações mantidas no conjunto de dados, levou aos seguintes resultados:

$$\sum_{i=1}^r \ln t_i = 52,67$$

$$T = \sum_{i=1}^r t_i = 992$$

$$B_r = \frac{2r \left[\ln \left(\frac{T}{r} \right) - \frac{1}{r} \left(\sum_{i=1}^r \ln t_i \right) \right]}{1 + (r+1)/6r} = \frac{2 \cdot 13 \left[\ln \left(\frac{992}{13} \right) - \frac{1}{13} (52,67) \right]}{1 + (13+1)/6 \cdot 13} = \frac{7,36412}{1,17948} = 6,2435$$

Os valores críticos da distribuição Qui-quadrado para $\alpha = 0,05$ são $c_{0,975;12}^2 = 4,404$ e $c_{0,025;12}^2 = 23,337$. Como o valor $B_{13} = 6,2435$ pertence à região entre os valores críticos, concluiu-se que a distribuição exponencial pode ser utilizada para modelar estes dados. Assim, os 13 valores forneceram uma estimativa de $\hat{I} = 1/76,308 = 0,0131$.

O segundo termo em T demanda a determinação do valor da variável d_1 ; no processo estudado, $d_1 = 0$, ou seja, o processo pára durante a busca por causas especiais

inexistentes. Também é preciso estimar o tempo médio de busca quando da ocorrência de um alarme falso (T_f). Este tempo depende do procedimento utilizado pelo operador da máquina quando ocorre algum ponto fora dos limites de controle da carta de controle. No presente caso, mesmo que não exista uma causa real provocando o ponto fora dos limites da carta de controle (por ser um alarme falso), o procedimento padrão utilizado é executar uma limpeza nas castanhas (dispositivos fixadores das peças sendo usinadas). Assim, considerou-se que o tempo de busca quando da ocorrência de um alarme falso é o tempo gasto pelo operador para preparar a máquina para a execução da limpeza nas castanhas. Este tempo, medido junto aos operadores, foi de 4 minutos ($\hat{T}_f = 4 \text{ min} = \frac{4}{60} \text{ h} = 0,06667 \text{ h}$).

O tempo necessário desde a coleta da amostra até a plotagem do ponto na carta, nE , também foi medido através da observação do trabalho dos operadores. Para uma amostra de tamanho 3, observou-se um tempo de 40 segundos (isto é, $n\hat{E} = 40 \text{ s} = 0,01111 \text{ h}$). Consequentemente, $\hat{E} = \frac{0,01111}{3} = 0,0037037 \text{ h}$.

O processo possui três tipos distintos de causas especiais, com proporções de ocorrência p_i e tempo de busca b_i . O tempo médio de busca por causas especiais, T_S , foi estabelecido como sendo a média ponderada entre os três tipos de causas, com ponderação feita através dos pesos p_i . A principal causa especial é a presença de cavacos (pequena lasca resultante do corte da peça) na castanha, resultando em fixação incorreta da peça, com $p_1 = 0,80$ e $b_1 = 4 \text{ min}$ (igual ao tempo médio de busca quando da ocorrência de um alarme falso, pois o procedimento utilizado é o mesmo). O 2º tipo de causa mais freqüente é a desregulagem do carregador, dispositivo que coloca a peça na castanha ($p_2 = 0,15$; $b_2 = 6,6667 \text{ min}$). O 3º tipo de causa é o desgaste da placa ($p_3 = 0,05$; $b_3 = 12,16667 \text{ min}$). A estimativa de T_S é dada então por:

$$\hat{T}_S = \frac{4}{60} 0,80 + \frac{6,6667}{60} 0,15 + \frac{12,16667}{60} 0,05 = \frac{4,808}{60} = 0,080139 \text{ h}$$

Para completar o cálculo de T , deve-se determinar o tempo médio gasto no reparo das causas especiais. Novamente, utilizou-se a média ponderada das três principais causas especiais, desta vez analisando os tempos de reparo (r_i) ao invés dos tempos de busca. A 1ª causa é reparada através da limpeza das castanhas ($r_1 = 1 \text{ min}$). A

2ª causa é reparada através da regulagem do carregador ($r_2 = 50 \text{ min}$). A 3ª causa necessita do torneamento das castanhas para ser reparada ($r_3 = 60 \text{ min}$). O valor estimado para T_R é então:

$$\hat{T}_R = \frac{1}{60} 0,80 + \frac{50}{60} 0,15 + \frac{60}{60} 0,05 = \frac{11,3}{60} = 0,18833 \text{ h}$$

Na seqüência, estimam-se os custos C_0 e C_1 , este último incluído na equação (2.44). Estes custos resultam da produção de peças não-conformes, estando o processo sob controle e fora de controle, respectivamente. Dados históricos mostraram que, da produção total da máquina, cerca de 0,838% resultava em itens não-conformes, 3,81% dos quais eram detectados na própria operação e 96,19% cerca de cinco operações adiante, onde o valor agregado da peça já era maior. Devido a esta particularidade, o custo unitário de peça não-conforme é de \$ 3,48, obtido a partir de uma média ponderada do custo unitário das peças detectadas nas duas operações citadas.

O percentual de peças não-conformes produzidas sob controle foi estimado através do índice C_{pk} do processo. O mesmo apresentava um $C_{pk} = 1,45$, produzindo em torno de 6,81 partes por milhão de não-conformes, ou 0,000681% de sua produção total, considerando um limite de especificação unilateral. O percentual de peças não-conformes produzidas fora de controle foi obtido pela diferença entre o percentual total de peças não-conformes e o percentual de peças não-conformes produzidas sob controle (0,838% - 0,00068% = 0,8374%). Finalmente, a produção do processo em estudo é 192 peças/h. Com as informações acima, estimaram-se os valores de:

$$C_0 = \$3,48 \times 192 \times 0,0000068 = \$0,004677; \text{ e}$$

$$C_1 = \$3,48 \times 192 \times 0,0083741 = \$5,5954.$$

O valor de d_2 na equação (2.44) foi fixado em $d_2 = 0$ (isto é, a produção é interrompida durante a execução de reparos).

O custo médio por alarme falso, Y , nas equações (2.45) e (2.46), decorre da interrupção na produção durante a busca por causas especiais após um alarme falso. No caso, $\hat{Y} = \hat{T}_f \times (\text{custo/h da máquina parada}) = 0,06667 \times \$66,14 = \$4,41$. O mesmo procedimento foi utilizado para calcular o custo médio para localizar e reparar uma

causa especial, \hat{C}_d , considerando os tempos médios de localização e reparo de causas especiais, \hat{T}_S e \hat{T}_R . O custo da equipe de reparo, que deve ser considerado no cálculo de \hat{C}_d , não é considerado neste caso, pois o próprio operador da máquina efetua o reparo. Assim:

$$\begin{aligned}\hat{C}_d &= (\hat{T}_S + \hat{T}_R) \times \text{custo/h da máquina parada} = \\ &= (0,080139 + 0,18833) \times \$66,14 = \$17,75654.\end{aligned}$$

Finalmente, estima-se o custo associado à coleta, processamento e plotagem de um ponto amostral na carta de controle, necessário no cálculo de C_e , dado pela equação (2.47). Neste estudo, considera-se o custo fixo de amostragem (a_1) como sendo zero. Além disso, este procedimento não demanda interrupção na produção e o ensaio é não-destrutivo, ou seja, $d_3 = 1$ e $d_4 = 0$ (equação 3.16). Portanto, o custo total de coleta, processamento e plotagem é estimado exclusivamente pelo custo variável correspondente ao salário pago ao operador durante o tempo de execução da tarefa ($a_2 n = \$0,03$, relativo a um tempo $n \hat{E} = 0,011 h$).

4.5 APLICAÇÃO DO MODELO PARA A OBTENÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DA CARTA ADAPTATIVA

Determinados os valores dos parâmetros de entrada do modelo econômico, utilizou-se o algoritmo de otimização não-linear GRG, disponível na opção *Solver* do Microsoft Excel (Microsoft Excel, 1997). O objetivo foi de minimizar o custo na função objetivo do modelo (equação (2.37)), gerando valores ótimos para os parâmetros w , n , h_l e h_b , sujeito às restrições (2.48) a (2.56). Como o resultado ótimo depende da sensibilidade desejada para a carta adaptativa de controle, diferentes valores de k foram utilizados ($k = 0,5; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75; 2,00; 2,25; 2,50$ e $2,75$). Para cada k , diferentes combinações de valores de w , n , h_l e h_b foram usados para iniciar a otimização, sendo que nem todas levaram aos mesmos valores ótimos. O Anexo B apresenta esta otimização. O Anexo B1 apresenta a planilha de cálculo em Microsoft Excel, com os parâmetros do modelo calculados para $k = 1$. O Anexo B2 apresenta as

fórmulas para as variáveis calculadas, de acordo com a sintaxe deste programa, e o Anexo B3 apresenta os resultados da otimização dos parâmetros w , n , h_l e h_b , para diferentes combinações de valores iniciais, considerando $k = 1$, para efeitos de exemplificação.

