

Controle Estatístico de Processos: Utilização de Cartas de Controle em um Processo Produtivo de Caprolactama.

Herbert Pereira de Oliveira (UNIVERSO) herbert.gestordecursos@sa.universo.edu.br

Wellington Ramos da Anunciação (UNIVERSO) wranun@gmail.com

Maria de Fátima dos Santos Lopes (UFBA) mfsl@ufba.br

RESUMO –

O presente trabalho teve por objetivo demonstrar a utilidade e praticidade das cartas de controle, como ferramentas estatísticas indispensáveis ao controle da qualidade em processos na indústria química e petroquímica. A proposta deste trabalho foi apresentar os procedimentos para seleção e utilização das cartas de controle no Controle Estatístico de Processo (CEP) de forma que mesmo profissionais com pouca vivência com as técnicas estatísticas possam entender e aplicar tais ferramentas de maneira correta, sem que para isso seja necessário abdicar do devido rigor científico que a estatística necessita. Todos os exemplos de aplicação de técnicas estatísticas de controle de qualidade e de processos são voltados para a área química e petroquímica, o que facilita a compreensão e a utilização dessas técnicas nas situações que o dia-a-dia de uma indústria química e petroquímica apresenta aos seus responsáveis. Palavras-chave: controle estatístico de processo (CEP), cartas de controle, indústria química e petroquímica.

1. Introdução

O Controle Estatístico de Processo (CEP) vem sendo implantado em um número cada vez maior de indústrias no Brasil, seja por imposição de algum cliente, seja por iniciativa da própria empresa, visando a obtenção de ganhos de produtividade e qualidade de seus produtos, num cenário de mercado aberto à concorrência externa, em virtude da crescente globalização. O CEP mais que um controle total da qualidade, estimula mudanças culturais da empresa, que passa a ter enfoque principal na qualidade, atenção à variabilidade e trabalho em equipe. Assim, o CEP surge como uma ferramenta indispensável para a consolidação da empresa no cenário mundial. A empresa passa a almejar não somente a obtenção de produtos dentro da especificação exigida pelos clientes, mas também, a partir de ações corretivas, atingir um ponto no qual o seu processo produtivo forneça produtos com as especificações controladas em torno de um valor central ou médio.

2. A Necessidade das Cartas de Controle

Se a melhoria contínua do processo é o foco principal, de que forma este progresso pode ser medido? A produção de 100% de material dentro da especificação é o parâmetro máximo para comparação, ou seja, é o *benchmarking* do CEP. Alcançar um estado de controle estatístico para o processo é outro.

Nenhum dos dois é permanente, mas ambos estão sujeitos a modificações e passíveis de serem revertidos.

3. Causas Comuns e Especiais de Variação da Qualidade

Em um processo produtivo, por mais cuidado que tenha sido tomado na fase do projeto e, também, na sua manutenção, *uma variabilidade natural ou inerente* estará sempre presente. Essa variabilidade natural é efeito cumulativo de causas essencialmente inevitáveis, intrínsecas do processo. Na ótica do controle estatístico de qualidade, essa *variabilidade natural* é freqüentemente chamada de sistema estável de *causas comuns*. Um processo que opera somente com a ocorrência de *causas comuns* de variação é dito estar sob controle estatístico.

Outros tipos de variabilidades podem ocasionalmente vir a ocorrer no processo. Essa variabilidade em características críticas da qualidade pode ser oriunda de três fontes potenciais: máquinas inadequadamente ajustadas, erros de procedimentos operacionais ou problemas com matérias-primas. Tal variabilidade é freqüentemente pronunciada quando comparada com a *variabilidade natural* do processo, e geralmente representa um nível de desempenho inaceitável do processo. Essas fontes de variabilidade que não são parte de desvios de causas comuns são denominadas de *causas especiais*. Um processo que opera na presença de *causas especiais* é dito estar fora de controle.

A regra histórica é que 15% das variações do sistema resultam de causas especiais e 85% resultam de causas comuns.

Essas causas *especiais e comuns* de variação são ilustradas na figura abaixo. Antes do tempo t_1 o processo mostrado na figura está sob controle; ou seja, somente causas comuns de variação estão presentes. Como resultado, a média e desvio padrão do processo têm seus valores controlados. No tempo t_1 uma causa especial ocorre. Conforme mostrado na figura, o efeito desta causa especial é levar a média do processo para um novo valor $\mu_1 > \mu_0$. No tempo t_2 uma outra causa especial ocorre, resultando em $\mu = \mu_0$, mas agora o desvio padrão do processo é levado para um valor $\sigma_1 > \sigma_0$. No tempo t_3 uma outra causa especial está presente, resultando numa variação conjunta da média e desvio padrão para valores fora de controle. A partir do tempo t_1 , a presença de causas especiais resultou em um processo fora de controle.

