CONTROLE ESTATÍSTICO DE UM PROCESSO QUÍMICO CONTÍNUO: UM ESTUDO DE CASO COM O GRÁFICO I-R_M E DUAS VARIÁVEIS DE CONTROLE

Maria Eugenia Santana Soares Vasconcelos
Instituto Superior de Educação do CENSA / ISECENSA
Rua Salvador Correa, 139 . Centro, Campos dos Goytacazes - RJ. CEP 28035-310
messvasconvelos@yahoo.com.br

Henrique Rego Monteiro da Hora
ISECENSA / UFF
Rua Salvador Correa, 139 . Centro, Campos dos Goytacazes - RJ. CEP 28035-310
dahora@gmail.com

Helder Gomes Costa
Universidade Federal Fluminense / UFF
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói - RJ CEP: 24.210-240
hgc@vm.uff.br

RESUMO

O objetivo desse trabalho é analisar criticamente o processo de produção de um sal uma Indústria Química localizada no Estado do Rio de Janeiro. De forma mais precisa, o estudo foi baseado na aplicação dos conceitos de Controle Estatístico de Processo (CEP) a fim de avaliar e estabelecer melhorias na capacidade de produção. A utilização do gráfico de Média Individual e Amplitude Móvel são as ferramentas mais adequadas para analisar a estabilidade do processo de nosso objeto de estudo. Este artigo limita-se a realizar análises estatísticas com os dados fornecidos pela empresa e propor melhoria em seu processo com objetivo de torná-lo mais estável. Os resultados obtidos revelam que o processo emite vários sinais estatísticos para que se tome uma ação corretiva que foram ignorados pela não utilização da ferramenta proposta. Também é revelado uma baixa capacidade do processo em atender às especificações. Conclui-se que a empresa pesquisada poderia implantar o controle estatístico do processo com frutuosos benefícios.

PALAVRAS-CHAVES: **Gráfico de Controle de Amplitude Móvel; Processo auto-correlacionado; Análise de Capacidade de processo. (EST)**

1. Introdução

Há uma crescente consciência de que bens e serviços de alta qualidade podem dar a uma organização uma considerável vantagem competitiva (SLACK, CHAMBERS & JOHNSTON, 2007).

A preocupação com que o conceito de qualidade seja empregado em seus produtos e serviços faz com que as empresas se empenhem cada vez mais em ampliar e buscar melhorias em seus processos a fim de que seus produtos e seus serviços atendam as necessidades e expectativas dos consumidores e clientes de modo a proporcionar uma redução nos custos (SIQUEIRA, 1997).

Fiterman *et al* (1994) explica que os clientes não estão dispostos a arcar com os custos da ineficiência das empresas e buscam sempre produtos com qualidade, ou seja, aqueles que não apresentam defeitos de fabricação e que sejam capazes de exercer sua função.

Ferreira *et al* (2007), reforça a preocupação de estabilidade do processo e acrescenta a importância de realizar uma análise da capacidade do processo, ou seja, sua capacidade de produzir itens que cumpram com as especificações do produto.

Segundo Moreira Júnior (2005) quando dados que representam o processo não seguem uma distribuição normal, a utilização de cartas de controle convencionais se tornam inviável uma vez que poderia ocorrer uma confusão entre as causas comuns (as que atuam aleatoriamente) e as causas especiais (interferem no processo causando grandes variações), comprometendo dessa forma as conclusões quanto ao comportamento do processo.

Moreira Júnior (*op. cit.*) cita que processos que possuem dados auto-correlacionados caracterizam-se pelo fato de que a observação atual está correlacionada com a observação anterior e que segundo Schissatti (1998), o erro mais comum é a adoção de um modelo de carta de controle sem que se faça a análise de correlação dos dados que representam o processo.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização das ferramentas de controle estatístico da qualidade em um processo de produção industrial químico. Existem inúmeras causas que podem levar a um diagnóstico impreciso de estabilidade de um processo: a utilização errada de uma ferramenta estatística seria um exemplo.

O problema abordado envolve o alto índice de lotes rejeitados pelos clientes internos da IQ (Indústria Química – pseudônimo da empresa onde é executado o estudo de caso), onde admite-se que há rejeição dos lotes por falta de um controle efetivo e científico do processo. Uma hipótese é que ao adotar o Controle Estatístico do Processo - CEP, problemas de conformidade seriam revelados antes que se chegasse ao cliente e fossem rejeitados.

2. Materiais & Métodos

2.1. Classificação da pesquisa

Quanto a natureza, segundo Silva & Menezes (2001), a pesquisa é classificada como aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimento para a aplicação prática dirigidos a problemas específicos.

É também descritiva uma vez que os dados levantados na pesquisa irão servir para avaliar e propor uma melhoria em seu processo (SILVA & MENEZES, *op. cit.*).

Quanto a abordagem ao problema, ainda segundo Silva & Menezes (*op. cit.*), é classificada como quantitativa, pois consideram variáveis quantificáveis que recebem tratamento estatístico.

Quanto aos objetivos, segundo Gil (2008), a pesquisa classifica-se em como exploratória, pois visa tomar maior familiaridade com o problema, de modo a torná-lo explícito ou criar hipóteses.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa classifica-se bibliográfica na fundamentação teórica, documental no levantamento de dados na empresa, e estudo de caso na execução dos procedimentos metodológicos (SILVA & MENEZES, 2001).

A pesquisa bibliográfica de acordo com Gil (2008) é desenvolvida com base em material já elaborado de livros e artigos científicos.