4.5.1 Resultados

Os resultados apresentados na Tabela 4.2, abaixo, são as soluções ótimas globais encontradas, para diferentes valores de k , considerando estratégias de controle adaptativa (parte (a)) ou com parâmetros fixos (parte (b)). Ou seja, estes resultados representam as estratégias ótimas de controle, no sentido de minimizar o custo, para cada tipo de carta e valor de k . Na parte (a), são apresentados os valores ótimos para o limite de advertência (w), tamanho de amostra (n), maior intervalo de amostragem (h_l) e menor intervalo de amostragem (h_b). Também são apresentados os valores do número médio de amostras, a partir da ocorrência de uma mudança no processo, até a carta sinalizar o estado fora de controle (ANSS), o tempo médio até a carta sinalizar erroneamente um estado fora de controle (ATS_1), o tempo médio até a carta sinalizar corretamente um estado fora de controle (ATS_2) e o custo médio horário do controle do processo (C_{CAC}). Na parte (b) são apresentados, para diferentes valores de k , os valores ótimos de tamanho de amostra (n) e intervalo de amostragem (h) para cartas de controle tradicionais. Também são apresentados o tamanho médio de corrida estando o processo sob controle (ARL_1), o tamanho médio de corrida estando o processo fora de controle (ARL_2) e o custo médio horário (C_{CC}), mediante uma estratégia de controle da qualidade utilizando cartas de controle com parâmetros fixos. Para obter os valores de n , h e C_{CC} , utilizou-se o modelo econômico de Lorenzen e Vance (1986), sobre o qual foram apresentadas as idéias gerais na seção 2.4.1.

Tabela 4.2 - Resultados da otimização e parâmetros resultantes nas cartas adaptativas de controle e cartas de controle com parâmetros fixos, limites unilaterais.

Valores ótimos														
(a) Carta adaptativa									(b) Carta c/ parâmetros fixos					
k	w	n	h_l	h_b	ANSS	ATS_1	ATS_2	C_{CAC}	k	n	h	ARL_1	ARL_2	C_{CC}
0,50	0,803	21	3,890	0,077	4,203	2288,8	3,304	0,7264	0,50	61	6,349	740,76	1,2214	0,8446
0,75	0,716	9	2,654	0,034	4,317	1507,7	2,126	0,5502	0,75	28	4,233	740,76	1,2093	0,6429
1,00	0,680	5	2,045	0,019	4,297	1144,1	1,574	0,4673	1,00	16	3,188	740,76	1,2019	0,5421
1,25	0,670	3	1,684	0,012	4,211	937,0	1,256	0,4196	1,25	10	2,568	740,76	1,1959	0,4818
1,50	0,983	3	1,590	0,011	2,908	988,4	1,062	0,3908	1,50	7	2,158	740,76	1,1906	0,4417
1,75	1,383	3	1,591	0,011	1,952	1082,2	0,961	0,3754	1,75	5	1,868	740,76	1,1855	0,4132
2,00	1,740	3	1,602	0,011	1,473	1140,3	0,908	0,3668	2,00	4	1,653	740,76	1,1803	0,3919
2,25	2,058	3	1,617	0,011	1,227	1175,9	0,879	0,3616	2,25	3	1,487	740,76	1,1752	0,3755
2,50	2,288	3	1,631	0,096	1,101	1197,0	0,862	0,3582	2,50	3	1,357	740,76	1,1700	0,3624
2,75	2,261	3	1,639	0,705	1,041	1206,7	0,855	0,3556	2,75	2	1,251	740,76	1,1648	0,3517

4.5.2 Análise dos resultados

Os resultados da Tabela 4.2 podem ser melhor compreendidos da seguinte maneira: se o objetivo da empresa é implantar uma carta adaptativa de controle capaz de detectar mais rapidamente mudanças na média do processo a partir de 1 desvio-padrão ($k = 1$), seria utilizado um limite de advertência situado à 0,680 desvio-padrão da média do processo ($w = 0,680$). As amostras seriam de 5 unidades ($n = 5$), tomadas com intervalos de 2,045 horas ($h_l = 2,045$, aproximadamente 2 horas e 3 minutos), no caso do ponto amostral anterior ter sido plotado abaixo do limite de advertência, ou de 0,019 horas ($h_b = 0,019$, pouco mais de um minuto), no caso do ponto amostral anterior ter sido plotado entre o limite de advertência e o limite de controle. Esta estratégia de controle resultaria em um número médio de 4,297 amostras entre a ocorrência de uma mudança no processo e sinalização do estado fora de controle (ANSS = 4,297). Resultaria também em um tempo médio de 1.144,1 horas até a ocorrência de um alarme falso ($ATS_1 = 1.144,1$) e um tempo médio de 1,574 horas até a correta sinalização de uma situação fora de controle ($ATS_2 = 1,574$). O custo decorrente da utilização desta carta de controle seria de \$0,4673 por hora ($C_{CAC} = 0,4673$).

A Figura 4.6 ilustra o controle do processo por meio da estratégia descrita acima, supondo um processo com concentricidade média de 0,7 mm e desvio-padrão de 1,23

mm. Os valores plotados são hipotéticos. A região central (ou região de relaxamento do controle) compreende a faixa de valores, para a média, entre zero e 1,074 mm (correspondente ao limite de advertência, dado por $m_0 + wS/\sqrt{n}$). A região de advertência compreende a faixa de valores entre 1,074 mm e 2,35 mm (correspondente ao limite de controle, dado por $m_0 + LS/\sqrt{n}$). A carta sinaliza que o processo está fora de controle quando um ponto amostral cair na região acima de 2,35 mm.

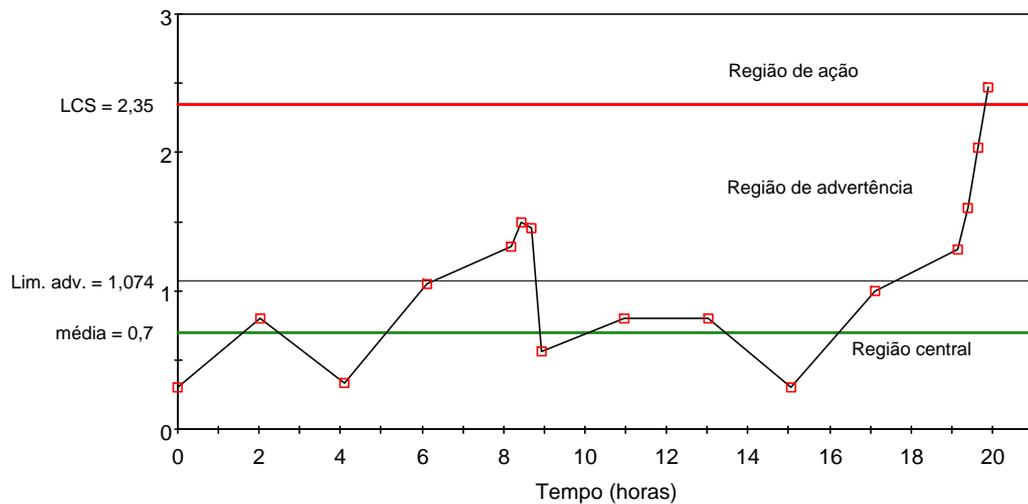


Figura 4.6 – Carta de controle \bar{X} com intervalo de amostragem adaptativo, proposta para o estudo de caso, para $k = 1$.

É interessante observar que, para este estudo de caso, os valores para o menor intervalo de amostragem (h_b) se aproximam sempre do seu limite inferior, dado pelo tempo necessário para coletar, medir e plotar uma amostra na carta de controle (nE). Isto significa que, no caso do ponto amostral anterior ter sido plotado na região de advertência da carta, a amostra seguinte será tomada imediatamente.