Geralmente os processos produtivos operam em estado de controle, produzindo produtos aceitáveis por períodos de tempo relativamente longos. Eventualmente, entretanto, causas especiais podem ocorrer, aparentemente de forma randômica, resultando em uma passagem para o estado fora de controle, no qual uma grande proporção das características de qualidade não satisfaz às exigências de especificação. Por exemplo, ainda de acordo com a figura, quando o processo está sob controle, a maior parte da produção terá suas características de qualidade entre os limites inferior e superior de especificação (LIE e LSE, respectivamente). Quando o processo está fora de controle, uma maior proporção de tais características cairá fora desses limites.

Um dos objetivos principais do controle estatístico de processo é justamente detectar a ocorrência de causas especiais no processo para que a investigação e ações corretivas possam ser tomadas antes que uma quantidade maior de produto não conforme seja produzido. A *carta de controle* é uma técnica on-line de controle do processo largamente usada para esse propósito. Cartas de controle também podem ser usadas para estimar os parâmetros de um processo produtivo, e, a partir dessa informação, determinar a *capacidade do processo*. Finalmente, devemos lembrar que o eventual objetivo do controle estatístico de processo é a *eliminação da variabilidade* do processo. Pode não ser possível

eliminar completamente a variabilidade do processo, mas a carta de controle é uma ferramenta efetiva para reduzir variabilidade ao seu nível mínimo.

