

CARTA DE CONTROLE CUSUM NA ANÁLISE DE UM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CAFÉ

Luciana Santos Costa¹
Verônica Dalmolin Cattelan²
Cláudia de Freitas Michelin³
Julio Cezar Mairesse Siluk⁴

RESUMO: Esta pesquisa trata de uma aplicação empírica com o uso da carta de controle estatístico de processo de somas acumulados, para avaliar a estabilidade de um processo produtivo de fabricação de café solúvel. Essa carta de controle sob a forma da V máscara é apropriada para processos produtivos autocorrelacionados. A amostra coletada no processo produtivo investigado corresponde a um total de 4.650 observações e a característica pesquisada corresponde ao peso das latas de 50g e 100g de café em pó instantâneo. A coleta dos dados foi realizada de maneira automatizada durante o período de 6 meses consecutivos. Os resíduos foram obtidos a partir das estimativas dos modelos autoregressivos de terceira ordem *AR* (3) e foram analisados com o uso da carta de controle de somas acumuladas onde evidenciou um processo de produtivo considerado instável estatisticamente, corroborando assim com a fragilidade desse processo no que tange à garantia de produtos não conformes, principalmente no que se refere ao peso dos vasilhames de 50g. Os resultados auferidos levam a sugerir uma maior atenção por parte dos funcionários da indústria de café em pó, dispensando assim uma maior atenção, com disciplina e controle nas atividades realizadas cotidianamente, além de dizimar relevantes erros cometidos pelos funcionários na rotina de trabalho e que podem ser solucionados com uma boa orientação, além da mudança de comportamento.

Palavras Chave: Carta de Controle. Somas Acumuladas. Produção de Café. Controle Estatístico de Processos.

¹Doutora em Administração pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professora do Centro Universitário Municipal de São José (USJ). São José, Santa Catarina, Brasil. E-mail: lucvcosta@gmail.com

²Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: veronica_vdc@hotmail.com

³Doutora em Administração pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Professora do curso de Ciências Contábeis da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: claudia.michelin@ufsm.br

⁴Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professor do Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: jsiluk@ufsm.br

CUSUM CONTROL CHART IN THE ANALYSIS OF A COFFEE MANUFACTURING PROCESS

ABSTRACT: This research deals with an empirical application using the statistical control chart of accumulated sums process, to evaluate the stability of a production process of instant coffee production. This control chart in the form of the V mask is suitable for autocorrelated production processes. The sample collected in the investigated production process corresponds to a total of 4,650 observations and the characteristic researched corresponds to the weight of the 50g and 100g instant coffee powder cans. Data collection was performed automatically during a period of 6 consecutive months. The residues were obtained from the estimates of the third order autoregressive models AR (3) and were analyzed using the accumulated sums control chart, which evidenced a productive process considered statistically unstable, thus corroborating the fragility of this process regarding guaranteeing non-compliant products, especially regarding the weight of 50g containers. The results suggest a greater attention from the coffee industry employees, thus giving greater attention, with discipline and control in daily activities, as well as decimating relevant mistakes made by employees in their work routine and which may be addressed with good guidance and behavior change.

Keywords: Control Charts. Accumulated Sums. Coffee Production. Statistical Process Control.

1 INTRODUÇÃO

Ao ser analisada uma determinada peça numa linha de produção, percebe-se a existência de algum grau de variabilidade de um produto para outro, normalmente apresentando diferenças em suas formas ou dimensões. À medida que são melhoradas as *performances* de máquinas e equipamentos, surgem concomitantemente novos requisitos de projetos de produtos, com exigências de exatidões cada vez maiores e com mais freqüência.

Diversas vezes o próprio operador de determinado sistema produtivo introduz variação adicional ao mesmo, o que acaba provocando não conformidades nos produtos elaborados *a posteriori*. Deming (1986) afirma que mesmo a melhor máquina automática não pode produzir todas as unidades exatamente iguais. Vale salientar, que o operador ao reagir diante de episódios localizados, deixa de focalizar o sistema produtivo como um todo, onde está a maior parte das causas de variações e de possíveis erros provenientes da produção.