Se, ao invés da carta adaptativa, fosse utilizada uma carta de controle com parâmetros fixos, considerando a mesma mudança de 1 desvio-padrão na média do processo ($k = 1$), as amostras deveriam ser de 16 unidades ($n = 16$), tomadas com intervalos de 3,1 horas ($h = 3,1$). Esta estratégia resultaria em um número médio de 740,7 amostras até a ocorrência de um alarme falso ($ARL_1 = 740,7$) e um número médio

de 1,209 amostras entre a ocorrência de uma causa especial e a correta sinalização do estado fora de controle ($ARL_2 = 1,209$). O custo, neste caso, seria de \$0,5421 por hora ($C_{CC} = 0,5421$).

Para avaliar o desempenho das cartas adaptativa e tradicional, nas suas estratégias ótimas de custo, em relação ao tempo médio até a ocorrência de um alarme falso (sinalização incorreta de um estado fora de controle), pode-se comparar o valor de ATS_1 (em horas) com a multiplicação dos valores de ARL_1 (dado em número de amostras) e h (em horas). A Figura 4.7 apresenta esta comparação, para os diferentes valores de k analisados. Observa-se que a carta adaptativa possui tempos menores até a ocorrência de alarme falso para valores de k abaixo de 2, o que significa uma maior ocorrência de alarmes falsos, em comparação com a carta tradicional. Embora sendo uma característica indesejada desta carta adaptativa, este resultado não chega a comprometer de forma significativa o seu desempenho. Note-se que o valor mais baixo de ATS_1 (para $k = 1,25$) é igual a 937 horas, representando a ocorrência média de um alarme falso a cada 937 horas.

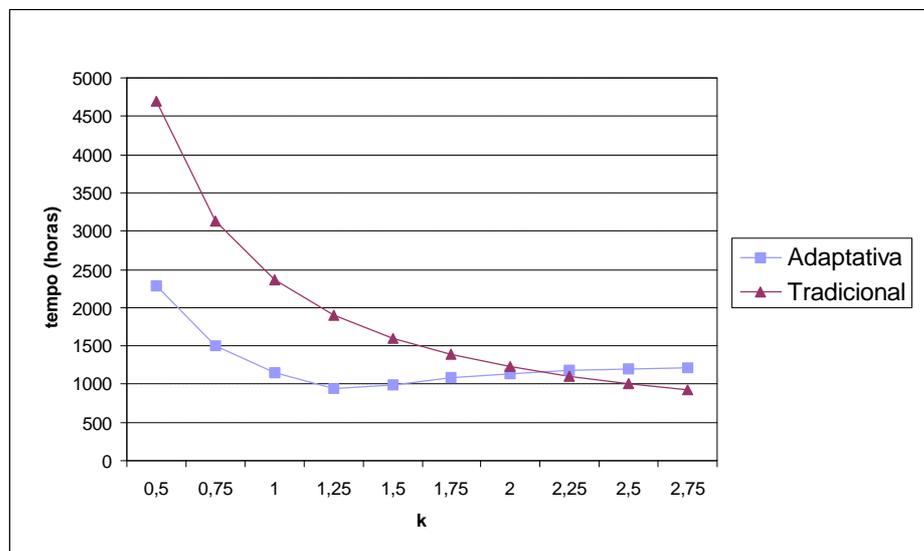


Figura 4.7 – Tempos médios até um alarme falso, para cartas adaptativas e tradicionais, como função do valor de k .

A comparação dos valores de ATS_2 (em horas) com a multiplicação dos valores de ARL_2 (dado em número de amostras) e h (em horas) permite avaliar o desempenho das cartas adaptativa e tradicional em relação ao tempo médio até a sinalização de um estado fora de controle. Esta comparação é particularmente importante, pois indica a

eficiência de cada tipo de carta na detecção de causas especiais. A Figura 4.8 mostra que a carta adaptativa detecta mudanças na média do processo mais rapidamente que a carta tradicional, para todos os valores de k , mas especialmente para os menores valores (pequenas mudanças na média). Em virtude da estratégia das cartas adaptativas de controle, intensificando a frequência de amostragem a partir da ocorrência de pontos na região de advertência, pode-se verificar numericamente que sua eficiência na detecção de pequenos desvios na média das características de qualidade é maior do que aquela verificada utilizando cartas de controle tradicionais.

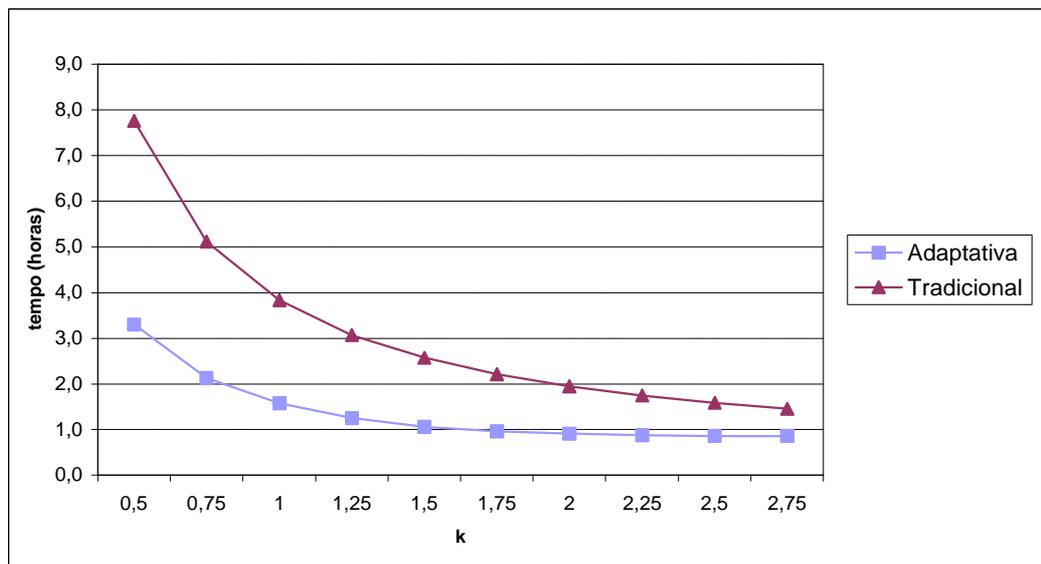


Figura 4.8 – Tempos médios até o sinal, para cartas adaptativas e tradicionais, como função do valor de k .

A comparação do desempenho econômico das cartas adaptativas e tradicional é realizada através da comparação dos valores de C_{CAC} e C_{CC} , para os diferentes valores de k apresentados na Tabela 4.2. Esses parâmetros indicam o custo médio horário do controle da qualidade no processo em estudo, mediante estratégias adaptativa e tradicional, respectivamente. A carta adaptativa de controle apresenta desempenho médio superior no monitoramento do processo se comparada à carta de controle tradicional, conforme evidenciado pelo menor custo médio horário C_{CAC} para valores de k inferiores a 2,75. A Figura 4.9 apresenta um gráfico de comparação entre os custos de controle para as duas cartas em função do valor de k para o processo em estudo. Parece evidente que, em termos de custos, a intensificação da frequência de amostragem sobre

o processo é compensada pela redução do tempo necessário para a sinalização de causas especiais, com conseqüente redução da produção de itens não-conformes.

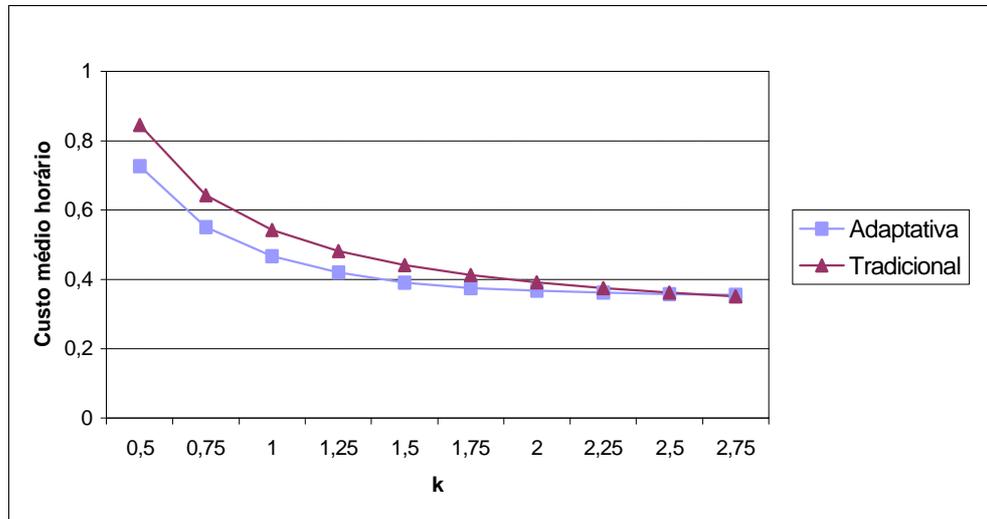


Figura 4.9 – Custos médios horários, para cartas adaptativas e tradicionais, como função do valor de k.