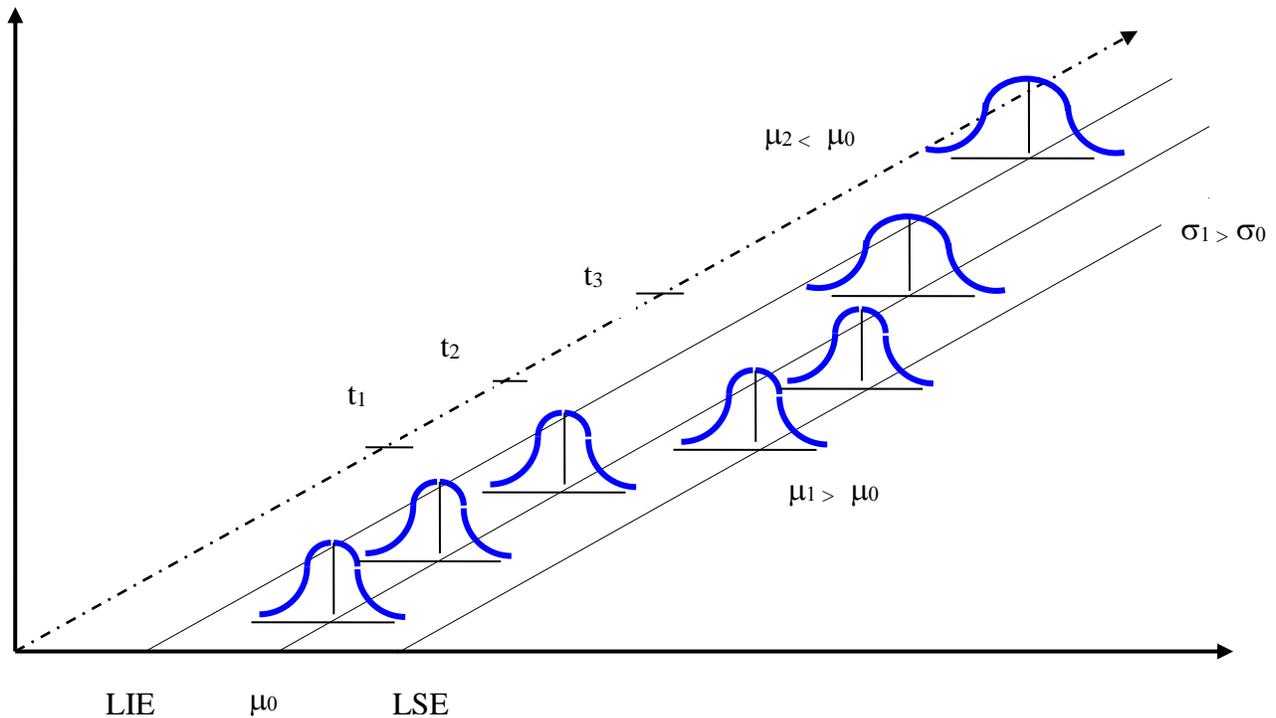


Figura 1: Causas comuns e especiais de variação

4. Base Estatística das Cartas de Controle

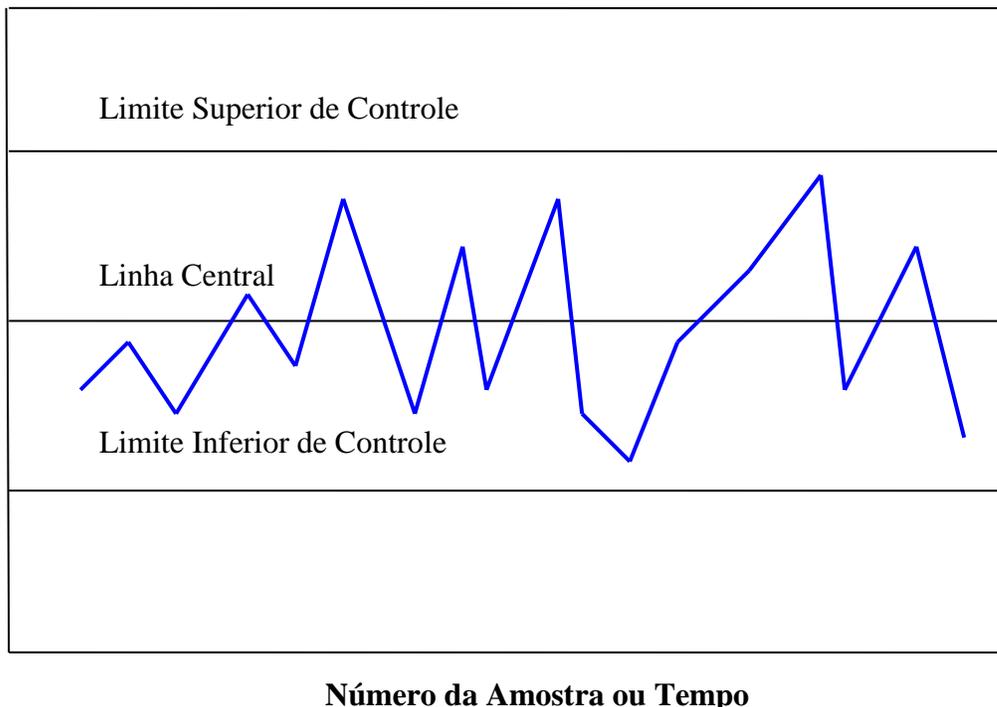
Uma carta de controle típica é mostrada na figura abaixo, que é um levantamento gráfico de uma característica de qualidade medida ou computada de uma amostra versus o número da amostra ou tempo. A carta contém uma *linha central* que representa o valor médio da característica de qualidade correspondente ao estado sob controle (isto é, somente causas comuns estão presentes). Duas outras linhas horizontais, chamadas de *limite superior de controle* (LSC) e *limite inferior de controle* (LIC), também mostrados na carta. Esses limites de controle são tais que, se o processo estiver sob controle, aproximadamente todos os pontos da amostra irão cair entre eles. Quanto mais distantes dos limites de controle os pontos estiverem, o processo é dito sob controle e nenhuma ação é necessária.

Um modelo geral para uma carta de controle considera uma amostra estatística w que mede alguma característica de qualidade de interesse, com uma média μ_w e desvio padrão σ_w . Então, nesse caso, a linha central, o limite superior de controle e o limite inferior de controle assumem a forma:

$$\begin{aligned} \text{LSC} &= \mu_w + L \cdot \sigma_w \\ \text{Linha Central} &= \mu_w \\ \text{LIC} &= \mu_w - L \cdot \sigma_w \end{aligned}$$

Onde L é a “distância” dos limites de controle à linha central, expressa em unidades de desvio padrão. Essa teoria geral de cartas de controle foi inicialmente proposta pelo Dr. Walter S. Shewhart, e as cartas de controle desenvolvidas de acordo com esses princípios são freqüentemente chamadas de *Cartas de Controle de Shewhart*.

A carta de controle padrão de Shewhart para dados de variáveis utiliza o limite de controle $\mu_0 \pm 3\sigma$. O risco para a empresa com a utilização desse limite é de apenas 0,27%, que corresponde à probabilidade de ocorrência de alarme falso quanto à detecção de causas especiais, ou seja, o limite de controle da carta padrão de Shewhart compreende 99,73% da variação em torno da média.



Número da Amostra ou Tempo

Figura 2: Uma Carta de Controle Típica

A carta de controle é um dispositivo para a descrição bastante precisa do controle estatístico, podendo ser usado de diversas formas. Em algumas aplicações, é usada para monitoramento on-line do processo. Ou seja, dados são coletados e usados para o levantamento das cartas de controle e se os valores se encontram dentro dos limites de controle e não demonstram comportamento de variação sistemático, considera-se que o mesmo está sob controle no nível indicado pela carta.

O uso mais importante da carta de controle é na melhoria do processo. Isso porque, já está provado que:

- I. A grande maioria dos processos não opera em estado de controle estatístico.
- II. Conseqüentemente, o uso rotineiro e atento de cartas de controle servirá para identificar as causas especiais e se essas causas puderem ser eliminadas do processo, a variabilidade será reduzida e o processo melhorado.

Essa atividade de melhoria contínua do processo, usando cartas de controle, é mostrada na figura 3.

III. A carta de controle irá detectar somente causas especiais. Uma ação conjunta da gerência, da operação e da engenharia será necessária para eliminar essas causas especiais.