2.2 Pesquisa Metodológica

As técnicas para desenvolvimento de uma carta de controle são definidas por Costa, Epprecht & Carpinetti (2005) genericamente como:

- Definição da característica a ser controlada;
- Definição método de amostragem e tamanho da amostragem;
- Coleta de dados;

- Determinação dos valores central e limites de controle;
- Determinação limites de controle revisados.

Estes passos são cumpridos de maneiras adaptadas à realidades diferentes. Hora, Vasconcelos & Fiuza (2009) realizaram um estudo em base de dados históricos para comprovar a técnica errônea utilizada por uma empresa. A técnica utilizada pelos autores consiste em separar a base em duas, sendo a primeira utilizada para definição dos limites de controle, e a segunda já para verificar as ações tomada pela empresa.

Moreira Júnior *et al* (2007), ao trabalharem com gráficos correlacionados numa indústria de filmes, utilizam o modelo ARIMA (*Autoregressive integrated moving avarage*), que tem por objetivo separar as causas estruturais das demais causas.

Costa, Epprecht & Carpinetti (2009) sugerem a utilização de gráficos de amplitude móvel (I-R_M), eliminando intervalos fixos da amostra, de modo a reduzir o coeficiente de correlação de modo a não mais influir no gráfico.

Os autores supracitados ainda sugerem uma técnica de coleta de dados de modo a utilizar subgrupos racionais, fazendo medições em intervalos pequenos (para formar o subgrupo) em tempos constantes maiores (para formar a amostra). Um exemplo desta técnica pode ser ilustrado em um controle de temperatura, onde são feitas 5 medições de com intervalo de 2 minutos, e este processo é repetido a cada meia hora. Assim, pode-se utilizar os conceitos gráficos usuais de Shewhart para posição e dispersão.

Samohyl (2004) realiza uma série de teste de hipóteses utilizando a distribuição t de Gosset (ou t de *student*) da autocorrelação de modo a achar um "k" que a correlação se dissipa e pode ser considerada nula.

Para este estudo, adota-se a metodologia sugerida por Samohyl (2005), mas utilizando o teste de hipóteses com a distribuição normal (sugerido por Hines *et al*, 2006), dado o tamanho da amostra coletada. Além da separação da base de dados histórica em duas, como em Hora, Vasconcelos & Fiuza (2009), a primeira para calibração do modelo (cálculo dos limites) e a segunda para o estudo crítico.

2.3 Procedimentos Técnicos

2.3.1. Escolha da característica de controle

Os itens de controle adotados neste trabalho são Cor, medido em uma escala numérica, e pH dos tanques A e B. O principal critério de escolha dessas variáveis são a disponibilidade dos dados históricos nos pontos de controle já existentes e também pela característica de influência de ambos no produto final.

2.3.2 Escolha da técnica de controle

A escolha pelo gráfico do tipo I-R_M é devido às variáveis de controle representarem um subgrupo com um único elemento.

Utilizar gráficos de controle por atributo não é justificável, pois este tipo de gráfico é baseado em ser defeituoso e não ser defeituoso, certo ou errado e para a empresa IQ não importa a porcentagem de defeito e sim a avaliação de estabilidade de seu processo.

Na utilização do gráfico I-R_M, é calculado um índice "k" para diluição da correlação, sendo este definido como o intervalo entre a amostra suficiente para que o teste de hipótese aponte que a correlação pode ser considerada nula.

2.3.3. Coleta dos dados

Os dados para o estudo são obtidos em pesquisa documental nos relatórios da empresa nos anos de 2007 e 2008 e tabulados em planilha eletrônica.

Os dados dos anos anteriores a 2007 são desconsiderados, pois o processo de produção foi modificado e não retrataria o processo dos demais anos. Os dados de 2009 não foram utilizados para monitoramento do processo já que não estão consolidados.

As variáveis utilizadas para avaliação do processo são a cor e o pH. Os valores de 2007 encontrados para as variáveis citadas serviram de base para determinação dos limites de controle de processo. Os valores das variáveis de 2008 indicam o comportamento do processo quando plotados no gráfico de controle I-R_M.

2.3.4. Método para determinação dos limites de controle

<u>- Primeiro passo</u>: Definir valores utilizados.

Após realizado o estudo de correlação, seleciona-se os dados das variáveis (cor e pH) e retira-se a média dos valores individuais. O próximo passo é calcular a amplitude dos dados e calcular a média entre os valores.

Cálculo das médias para observações individuais e amplitude móvel, definido por Slack, Chambers & Johnston (2007):

$$\overline{\overline{X}} = \frac{\overline{X}_1 + \overline{X}_2 \ldots \overline{X}_m}{m} \qquad \overline{R} = \frac{R_1 + R_2 + \ldots + R_m}{m} \tag{1}$$

- Segundo Passo: Calcular o desvio padrão.

Para observações individuais, calcula-se da seguinte forma, Segundo Costa, Epprecht & Carpinetti (2005).

$$\sigma\ x = S_D = \frac{M\overline{R}}{d_2} \tag{2}$$

Segundo Costa, Epprecht e Carpinetti (2008), o estimador σ x é um caso especial do estimador S_D e a amplitude móvel corresponde a amplitude de um par de observações, o valor de d_2 é o valor de n=2. Consultando na Tabela 1, tem se o valor de d_2=1,128.

Tabela 1: Valores de referência para as constantes d2, d3 e c4

n	d_2	d_3	c_4
2	1,128	0,853	0,798

Fonte: Costa, Epprecht & Carpinetti (2005).