Cabe notar que, embora a diferença entre os custos médios horários das cartas adaptativa e tradicional possa parecer pequena, a economia proporcionada pela carta adaptativa pode ser significativa quando se considera sua utilização por longos períodos de tempo. Além disso, quando utilizadas em várias linhas de produção, a economia poderá ser maior. Uma vez que os resultados obtidos dependem dos parâmetros de entrada, o uso da carta em outros processos, com outros valores para os diversos parâmetros envolvidos, pode proporcionar maiores ganhos econômicos.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O principal objetivo desta dissertação foi elaborar uma metodologia de implementação de cartas adaptativas, a partir da investigação de aspectos práticos e teóricos relacionados ao planejamento da implementação destas cartas. Os aspectos práticos surgiram do estudo de caso e indicaram os modelos teóricos mais apropriados para o planejamento das cartas adaptativas para média, tendo em vista o processo em estudo. A partir da análise desses modelos, tendo em vista seus pressupostos e problemas que visavam tratar, foi feita a seleção do modelo teórico a ser utilizado no estudo de caso.

O período de realização do estudo de caso, que se estendeu por 8 meses, apresentou-se longo devido à não-disponibilidade inicial de uma metodologia de planejamento para a implementação das cartas adaptativas de controle. A literatura existente sobre o tema, via de regra, apresenta modelos e seus parâmetros de entrada; porém, não há uma preocupação no detalhamento de sua determinação prática, a fim de agilizar o processo de implementação das cartas. Para o caso dos modelos econômicos, devido a sua complexidade, a falta de uma metodologia de planejamento pode efetivamente inviabilizar seu uso. É neste sentido que foi desenvolvido este trabalho, ou seja, buscando desenvolver uma sistemática de apoio à implementação das cartas adaptativas.

A metodologia proposta no capítulo 3 iniciou-se com a utilização do QFD na priorização das características da qualidade a serem monitoradas através das cartas adaptativas. A partir daí, a mesma foi desdobrada até a obtenção dos dados necessários, cálculo dos parâmetros do modelo e planejamento da carta de controle. Introduziu-se na metodologia o método do estudo de tempos, a fim de dar suporte ao cálculo dos parâmetros de tempo.

Cabe destacar que a metodologia foi elaborada a partir do estudo de caso, o que parece indicar sua generalização restrita. Todavia, tendo em vista sua apresentação em cinco passos gerais, os quais podem ser desdobrados de forma diferenciada dependendo do tipo de processo a ser monitorado (requerendo, para tanto, o uso de modelos diferentes ou adaptações no modelo utilizado), defende-se a hipótese de aplicabilidade ampla em outros casos práticos. Isto se reforça pelo fato de a maioria dos parâmetros de entrada do modelo serem comuns a diferentes modelos econômicos identificados na revisão da literatura.

O estudo de caso também permitiu verificar, teoricamente, a diferença entre o uso das cartas adaptativas e tradicionais para monitorar o processo em questão, em termos de desempenho estatístico e econômico (custos associados). Os resultados indicaram ser preferível o uso de cartas adaptativas ao uso de cartas tradicionais para monitorar o processo estudado, principalmente no caso de pequenas variações na média da característica de qualidade monitorada. Os resultados indicam que, no caso de se ter várias linhas de produção similares, ou outros processos a serem controlados, com outros valores para os custos e parâmetros envolvidos, a economia proporcionada pelas cartas adaptativas pode ser ampliada. Entretanto, dadas as limitações do estudo de caso, as conclusões sobre a economia proporcionada neste estudo não podem ser generalizadas, o que, de qualquer forma, não se constitui em objetivo deste trabalho. O que se propõe como passível de generalização é a metodologia, ou seja, como planejar a implementação das cartas.

Considera-se, aqui, que a não implementação da carta adaptativa no processo em estudo não compromete a validade da metodologia proposta, visto que a mesma é destinada somente ao planejamento da carta e não à determinação de ações gerenciais

para sua implementação e acompanhamento. Via de regra, estas são ações relacionadas ao Gerenciamento da Rotina na fábrica, não tratadas neste trabalho.

Assim, considera-se ter contemplado o objetivo principal, bem como os objetivos secundários de: a) revisar a literatura sobre cartas adaptativas de controle, suas peculiaridades e aplicações, b) revisar a literatura sobre modelos econômicos para o planejamento de cartas de controle tradicionais e de cartas de controle adaptativas, c) analisar modelos econômicos propostos na literatura para o projeto de cartas adaptativas, com vistas a viabilizar a sua aplicação prática e d) realizar uma experimentação prática, através de um estudo de caso, a fim de dar subsídios ao desenvolvimento da metodologia e verificar as diferenças entre a utilização de cartas adaptativas e tradicionais.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É possível identificar, a partir deste trabalho, alguns estudos que podem ser desenvolvidos:

- Utilizar a metodologia aqui proposta em novos estudos de caso, para validar sua aplicabilidade;
- Investigar formas de determinar quais parâmetros devem ser considerados adaptativos, ou seja, que tipo de carta adaptativa deve ser utilizada em cada caso;
- Realizar a implementação de cartas adaptativas em outros processos, similares ou diferentes daquele estudado neste trabalho, e acompanhar seu desempenho no controle do processo, a fim de comprovar os pontos fortes e fracos de seu uso;
- Ampliar a metodologia para contemplar o planejamento conjunto de cartas adaptativas de controle do tipo \bar{X} e R , tomando como base o trabalho pioneiro de Costa (1998);

- Investigar a possibilidade de extensão de esquemas adaptativos de monitoramento de processos para contemplar cartas de controle multivariadas, como as cartas de Hotelling, ou cartas de controle baseadas na utilização de componentes principais;
- Realizar uma análise de sensibilidade sobre os parâmetros do modelo econômico utilizado no projeto de cartas adaptativas, priorizando parâmetros e propondo modelos simplificados, de fácil implementação;
- Realizar estudo de caso referente às ações de Gerenciamento da Rotina necessárias para manter o controle de processo através de cartas adaptativas, bem como propor um método ou abordagem deste gerenciamento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMIN, R. W.; LETSINGER, W. Improved Switching Rules in Control Procedures Using Variable Sampling Intervals. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, v.20, p.205-30, 1991.
- 2 AMIN, R. W.; MILLER, R. W. A Robustness Study of \bar{X} Charts with Variable Sampling Intervals. **Journal of Quality Technology**, v.25, p.36-44, 1993.
- 3 ANNADI, H. P.; KEATS, L. B.; RUNGER, G. C.; MONTGOMERY, D. C. An Adaptive Sample Size CUSUM Control Chart. **International Journal of Production Research**, v.33, n.6, p.1605-16, 1995.
- 4 BAXLEY, R. V., Jr. An Application of Variable Sampling Interval Control Charts. **Journal of Quality Technology**, v.27, p.275-82, 1995.
- 5 CATEN, C.S.; RIBEIRO, J.L.D.; FOGLIATTO, F.S. Implantação do Controle Integrado de Processos - etapas da implantação e estudo de caso. **Produto e Produção**, v.4, n.1, p.22-39, 2000.
- 6 COSTA, A. F. B. \bar{X} Charts with Variable Sample Size. **Journal of Quality Technology**, v.26, p.155-63, 1994.
- 7 COSTA, A. F. B. \bar{X} Chart with Variable Sample Size and Sample Intervals. **Journal of Quality Technology**, v.29, p.197-204, 1997.
- 8 COSTA, A. F. B. Joint \bar{X} and R Charts with Variable Parameters. **IIE Transactions**, v.30, p.505-14, 1998.