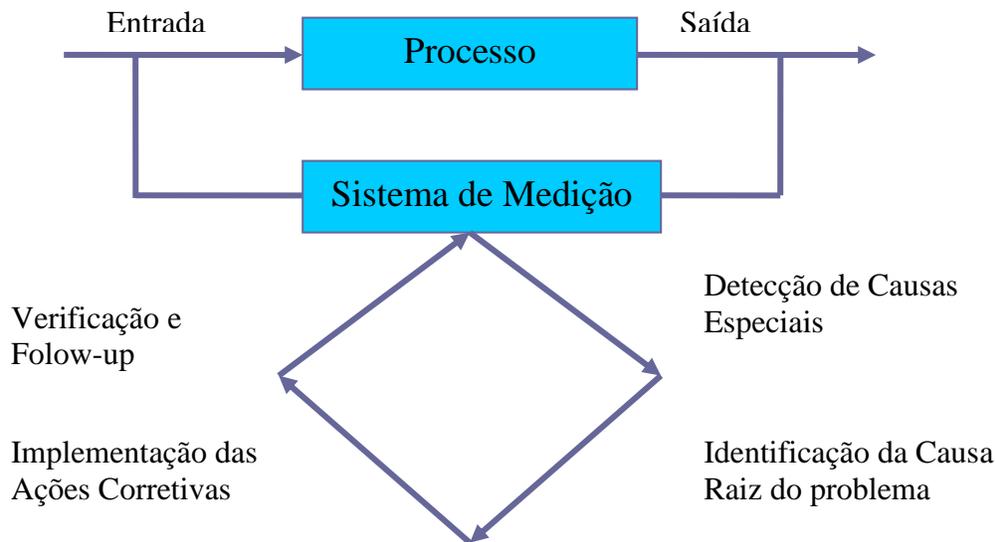


Figura 3: Melhoria do processo usando cartas de controle

As cartas de controle podem ser classificadas em dois tipos gerais. Se a característica de qualidade pode ser medida e expressada como um número numa escala contínua de medida, ela é geralmente chamada de *variável*. Nesse caso, é conveniente descrever a característica de qualidade com uma medida da tendência central e uma medida da variabilidade. Cartas de controle para tendência central e variabilidade são denominadas *cartas de controle de variáveis*. Algumas características de qualidade não podem ser medidas numa escala contínua ou numa escala quantitativa. Nesses casos, costuma-se julgar a característica como conforme ou não conforme. Cartas de controle para tais características são denominadas *cartas de controle de atributos*.

Um importante fator no uso das cartas de controle é o *projeto da carta de controle*, que envolve a seleção do tamanho da amostra, limites de controle e frequência de amostragem. Na maioria dos problemas de controle de qualidade, é bastante comum projetar a carta de controle usando considerações meramente estatísticas. Recentemente, entretanto, costuma-se analisar a carta de controle sob o ponto de vista econômico, considerando explicitamente o custo da amostragem e custos de investigação de sinais de saída de controle do processo que funcionam como “falsos alarmes”.

As cartas de controle têm tido uma longa história de uso nas indústrias em todo o mundo. Existem cinco razões principais para a sua popularidade:

- I. A sua utilização é uma técnica comprovada para melhoria da produtividade.
- II. São efetivamente eficientes na prevenção de defeitos ou não conformidades.
- III. Evitam ajustes desnecessários no processo.
- IV. Fornecem informação diagnóstica.
- V. Fornece informação sobre a capacidade do processo.

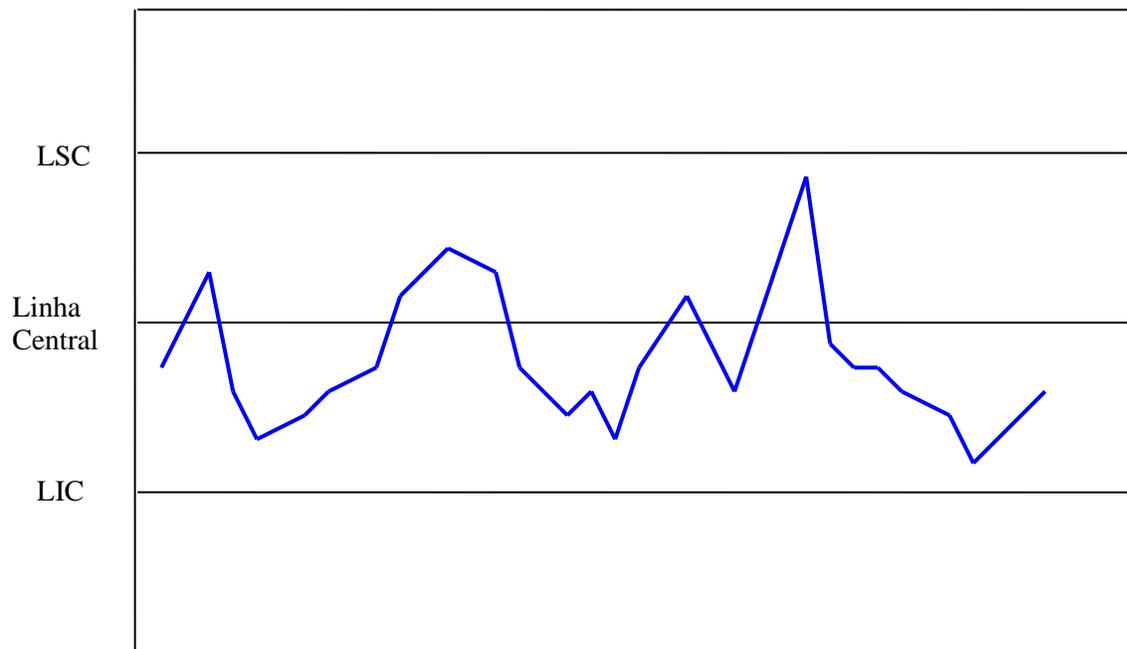
5. Escolha dos Limites de Controle

A especificação dos limites de controle é uma decisão crítica a ser tomada no projeto de uma carta de controle. O afastamento dos limites de controle da linha central diminui o risco de ocorrência do erro tipo I – um ponto fora dos limites de controle, mesmo quando causas especiais estão ausentes. Entretanto, a ampliação dos limites de controle aumenta o risco de um erro tipo II – um ponto dentro dos limites de controle com o processo estando realmente fora de controle.