Assim, é preciso que o operador saiba identificar com clareza as variabilidades que estejam ocorrendo, buscando as suas causas e tomando as devidas ações corretivas, dado que a variabilidade é reduzida no processo e a qualidade dos produtos é melhorada. Ademais, as ações preventivas no processo fazem ainda com que os itens fabricados não sejam expedidos e remetidos aos potenciais clientes, o que acaba promovendo ganhos de oportunidades à empresa.

Nesses termos, o Controle Estatístico de Processos (CEP) é um método muito usado para controlar as variabilidades de processos produtivos e tem sido visto como um dos fatores fundamentais para o sucesso (CARDOSO, 2016). O autor enfatiza que todas as empresas ambicionam atingir altos níveis de otimização da produção, e das várias ferramentas utilizadas para o CEP, aquelas que mais têm sido mencionadas são as cartas de controle. Tratam-se de gráficos de controle que buscam monitorar as características dos produtos com relação aos limites de tolerância ou de especificação. Esses gráficos buscam encontrar variabilidades no processo, aumentando por consequência a produtividade e prevenindo, com isso, possíveis ajustes desnecessários nos equipamentos monitorados.

A indústria analisada nesse estudo é considerada referência em competitividade nesse setor de atividade econômica e está procurando avaliar o comportamento do seu processo produtivo, mais precisamente o processo de produção de café solúvel, visando detectar possíveis anomalias no seu processo e, conseqüentemente, recolocar o sistema em condições estáveis. Logo, este artigo visa avaliar o nível de estabilidade de um processo produtivo de fabricação de café solúvel de uma indústria nacional.

O presente trabalho trata do monitoramento do processo autocorrelacionado de café solúvel com observações coletadas em subgrupos racionais, tal como evidenciado no trabalho desenvolvido por Claro, Costa e Machado (2007).

Assim, a presente pesquisa visa responder a seguinte problemática de pesquisa: *de que forma pode-se avaliar e ao mesmo tempo corrigir possíveis instabilidades do processo de produção de café solúvel?*

Nesse contexto, o controle estatístico de processos é aliado para o alcance de tal objetivo meio da carta de controle estatístico de processos de Somas Acumuladas (CUSUM) visando controlar a variabilidade dos processos. Por meio do uso das cartas de controle é possível detectar alterações no processo produtivo,

contribuindo assim para a melhoria de todo o processo. É por estas razões que nos dias de hoje é uma ferramenta que foi desenvolvida a bastante tempo é utilizada nas organizações (CARDOSO, 2016).

Finalmente, o presente trabalho encontra-se estruturado cinco seções. A segunda seção traz uma breve revisão de literatura sobre o gráfico de controle de somas acumuladas. A terceira seção apresenta os procedimentos metodológicos utilizados. A quarta seção mostra a descrição do processo produtivo e traz os resultados empíricos. Já a quinta seção mostra as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 A CARTA DE CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS

O controle estatístico de processos (CEP) é o ramo do controle de qualidade que consiste na coleta, análise e interpretação de dados, estabelecimento de padrões, comparação de desempenhos, verificação de desvios, tudo isso para a utilização nas atividades de melhoria e controle da qualidade de produtos e serviços.

Pereira e Requeijo (2012) enfatizam que o CEP surge a partir da necessidade de estabilizar processos em torno de um valor médio de um dado parâmetro ou de um conjunto de parâmetros.

Sua ferramenta básica é a carta de controle, desenvolvida por Shewhart (1931) tal como menciona Reynolds et al. (1990), com o objetivo de controlar a variabilidade dos processos. As cartas de controle são consideradas importantes instrumentos no estudo do CEP.

Inicialmente Shewhart desenvolveu as cartas da média (\bar{X}), da amplitude (R) e do desvio padrão (S) e que normalmente são aplicadas a processos contínuos e semicontínuos, onde uma dimensão ou característica do produto é medida em uma amostra aleatória tirada sob um determinado período de tempo, com o objetivo de avaliar a estabilidade ou estado de controle estatístico de um processo.

Segundo Hradesky (1989), a principal vantagem proporcionada pelo CEP é a realimentação do processo em tempo real. Essa realimentação deve ser contínua e estatisticamente fundamentada. Desse modo, em todo processo produtivo existem

pontos específicos que são determinantes para que o fluxo de produção não apresente problemas.

