



ConBREpro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Controle Estatístico do Processo em R: análise exploratória do pacote qcc

Olga Maria Formigoni Carvalho Walter

Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas – Universidade do Estado de Santa Catarina

Elisa Henning

Departamento de Matemática - Universidade do Estado de Santa Catarina

Leandro Zvirtes

Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas - Universidade do Estado de Santa Catarina

Resumo: Este artigo tem como objetivo explorar as principais funções do pacote *qcc* versão 2.7 do *software* R, considerando o Controle Estatístico de Processo (CEP) univariado. A intenção é possibilitar a ampliação de sua aplicação por se tratar de um *software* estatístico gratuito, o que facilita seu uso por estudantes, pesquisadores e profissionais da área de engenharia da qualidade. Além disso, pode ser utilizado como ferramenta auxiliar no ensino de CEP. Este é um estudo exploratório e as aplicações são realizadas em ambiente RStudio explorando as principais funções do pacote por meio de exemplos com dados oriundos de uma das referências clássicas de CEP utilizadas nos cursos de graduação e pós-graduação em engenharia de produção. Os resultados apontam que é possível usar o pacote *qcc* como ferramenta auxiliar no ensino de CEP, proporcionando maior embasamento prático, bem como introduzir seu uso em empresas de pequeno porte que possuem maior escassez de recursos, quando comparadas a empresas de médio e grande porte.

Palavras-chave: Controle Estatístico do Processo, Gráfico de Controle, Capacidade do Processo, *qcc*, RStudio.

Statistical Process Control in R: exploratory analysis of the qcc package

Abstract: This article aims to explore the main functions of the *qcc* package version 2.7 of the R software, considering univariate Statistical Process Control (SPC). The intention is to enable the expansion of its application, since it is a free statistical software, which facilitates its use by students, researchers and professionals in the quality engineering field. In addition, it can be used as an auxiliary tool in the teaching of SPC. This is an exploratory study and the applications are carried out in the RStudio environment, exploring the main functions of the package through examples with data from classic SPC references used in undergraduate and graduate courses in industrial engineering. The results indicate that it is possible to use the *qcc* package as an auxiliary tool in teaching SPC, providing greater practical support to students, as well as introducing its use in small companies that have scarcity of resources, when compared to medium and large companies.

Keywords: Statistical Process Control, Control Chart, Process Capability, *qcc*, RStudio.

1. Introdução

O Controle Estatístico de Processo (CEP) é uma prática de melhoria que empresas adotam para garantir a confiabilidade e qualidade de seus produtos, aumentando assim a satisfação do cliente. O CEP foi introduzido em processos industriais na década de 1920 por Walter A. Shewhart e desde então se difundiu para as mais diversas áreas (Montgomery, 2016).

Apesar de décadas de aplicação do CEP, ainda existem dificuldades na sua condução, devido à falta de atenção a alguns fatores associados à sua implantação, dentre eles o uso de *softwares* para CEP. Conforme Soriano (2015), o uso de pacotes computacionais de CEP não ocorre diariamente quando necessários na gestão de operações. Porém, usar ferramentas computacionais é indispensável em razão da complexidade dos projetos de melhoria contínua. Segundo Toledo, Lizarelli e Santana Junior (2017) o uso de computadores e *softwares* específicos é um dos fatores críticos de sucesso na implantação do CEP. Nesse sentido, uso de um *software* oferece vantagens como menor tempo para cálculos matemáticos, além de facilidade de armazenamento e recuperação de dados. Soriano, Oprime e Lizarelli (2020) apontam a utilização de pacotes computacionais como fator importante para efetiva implantação do CEP.

Além de *softwares*, o treinamento, a compreensão do CEP, e inclusive treinamento a nível gerencial, também são apontados na literatura como importantes fatores que viabilizam melhores resultados nas empresas que utilizam o CEP.

Se tanto o treinamento, quanto o uso de *softwares* específicos para CEP é apontado na literatura como importante fator para condução de projetos de melhoria da qualidade nas empresas, na academia, que prepara para o mercado profissionais de alto nível como engenheiros e gestores da qualidade, esta realidade não é diferente.

A aprendizagem de CEP baseada em aplicações computacionais tem como um de seus propósitos, estimular o aprendizado por meio de desafios relacionados a solução de problemas com dados do cotidiano industrial. Ao explorar soluções dentro de um contexto que se apropria de tecnologias como recursos computacionais específicos, é possível incentivar a habilidade de investigar e ampliar a reflexão mediante a uma situação problema.

Nesse sentido, esse artigo tem como objetivo explorar as principais funções do pacote *qcc* do *software* R. A intenção é possibilitar a ampliação de sua aplicação por se tratar de um *software* estatístico gratuito, o que facilita seu uso por estudantes e profissionais da área da qualidade de pequenas empresas. Além disso, pode também ser utilizado como ferramenta auxiliar no processo de ensino e aprendizagem de CEP, proporcionando maior embasamento prático aos estudantes.

2. Controle Estatístico do Processo

Todos os processos apresentam variabilidade e geram variação nas características da qualidade, tanto de produtos quanto de serviços. Tais variações podem resultar dos equipamentos, condições ambientais, matérias-primas, fornecedores, métodos de trabalho, operadores envolvidos, etc. (Werkema, 2014). Porém, é importante monitorar a variabilidade para garantir produtos com qualidade e reduzir custos.

O gráfico de controle é uma das ferramentas principais do CEP. Gráficos de controle monitoram a variabilidade das características da qualidade em amostras ao longo do tempo. Quando é identificada a variabilidade, o gráfico de controle sinaliza a necessidade de investigação e de tomada de ação para identificar as fontes de variabilidades especiais (Montgomery, 2016).