Para amplitude móvel, calcula-se da seguinte forma, segundo Costa, Epprecht & Carpinetti (2005). Consultando na Tabela 1, encontra-se o valor de d_3=0,853.

$$\sigma_R = d_3\, \sigma_x \tag{3}$$

- Terceiro Passo: Cálculo dos limites pelas fórmulas abaixo:

$$LSC_{\overline{X}} = \overline{\overline{X}} + 3\sigma_{\overline{x}} \qquad LSC_R = \overline{R} + 3\sigma_R$$

$$LIC_{\overline{X}} = \overline{\overline{X}} - 3\sigma_{\overline{x}} \qquad LIC_R = \overline{R} - 3\sigma_R \tag{4}$$

Onde LSC = Limite superior de controle;

LIC = Limite inferior de controle;

$\sigma_{\overline{X}}$ = desvios padrão das médias dos subgrupos;

σ R = desvio padrão das amplitudes dos subgrupos.

2.3.5. Método do Teste de hipóteses

Samohyl (2009) propõe alguns passos para realização do teste de hipóteses.

1. Uma questão ou dúvida é levantada sobre uma realidade concreta com características importante, mas não totalmente conhecidas;
2. As hipóteses nula e alternativa são construídas dando enfâse ao papel da hipótese nula;
3. A hipótese nula é rejeitada baseada no *p-value* extremamente pequeno, minimizando a probabilidade de rejeições erradas.

O teste de correlação é construído de modo a admitir que a hipótese nula é a própria correlação nula, e a hipótese alternativa admite uma correlação não nula.

$$H_0 \rightarrow \rho = 0$$
$$H_1 \rightarrow \rho \neq 0$$

O teste de hipóteses é realizado segundo a distribuição normal, pois a amostra é grande o suficiente para não utilizar a distribuição t de *student* (HINES *et al*, 2006).

$$t_o = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \tag{5}$$

Para amostras moderadamente grandes (n≥ 25), sugere-se utilizar a equação abaixo (HINES *et al*, 2006).

$$Z = (\text{arctanh } r - \text{arctanh } \rho_0)\,(n-3)^{1/2} \qquad (6)$$

A variância é representada pela equação que segue (HINES *et al*, 2006).

$$\sigma^{2Z} = (n-3)^{-1} \qquad (7)$$

2.3.6. Análise de capacidade de processo

A capacidade de processo diz respeito à uma comparação entre os limites de controle obtidos estatisticamente, e os limites de especificação, determinados por força de uma norma, por exigência de clientes, ou por outra técnica (COSTA, EPPRECHT & CARPINETTI, 2005).

Neste estudo, os três índices são calculados segundo Costa, Epprecht & Carpinetti (2005) sugerem:

$$Cp = \frac{LSE - LEI}{6\sigma} \;/\; Cpk = \text{Min}\left(\frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma}\right) \;/\; Cpm = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (d - \mu)^2}} \qquad (8)$$

O índice Cp é aconselhado quando se tem processos centralizados, isto é, quando o ponto médio dos limites especificados coincidem com o ponto médio dos limites de controle. O Cpk é utilizado seguindo o mesmo princípio que o Cp, mas adaptado à realidade de processos descentralizados. O índice Cpm é adequado a idéia de qualidade de Taguchi, que penaliza mais a descentralidade do processo do que a produção fora da especificação (COSTA, EPPRECHT & CARPINETTI, 2005).

2.4. Limitações Metodológicas

Como a produção do sal LacSol é do tipo contínua, então ele apresenta características específicas, surge então dificuldades quanto ao uso das ferramentas do Controle Estatístico da Qualidade.

Segundo Ramos (2000), estas dificuldades podem ser quanto:

- Emprego de amostras unitárias;
- Coleta e formação de amostras;
- Dados independentes;
- Bateladas homogêneas, mas com diferenças entre si; etc.
- Fornecimento de dados de produção;
- Inexistência do banco de dados histórico de produção;
- Custo de implementação da melhoria.

Outra limitação encontrada na pesquisa refere-se à coleta de dados, que não é feita *on-line*, delimitando o escopo da pesquisa aos dados históricos dipsonibilizados pela empresa.

É importante também citar que o nome da empresa é omitido por sigilo industrial, mas que houve todas as condições para execução do estudo de caso.

2.5 Análise dos resultados

Após a definição dos limites de controle, é realizada uma crítica ao controle de qualidade adotado durante o período analisado.

A capacidade de processo também é analisada criticamente, de acordo com as faixas de valores definidas por Montgomery (2008), apresetadas no Quadro 3.

	Especificações bilaterais	**Especificações unilaterais**
Processos existentes	1,33	1,25
Processos novos	1,50	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico, processo existente	1,50	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico, processo novo	1,67	1,60

Quadro 1: Valores Mínimos recomendados da razão da capacidade do processo.
Fonte: Montgomery, 2008.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Controle de Processos Auto-Correlacionados

De acordo com Russo & Camargo (2004), a auto-correlação é um mecanismo que existe em um processo, que faz com que os dados não sejam independentes entre si e que o valor de uma variável pode não ser um valor aleatório e tem seu próprio valor influenciado em algum momento no tempo.

O coeficiente de correlação é uma ferramenta básica e simples, porém muito eficiente para estimar o grau de relacionamento linear entre as variáveis distribuídas normalmente (SAMOHYL, 2009). Pedrini *et al* (2007) afirma que autocorrelação tem sido reconhecida como um fenômeno natural nas indústrias e é vista como um problema já gera alarmes falsos nos gráficos de controle.

Moreira Jr. *et al* (2007) reforça a afirmativa acima sugerindo uma abordagem para trabalhar com dados autocorrelacionados: modelar diretamente a estrutura correlacional com uma série temporal, usar esse modelo para remover a autocorrelação dos dados, e aplicar gráficos de controle aos resíduos. O autor ainda sugere a utilização da modelagem ARIMA (*Autoregressive integrated moving average*) que tem como objetivo separar as causas estruturais das causas comuns e especiais.