Na maioria das aplicações do controle estatístico de processo, com a utilização de cartas de controle, são utilizados os limites de controle do tipo *3-sigma*, que fornece uma probabilidade de ocorrência de erro tipo I da ordem de 0,27%, ou seja, um sinal equivocado de saída de controle ou um alarme falso poderá ocorrer somente em 27 pontos a cada 10.000 pontos. A justificativa típica para o uso dos limites de controle 3-sigma são os seus resultados práticos.

6. Análise de Desvios em Cartas de Controle

Uma carta de controle pode indicar uma condição de saída de controle sempre que um ou mais pontos caem fora dos limites de controle ou quando a seqüência de pontos apresenta um comportamento não randômico. Por exemplo, considere a carta de controle X-barra mostrada na figura 4 abaixo. Embora todos os 25 pontos estejam dentro dos limites de controle, não indicam um controle estatístico porque o seu comportamento é completamente não randômico. Especificamente, pode-se notar que 19 dos 25 pontos encontram-se abaixo da linha central, enquanto somente seis pontos encontram-se acima desta. Se a seqüência de pontos é verdadeiramente randômica, é de se esperar que estejam uniformemente distribuídos acima e baixo da linha central. Pode-se observar também, a partir do quarto ponto, uma seqüência crescente em magnitude de cinco pontos. Essa disposição de pontos é comumente chamada de corrida.



Número da Amostra ou Tempo
Figura 4: Carta de Controle X-barra

7. Discussão de Regras para Levantamento de Cartas de Controle

Vários critérios podem ser aplicados simultaneamente para uma carta de controle a fim de determinar condições de saída de controle do processo. Critérios suplementares são muitas vezes utilizados para aumentar a sensibilidade das cartas de controle para pequenas variações do processo, para que o mesmo possa responder mais rapidamente às causas especiais. As principais regras de sensitização comumente utilizadas na prática foram propostas por Nelson (1984), sendo mostradas na figura 5. Frequentemente avaliam-se as cartas de controle e conclui-se que o processo está fora de controle se um ou mais desses critérios são violados.

Quando várias dessas regras de sensitização são aplicadas simultaneamente, geralmente utiliza-se uma resposta graduada por sinais de saída de controle. Por exemplo, se um ponto excede um limite de controle, deve-se iniciar imediatamente a identificação da fonte potencial dessa causa especial, mas se um ou mais pontos consecutivos excedem o limite de alerta de 2 sigma, o procedimento indicado é aumentar a frequência de amostragem. Essa resposta por amostragem adaptativa pode não ser tão efetiva quanto uma busca completa de uma causa especial, mas se o processo estiver realmente fora de controle, com certeza a probabilidade de detecção desta situação seria bem mais rápida do que se fosse mantida a frequência original da amostragem.

A utilização simultânea de várias regras de decisão exige atenção especial. Suponha que sejam utilizadas k regras de decisão, cujo critério i tenha uma probabilidade α_i de ocorrência de erro tipo I. Então, a probabilidade de erro tipo I ou alarme falso para a decisão baseada em todos os k testes, considerando que todas as k regras de decisão são independentes é:

$$\alpha = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \alpha_i)$$

Sinais de Ação Padrão →

1. Um ou mais pontos fora dos limites de controle.
 2. Dois dentre três pontos consecutivos fora do limite de alerta de 2 sigma.
 3. Quatro dentre cinco pontos consecutivos além do limite de 1 sigma.
 4. Uma corrida de oito pontos consecutivos de um mesmo lado da linha central.
 5. Seis pontos em uma seqüência, aumentando ou diminuindo.
 6. Quinze pontos em seqüência na zona C, ambos abaixo e acima da linha central.
 7. Catorze pontos em seqüência alternadamente aumentando e diminuindo.
 8. Oito pontos em seqüência e, ambos os lados da linha central, fora da zona C.
 9. Um desvio incomum nos dados.
 10. Um ou mais pontos próximo ao limite de controle de alerta (2 sigma)
-