Há gráficos de controle para atributos e gráficos de controle para variáveis. Os gráficos de controle para atributos monitoram a variação do número ou da proporção de itens não conformes que ocorrem em um processo. Os gráficos de controle para atributos são: gráfico p para proporção de itens não conformes; gráfico np , para o número de itens não conformes; gráfico c para o número de não conformidades e; o gráfico u para o número médio de não conformidades. Por outro lado, os gráficos de controle para variáveis analisam características da qualidade como largura, temperatura e volume, por exemplo. Os gráficos de controle para variáveis são: gráfico $\bar{x} - R$ para média e amplitude, gráfico $\bar{x} - s$ para média e desvio padrão e o gráfico de controle para medidas individuais que monitora a média e a amplitude móvel de amostras de tamanho $n = 1$.

Detalhes quanto as fórmulas dos gráficos de controle e sobre análise da capacidade do processo podem ser consultadas em literatura específica de CEP, como Werkema (2014), Montgomery (2016) e Costa, Epprecht e Carpinetti (2018).

3. Metodologia

Este é um estudo exploratório e investiga a aplicação do pacote *qcc* versão 2.7 (Scrucca, 2004) do *software* estatístico R (R Core Team, 2024), considerando o CEP univariado. Para melhor entendimento das funcionalidades do pacote *qcc*, é explicado o objetivo de cada função analisada, bem como seus principais argumentos, seguido de exemplos de aplicação. Aplicar conceitos de exemplos ou situações possíveis no cotidiano daquele contexto estudado pelo aluno, permite criar forte ligação entre o aprendizado e sua utilidade na vida real.

Todos os comandos dos exemplos do RStudio deste trabalho se executados na sequência apresentada, reproduzirão o mesmo conteúdo deste documento. Os dados utilizados são *pistonrings*, *orangejuice*, *orangejuice2* e *circuit* que estão disponíveis no R e são provenientes de Montgomery (2016). O conjunto de dados *pistonrings* trata-se do diâmetro interno de anéis de pistão de motores de automóveis. A cada hora, extrai-se uma amostra aleatória de 5 anéis. Para a análise da fase I da construção do gráfico de controle, foram coletadas 25 amostras de tamanho 5 cada, de um processo sob controle. Depois, mais 15 amostras cada uma de tamanho 5, foram obtidas para a fase II.

Orangejuice são dados de suco de laranja concentrado congelado em embalagens de papelão. Essas embalagens são feitas enrolando-se o papelão e colocando um fundo de metal. Quando há vazamento na lateral ou no fundo da embalagem, esta é considerada não conforme. Inicialmente, selecionaram-se 30 amostras, de tamanho $n = 50$ embalagens cada, em intervalos de meia hora. *Orangejuice2* é a continuação dos dados de *orangejuice*.

O conjunto de dados *circuit* apresenta o número de não conformidades em 26 amostras sucessivas de 100 placas de circuito impresso. Posteriormente, 20 novas amostras, cada uma consistindo em uma unidade de inspeção (100 placas), foram coletadas.

4. Aplicação do pacote *qcc*

Após instalação do pacote pelo Console por meio do comando `install.packages("qcc")`, ou pelo menu *Tools/Install Packages*, é preciso ativar o pacote *qcc* com o comando `library(qcc)` ou `require(qcc)`. Outra forma de ativar o pacote, é flegar *qcc* na guia *Packages* do RStudio.

4.1 Leitura de dados disponível no RStudio

Depois de ativar o pacote, a leitura do conjunto de dados pode ser feita pelo Console por meio dos comandos `data(pistonrings); attach(pistonrings)`.

Na aba *Environment* do RStudio será disponibilizado o conjunto de dados que pode ser visualizado.

A organização dos dados em subgrupos, pode ser feita com a função `qcc.groups()`, por meio do comando `diameter<-qcc.groups(diameter,sample)`. Onde `diameter` é a variável do conjunto de dados e `sample` é variável com o número da amostra de *pistonrings*. O resultado do comando anterior está na Figura 1.

Figura 1 – Conjunto de dados *pistonrings* organizados em subgrupos

	V1	V2	V3	V4	V5
1	74.030	74.002	74.019	73.992	74.008
2	73.995	73.992	74.001	74.011	74.004
3	73.988	74.024	74.021	74.005	74.002
4	74.002	73.996	73.993	74.015	74.009
5	73.992	74.007	74.015	73.989	74.014
6	74.009	73.994	73.997	73.985	73.993

Showing 1 to 6 of 40 entries, 5 total columns

Fonte: Os autores (2024)

4.2 Leitura de dados externos ao RStudio

Nesta seção é mostrado como importar do *Microsoft Excel* os mesmos dados da seção 4.1.

Neste exemplo, os dados devem ser salvos no computador local com extensão `.xlsx` e estarem organizados como mostra a Figura 2.

Na guia *Environment*, acessar o menu *Import Dataset/From Excel* e escolher no diretório do computador o arquivo a importar no formato `.xlsx`.

Na coluna A da Figura 2 estão as medições do diâmetro dos anéis de pistão, do conjunto de dados *pistonrings*. A cada 5 linhas há uma amostra. Cada amostra *m* tem tamanho *n* = 5. Na coluna B (*sample*), da linha 2 até 6, consta 1, que corresponde a amostra *m*₁.

Na coluna B, da linha 7 até 11, está preenchido com 2, que corresponde a segunda amostra *m*₂, e assim sucessivamente.

A próxima seção explica os principais argumentos da função `qcc()` usada para construir os gráficos de controle.