2.2. Índices de Capacidade de Processo

Segundo Costa, Epprecht & Carpinetti (2005), os índices de capacidade do processo (ICP's) são parâmetros adimensionais que indiretamente medem o quanto o processo consegue atender às especificações. Existem vários índices de capacidade do processo, dentre eles, os índices Cp, Cpk e Cpm que são mais usuais.

Para Slack, Chambers & Jhonston (2007), a capabilidade do processo é a medida da aceitabilidade da variação do processo. O cálculo de ICP, genericamente, é dado pela razão entre a faixa de especificação e a variação "natural" do processo: mais ou menos três desvios-padrão.

CLASSIFICAÇÃO	VALOR DE ICP
Capaz	$\geq 1{,}33$
Razoavelmente capaz	$1 \leq ICP \leq 1{,}33$
Incapaz	< 1

Quadro 2: Classificação do processo com respeito a sua capacidade.
Fonte: Costa, Epprecht & Carpinetti (2008).

Para os índices de capacidade tradicionais, quanto maior o seu valor, melhor o processo consegue atender às especificações. O Quadro 1 mostra, em resumo, os possíveis valores dos Índices e a respectiva classificação em relação à capacidade do processo.

2.3 Teste de Hipóteses para CEP

Hines *et al* (2006) afirmam que muitos problemas exigem uma decisão entre aceitar e rejeitar algum parâmetro. Samohyl (2009) define hipótese como o resultado de uma teoria cientifica, da engenharia ou até mesmo da experiência.

As hipóteses podem ser comprovadas, continua Samohyl (*op. cit.*), quando são bem definidas e passíveis de mensurações.

Um teste de hipóteses é realizado quando se deseja tomar uma decisão sobre a veracidade ou falsidade de uma hipótese, e se apóia no uso de informação de uma amostra aleatória da população de interesse (HINES *et al*, 2006).

Samohyl (2009) divide as hipóteses em dois grandes grupos, a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1). A primeira é definida como a verdade científica do momento e apela pela igualdade ou por efeito zero ou nulo, e a segunda é definida como a negação da primeira.

Hines *et al* (2009) afirmam que sempre se esta sujeito a erros ao se trabalhar com teste de hipóteses, pois os dados são levantados a partir de uma amostra aleatória. São possíveis dois tipos erros, o I e o II.

O erro tipo I é definido quando rejeita-se a hipótese nula e ela é verdadeira, enquanto o erro tipo II é a aceitação da hipótese nula, quando ela é falsa. O erro tipo I é mais grave (e por isso o mais importante) pois envolve o custo da mudança (SAMOHYL, 2009; HINES *et al*, 2006).

	Pesquisador opta entre estados da hipótese nula	
Estados reais da hipótese nula na população	**Rejeita (negativo)**	**Não rejeita (positivo)**

VERDADEIRO	Erro I	OK
FALSO	OK	Erro tipo II

Quadro 3: Tipos de erros em teste de hipóteses.
Fonte: Samohyl (2009).

Slack, Chambers & Johnston (2002) definem erro tipo I como aqueles em que uma decisão de fazer alguma coisa foi tomada e situação não garantia que aquilo pudesse ser feito. Os erros tipo II são aqueles em que nada foi feito, ainda que uma decisão de fazer devesse ter sido tomada e a situação de fato garantia que isso pudesse ser feito.

Dentro do teste de hipóteses, é preferível cometer o erro tipo II ao erro tipo I, então o teste é construído de modo a diminuir a probabilidade de se rejeitar H_0 estando esta correta, e aceitar H_1 estando esta errada (HINES *et al*, 2006).

Samohyl (2009) propõe a hipótese nula, como resultado de lotes conformes em uma linha produção. O erro tipo I é o risco da empresa rejeitar um lote que é bom e o erro tipo II é o risco do consumidor aceitar por engano o lote não conforme.

O autor supracitado afirma ainda que existe uma relação negativa entre os dois erros: segurando que um dos erros não ocorre, significa que o outro erro fique mais vulnerável e exemplifica que em um teste clínico é desenvolvido para minimizar o erro tipo I (falso negativo), mas tolera o erro tipo II (falso positivo).

Samohyl (2009) aponta que o valor da probabilidade de ocorrer o erro tipo I é chamado valor-p ("*p value*"). Um alto valor-p significa maior probabilidade de errar rejeitando a hipótese nula.

A proposta de Samohyl (2009) para montagem do teste de hipótese é a que segue abaixo.

1. Levantar uma dúvida sobre uma realidade que deve ser concreta, com características importantes e desconhecidas;
2. A ênfase é na hipótese nula: A hipótese nula rejeitada significa um ganho do ponto de vista científico, ou ainda, se for rejeitada quando não deveria ser (erro tipo I), o custo desse erro seria muito grande;
3. Baseando em um valor-p muito pequeno, a hipótese nula é descartada, minimizando a probabilidade de rejeição errada.

4. Descrição do objeto de estudo

A empresa onde foi aplicado esse estudo de caso destaca-se no mercado internacional e nacional no ramo de aditivos químicos alimentares. Está situada no Norte do Estado do Rio de Janeiro, é fabricante de um ácido orgânico de origem fermentativa e sais de sódio que tem atuação em diversos segmentos industriais como panificação, cárneos e aves, farmacêutico e têxtil.

A referência a esta empresa será feita pelo pseudônimo IQ (Indústria Química). Qualquer outra informação que permita a identificação da empresa será omitida por sigilo industrial. Como já foi elucidado.