- 9 D'AGOSTINO, R.; STEPHENS, M. A. **Goodness-of-Fit Techniques**, New York: Marcel Dekker, 1986.
- 10 DAS, T. K.; JAIN, V. An economic design model for \bar{X} charts with random sampling policies. **IIE Transactions**, v.29, p.507-518, 1997.
- 11 DAS, T. K.; JAIN, V.; GOSAVI, A. Economic design of dual sampling interval policies for \bar{X} charts with and without run rules. **IIE Transactions**, v.29, n.6, p.497-506, 1997.
- 12 DAUDIN, J. J. Double Sampling \bar{X} Charts. **Journal of Quality Technology**, v.24, p.78-87, 1992.
- 13 DUNCAN, A. J. **Quality Control and Industrial Statistics**, 5.ed. Chicago: Richard D. Irwin, Inc, 1986.
- 14 EISENHARDT, K. M. Building Theories from Case Study Research. **Academy of Management Review**, v.14, n.4, p.532-550, 1989.
- 15 ELSAYED, E. A. **Reliability Engineering**, Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman, Inc, 1996.
- 16 FLAIG, J. J. Adaptive Control Charts. In: KEATS J. B.; MONTGOMERY D. C. (Ed.) **Statistical Process Control in Manufacturing**. Marcel Dekker, New York, NY, 1991. p.111-122.
- 17 GRABOV, P.; INGMAN, D. Adaptive Control Limits for Bivariate Process Monitoring. **Journal of Quality Technology**, v.28, n.3, p.320-30, 1996.
- 18 KEATS, J. B.; CASTILLO, E. D.; COLLANI, E. V.; SANIGA, E. M. Economic Modeling for Statistical Process Control. **Journal of Quality Technology**, v.29, p.144-47, 1997.
- 19 KRAJEWSKI, L. J.; RITZMAN, L. P., **Operations management: strategy and analysis**. 5 ed. Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman, Inc, 1999.
- 20 LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 1991.

- 21 LASDON, L. S.; WAREN, A. D.; JAIN, A.; RATNER, M. Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming. **ACM Trans. Math. Software**, v.4, p.34-50, 1978.
- 22 LORENZEN, T. J.; VANCE, L. C. The Economic Design of Control Charts: A Unified Approach. **Technometrics**, v.28, n.1, p.3-10, 1986.
- 23 MACKE, J. **Desenvolvimento de um modelo de intervenção baseado no Sistema Toyota de Produção e na Teoria das Restrições**: a utilização da pesquisa-ação em uma indústria de cerâmica vermelha de pequeno porte da região metropolitana de Porto Alegre. Porto Alegre, 1999. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 24 MCWILLIAMS, T. P. Economic, Statistical, and Economic-Statistical \bar{X} Chart Designs. **Journal of Quality Technology**, v.26, p.227-38, 1994.
- 25 MICROSOFT EXCEL, Ver. 97 **User's guide**. Microsoft Co., Redmond, WA, 1997.
- 26 MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- 27 PARKHIDEH, B.; CASE, K.E. The Economic Design of a Dynamic \bar{X} Control Chart. **IIE Transactions**, v.21, p.313-23, 1989.
- 28 PARK, C.; REYNOLDS, M. R., Jr. Economic Design of a Variable Sample Size \bar{X} Chart. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, v.23, p.467-83, 1994.
- 29 PRABHU, S. S.; MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. A Combined Adaptive Sample Size and Sampling Interval \bar{X} Control Scheme. **Journal of Quality Technology**, v.26, n.3, p.164-76, 1994.
- 30 PRABHU, S. S.; MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. A Design Tool to Evaluate Average Time to Signal Properties of Adaptive \bar{X} Charts. **Journal of Quality Technology**, v.27, n1, p.74-83, 1995.

- 31 PRABHU, S. S.; MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Economic-Statistical Design of an Adaptive \bar{X} Chart. **International Journal of Production Economics**, v.49, p.1-15, 1997.
- 32 PRABHU, S. S.; RUNGER, G. C.; KEATS, J. B. \bar{X} Chart with Adaptive Sample Sizes. **International Journal of Production Research**, v.31, p.2895-2909, 1993.
- 33 PROCEP: **Manual do Usuário**, Ver. 3.01. Porto Alegre, Maxxi Gestão Empresarial, 1999.
- 34 REYNOLDS, M. R., Jr. Optimal Variable Sampling Interval Control Charts. **Sequential Analysis**, v.8, p.361-79, 1989.
- 35 REYNOLDS, M. R., Jr. Evaluating Properties of Variable Sampling Interval Control Charts. **Sequential Analysis**, v.14, p.59-97, 1995.
- 36 REYNOLDS, M. R., Jr. Shewhart and EWMA Variable Sampling Interval Control Charts with Sampling at Fixed Times. **Journal of Quality Technology**, v.28, n.2, p.199-212, 1996^a.
- 37 REYNOLDS, M. R., Jr. Variable-Sampling-Interval Control Charts with Sampling at Fixed Times. **IIE Transactions**, v.28, p.497-510, 1996^b.
- 38 REYNOLDS, M. R., Jr.; AMIN, R. W.; ARNOLD, J. C. CUSUM Charts with Variable Sampling Intervals. **Technometrics**, v.32, p.371-84, 1990.
- 39 REYNOLDS, M. R., Jr.; ARNOLD, J. C. Optimal One-Sided Shewhart Control Charts with Variable Sampling Intervals. **Sequential Analysis**, v.8, p.51-77, 1989.
- 40 REYNOLDS, M. R., Jr.; ARNOLD, J. C.; BAIK, J. W. Variable Sampling Interval \bar{X} Charts in the Presence of Correlation. **Journal of Quality Technology**, v.28, p.12-30, 1996.
- 41 REYNOLDS, M. R., Jr.; AMIN, R. W.; ARNOLD, J. C.; NACHLAS, J. A. \bar{X} Charts with Variable Sampling Intervals. **Technometrics**, v.30, p.181-92, 1988.

- 42 RIBEIRO, J. L. D. **Controle estatístico do processo**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, 1997. Notas de aula.
- 43 ROESE, M. A metodologia do estudo de caso. In: NEVES, C. E. B; CORRÊA, M. B. (Org.) **Pesquisa Social Empírica: Métodos e Técnicas**. Porto Alegre: Cadernos de Sociologia, Programa de Pós-Graduação em Sociologia, PPGS/UFRGS, v. 9, 1998.
- 44 RUNGER, G. C.; MONTGOMERY, D. C. Adaptive Sampling Enhancements for Shewhart Control Charts. **IIE Transactions**, v.25, p.41-51, 1993.
- 45 RUNGER, G. C.; PIGNATIELLO, J. R., JOSEPH J. Adaptive Sampling for Process Control. **Journal of Quality Technology**, v.23, n.2, p.135-55, 1991.
- 46 SACCUCCI, M. S.; AMIN, R. W.; LUCAS, J. M. Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes with Variable Sampling Intervals. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, v.21, p.627-57, 1992.
- 47 STEPHENS, M. A. EDF Statistics for Goodness-of-Fit and Some Comparisons. **Journal of the American Statistical Association**, v.69, p.730-37, 1974.
- 48 TAGARAS, G. A Survey of Recent Developments in the Design of Adaptive Control Charts. **Journal of Quality Technology**, v.30, n.3, p.212-31, 1998.
- 49 VINING, G. G.; REYNOLDS, M. R., Jr. Multi-Level Sampling Interval Approach to Control Charts. **Journal of Quality Technology**, v.29, n.4, p.418-28, 1997.
- 50 WINSTON, W.L. **Operations Research – Applications and Algorithms**. Belmont, California: Duxbury Press, 1994.
- 51 WHAT'S BEST! **User's Manual**. Taking your spreadsheet beyond "What If?" Lindo Systems Inc., Chigaco, Illinois, 1998.
- 52 YIN, R.K. **Case study research: design and methods**. 2.ed. Thousand Oaks: Sage, 1994.

ANEXOS

ANEXO A – MATRIZ DO QFD PARA O ESTUDO DE CASO

					Qualidade demandada					Custos										
					mont. perfeita	segurança	desempenho	durabilidade	intercambiabilidade			op. fora de controle	alarmes falsos	local. e reparo de C.E.	amostragem					
					10	45	25	15	5	100			40	5	20	35	100			
					4	18	10	6	2				24	3	12	21	100			
No	Máquina	Nº	OP-Caract. de Qualidade	Controle												ICQ	Capacidade	PPM	IPCQ	
2	Maixon	654	10-Paralelismo	X, R	2	0,5	1	1	0			0,18	0,5	1,5	0,5	67	1,34	58,226	3922,327	
4	Dmec	341-1	30-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	1,45	13,624	1140,714	
5	Dmec	341-2	30-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	1,58	2,140	179,157	
27	XLO	170-3	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	1,71	0,290	86,999	
66	Gildemeiser	259-6	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	1,82	0,048	6,827	
61	Gildemeiser	259-1	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	1,84	0,034	4,861	
3	Weisser	153	30-Ø Externo	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	0,5	0,5	60	1,81	0,056	3,374	
64	Gildemeiser	259-4	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	1,91	0,010	1,441	
17	Georg	243	40-Erro de divisão	X, R	3	0,8	1	1	0			0,91	0,5	3	2,5	154	1,94	0,006	0,978	
18	Georg	466	40-Erro de divisão	X, R	3	0,8	1	1	0			0,91	0,5	3	2,5	154	2,00	0,002	0,335	
42	XLO	461-6	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,11	0,000	0,080	
7	Promecor	442	30-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	2,17	0,000	0,006	
53	Russo	030-5	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,22	0,000	0,004	
38	XLO	461-2	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,26	0,000	0,004	
39	XLO	461-3	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,32	0,000	0,001	
63	Gildemeiser	259-3	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,31	0,000	0,001	
40	XLO	461-4	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,38	0,000	0,000	