Figura 5: Regras de sensibilização para cartas de controle Shewhart

8. Seleção de Cartas de Controle

A primeira decisão na escolha do tipo de carta de controle é determinar o tipo de dados que são coletados. Se os dados consistem de contadores, então uma das cartas de atributos deve ser selecionada. A segunda decisão para cartas de atributos é se está sendo computado o número de unidades fora de especificação em uma amostra ou o número total de não conformidades em uma amostra. A terceira decisão é se o tamanho da amostra irá permanecer constante ou variar de amostra para amostra. Se os dados coletados são medidos, então uma das cartas de controle de variáveis deve ser selecionada. A segunda decisão para cartas de variáveis para dados medidos depende do tamanho de amostra adequado para a situação. As cartas de controle mais comumente utilizadas para esses tipos de dados são do tipo X-barra e R (média e amplitude) ou X-barra e s. Se habilidades matemáticas da equipe responsável são limitadas, então cartas de controle X-barra e R são a melhor opção, uma vez que é mais fácil encontrar um número médio em uma pequena amostra do que calcular a média par tal amostra. Entretanto, se a equipe responsável dispõe de calculadoras estatísticas ou algum software estatístico, cartas do tipo X-barra e s são mais eficientes. A escolha mais usual, entretanto, são as cartas do tipo X-barra e R, que correspondem ao padrão nas indústrias, sendo mais facilmente entendidas.

9. Utilização das Cartas de Controle

Uma análise preliminar dos dados de especificação da caprolactama identificou como especificações críticas a Extinção 290nm e o Número de Permanganato, sendo responsáveis, respectivamente, por 50% e 25% de todas as reprovações durante o ano de 2002. Os índices de capacidade do processo (cp e cpk) foram obtidos para o ano de 2002 (Figura 6), a partir do levantamento dos gráficos de capacidade, utilizando-se o software estatístico Minitab, para as especificações identificadas como críticas.

Ext. 290 nm			
Mês	cpK	MIN	cp
Jan02	1,96	1,33	2,92
Fev02	1,63	1,33	2,35
Mar02	1,57	1,33	2,48
Abr02	1,27	1,33	1,27
Mai02	1,11	1,33	1,51
Jun02	1,43	1,33	2,48
Jul02	1,35	1,33	2,37
Ago02	0,78	1,33	1,23
Set02	0,93	1,33	1,17
Out02	1,50	1,33	2,90
Nov02	1,51	1,33	2,53
Dez02	0,99	1,33	1,84

(a) NP

Nº PERMANGANATO			
Mês	cpK	Ideal	cp
Jan02	10,48	1,33	-
Fev02	2,10	1,33	-
Mar02	4,10	1,33	-
Abr02	1,26	1,33	-
Mai02	2,41	1,33	-
Jun02	6,76	1,33	-
Jul02	3,21	1,33	-
Ago02	60,66	1,33	-
Set02	1,81	1,33	-
Out02	4,60	1,33	-
Nov02	2,92	1,33	-
Dez02	8,00	1,33	-

(b) Extinção 290nm

Tabela 1: Índices mensais de capacidade durante o ano de 2002

A análise dos dados da tabela (a) evidencia que o processo é suficientemente capaz no que diz respeito à especificação Número de Permanganato, uma vez que se manteve num patamar superior ao valor mínimo requerido para os índices de capacidade, que é de 1,33. O índice de capacidade cp não é definido para esta especificação, pois a mesma não possui limite superior, sendo definido somente o índice cpk.

A análise dos dados da tabela (b), entretanto, demonstra que o processo se mostrou incapaz nos meses de maio, agosto, setembro e dezembro, no que diz respeito à especificação Extinção 290nm, e esta incapacidade se revela mais crítica quanto ao índice de capacidade cpk, que mede a capacidade do processo para fornecer resultados em torno de um valor nominal ou médio e centralizados em relação aos limites de especificação. Por esta razão, foi definida a Extinção 290nm como especificação alvo de estudo para o levantamento de cartas de controle, visando a análise da ocorrência de causas especiais, para posterior identificação de fontes potenciais de variabilidade anormal e sugestões para tomada de ações corretivas, visando a minimização desta variabilidade.

Com base na análise anterior, foram levantadas as cartas de controle X-barra e R, para a especificação Extinção 290nm, nos períodos nos quais o processo se mostrou incapaz, ou seja, nos meses de maio, agosto, setembro e dezembro (Figuras 7, 8, 9 e 10).

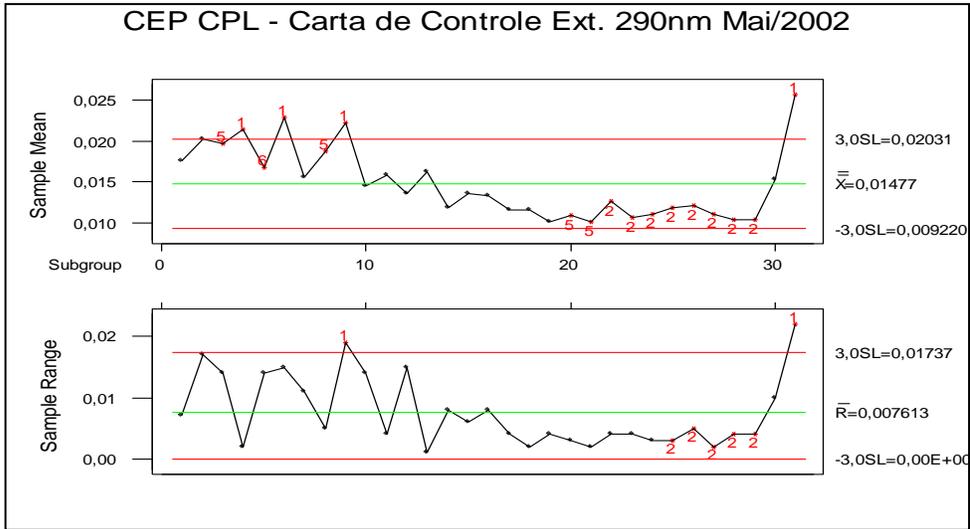


Figura 6: Cartas de Controle de Shewhart – Extinção 290nm – Maio / 2002.