A indústria IQ, conta com cerca de 100 funcionários distribuídos na fábrica e em seu escritório localizado em outro estado do Brasil. Ela ainda faz parte de uma companhia internacional composta por outras IQ's que vão produzir produtos derivados de ácido orgânico.

O objeto de estudo deste trabalho é o processo de produção de um sal de sódio, chamado de forma fictícia de LacSol, produzido pela IQ. A planta de produção está localizada no estado do Rio de Janeiro, com a capacidade de operação com cerca de 1.500 toneladas/mês.

O processo de produção do LacSol não é totalmente automatizado. É simples e continuo, tendo como matéria prima principal um ácido de origem orgânica em uma base de sódio que pode ser o hidróxido de sódio.

A produção é iniciada em um reator que recebe o ácido orgânico que deverá estar dentro das conformidades necessárias como, por exemplo, a sua concentração.

Dentro de um valor estimado e de forma manual e lenta adiciona-se o hidróxido de sódio até atingir um determinado pH. Ao chegar ao pH ideal o LacSol irá para um tanque de processo, para seguir para a próxima etapa que é a de passar por colunas que contem mineral vegetal.

Essas colunas retiram a cor do LacSol e cheiro de queimado proveniente do processo após passar pelas colunas o sal de sódio em processo vai para tanques que recebem o nome de "pulmão" onde são realizadas análises prévias de aprovação do produto.

Caso seja aprovado passará para os tanques do setor de embalagem onde terá um lote final e sairá para atender os clientes.

Neste processo simples, algumas variáveis como as de matérias primas do processo (ácido orgânico e o hidróxido de sódio) devem estar com seus parâmetros controlados e avaliados, pois eles vão impactar diretamente no processo de produção. Os aspectos que tangem a qualidade do produto são a cor do produto, o pH e a sua concentração. Para este estudo são adotados os indicadores de pH e cor, uma vez que o controle de de concentração não é feito regularmente.

5. Resultados

5.1. Estudo de Correlação

O teste de hipóteses para correlação é feito conforme Hines *et al* (2006), com as fórmulas definidas na metodologia. Este teste também é encontrado em Fonseca, Martins e Toledo (1989), corroborando com a técnica adotada.

Nos quadros abaixo é calculado o teste de hipóteses a um nível de significância de 99% (α=0,01) para vários intervalos (k), para as variáveis pH e cor para ambos os tanques. A coluna "k" refere-se ao intervalo adotado entre medições, a coluna "r-pH" refere-se à auto-correlação. "z-pH" é a correlação reduzida à uma variável padronizada, "sigma- pH" é o desvio padrão e "Z" indica o ponto na reta onde limita a região de rejeição do teste de hipótese. Analogamente, as mesmas colunas são consideradas para a variável "cor".

Para variável pH no Tanque A (primeiro processo), um intervalo de 3 medições é suficiente para afirmar que a correlação é nula.

k	r-pH	z-pH	sigma pH	Z	99%
1	0,47	0,51	0,01	6,09	2,58
2	0,35	0,36	0,01	4,24	2,58
3	**0,15**	**0,15**	**0,01**	**1,74**	**2,58**
4	0,1	0,1	0,01	1,15	2,58
5	0,07	0,07	0,01	0,86	2,58

Quadro 4: Cálculo para teste de hipótese - 1° Processo. Fonte: Própria.

No Tanque B (segundo processo), o intervalo de 3 medições não é suficiente para diminuir a correlação entre os dados. Nesta situação é necessário um intervalo de 5 medições para a diluição da correlação.

k	r-pH	z – pH	sigma pH	Z	99%
1	0,465	0,50	0,01	6,06	2,58
2	0,292	0,30	0,01	3,60	2,58
3	0,351	0,37	0,01	4,38	2,58
4	0,258	0,26	0,01	3,15	2,58
5	**0,190**	**0,19**	**0,01**	**2,28**	**2,58**

Quadro 5: Cálculo para teste de hipótese - 2° Processo. Fonte: Própria.

Para variável Cor, o intervalo de 5 medições foi o suficiente em ambos os tanques conforme mostrado nos quadros abaixo.

k	r-cor	z- cor	sigma cor	Z	99%
1	0,51	0,57	0,01	6,73	2,58
2	0,39	0,42	0,01	4,92	2,58
3	0,33	0,34	0,01	4,04	2,58
4	0,28	0,29	0,01	3,41	2,58
5	**0,17**	**0,17**	**0,01**	**1,98**	**2,58**

Quadro 6: Cálculo para teste de hipótese - 1° Processo. Fonte: Própria.

k	r-cor	z – cor	sigma cor	Z	99%
1	0,43	0,46	0,01	5,60	2,58

2	0,37	0,39	0,01	4,72	2,58
3	0,30	0,31	0,01	3,66	2,58
4	0,17	0,17	0,01	2,04	2,58
5	**0,17**	**0,17**	**0,01**	**1,99**	**2,58**

Quadro 7: Cálculo para teste de hipótese - 2° Processo. Fonte: Própria.

Como as análises são feitas a partir de amostra coletadas no mesmo instante, é preferível utilizar o mesmo "k" para ambas análises. Neste trabalho será utilizado um k igual a 5, admitindo-se ser suficiente para diluição da correlação.

5.2. Definição dos limites de controle

Os limites determinados a partir dos dados de 2007 são mostrados no quadro a seguir:

		Valor		Amplitude	
	Variáveis	**LSC**	**LIC**	**LSC**	**LIC**
Tanque A	*pH*	8,4	7,5	0,5	0,0
	Cor	22,63	7,29	9,4	0,0
	Variáveis	**LSC**	**LIC**	**LSC**	**LIC**
Tanque B	*pH*	8,32	7,67	0,4	0,0
	Cor	22,45	4,48	11	0,0

Quadro 8: Limites de controle para ambos os tanques. Fonte: Própria.