62	Gildemeiser	259-2	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,39	0,000	0,000
78	Meccanodora	840	80-Ø de Pista	X, R	5	0,5	2	2	0,5			4	1	1	1,5	205	2,44	0,000	0,000
49	Russo	030-1	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,43	0,000	0,000
50	Russo	030-2	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,47	0,000	0,000
54	Russo	030-6	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,47	0,000	0,000
41	XLO	461-5	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,52	0,000	0,000
16	Georg	91	40-Erro de divisão	X, R	3	0,8	1	1	0			0,91	0,5	3	2,5	154	2,50	0,000	0,000
6	Promecor	441	30-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	2,49	0,000	0,000
79	Meccanodora	842	80-Ø de Pista	X, R	5	0,5	2	2	0,5			4	1	1	1,5	205	2,56	0,000	0,000
11	Promecor	782	35-Ø Externo	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	0,5	0,5	60	2,51	0,000	0,000
73	Russo	354-5	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,58	0,000	0,000
65	Gildemeiser	259-5	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,59	0,000	0,000
71	Russo	354-3	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,59	0,000	0,000
57	Gildemeiser	177-3	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,64	0,000	0,000
59	Gildemeiser	177-5	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,64	0,000	0,000
60	Gildemeiser	177-6	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,64	0,000	0,000
52	Russo	030-4	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,67	0,000	0,000
77	Meccanodora	760	80-Ø de Pista	X, R	5	0,5	2	2	0,5			4	1	1	1,5	205	2,70	0,000	0,000
36	XLO	231-6	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,72	0,000	0,000
14	Promecor	787	30.1-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	2,70	0,000	0,000
15	Promecor	788	30.1-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	2,70	0,000	0,000
75	Cosmos	371	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	2	2	88	2,75	0,000	0,000
1	Bodenson	438	10-Paralelismo	X, R	2	0,5	1	1	0			0,18	0,5	1,5	0,5	67	3,30	0,000	0,000
8	Promecor	443	30-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	3,28	0,000	0,000
9	Promecor	444	30-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	3,35	0,000	0,000
10	Promecor	781	30-Ø Interno	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	0,5	0,5	60	4,16	0,000	0,000
12	Promecor	785	30.1-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	3,01	0,000	0,000
13	Promecor	786	30.1-Concentricidade	X, R	2	0,5	1	1	0			0,36	0,5	2,5	0,5	84	3,00	0,000	0,000
19	XLO	169-1	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	4,12	0,000	0,000
20	XLO	169-2	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,77	0,000	0,000
21	XLO	169-3	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,82	0,000	0,000
22	XLO	169-4	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,33	0,000	0,000
23	XLO	169-5	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,46	0,000	0,000
24	XLO	169-6	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,50	0,000	0,000

25	XLO	170-1	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,88	0,000	0,000
26	XLO	170-2	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,33	0,000	0,000
28	XLO	170-4	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,34	0,000	0,000
29	XLO	170-5	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	4,63	0,000	0,000
30	XLO	170-6	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,42	0,000	0,000
31	XLO	231-1	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	3,29	0,000	0,000
32	XLO	231-2	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,83	0,000	0,000
33	XLO	231-3	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	5,37	0,000	0,000
34	XLO	231-4	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,96	0,000	0,000
35	XLO	231-5	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,90	0,000	0,000
37	XLO	461-1	100-Largura Janela	X, R	4	1	3	4	1			2,86	3	4	4	300	2,92	0,000	0,000
43	Russo	029-1	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	4,18	0,000	0,000
44	Russo	029-2	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,45	0,000	0,000
45	Russo	029-3	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,30	0,000	0,000
46	Russo	029-4	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,11	0,000	0,000
47	Russo	029-5	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,08	0,000	0,000
48	Russo	029-6	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,25	0,000	0,000
51	Russo	030-3	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,77	0,000	0,000
55	Gildemeiser	177-1	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,07	0,000	0,000
56	Gildemeiser	177-2	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,13	0,000	0,000
58	Gildemeiser	177-4	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	2,99	0,000	0,000
67	Dmec	342-1	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	2,5	122	3,98	0,000	0,000
68	Dmec	342-2	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	2,5	122	3,59	0,000	0,000
69	Russo	354-1	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,18	0,000	0,000
70	Russo	354-2	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,48	0,000	0,000
72	Russo	354-4	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,21	0,000	0,000
74	Russo	354-6	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	4	3,5	143	3,04	0,000	0,000
76	Promecor	898	10-Concentricidade	X, R	2	0	0	0	0,5			0,27	2	2	2	88	3,98	0,000	0,000

B2 – Fórmulas para as variáveis calculadas do modelo econômico, em Microsoft Excel

$$\phi = (\$B\$11*(DIST.NORMP(\$B\$8))/(DIST.NORMP(\$B\$10)))+(\$B\$12*(DIST.NORMP(\$B\$10)-DIST.NORMP(\$B\$8))/(DIST.NORMP(\$B\$10)))$$

$$\gamma = \frac{\$B\$11*(DIST.NORMP(\$B\$8-\$B\$15))/(DIST.NORMP(\$B\$10-\$B\$15))+\$B\$12*(DIST.NORMP(\$B\$10-\$B\$15)-DIST.NORMP(\$B\$8-\$B\$15))}{(DIST.NORMP(\$B\$10-\$B\$15))}$$

$$\tau(h_i) = (1-(1+\$B\$13*B11)*EXP(-\$B\$13*B11))/(\$B\$13*(1-EXP(-\$B\$13*B11)))$$

$$\tau(h_b) = (1-(1+\$B\$13*\$B\$12)*EXP(-\$B\$13*\$B\$12))/(\$B\$13*(1-EXP(-\$B\$13*\$B\$12)))$$

$$\Upsilon = \frac{(EXP(-\$B\$13*\$B\$11)*(DIST.NORMP(\$B\$8))/(DIST.NORMP(\$B\$10)))+(EXP(-\$B\$13*\$B\$12)*(DIST.NORMP(\$B\$10)-DIST.NORMP(\$B\$8))/(DIST.NORMP(\$B\$10)))}{(DIST.NORMP(\$B\$10))}$$

$$s = \frac{EXP(-\$B\$13*\$B\$12)*(((1-EXP(-\$B\$13*\$B\$11))*(DIST.NORMP(\$B\$8))/(DIST.NORMP(\$B\$10)))+(1-EXP(-\$B\$13*\$B\$12)) * ((DIST.NORMP(\$B\$10)-DIST.NORMP(\$B\$8))/(DIST.NORMP(\$B\$10))))}{(1/(1-\$F\$12)^2)}$$

$$ANSS = 1/(1-DIST.NORMP(\$B\$10-\$B\$15))$$

$$ATS1 = \$F\$8/(1-DIST.NORMP(\$B\$10))$$

$$ATS2 = \frac{((\$B\$11-\$F\$10)*((DIST.NORMP(\$B\$8))*\$B\$11)/((DIST.NORMP(\$B\$10))*\$F\$8))+((\$B\$12-\$F\$11)*(DIST.NORMP(\$B\$10)-DIST.NORMP(\$B\$8))*\$B\$12)/((DIST.NORMP(\$B\$10))*\$F\$8)+\$F\$9*(\$F\$14-1)}$$

$$C_a = \$B\$23/\$B\$13$$

$$C_b = \$B\$24*(\$F\$16+\$B\$17+\$B\$21*\$B\$19+\$B\$22*\$B\$20)$$

$$C_c = (1-DIST.NORMP(\$B\$10))*\$F\$13*\$B\$26$$

$$C_e = ((\$B\$27+(\$B\$28*\$B\$9))*\$F\$13)+(((\$B\$27+(\$B\$28*\$B\$9))/\$F\$9)*(\$F\$16+\$B\$17+(\$B\$21*\$B\$19)+(\$B\$22*\$B\$20)))$$