A produção em série da peça ou a repetição do serviço traz um certo grau de variação, uma certa dispersão dos resultados ao redor de um valor nominal, chamado comumente na literatura de causa comum ou aleatória. Caso contrário, quando a mudança passa a ser não mais aleatória, mas associada a alguma causa especial que foge ao controle de quem está acompanhando o processo, isso passa a ser um problema e deve ser rapidamente corrigido.

Apesar de amplamente usadas nas indústrias, essas cartas não possuem memória, ou seja, só levam em consideração as informações obtidas no período presente. Logo, qualquer mudança que tenha ocorrido anteriormente, simplesmente é ignorada, fazendo com que as cartas de Shewhart não sejam capazes de detectar pequenas variações. Por esta razão, Page (1954) *apud* Reynolds et al. (1990) desenvolveu a carta de somas acumuladas que possui uma memória curta; ou seja, leva em consideração as informações obtidas no período imediatamente anterior, além de captar mudanças pequenas, mas persistentes, que venham ocorrer no processo.

Em termos econômicos, o uso das cartas de controle na visão de Bolle (2001) visa a eliminação de desperdícios, adoção de tecnologias avançadas, desenvolvimento de novos produtos, envolvimento de colaboradores e busca de melhoria contínua dos processos de produção de tal forma que possa sustentar os negócios.

A carta de somas acumuladas além de sinalizar o desajuste, ainda informa quando este ocorreu. O fato de a carta de somas acumuladas basear-se no histórico do processo produtivo, e não somente na última observação, ele, naturalmente, não sinaliza os desajustes de imediato, independentemente da magnitude destes; portanto, para grandes desvios da média, a carta da média (\bar{X}), é sempre mais ágil (Johnson e Bagshaw (1974), Bagshaw e Johnson (1975), Vanbrackle e Reynolds (1997), Yashchin (1993), Wieringa (1999), Lu e Reynolds (2001), Atienza, Tang e Ang (2002) e Costa, Epprecht e Carpinetti (2004).

Segundo Montgomery, Jennings e Kulahci (2011) a carta de controle de soma acumulada é muito eficaz na detecção de mudanças da variável que é monitorada.

Seu funcionamento se dá por meio da acumulação de desvios dos erros de previsão que estão acima do valor-alvo desejado ou abaixo.

Christo e Ferreira (2013) destacam que a presença de causas identificáveis é identificada pela ocorrência de diferenças insignificantes entre o valor observado e a média do processo, isto é, de valores amostrais fora da taxa de controle. Assim, a presença dessas causas pode ser revelada a partir de um dispositivo prático, chamado de carta de controle ou gráfico de controle.

A partir do seu uso é possível detectar alterações no processo produtivo, logo, diante da possibilidade de aplicação prática, e otimização, vários pesquisadores têm despertado interesse na investigação para aperfeiçoamento destas ferramentas, bem como o desenvolvimento de outras, cada vez mais específicas e voltadas para o acompanhamento de processos (ALVES et al., 2017).

Os processos industriais atuais, dotados de automação industrial e de um alto volume de dados inerentes aos processos têm exigido o controle das variáveis em tempo real, para que seja possível obter respostas rápidas à detecção e correção de falhas ocorridas durante o processo (NUNES et al., 2018).

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CAFÉ SOLÚVEL

O café é uma das bebidas quentes mais populares do país, em função do seu sabor e do aroma que são apreciados universalmente. Por ser um produto considerado estimulante, inúmeros estudos científicos já comprovaram a sua eficácia na melhoria do raciocínio e, conseqüentemente, da associação de ideias, o que o torna um importante aliado na eficiência de pessoas que fazem tarefas mecanizadas.

O café originou-se no Brasil por volta do século XVIII trazido pelos portugueses. Em pouco tempo essa bebida se tornou o principal produto da pauta de exportação do Brasil, gerando riquezas e impulsionando o desenvolvimento econômico da então colônia de exploração. Nos dias de hoje, existe uma preocupação cada vez maior por parte das empresas produtoras de café acerca da qualidade desse produto no mercado consumidor, sob pena de não poder colocar no mercado uma bebida que atenda as exigências dos órgãos fiscalizadores e os

consumidores, cada vez mais exigentes no que tange os seus direitos (NUINTIN, 2007).