Figura 2 – Disposição no *Microsoft Excel* dos dados de *pistonrings* a ser importado para o RStudio

	A	B
1	diameter	sample
2	74,03	1
3	74,002	1
4	74,019	1
5	73,992	1
6	74,008	1
7	73,995	2
8	73,992	2
9	74,001	2
10	74,011	2
11	74,004	2
12	73,988	3
13	74,024	3
14	74,021	3
15	74,005	3
16	74,002	3
17	74,002	4
18	73,996	4
19	73,993	4
20	74,015	4

Fonte: Os autores (2024)

4.3 Função para gráficos de controle

Para construção de gráfico de controle usa-se a função `qcc()`. Para alterar o tipo de gráfico de controle, modificam-se os argumentos da função conforme a necessidade. Os principais argumentos da função `qcc()` estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais argumentos da função `qcc()` para construção do gráfico de controle

Argumento	Quantidade
<code>data</code>	Conjunto de dados, vetor ou matriz do processo a ser monitorado.
<code>type</code>	Especifica o tipo de gráfico de controle, podendo ser: 'xbar' média; 'S' desvio padrão; 'R' amplitude; 'xbar.one' medidas individuais; 'p' fração não conforme; 'np' número de não conformes; 'c' não-conformidades; 'u' número médio de não-conformidades por unidades; 'g': número de eventos raros entre eventos.
<code>sizes</code>	Valor ou vetor com tamanho da amostra de cada subgrupo. Obrigatório para os gráficos do tipo 'p', 'np' e 'u'
<code>center</code>	Valor especificando o centro ou o valor alvo do processo.
<code>std.dev</code>	Método especificando o cálculo do desvio padrão (dentro do grupo) para dados contínuos. Métodos disponíveis: "UWAVE-R", "UWAVE-SD", "MVLUE-R", "MVLUE-SD" e "RMSDF".
<code>limits</code>	Vetor com dois valores especificando os limites de controle.
<code>data.name</code>	Especifica o nome da variável conjunto de dados que aparece nos gráficos.
<code>labels</code>	Especifica os rótulos para cada grupo.
<code>newdata</code>	Dados para fase II da construção de gráficos de controle a serem plotados, não computados inicialmente para construção dos limites de controle (fase I).
<code>newsizes</code>	Novos tamanhos de amostra (fase II) a serem plotados, não computados inicialmente para construção dos limites de controle (fase I).
<code>newdata.name</code>	Nome da variável conjunto de dados (fase II) que aparece nos gráficos.
<code>newlabels</code>	Vetor de caracteres de rótulos para cada novo grupo definido no argumento <code>newdata</code> .
<code>nsigmas</code>	Número de sigmas para calcular os limites de controle.
<code>confidence.level</code>	Valor entre 0 e 1 especificando o nível de confiança.
<code>rules</code>	Regras a serem aplicadas aos gráficos de controle (<i>default</i> = 'shewhart.rules')
<code>plot</code>	Argumento lógico. Se TRUE o gráfico de Shewhart é plotado (<i>default</i> = 'TRUE').
<code>add.stats</code>	Argumento lógico que indica se as estatísticas e informações devem ser plotadas.
<code>chart.all</code>	Argumento lógico indicando se as estatísticas para os argumentos <code>data</code> e <code>newdata</code> (se fornecidas) devem ser plotadas.
<code>label.limits</code>	Especifica os rótulos dos limites de controle.
<code>title</code>	Título do gráfico de controle.
<code>xlab</code>	Nome para o eixo x do gráfico de controle.
<code>ylab</code>	Nome para o eixo y do gráfico de controle.
<code>ylim</code>	Vetor numérico especificando os limites para o eixo y do gráfico de controle.
<code>axes.las</code>	Valor numérico inteiro {0,1,2,3} especificando o estilo dos rótulos dos eixos.
<code>digits</code>	Número de dígitos significativos a serem usados.
<code>restore.par</code>	Argumento lógico indicando se as configurações iniciais do gráfico de controle devem ser restauradas.

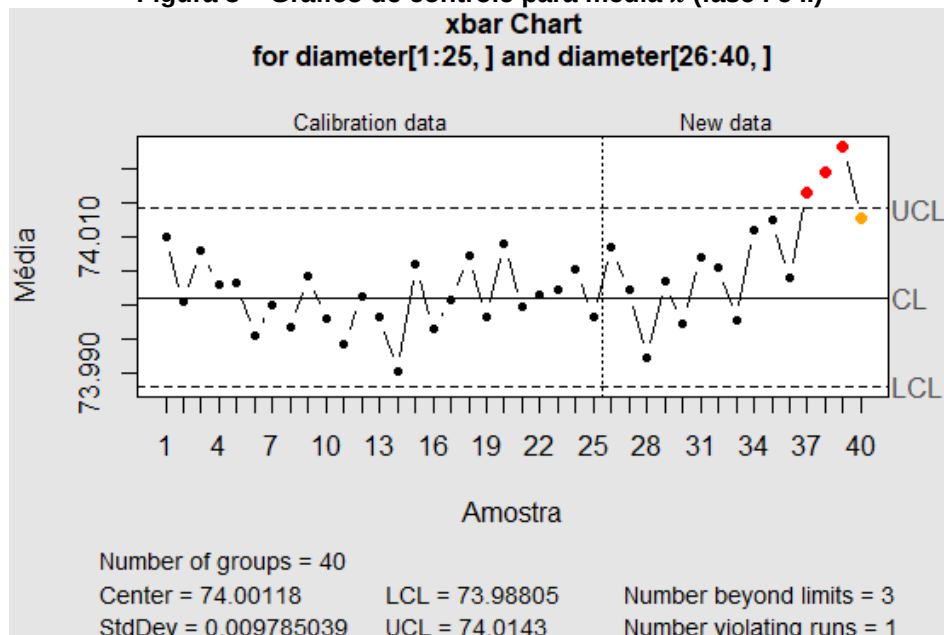
Fonte: Os autores (2024)