$$T = (1/\$B\$13)+((1-\$B\$21)*(1-DIST.NORMP(\$B\$10))*\$F\$13*\$B\$18)+\$F\$16+\$B\$17+\$B\$19+\$B\$20$$

$$C = (1/\$F\$24)*(\$F\$20+\$F\$21+\$F\$22+\$B\$25+\$F\$23)$$

B3 – Resultados da otimização dos parâmetros w , n , h_l e h_b , para diferentes combinações de valores iniciais e $k = 1$

k	Valores iniciais					Valores ótimos									
	w	n	L	h_l	h_b	w	n	L	h_l	h_b	ANSS	ATS1	ATS2	C	
1,0	0,5	3	3	3	0,1	0,433	3	3	2,981	0,000	9,54279	1475,79097	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	0,5	3	3	3	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29680	1144,04235	1,57395	0,46731	
1,0	0,5	3	3	3	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29669	1144,07978	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	3	3	3	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29672	1144,08087	1,57399	0,46731	
1,0	0,5	3	3	3	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29657	1144,09043	1,57396	0,46731	
1,0	0,5	3	3	3	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29772	1143,80041	1,57391	0,46731	
1,0	0,5	3	3	4	0,1	0,407	3	3	3,980	0,000	9,47316	1942,94371	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	0,5	3	3	4	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29666	1144,05914	1,57397	0,46731	
1,0	0,5	3	3	4	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29726	1143,92188	1,57393	0,46731	
1,0	0,5	3	3	4	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29669	1144,08173	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	3	3	4	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29673	1144,06264	1,57397	0,46731	
1,0	0,5	3	3	4	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29612	1144,19521	1,57403	0,46731	
1,0	0,5	3	3	5	0,1	0,681	5	3	2,046	0,019	4,29754	1144,68069	1,57510	0,46731	
1,0	0,5	3	3	5	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29940	1143,85483	1,57432	0,46731	
1,0	0,5	3	3	5	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29654	1144,09876	1,57397	0,46731	
1,0	0,5	3	3	5	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29663	1144,07262	1,57393	0,46731	
1,0	0,5	3	3	5	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29706	1144,06621	1,57407	0,46731	
1,0	0,5	3	3	5	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29611	1144,18071	1,57399	0,46731	
1,0	0,5	5	3	3	0,1	0,481	5	3	2,984	0,000	4,47890	1516,10598	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	0,5	5	3	3	0,3	0,686	5	3	2,049	0,019	4,26835	1149,00486	1,57409	0,46731	
1,0	0,5	5	3	3	0,5	0,699	5	3	2,054	0,019	4,21164	1158,14169	1,57367	0,46732	
1,0	0,5	5	3	3	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29667	1144,08217	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	5	3	3	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29688	1144,04182	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	5	3	3	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29658	1144,08474	1,57395	0,46731	
1,0	0,5	5	3	4	0,1	0,463	5	3	3,979	0,000	4,46950	2001,54439	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	0,5	5	3	4	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29655	1144,10470	1,57397	0,46731	
1,0	0,5	5	3	4	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29673	1144,06975	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	5	3	4	0,7	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29615	1144,07259	1,57386	0,46731	
1,0	0,5	5	3	4	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29834	1143,94351	1,57416	0,46731	
1,0	0,5	5	3	4	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29591	1144,10721	1,57383	0,46731	
1,0	0,5	5	3	5	0,1	0,446	5	3	4,977	0,000	4,46146	2481,91598	#DIV/0!	#DIV/0!	

k	Valores iniciais					Valores ótimos									
	w	n	L	h _i	h _b	w	n	L	h _i	h _b	ANSS	ATS1	ATS2	C	
1,0	0,5	5	3	5	0,3	0,681	5	3	2,046	0,019	4,29498	1144,49448	1,57415	0,46731	
1,0	0,5	5	3	5	0,5	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29334	1144,46903	1,57375	0,46731	
1,0	0,5	5	3	5	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29664	1144,08611	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	5	3	5	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29709	1144,01633	1,57399	0,46731	
1,0	0,5	5	3	5	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29661	1144,09637	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	7	3	3	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29656	1144,10255	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	7	3	3	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29655	1144,10216	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	7	3	3	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29656	1144,07839	1,57395	0,46731	
1,0	0,5	7	3	3	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29660	1144,09053	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	7	3	3	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29664	1144,08343	1,57397	0,46731	
1,0	0,5	7	3	3	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29270	1144,29658	1,57340	0,46731	
1,0	0,5	7	3	4	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29660	1144,10120	1,57398	0,46731	
1,0	0,5	7	3	4	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29661	1144,08309	1,57397	0,46731	
1,0	0,5	7	3	4	0,5	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29605	1144,20773	1,57400	0,46731	
1,0	0,5	7	3	4	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29677	1144,15305	1,57406	0,46731	
1,0	0,5	7	3	4	0,9	0,681	5	3	2,044	0,019	4,29638	1143,68528	1,57347	0,46731	
1,0	0,5	7	3	4	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29584	1144,25938	1,57402	0,46731	
1,0	0,5	7	3	5	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29641	1144,16016	1,57403	0,46731	
1,0	0,5	7	3	5	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29699	1144,13780	1,57415	0,46731	
1,0	0,5	7	3	5	0,5	0,681	5	3	2,046	0,019	4,29449	1144,93819	1,57455	0,46731	
1,0	0,5	7	3	5	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29674	1144,06363	1,57396	0,46731	
1,0	0,5	7	3	5	0,9	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29591	1144,21995	1,57399	0,46731	
1,0	0,5	7	3	5	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29656	1144,11331	1,57400	0,46731	
1,0	1	3	3	3	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29843	1143,80273	1,57404	0,46731	
1,0	1	3	3	3	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29671	1144,06014	1,57395	0,46731	
1,0	1	3	3	3	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29738	1143,90359	1,57391	0,46731	
1,0	1	3	3	3	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29683	1143,88869	1,57373	0,46731	
1,0	1	3	3	3	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29682	1144,04346	1,57399	0,46731	
1,0	1	3	3	3	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29665	1144,10532	1,57407	0,46731	
1,0	1	3	3	4	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29710	1144,10494	1,57407	0,46731	
1,0	1	3	3	4	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29671	1144,08663	1,57399	0,46731	
1,0	1	3	3	4	0,5	0,679	5	3	2,045	0,019	4,30517	1143,24060	1,57474	0,46731	
1,0	1	3	3	4	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29671	1144,07326	1,57397	0,46731	

k	Valores iniciais					Valores ótimos									
	w	n	L	h _i	h _b	w	n	L	h _i	h _b	ANSS	ATS1	ATS2	C	
1,0	1	3	3	4	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29709	1144,03970	1,57404	0,46731	
1,0	1	3	3	4	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29674	1144,07792	1,57398	0,46731	
1,0	1	3	3	5	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29793	1143,84646	1,57394	0,46731	
1,0	1	3	3	5	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29622	1144,02252	1,57376	0,46731	
1,0	1	3	3	5	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29783	1143,93526	1,57402	0,46731	
1,0	1	3	3	5	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29666	1144,11727	1,57403	0,46731	
1,0	1	3	3	5	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29831	1144,01719	1,57425	0,46731	
1,0	1	3	3	5	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29665	1144,08242	1,57397	0,46731	
1,0	1	5	3	3	0,1	0,924	5	3	2,974	0,000	4,45100	1813,82565	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	1	5	3	3	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29667	1144,07795	1,57397	0,46731	
1,0	1	5	3	3	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29644	1144,11128	1,57397	0,46731	
1,0	1	5	3	3	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29650	1144,10288	1,57396	0,46731	
1,0	1	5	3	3	0,9	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29493	1144,29860	1,57388	0,46731	
1,0	1	5	3	3	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29293	1144,66507	1,57395	0,46731	
1,0	1	5	3	4	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29653	1144,08074	1,57394	0,46731	
1,0	1	5	3	4	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29905	1143,56070	1,57385	0,46731	
1,0	1	5	3	4	0,5	0,681	5	3	2,046	0,019	4,29437	1144,58904	1,57410	0,46731	
1,0	1	5	3	4	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29764	1144,01873	1,57410	0,46731	
1,0	1	5	3	4	0,9	0,272	6	3	3,731	0,000	3,77414	1680,39725	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	1	5	3	4	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29700	1143,98413	1,57393	0,46731	
1,0	1	5	3	5	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29597	1144,12872	1,57386	0,46731	
1,0	1	5	3	5	0,3	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29640	1143,91156	1,57370	0,46731	
1,0	1	5	3	5	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29672	1144,07495	1,57398	0,46731	
1,0	1	5	3	5	0,7	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29507	1144,47136	1,57416	0,46731	
1,0	1	5	3	5	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29642	1144,14365	1,57400	0,46731	
1,0	1	5	3	5	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29622	1144,03837	1,57379	0,46731	
1,0	1	7	3	3	0,1	0,976	7	3	2,973	0,000	2,76247	1842,22004	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	1	7	3	3	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29659	1144,09849	1,57398	0,46731	
1,0	1	7	3	3	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29660	1144,09081	1,57398	0,46731	
1,0	1	7	3	3	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29590	1143,94258	1,57359	0,46731	
1,0	1	7	3	3	0,9	0,681	5	3	2,043	0,019	4,29816	1143,39071	1,57366	0,46731	
1,0	1	7	3	3	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29603	1144,18719	1,57399	0,46731	
1,0	1	7	3	4	0,1	0,947	7	3	3,958	0,000	2,75658	2430,97762	#DIV/0!	#DIV/0!	