A empresa também especifica valores para aceitação ou rejeição, permitindo que seja feita uma análise de capacidade do processo.

Variáveis	LSE	LIE
pH	8,3	7,8
Cor	20	0

Quadro 9: Limites Especificados Superior (LSE) e Inferior (LIE). Fonte: Empresa IQ.

5.3. Estudo de capacidade do processo

Os resultados do estudo de capacidade de processo é apresentado no quadro abaixo.

	Tanque A		Tanque B	
Índices	pH	Cor	pH	Cor
Cp	0,56	1,3	0,77	1,11
Cpk	0,33	0,66	0,6	0,73
Cpm	0,46	0,6	0,69	0,73

Quadro 10: Estudo de Capacidade do Processo. Fonte: Própria.

No quadro acima é possível observar vários valores abaixo do índices de processo, que devem ser confrontados com a tabela abaixo, para descobrir quantos itens serão produzidos fora da especificação em um universo de um milhão.

RCP	Especificação Unilateral	Especificação Bilateral	RCP	Especificação Unilateral	Especificação Bilateral
0,25	226.628	453.256	1,20	159	318
0,50	66.807	133.614 **(A)**	1,30	48	96
0,60	35.931	71.862 **(B)**	1,40	14	28
0,70	17.865	35.730	1,50	4	8
0,80	8.189	16.378	1,60	1	2
0,90	3.467	6.934	1,70	0,17	0,34
1,00	1.350	2.700	1,80	0,03	0,06
1,10	484	968	2,00	0,0009	0,0018

Quadro 11: Porções de defeitos por milhão de oportunidades. Fonte: Montgomery (2008).

O resultado do estudo de capacidade do processo indica que em um milhão de lotes

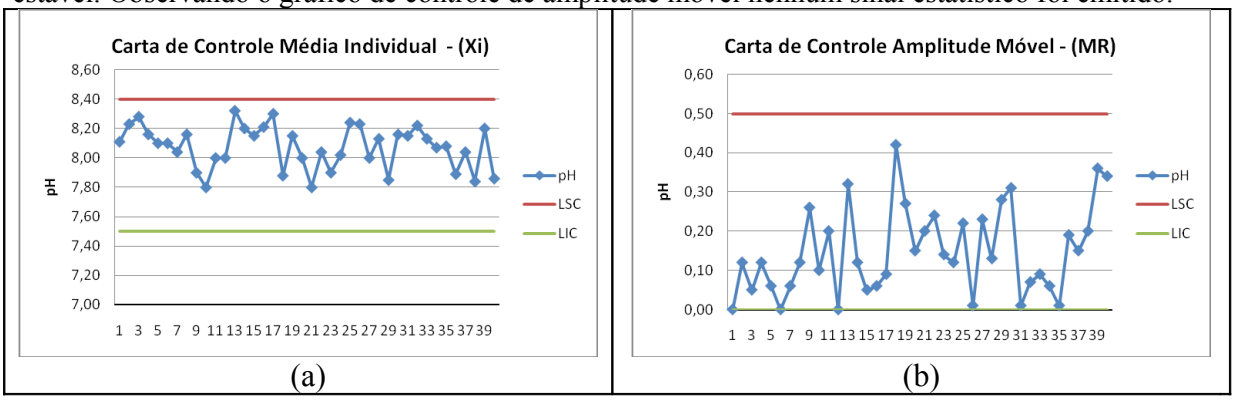
produzidos, aproximadamente 130 mil itens serão produzidos fora da especificação no processo do tanque A e 70 mil no processo do tanque B.

5.4. Monitoramento do processo

Após os limites determinados, estes são utilizados para verificar as decisões de aceitação dos lotes em uma segunda série histórica de dados.

5.4.1Controle de pH

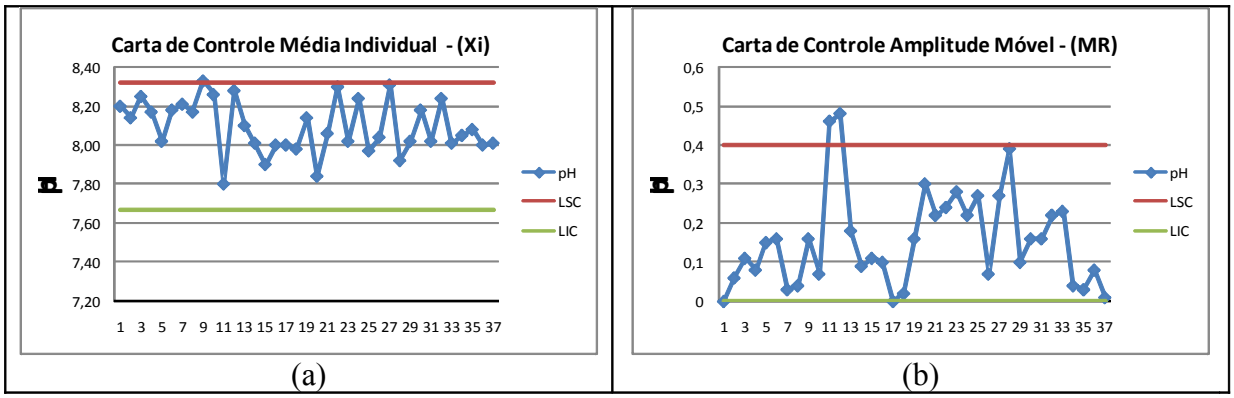
Observa-se neste primeiro momento que a média aumentou. Os valores passaram a ficar próximo do limite superior de controle (LSC). O processo para esta variável aparentemente está estável. Observando o gráfico de controle de amplitude móvel nenhum sinal estatístico foi emitido.