Na sequência serão apresentados exemplos do uso da função `qcc()` para construção dos gráficos de controle para média, amplitude, fração de não-conforme e não conformidades.

a) Exemplo de gráfico de controle para média $\bar{x}$

O comando `graficoX<-qcc(diameter[1:25,],type="xbar",xlab="Amostra",ylab="Média")` constrói a fase I do gráfico de controle com as amostras 1 a 25 usadas para cálculo dos limites de controle. Além disso, coloca rótulo nos eixos x e y. Já o comando `graficoX2<-qcc(diameter[1:25,],type="xbar",newdata = diameter[26:40,],xlab="Amostra",ylab="Média")` gera tanto a fase I quanto a fase II do gráfico de controle, usando na fase II, as amostras 26 a 40. O resultado do último comando é o da Figura 3.

Figura 3 – Gráfico de controle para média $\bar{x}$ (fase I e II)



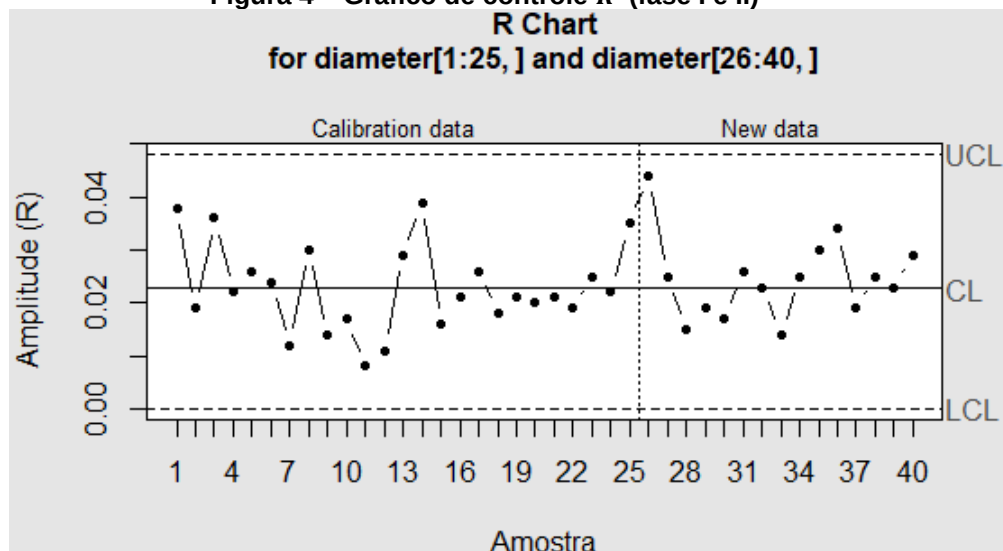
Fonte: Os autores (2024)

Na Figura 3, as amostras 37, 38 e 39 estão além do limite de controle superior, o que caracteriza o processo como fora de controle estatístico.

b) Exemplo de gráfico de controle para amplitude R

O gráfico de controle R pode ser gerado por meio do comando `qcc(diameter[1:25,], type="R", newdata = diameter[26:40,], xlab="Amostra", ylab="Amplitude (R)", add.stats=FALSE)` que gera tanto a fase I quanto a fase II do gráfico de controle, resultando na Figura 4.

Figura 4 – Gráfico de controle R (fase I e II)



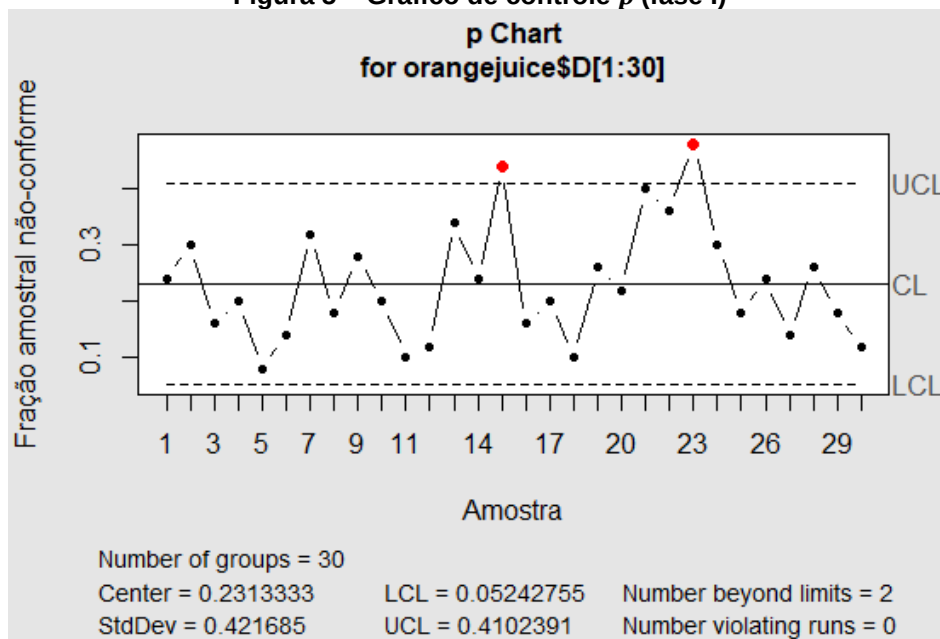
Fonte: Os autores (2024)