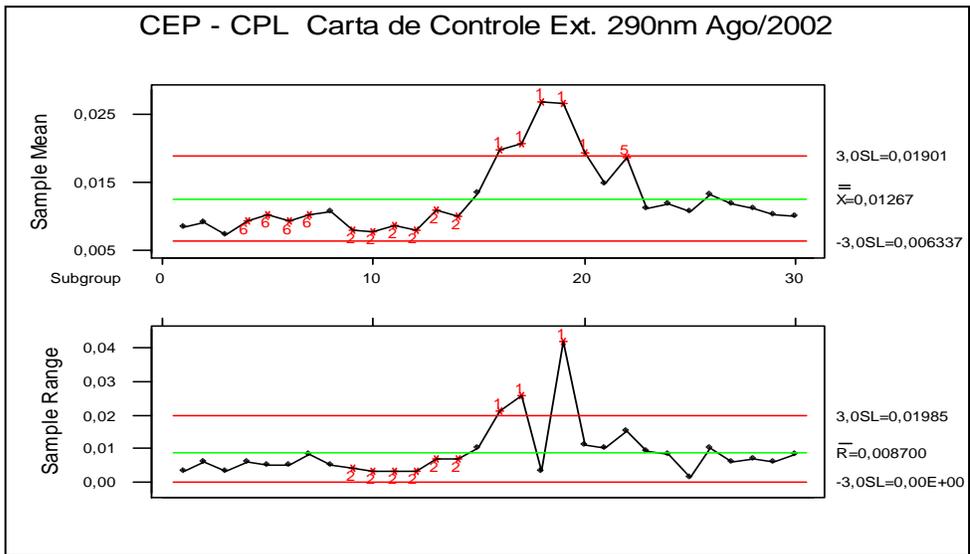


Figura 7: Cartas de Controle de Shewhart – Extinção 290nm – Agosto / 2002.

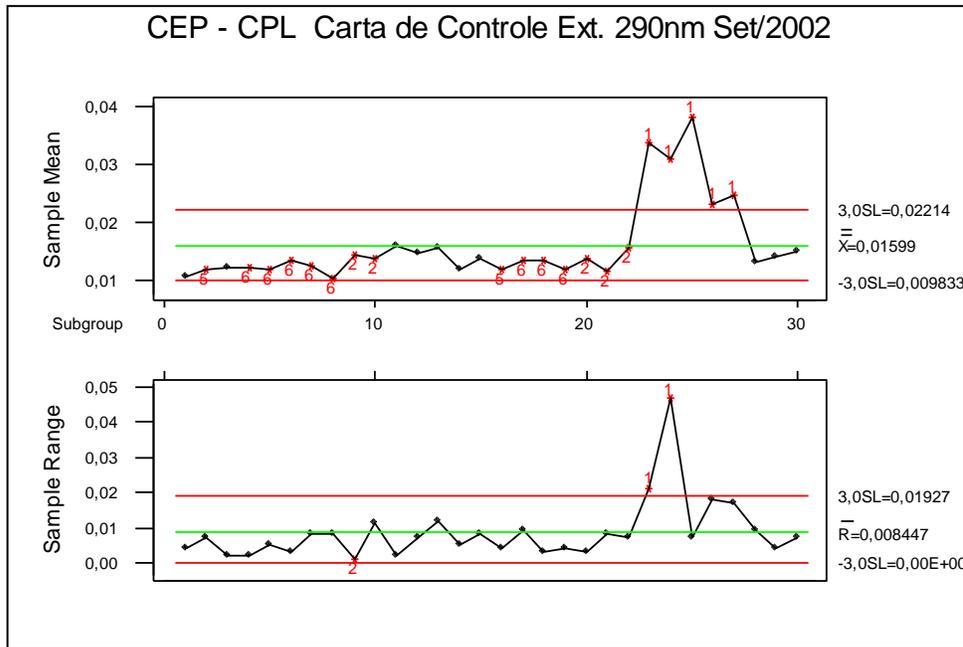


Figura 8: Cartas de Controle de Shewhart – Extinção 290nm – Setembro / 2002.