No Brasil, diversos esforços vêm sendo realizados a partir de instituições voltadas à pesquisa do café visando a melhoria da produtividade, competitividade internacional e sustentabilidade do agronegócio do cafeeiro (DURAN et al., 2017).

Nesse sentido, as empresas fabricantes de café vêm procurando avaliar os seus processos produtivos, visando melhorar a qualidade durante todas as etapas de elaboração do produto. A empresa analisada nesse trabalho também tem procurado atender as novas exigências dos consumidores. Para tanto, descreve-se todo o processo de fabricação do produto analisado, visando dar uma ideia ao leitor de como se dá todo o processo de fabricação do café no estabelecimento que fora avaliado.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Essa seção apresenta o delineamento da pesquisa e os procedimentos metodológicos que utilizados no decorrer do trabalho. Quanto à natureza, a pesquisa é considerada como aplicada devido à forte relação existente entre os dados e a informações que serão obtidas no ambiente analisado e a resposta prática que poderá ser alcançada por seus resultados, que contribuirá para a solução de problemas pontuais na fabricação de café solúvel (MARCONI; LAKATOS, 2010). Logo, espera-se que os resultados gerem conhecimentos para a aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, uma vez que envolve verdades e interesses locais.

Em relação à abordagem, classifica-se em qualitativa e quantitativa. No que tange os objetivos, a pesquisa é considerada descritiva, a partir da necessidade de se conhecer com maior profundidade os conceitos da temática e as características do processo de fabricação de café. Quanto aos procedimentos técnicos utilizados, o trabalho contou com três etapas para o cumprimento dos seus objetivos: em um primeiro momento a pesquisa bibliográfica, devido à busca de publicações científicas que embasam as temáticas abordadas; logo, foi utilizada também a pesquisa documental para melhor entendimento do processo; e por último, enquadra-se como um estudo de caso. De acordo com Diehl e Tatim (2004), caracteriza-se pelo estudo

profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento.

A metodologia usada para analisar a estabilidade do processo produtivo foi a carta de controle de Somas Acumuladas conhecida também como *CUSUM* sob a forma da *V* máscara. A carta *CUSUM* considera que as observações X_j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) são estatisticamente independentes e identicamente distribuídas (*i.i.d.*) e seguem uma distribuição normal. Assim, determina-se a soma acumulada dos desvios da média amostral no instante t (\bar{X}_t) com relação ao valor nominal (μ) do processo, como segue:

$$C_n = \sum_{j=1}^n (X_j - \mu) \quad (1)$$

Onde C_n é a soma acumulada dos desvios da média amostral com relação ao valor nominal do processo produtivo; X_j é a j -ésima observação, sendo $j = 1, 2, 3, \dots, n$; e μ é o valor nominal do processo.

Desta forma, a soma acumulada C_n absorve informações passadas a partir dos desvios, o que faz com que a carta *CUSUM* seja mais eficiente do que a carta de Shewhart para detectar pequenas variações no processo. Existem duas maneiras de definir a soma acumulada C_n . A primeira é na escala original das observações e já foi definida na equação 1; a outra forma envolve a padronização das observações para ter a média zero e o desvio padrão igual a um, tal como pode ser definido na equação 2.

$$U_j = \frac{(X_j - \mu)}{\sigma} \text{ e } S_n = \sum_{j=1}^n U_j \quad (2)$$

Onde, U_j é a padronização dos desvios da média amostral com relação ao valor nominal do processo produtivo; μ é o valor nominal do processo produtivo; X_j é a j -ésima observação, sendo $j = 1, 2, 3, \dots, n$; e S_n é a soma acumulada padronizada.

Assim, as somas acumuladas de C_n e de S_n são idênticas, exceto pelas unidades do eixo vertical na carta. O eixo vertical das somas acumuladas de S_n será medido em múltiplos do desvio padrão dos dados, ao contrário das somas acumuladas de C_n que serão mensuradas na mesma unidade de medida de X . Estatisticamente, as duas somas acumuladas contêm a mesma informação. A

equação para C_n mostra que ela pode ser escrita na forma recursiva, tal como encontra-se na equação 3.