Para alterar o tipo de gráfico, modifica-se o argumento `type` da função `qcc()`. Na Figura 4 não foram plotadas as estatísticas e demais informações na parte inferior do gráfico, uma vez que o argumento `add.stats` foi configurado para `FALSE`. A construção do gráfico de controle S é similar ao R , mas é preciso alterar o argumento para `type='S'` e o argumento

`std.dev` dever ser igual a "UWAVE-SD". Analogamente, para construir um gráfico de controle para medidas individuais alterar o argumento para `type = 'xbar.one'`.

c) Exemplo de gráfico de controle para fração de não-conforme ou fração de defeituosos p . Inicialmente procede-se com a leitura do conjunto de dados por meio do comando `data(orangejuice); attach(orangejuice)`. Para construir a fase I do gráfico de controle p pode-se usar o comando `qcc(orangejuice$D[1:30], size=50, type='p', xlab="Amostra", ylab="Fração amostral não-conforme")`. Onde a variável `orangejuice$D` tem a quantidade de defeitos (coluna de rótulo D) observados na amostra. É necessário eliminar amostras 15 e 23 do gráfico, por se tratar de novo lote de matéria prima (amostra 15) e operador inexperiente que operou temporariamente a máquina (amostra 23), resultando em pontos além do limite de controle superior (Montgomery, 2016), como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Gráfico de controle p (fase I)

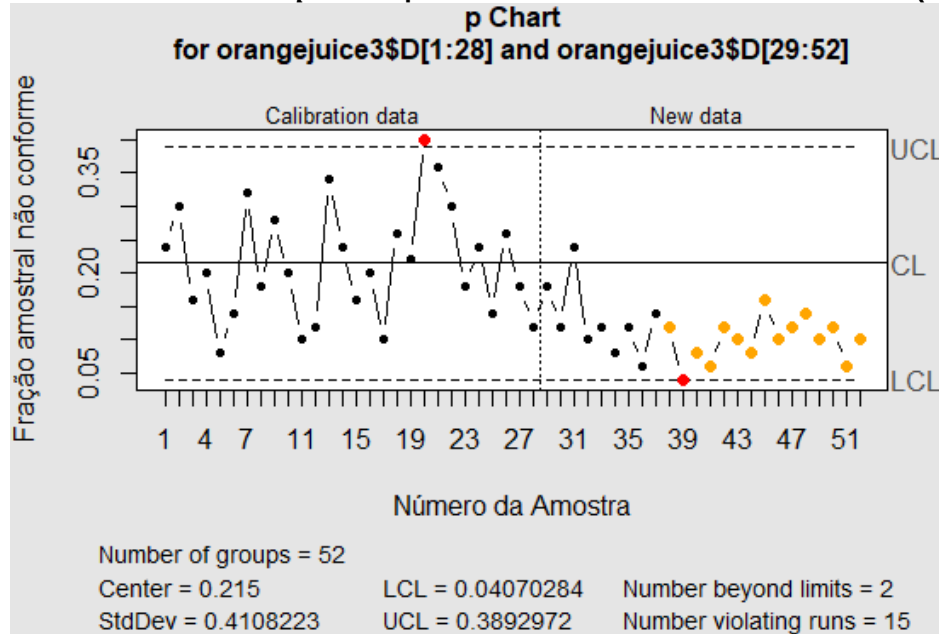


Fonte: Os autores (2024)

Após eliminar as amostras 15 e 23, foi feito ajuste nas máquinas e mais 24 amostras foram retiradas do processo (fase II). Assim, foi gerado novo gráfico de controle p , que contempla a fase I e II da construção dos gráficos de controle, usando o comando `qcc(orangejuice3$D[1:28], size=50, type='p', newdata=orangejuice3$D[29:52], newsizes=50, xlab="Número da Amostra", ylab="Fração amostral não conforme")`. Onde `orangejuice3$D[1:28]` é a variável sem as amostras 15 e 23 e `orangejuice3$D[29:52]` são as amostras da fase II. O resultado deste comando está na Figura 6. Manteve-se a amostra 21 na fase I, pois não houve uma causa especial para eliminá-la, optando-se por conservar o ponto (Montgomery, 2016).

A partir da fase II, observa-se que houve alteração na proporção de não-conformes. Inclusive a amostra 41 do gráfico da Figura 6 está abaixo do limite inferior de controle e nenhuma causa especial pode ser determinada. Essa mudança brusca do processo está relacionada a ajustes realizados nas máquinas e foi comprovada estatisticamente por teste de hipóteses conforme apresentado em Montgomery (2016).

Figura 6 – Gráfico de controle p com o primeiro cálculo dos limites de controle (fase I e II)