(a) (b)

Figura 1: Gráficos de controle para monitoramento do pH no tanque A. Fonte: Elaboração Própria.

No tanque B, evidencia um aumento na média e nota-se que para a variável pH o processo não apresenta estabilidade. No gráfico de amplitude móvel, existiram pontos que ficaram fora dos limites de controle.

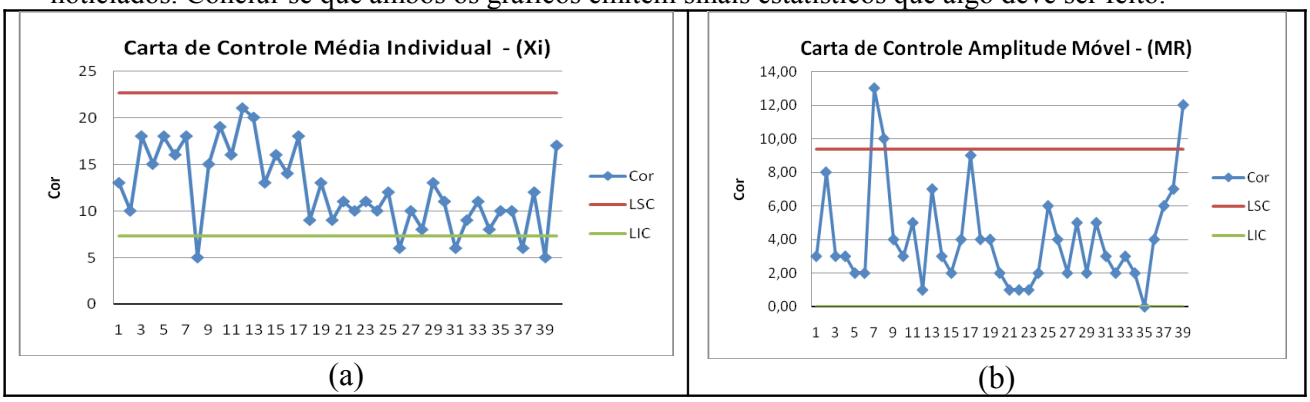


(a) (b)

Figura 2: Gráficos de controle para monitoramento do pH no tanque B. Fonte: Elaboração Própria.

5.4.2 Controle de Cor

O processo neste tanque para a variável cor, oscila bastante: ele começa alto e depois desce ficando próximo do limite inferior de controle (LIC), evidenciando que alguma mudança foi realizada no processo. Observando o gráfico de amplitude móvel, pontos fora dos limites de controle foram noticiados. Conclui-se que ambos os gráficos emitem sinais estatísticos que algo deve ser feito.



(a) (b)

Figura 3: Gráficos de controle para monitoramento da cor no tanque A. Fonte: Elaboração Própria.

No tanque B, a situação é um pouco diferente. Apresentou muitos pontos perto da zona A, ou seja, próximo dos limites de controle.

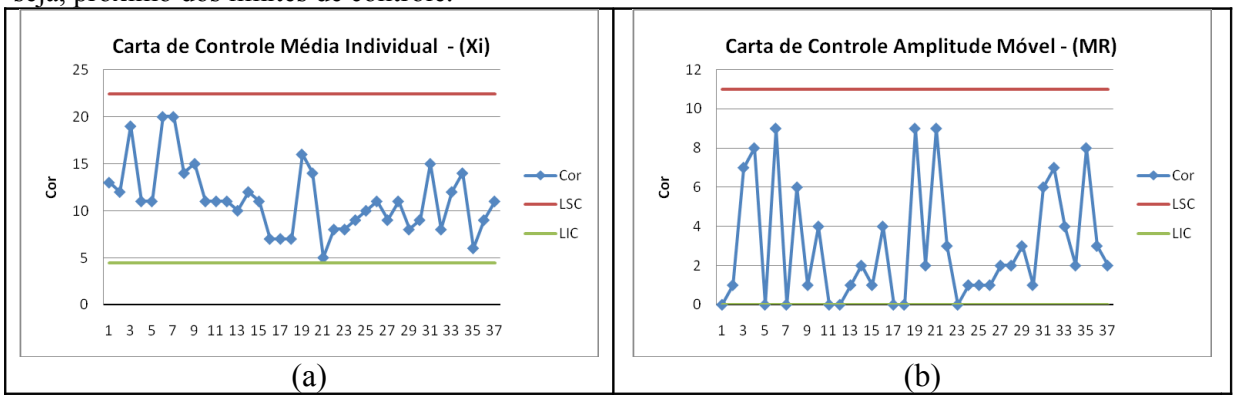


Figura 4: Gráficos de controle para monitoramento da cor no tanque B Fonte: Elaboração Própria.

6. Conclusões

6.1. Quanto aos objetivos

Este artigo abordou a implantação do CEP em uma Indústria Química localizada no Estado do Rio de Janeiro, com o objetivo de avaliar o processo de produção de um de seus produtos e evidenciar que o uso de ferramentas estatísticas como o gráfico de controle de média individual e o gráfico de amplitude móvel, são de extrema importância pois revelam a estabilidade (ou instabilidade) do processo.

6.2. Quanto ao trabalho realizado

Os resultados obtidos neste estudo de caso mostram que os gráficos de controle de média individual e o gráfico de amplitude móvel são as melhores ferramentas de avaliação quando se trabalha com dados que apresentam uma certa correlação. Existe um grande chance de estar alarmando o processo de forma errada quando não se utiliza gráficos apropriados para avaliação.