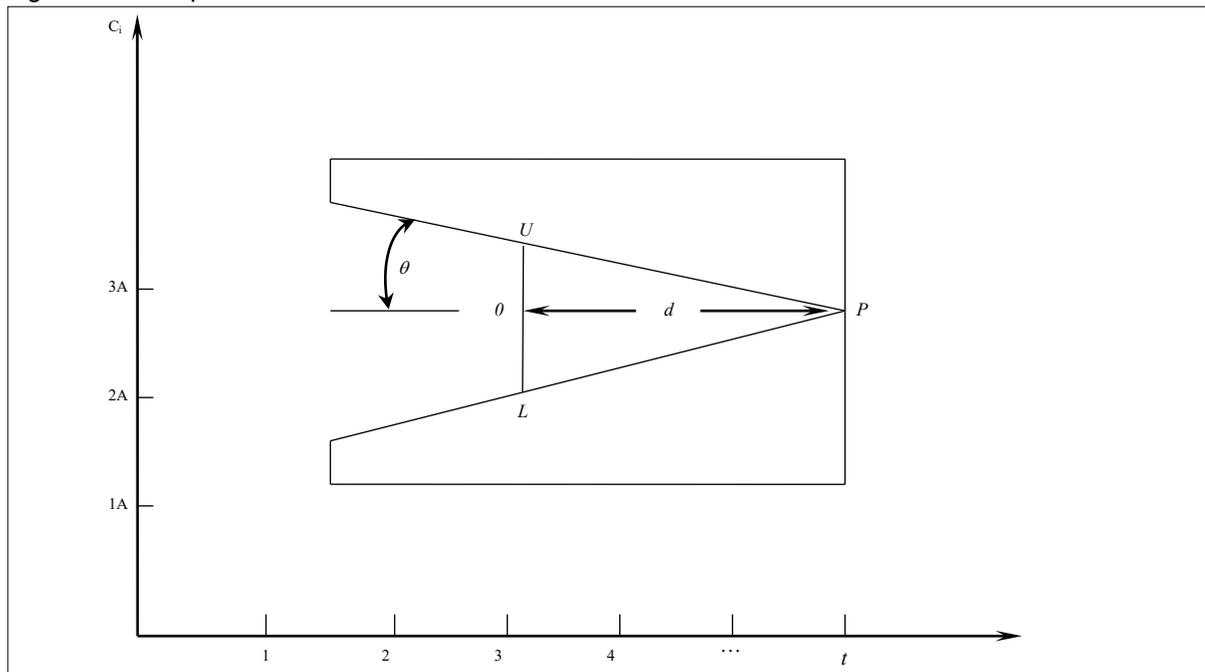
$$C_n = C_{n-1} + (X_n - \mu) \quad \text{com: } C_0 = 0 \quad (3)$$

Isto implica que, enquanto o processo estiver sob controle, a *CUSUM* será um caminho aleatório sem mudanças – cada ponto é o ponto precedente somado a uma compensação com média zero. Este mesmo procedimento pode ser realizado tomando-se como base a forma padronizada e levando-se em consideração o fato de que a interpretação deve ser a mesma. Supondo que em algum instante m o valor nominal μ_0 sofra uma mudança δ na distribuição de X_n ; em qualquer instante subsequente n , o processo passa a ter uma outra média chamada μ_1 . Reescrevendo a *CUSUM* de outra forma, pode-se expressar a equação 4, tal como segue:

$$C_n = \sum_{j=1}^m (X_j - \mu) + \sum_{j=m+1}^n (X_j - \mu) \quad (4)$$

Assim, o valor médio da *CUSUM* é $(n-m)\delta$. Isto significa que no início do ponto onde ocorreu a mudança, a média das somas acumuladas (*CUSUM*) passará a ter outro comportamento no gráfico, sinalizando que o processo está fora de controle. Existem duas maneiras de calcular e apresentar o esquema de somas acumuladas: através da máscara *V* ou na forma tabular. A máscara *V* recebe esse nome pela maneira como é apresentada graficamente, conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Comportamento da Carta de Controle de Somas Acumuladas sob a Forma da Máscara *V*



Fonte: Adaptada de Montgomery (1997).