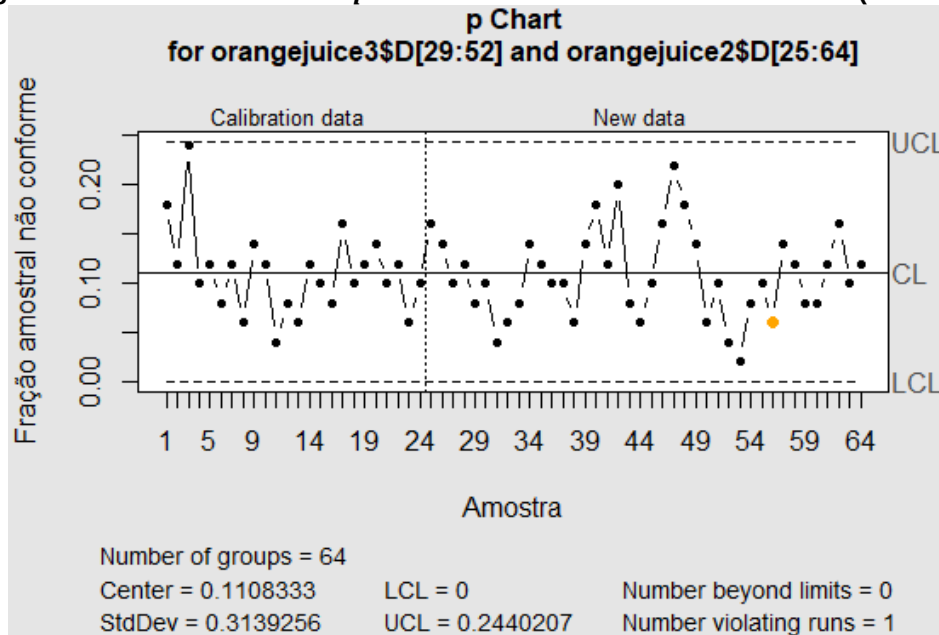
Fonte: Os autores (2024)

Assim, usou-se as amostras coletadas após realização dos ajustes das máquinas para cálculos de novos limites (fase I), que se mostraram sob controle estatístico. Coletaram-se mais amostras que estão no conjunto de dados do R `orangejuice2`. Isso foi feito por meio dos comandos

```
detach(orangejuice);
data(orangejuice2); attach(orangejuice2); qcc(orangejuice3$D[29:52], size=50, type='p', newdata=orangejuice2$D[25:64], newsizes=50, xlab="Amostra", ylab="Fração amostral não conforme"),
```

resultando no gráfico da Figura 7.

Figura 7 – Gráfico de controle p com a revisão dos limites de controle (fase I e II)



Fonte: Os autores (2024)

A construção do gráfico np é similar ao p , mas é preciso alterar o argumento para `type='np'`.

Para gráfico de controle com amostra de tamanho variável a disposição das amostras em Excel a serem importadas para o RStudio, podem seguir o padrão da Figura 8. Em que a coluna A representa o número da amostra, na coluna B contém o tamanho da amostra, e a coluna C é a quantidade de defeitos na amostra. A importação dos dados pode ser feita conforme já discutido na seção 4.2.

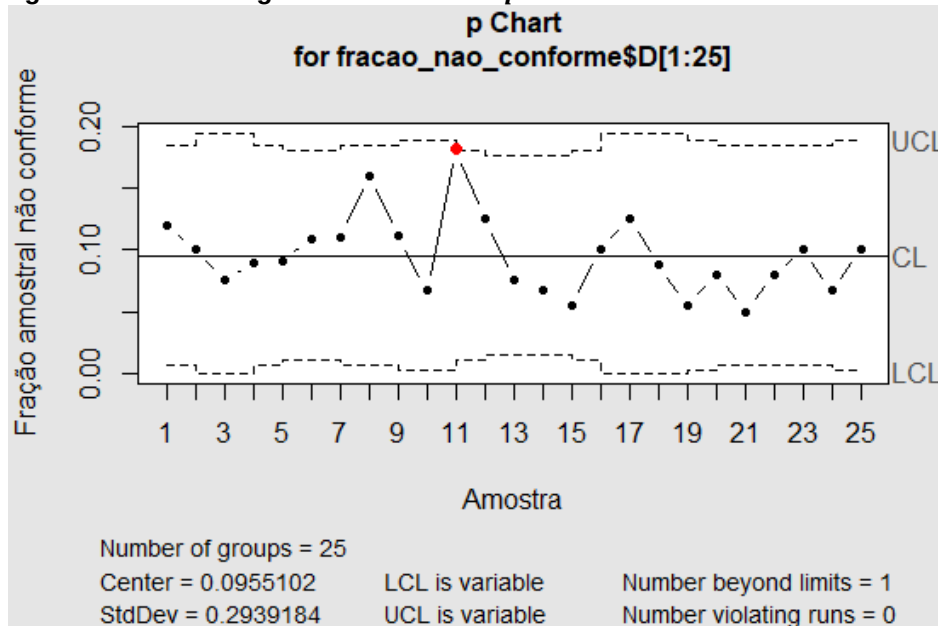
Figura 8 – Disposição no Microsoft Excel dos dados de amostras de tamanho variável a serem importadas

	A	B	C
1	amostra	n	D
2	1	100	12
3	2	80	8
4	3	80	6
5	4	100	9
6	5	110	10
7	6	110	12
8	7	100	11
9	8	100	16
10	9	90	10

Fonte: Os autores (2024)

Para construir o gráfico de controle para amostra de tamanho variável (Figura 9) pode-se usar o comando `qcc(fracao_nao_conforme$D[1:25], size=fracao_nao_conforme$n[1:25], type='p', xlab="Amostra", ylab="Fração amostral não conforme")`. Onde `fracao_nao_conforme` é a variável com os dados da Figura 8. E `$n[1:25]` especifica a coluna B, que contém o tamanho das amostras (amostras 1 até 25).

Figura 9 – Fase I do gráfico de controle p com amostra de tamanho variável



Fonte: Os autores (2024)

A amostra 11 está no limite superior de controle, assim há necessidade de revisão.

d) Exemplo de gráfico de controle c para número de defeitos ou não conformidades.