k	Valores iniciais					Valores ótimos									
	w	n	L	h _i	h _b	w	n	L	h _i	h _b	ANSS	ATS1	ATS2	C	
1,0	1	7	3	4	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29669	1144,07679	1,57398	0,46731	
1,0	1	7	3	4	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29665	1144,08627	1,57398	0,46731	
1,0	1	7	3	4	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29645	1144,04819	1,57388	0,46731	
1,0	1	7	3	4	0,9	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29579	1144,24675	1,57400	0,46731	
1,0	1	7	3	4	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29563	1144,27687	1,57399	0,46731	
1,0	1	7	3	5	0,1	0,922	7	3	4,953	0,000	2,75217	3019,20788	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	1	7	3	5	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29853	1143,54693	1,57367	0,46731	
1,0	1	7	3	5	0,5	0,681	7	3	4,721	0,000	2,67562	2633,46948	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	1	7	3	5	0,7	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29597	1144,21774	1,57399	0,46731	
1,0	1	7	3	5	0,9	0,681	5	3	2,046	0,019	4,29127	1145,12331	1,57405	0,46731	
1,0	1	7	3	5	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29670	1144,07607	1,57398	0,46731	
1,0	1,5	3	3	3	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29664	1144,13346	1,57403	0,46731	
1,0	1,5	3	3	3	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29768	1143,81539	1,57390	0,46731	
1,0	1,5	3	3	3	0,5	0,678	5	3	2,045	0,019	4,30965	1142,84545	1,57524	0,46731	
1,0	1,5	3	3	3	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29811	1143,86203	1,57403	0,46731	
1,0	1,5	3	3	3	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29663	1144,10068	1,57400	0,46731	
1,0	1,5	3	3	3	1,1	0,655	5	3	2,025	0,019	4,42593	1120,74639	1,57164	0,46733	
1,0	1,5	3	3	4	0,1	0,678	5	3	2,046	0,019	4,30781	1142,98213	1,57484	0,46731	
1,0	1,5	3	3	4	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29659	1144,07952	1,57395	0,46731	
1,0	1,5	3	3	4	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29835	1143,94000	1,57414	0,46731	
1,0	1,5	3	3	4	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29674	1144,06991	1,57398	0,46731	
1,0	1,5	3	3	4	0,9	0,662	5	3	2,032	0,019	4,38760	1128,35439	1,57344	0,46732	
1,0	1,5	3	3	4	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29579	1144,14669	1,57388	0,46731	
1,0	1,5	3	3	5	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29663	1144,09130	1,57398	0,46731	
1,0	1,5	3	3	5	0,3	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29527	1144,17335	1,57381	0,46731	
1,0	1,5	3	3	5	0,5	0,679	5	3	2,045	0,019	4,30220	1143,21091	1,57404	0,46731	
1,0	1,5	3	3	5	0,7	0,690	5	3	2,052	0,019	4,24924	1152,53247	1,57446	0,46731	
1,0	1,5	3	3	5	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29824	1143,76371	1,57399	0,46731	
1,0	1,5	3	3	5	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29441	1144,22071	1,57370	0,46731	
1,0	1,5	3	3	6	0,1	0,701	5	3	2,061	0,019	4,19752	1162,34573	1,57544	0,46732	
1,0	1,5	3	3	6	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29716	1143,98826	1,57396	0,46731	
1,0	1,5	3	3	6	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29766	1143,88312	1,57393	0,46731	
1,0	1,5	3	3	6	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29680	1144,05556	1,57398	0,46731	

k	Valores iniciais					Valores ótimos									
	w	n	L	h _i	h _b	w	n	L	h _i	h _b	ANSS	ATS1	ATS2	C	
1,0	1,5	3	3	6	0,9	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29608	1144,23495	1,57406	0,46731	
1,0	1,5	3	3	6	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29658	1144,12329	1,57400	0,46731	
1,0	1,5	5	3	3	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29623	1144,21049	1,57401	0,46731	
1,0	1,5	5	3	3	0,3	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29573	1144,25048	1,57399	0,46731	
1,0	1,5	5	3	3	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29645	1144,10843	1,57395	0,46731	
1,0	1,5	5	3	3	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29665	1144,08625	1,57398	0,46731	
1,0	1,5	5	3	3	0,9	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29524	1144,33702	1,57397	0,46731	
1,0	1,5	5	3	3	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29666	1144,07357	1,57395	0,46731	
1,0	1,5	5	3	4	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29789	1143,95336	1,57407	0,46731	
1,0	1,5	5	3	4	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29673	1144,06500	1,57397	0,46731	
1,0	1,5	5	3	4	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29630	1144,12539	1,57391	0,46731	
1,0	1,5	5	3	4	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29677	1144,09592	1,57402	0,46731	
1,0	1,5	5	3	4	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29713	1144,00116	1,57399	0,46731	
1,0	1,5	5	3	4	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29619	1144,21469	1,57404	0,46731	
1,0	1,5	5	3	5	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29608	1144,28068	1,57409	0,46731	
1,0	1,5	5	3	5	0,3	0,683	5	3	2,046	0,019	4,28720	1145,45545	1,57372	0,46731	
1,0	1,5	5	3	5	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29680	1144,03142	1,57395	0,46731	
1,0	1,5	5	3	5	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29647	1144,12391	1,57398	0,46731	
1,0	1,5	5	3	5	0,9	0,679	5	3	2,044	0,019	4,30232	1142,98807	1,57379	0,46731	
1,0	1,5	5	3	5	1,1	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29563	1144,07293	1,57373	0,46731	
1,0	1,5	7	3	3	0,1	1,388	7	3	2,961	0,000	2,74894	2015,02365	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,0	1,5	7	3	3	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29735	1143,69954	1,57358	0,46731	
1,0	1,5	7	3	3	0,5	0,681	5	3	2,046	0,019	4,29546	1144,47446	1,57425	0,46731	
1,0	1,5	7	3	3	0,7	0,681	5	3	2,045	0,019	4,29345	1144,45482	1,57366	0,46731	
1,0	1,5	7	3	3	0,9	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29660	1144,10295	1,57399	0,46731	
1,0	1,5	7	3	3	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29671	1144,07421	1,57397	0,46731	
1,0	1,5	7	3	4	0,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29669	1144,07888	1,57398	0,46731	
1,0	1,5	7	3	4	0,3	0,680	5	3	2,044	0,019	4,30219	1143,11027	1,57410	0,46731	
1,0	1,5	7	3	4	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29649	1144,12143	1,57399	0,46731	
1,0	1,5	7	3	4	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29670	1144,05766	1,57394	0,46731	
1,0	1,5	7	3	4	0,9	0,682	5	3	2,045	0,019	4,29175	1144,52797	1,57365	0,46731	
1,0	1,5	7	3	4	1,1	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29684	1144,04399	1,57395	0,46731	
1,0	1,5	7	3	5	0,1	0,680	5	3	2,044	0,019	4,30177	1143,39337	1,57441	0,46731	

k	Valores iniciais					Valores ótimos								
	w	n	L	h_l	h_b	w	n	L	h_l	h_b	ANSS	ATS1	ATS2	C
1,0	1,5	7	3	5	0,3	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29686	1144,01894	1,57392	0,46731
1,0	1,5	7	3	5	0,5	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29657	1144,09822	1,57398	0,46731
1,0	1,5	7	3	5	0,7	0,680	5	3	2,045	0,019	4,29656	1144,10129	1,57398	0,46731
1,0	1,5	7	3	5	0,9	0,680	5	3	2,046	0,019	4,29555	1144,32967	1,57399	0,46731
1,0	1,5	7	3	5	1,1	0,680	5	3	2,046	0,019	4,29446	1144,70441	1,57405	0,46731