Desta forma, a máscara é então posicionada em relação ao valor C_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). O ponto O é o ponto médio do segmento vertical UL , deve coincidir com o último ponto *plotado* e o segmento OP deve ser mantido horizontal. Assim, a procura por mudanças no processo é verificada sempre que algum ponto no gráfico ficar fora da região delimitada pelos braços da máscara ou vértices do ângulo.

Para definir a máscara V são suficientes os seguintes parâmetros: d o comprimento do segmento OP e θ que é o ângulo em graus que os braços da máscara formam simetricamente, com o suporte do segmento OP . Segundo Montgomery (1997), os parâmetros d e θ podem ser calculados tal como pode ser visto na equação 5.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\delta\sigma}{2A}\right) \quad e \quad d = \frac{2}{\delta^2} \ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right) \quad (5)$$

Onde, α é a probabilidade de concluir incorretamente que uma mudança ($\delta\sigma$) tenha ocorrido (alarme falso); β é a probabilidade de que uma mudança $\delta\sigma$ que tenha ocorrido não seja detectada; e A é a distância horizontal ao *plotar* a máscara V entre os pontos sucessivos em termos de unidades de distância na escala vertical. Por exemplo, se na escala horizontal a unidade é σ e na escala vertical a unidade é 2σ , então $A = 2$.

Assim, o processo é considerado fora de controle quando algum ponto da amostra *plotada* ultrapassar um dos braços da máscara, indicando que a média μ_0 da variável X sofreu uma mudança μ_1 , sendo deslocada do alvo μ . Hawkins e Olwell (1997) chamam o parâmetro k de valor de referência, sendo considerado o ponto médio entre o valor nominal μ_0 e o valor subsequente μ_1 que sofreu uma mudança δ no processo, medida em unidades de desvios padrão. Logo, o valor k pode ser visto na equação 6.

$$k = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2} = \frac{\delta}{2} \sigma \quad (6)$$

Existe um dilema em determinar qual seria a dimensão ideal da mudança que poderia detectar rapidamente um processo fora de controle. Por isso, Yashchin (1992), afirma que é necessário saber quantas observações seriam necessárias retirar do processo, antes que o mesmo apresente um sinal fora de controle. Este procedimento é normalmente usado para avaliar o desempenho da carta.

Cada vez que um ponto atravessa o intervalo de decisão h , isso indica que ocorreu uma mudança e, por isso, deve ser tomada alguma ação no sentido de investigar que tipo de mudança ocorreu. Assim, uma seqüência de pontos que sai do estado sob controle até o estado fora de controle é chamada na literatura de corrida. O número de observações contidas nesta seqüência de pontos é chamado de comprimento de corrida.

Acosta-Mejia (1998), Waldmann (1986) e Yashchin (1992) assumem que o RL é uma variável aleatória, que tem uma média, uma variância e uma distribuição. Sua média é chamada de *average run length (ARL)*, que traduzindo para o português poderia ser chamado de comprimento médio da corrida. É desejável ter um RL bastante grande quando o conjunto de observações corresponde a níveis aceitáveis (sob controle) e, contrariamente, um RL bem pequeno quando o conjunto de observações corresponde a níveis inaceitáveis (fora de controle).

Baseando-se no que fora exposto acima, Hawkins e Owell (1997) afirmam que existe um conflito ao desejar uma seqüência longa (RL grande) antes de surgir alarmes falsos, mas uma seqüência curta (RL pequeno) antes que a carta assinale uma mudança no processo. Esta afirmação é análoga à teoria dos testes de hipóteses clássicos onde se tem o *Erro Tipo I* (α) e o *Erro Tipo II* (β).

No *Erro Tipo I* (α), a carta assinala uma mudança no processo, quando na realidade esta mudança não ocorreu; apresentando assim um alarme falso. Logo, a seqüência de observações entre alarmes falsos deve ser tão grande quanto possível. Já o *Erro Tipo II* (β) também tem uma analogia com a carta de controle; isto é, a carta permanece dentro do intervalo de decisão (limites de controle) ainda que alguma causa especial tenha surgido. Sendo assim, se as mudanças forem grandes o bastante para ter uma implicação prática, então é necessário que as seqüências das observações sejam curtas, a fim de que as mudanças no processo sejam detectadas tão logo quanto possível.