Para construção do gráfico de controle c , realiza-se a leitura do conjunto de dados disponíveis no R por meio do comando `data(circuit); attach(circuit)`. O conjunto de dados é o da Figura 10. A fase I do gráfico de controle c pode ser gerada usando os comandos `qcc(circuit$x[1:26], size=100, type='c', xlab="Amostra", ylab="Número de não conformidades")`. Onde `circuit$x[1:26]` é a variável que contém as amostras 1 a 26. Identificou-se que as amostras 6 e 20 estão além dos limites de controle, pelas causas de erro de inspeção e problema de controle da temperatura, respectivamente. O conjunto de dados `circuit` foi exportado para o *Microsoft Excel* para o diretório C:/ por meio dos

comandos `setwd("C:/"); write.table(circuit, file='circuit.csv', sep=';', dec=',', row.names=TRUE)`.

Onde a função `write.table()` recebe como primeiro argumento o nome da variável que receberá o conjunto de dados, no caso `circuit`; o argumento `file` refere-se ao nome do arquivo com sua respectiva extensão (.csv) que será gerado no diretório configurado pela função `setwd()`; o argumento `sep` indica o tipo de separador de coluna (para planilhas Excel é ponto e vírgula); `dec` indica o caractere de casa decimal dos dados, se vírgula (sistema nacional) ou ponto (sistema americano); `row.names` indica se é (TRUE) ou não (FALSE) preservado o rótulo das linhas.

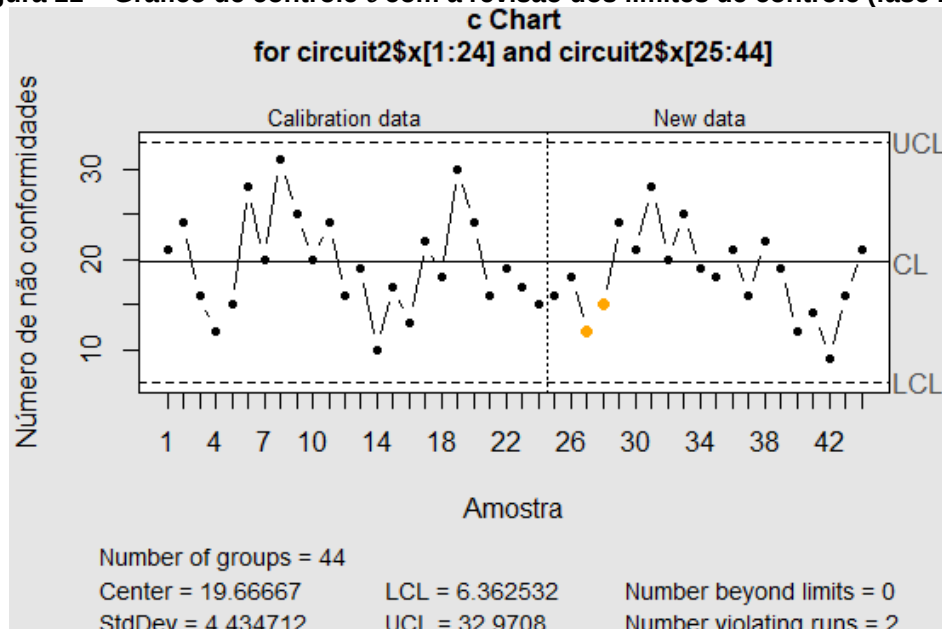
Figura 10 – Parte das amostras de *circuit*

	x	size	trial
1	21	100	TRUE
2	24	100	TRUE
3	16	100	TRUE
4	12	100	TRUE
5	15	100	TRUE
6	5	100	TRUE
7	28	100	TRUE

Fonte: Os autores (2024)

Assim, as amostras 6 e 20 foram eliminadas manualmente do arquivo `circuit.csv` gerado e o conjunto de dados foi importado para o RStudio por meio do comando `circuit2<-read.csv("circuit.csv", header=TRUE, sep=";", dec=",")`. Onde `circuit2` é a variável com os dados sem as amostras 6 e 20. Vinte novas amostras foram coletadas. A importação também poderia ser executada pela guia *Environment*, menu *Import Dataset/From Excel* e escolher no diretório o arquivo a importar no formato .xlsx como discutido na seção 4.2. Novos limites tentativos foram calculados e gerado o gráfico de controle por meio do comando `qcc(circuit2$x[1:24],size=100,type='c', newdata = circuit2$x[25:44], xlab="Amostra", ylab="Número de não conformidades")` resultando na Figura 11.

Figura 11 – Gráfico de controle *c* com a revisão dos limites de controle (fase I e II)



Fonte: Os autores (2024)

Mesmo com o processo sob controle o número de não conformidades por placa é alto e é necessário plano de ação para melhorar a variabilidade do processo (Montgomery, 2016).

A construção do gráfico *u* é similar ao *c*, mas é preciso alterar o argumento `type` para `type='u'`.

4.4 Função para análise da capacidade do processo

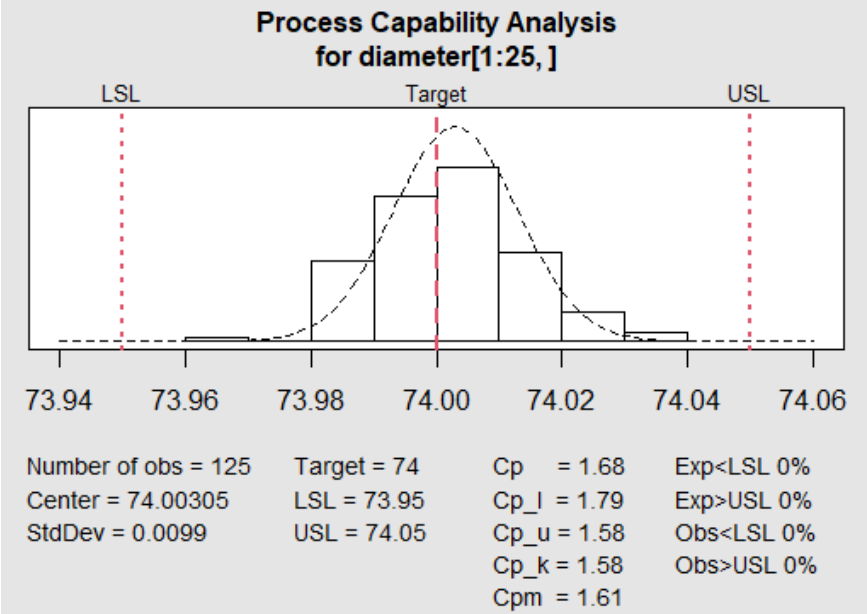
Para fazer a análise da capacidade do processo é usada a função `process.capability()` que calcula os índices de capacidade do processo para um objeto *qcc* e plota o histograma (Figura 12). Os principais argumentos da função `process.capability()` estão na Tabela 2.