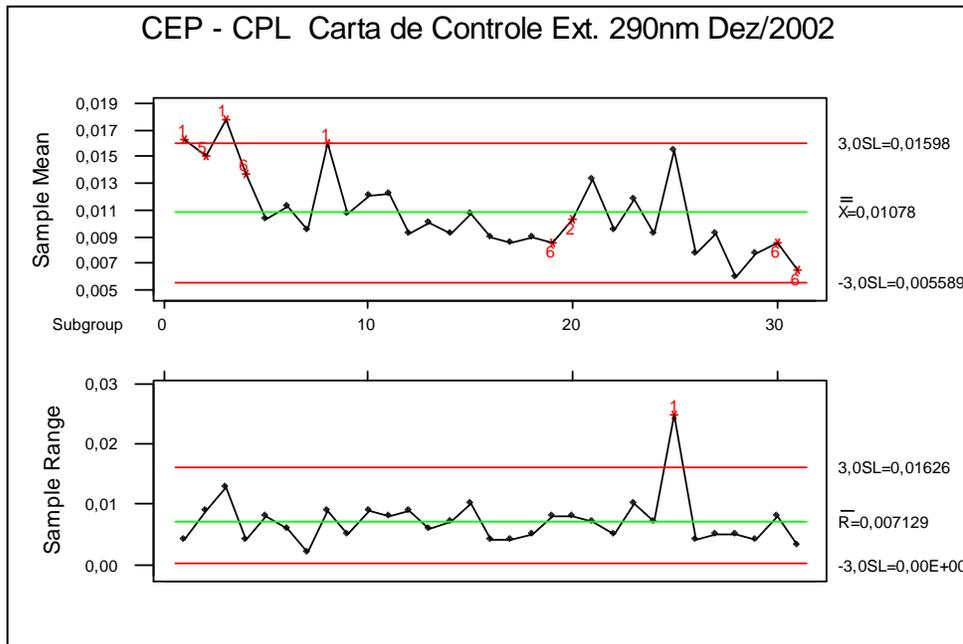


Figura 9: Cartas de Controle de Shewhart – Extinção 290nm – Setembro / 2002.

A análise da carta R do mês de maio revela a ocorrência de causa especial do tipo 1 no dia 25, demonstrando, pois, uma condição de saída de controle. A carta X-barra confirma a condição de saída de controle, com a ocorrência de causas especiais, ao longo do mês, dos tipos 1, 2 e 5.

A análise da carta R do mês de agosto revela a ocorrência de causas especiais do tipo 1 nos dias 23 e 24, e do tipo 2, no período de 09 a 14, demonstrando, pois, uma condição de saída de controle. A carta X-barra confirma a condição de saída de controle, com a ocorrência de causas especiais, ao longo do mês, dos tipos 1, 2, 5 e 6.

A análise da carta R do mês de setembro revela a ocorrência de causas especiais do tipo 1 nos dias 23 e 24, e do tipo 2, no dia 09, demonstrando, pois, uma condição de saída de controle. A carta X-barra confirma a condição de saída de controle, com a ocorrência de causas especiais, ao longo do mês, dos tipos 1, 2, 5 e 6.

A análise da carta R do mês de dezembro revela a ocorrência de causas especiais do tipo 1 nos dias 09 e 31, e do tipo 2, no período de 25 a 29, demonstrando, pois, uma condição de saída de controle. A carta X-barra confirma a condição de saída de controle, com a ocorrência de causas especiais, ao longo do mês, dos tipos 1, 2, 5 e 6.

A utilização das cartas de controle serve, portanto para revelar uma condição de saída de controle do processo, identificando o tipo de causa especial e o dia de sua ocorrência, sendo, portanto uma ferramenta indispensável para o Controle Estatístico de Processo, fornecendo dados bastante confiáveis para o posterior estudo da variabilidade do processo, que identifica as fontes potenciais das anormalidades e permite a tomada de ações quanto às modificações no processo para a minimização da variabilidade, melhorando, assim, a qualidade do produto.

Referências Bibliográficas

- 1 - SMITH, GERALD M. (1998) - Statistical Process Control and Quality Improvement. Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- 2 - MONTGOMERY, DOUGLAS C. (1997) - Introduction to Statistical Quality Control. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 3 - GARVIN, D. A. (1987) - Competing in the Eight Dimensions of Quality. Harvard Business Review, Sept.-Oct.
- 4 - LOPES, MARIA DE FÁTIMA DOS SANTOS (1999) - Controle Estatístico de Processo. Tese apresentada no concurso público para o provimento do cargo de Professor Titular da UFBA, na área de Processos Químicos.
- 5 - RODRIGUES, GUILHERME PÁDUA (1998) - Controle Estatístico de Qualidade e de Processos na Indústria de Alimentos. Tese de Mestrado da Universidade Federal de Viçosa, do Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos.
- 6 - WHEELER, DONALD J., CHAMBERS, DAVID S. (1992) - Understanding Statistical Process Control. SPC Press, Tennessee.
- 7 - OLIVEIRA, HERBERT, LOPES, M. F. S. (2003) - Proposta de Modelo para a Implementação do Controle Estatístico de Processos na Indústria Química e Petroquímica de Processo Contínuo. Tese de Mestrado da Universidade Federal da Bahia, Curso de Engenharia Química.

8 - LEVINSON, WILLIAM (1990) - Understand the Basis of Statistical Process Control. IBM Corporation.