Antes de determinar os limites de controle é necessário diminuir essa correlação, e testar as hipóteses.

Com os limites de controle já encontrados a partir dos dados dos tanques A e B de 2007, lança-se os valores disponíveis de 2008 para os dois tanques citados para realizar o seu comportamento quanto as variáveis cor e pH e chegou-se as seguintes conclusões:

- Mesmo sendo um processo contínuo, observou-se uma diferença entre os valores encontrados em cada um dos tanques. Para variável pH, o tanque A se mostra estável, evidenciando um aumento na sua média. Ao contrário do tanque B, que se mostrou totalmente não estabilizado, apresentando pontos fora dos limites de controle calculados anteriormente;
- A variável cor foi a que evidenciou um maior sinal estatístico, apresentando uma variação nos seus valores de média para ambos os tanques;
- Como a indústria IQ, fornece limites de controle de especificação, pode-se calcular os índices de capacidade desse processo, e a conclusão é que esse processo poderia ser melhorado se mostrando incapaz de atender as especificações de controle;
- Por não ter observado o comportamento desse processo, não se tomou nenhuma atitude para torná-lo mais capaz e estável.

6.3. Quanto a trabalhos futuros

A sugestão de melhoria é reforçar a importância de se ter implantado o Controle Estatístico de Processo na indústria IQ, de forma a garantir produtos com qualidade assegurada não somente no produto final mas durante o processo também, pois dessa forma a empresa pode reduzir bastante os custos de produção, do retrabalho bem como a de se ter produtos reprovados e devolvidos pelos seus clientes.

No âmbito acadêmico, as mudanças sugeridas, após implantadas, tanto na forma de coleta de

dados, quanto na precisão das medições, incentivam uma nova pesquisa, uma vez que o método adotado, por ser com dados históricos, não é o mais indicado para o problema abordado.

Bibliografia

COSTA, A. F. B.; **EPPRECHT**, E. K.; **CARPINETTI**, L. C. R. *Controle Estatístico de Qualidade*. 2.ed. 334p. Ed. Atlas, São Paulo, 2005.

DIAS, J. R. Comparação de Intervalos de amostragem fixos e variáveis adaptativos em controlo estatístico de qualidade com algum novos resultados. In 5° Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – 2° Congresso de Engenharia de Moçambique, 2008 – Maputo – Moçambique.

FERREIRA *et al.* Utilização do Controle Estatístico do Processo (CEP) na comparação de velocidades de encapsulamento de medicamentos para tuberculose in Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007, Foz do Iguaçú –PR.

FITERMAM, M; **TEN CATEN** C.S. **BATTESINI** M.; **LIMA**, L.L. CEP por atributos: uma abordagem de implantação *in* Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2004, Florianópolis - SC

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. Ed. Atlas, São Paulo, 2008.175p.

HINES, W. W. *et al*. Probabilidade e Estatística na engenharia. Ed. LTC, quarta edição. 588p. Rio de Janeiro, 2006.

HORA, H.R.M.; **VASCONCELOS**, M.E.S.S.; **FIUZA**, I. Gráfico de Controle de porção defeituosa (gráfico p): Um estudo de comparação em uma empresa de usinagem in Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2009, Salvador – BA.

MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. 4ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 513p.

MOREIRA JÚNIOR, F.J. Proposta de um método para o controle estatístico de processo para observações autocorrelacionadas. Porto Alegre. 2005. 138p.

MOREIRA JÚNIOR, F.J.; **SEIDEL** E.J; **LOPES**, L.F.D; **ZANELLA** A; **OLIVEIRA** F.C. Aplicação do controle estatístico do processo com dados autocorrelacionados na produção de filmes plásticos flexíveis. In Simpósio de Engenharia de Produção, 2007- Bauru – SP.

PEDRINI D.C; **TEN CATEN** C.S; **SOARES** A.B; **CAMPOS**, M.S. Gráficos de controle para média e desvio padrão de tamanho de amostra variável: uma aplicação em uma indústria do setor metalúrgico. In Encontro nacional de Engenharia de produção, 2007 – Foz do Iguaçú – PR.

RAMOS, A.W. CEP para processos contínuos e bateladas. 1.ed. Edgard Blücher LTDA. São Paulo 2000.

REQUEIJO J.G; **LEAL** R.P; **PEREIRA** Z.L. Metodologia para implementação do controlo estatístico do processo. In 5° Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – 2° Congresso de Engenharia de Moçambique, 2008 – Maputo – Moçambique.

RUSSO, S.; **CAMARGO**, M.E. Controle estatístico de processo: Soluções de um estudo de caso usando procedimentos estatísticos *in* Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2004, Florianópolis – SC.

SAMOHYL, R. W. Controle Estatístico de Qualidade. Ed. Campus, 275p Rio de Janeiro, 2009.

SAMOHYL, R. W. Controle Estatístico de Processo e Ferramentas da Qualidade. *in* **CARVALHO**, M. M. (coord.), **PALADINI**, E. P. (coord). Gestão da Qualidade: teoria de casos. Ed. Campus, pp. 261-299, Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, E. L., **MENEZES**, E. M. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 121p. UFSC. 3ª. Edição. Florianópolis, 2001.

SIQUEIRA, L.G.P. Controle Estatístico do Processo. 1 edição. São Paulo: Editora Pioneira. 1997.129p.

SLACK, N. ; **CHAMBERS**, S.; **JOHNSTON,** R. *Administração da Produção.* 2.ed. Ed. Atlas, São Paulo 2007.