Argumento	Descrição
<i>object</i>	Um objeto 'qcc' do tipo "xbar" (tipo gráfico para médias)
<i>spec.limits</i>	Vetor de dois valores especificando os limites de especificação inferior e superior. Para limite unilateral, o limite ausente deve ser definido como NA.
<i>target</i>	Alvo do processo.
<i>std.dev</i>	Desvio padrão dentro do grupo. Se não fornecido, é obtido do objeto 'qcc'.
<i>nsigmas</i>	Valor numérico especificando o número de sigmas a serem usados. Se não fornecido, é obtido do objeto 'qcc'.
<i>confidence.level</i>	Valor numérico entre 0 e 1 especificando o nível a ser usado para calcular os intervalos de confiança (<i>default</i> = 0,95).
<i>break</i>	Valor ou <i>string</i> usados para desenhar o histograma.
<i>add.stats</i>	Argumento lógico que indica se as estatísticas e índices de capacidade devem ser adicionados na parte inferior do gráfico.
<i>print</i>	Argumento lógico. Indica se estatísticas de capacidade devem ser impressas.
<i>digits</i>	Número de dígitos significativos a serem usados.
<i>restore.par</i>	Argumento lógico. Indica se as configurações iniciais do gráfico devem ser restauradas.

Fonte: Os autores (2024)

O objeto *qcc* `graficoX2` gerado no início da seção 4.3, será utilizado como argumento na função `process.capability()`. Por meio do comando `process.capability(graficoX2, spec.limits=c(73.95, 74.05))` é gerado o gráfico da Figura 12. Os limites de especificação dos anéis de pistão estão informados no argumento `spec.limits` e são $74,00 \pm 0,05$ mm (Montgomery, 2016).

Figura 12 – Histograma e índices de capacidade do processo para os dados *pistonrings*



Fonte: Os autores (2024)

O índice $\hat{C}_p = 1,68$ indica que os limites de tolerância naturais no processo (três sigmas acima e abaixo da média) estão dentro dos limites de especificação. Assim, um número relativamente baixo de anéis de pistão não conformes será produzido.

5. Considerações finais

Este trabalho explorou as principais funções do pacote *qcc* do R com objetivo de proporcionar maior entendimento de como utilizá-las. As aplicações mostraram que é possível usar o pacote *qcc* como ferramenta auxiliar no ensino de CEP, proporcionando maior embasamento prático. Também é possível introduzir seu uso em empresas de pequeno porte que têm maior escassez de recursos, para aquisição de *softwares* comerciais, quando comparadas a empresas de médio e grande porte.

Todos os exemplos discutidos com as funções do pacote *qcc* apresentaram os mesmos resultados disponíveis em Montgomery (2016), revelando que as funções analisadas do pacote refletem a realidade do embasamento teórico de CEP.

O *help* do R é útil para autodidatas e para quem tem perfil de pesquisador, porém, exige o conhecimento da língua inglesa para seu uso. Assim, acredita-se que um material que explore as principais aplicações de CEP, abordando também o uso de conjunto de dados em planilhas eletrônicas para construção dos gráficos de controle, pode colaborar e incentivar estudantes e profissionais da área, familiarizados com uso de planilhas.

O pacote *qcc* também permite construir gráficos de controles como *Cumulative Sum* (CUSUM) e o *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA). Também possibilita a construção de gráficos de controles multivariados. Nesse sentido, sugere-se para continuação desta pesquisa, explorar funções de gráficos de controles não explorados nesse trabalho. Além disso, é possível explorar outros pacotes de CEP disponíveis no R.

Referências

- COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. 2ª. ed. São Paulo: Atlas, 2018.
- MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico de Qualidade**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- R CORE TEAM (2024). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- SCRUCCA, L. *Qcc: An R package for quality control charting and statistical process control*. **R News**, v. 4, n. 1, p. 11-17, 2004.
- SORIANO, F. R. **Análise da aplicação do controle estatístico de processo segundo as percepções dos usuários do setor de autopeças**. 2015. 177f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.
- SORIANO, F. R.; OPRIME, P. C.; LIZARELLI, F. L. Os fatores que devem ser considerados para uma efetiva implantação do controle estatístico de processo (CEP): uma revisão de literatura. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 15, n. 1, p. 71 - 91, 2020.
- TOLEDO, J. C.; LIZARELLI, F. L.; SANTANA JUNIOR, M. B. Success factors in the implementation of statistical process control: action research in a chemical plant. **Production**, v. 27, 2017.
- WERKEMA, C. **Ferramentas Estatísticas Básicas do Lean Seis Sigma Integradas**. Grupo GEN, 2014. E-book. ISBN 9788595152311.