A determinação do intervalo de decisão h é geralmente um valor em torno de 4 ou 5, sugerido na literatura. Esse valor foi determinado como sendo o ideal para obter-se um ARL em torno de 310 ou 370 amostras. O cálculo efetuado para a determinação dos valores de h e ARL para a carta anteriormente citada, ainda é muito discutido na literatura. Existem algumas aproximações sugeridas por alguns autores como Hawkins e Olwell (1998) e Yashchin (1992), onde os valores de h e do

ARL são fornecidos em tabelas. Outros autores, porém, contestam essas aproximações e recomendam um valor de h como 4 ou 5 considerados razoavelmente como o ideal. Essas discussões ainda estão muito latentes nos artigos que são publicados pelas revistas especializadas, pois a fórmula para calcular o *ARL* depende de um paradoxo ainda não resolvido, que é a determinação de um valor para beta e alfa, de forma que essa escolha esteja de acordo com o que os consumidores em geral desejam e também com o que os fabricantes pretendem em termos de custos.

Quanto ao processo de coleta foi feito de forma automática durante o período de sete meses através de um sistema computadorizado que, de alguma forma, procura evitar qualquer tipo de erro de medida que por ventura venham existir. Os dados obtidos do processo foram compilados de forma aleatória e a amostra corresponde cerca de 4.598 observações do peso de latas de 50g e 100g de café instantâneo em pó.

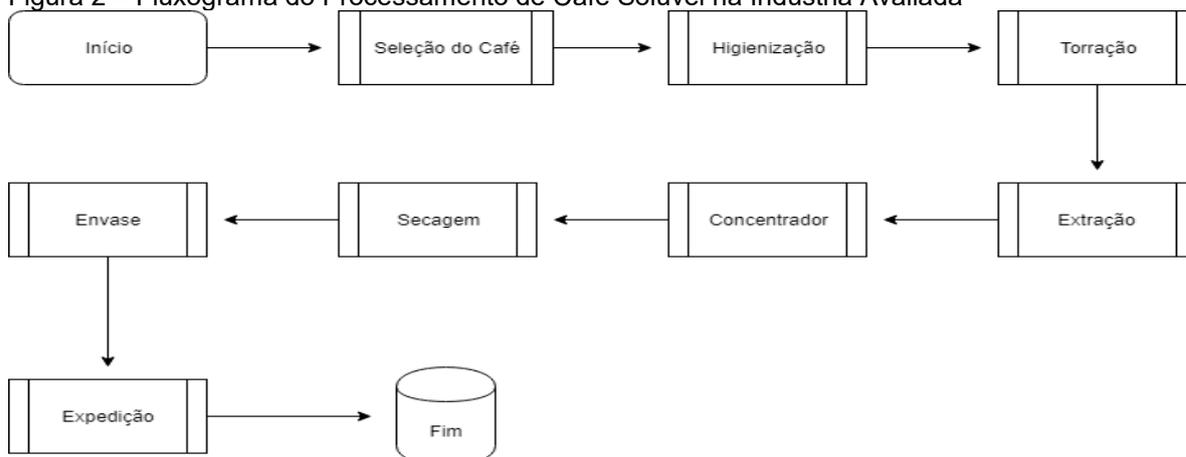
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CAFÉ SOLÚVEL

O processo de fabricação inicia-se a partir da seleção dos cafés das distintas regiões produtoras de café do país os quais, combinados adequadamente, resultam na qualidade exigida por cada padrão. No passo seguinte, os grãos de café, que foram selecionados e posteriormente higienizados, são processados em torradores para o desenvolvimento integral de suas qualidades, assegurando a máxima retenção de aroma e as intensidades de torra adequadas a cada característica organoléptica requerida.

Na granulação são empregados equipamentos projetados para a fragmentação dos grãos torrados com o mínimo desenvolvimento de calor, com o que se retêm substâncias aromáticas e se promove uma distribuição granulométrica mais uniforme. O fluxograma descrito na Figura 2 mostra todas as etapas do processo de fabricação do produto analisado.

Figura 2 – Fluxograma do Processamento de Café Solúvel na Indústria Avaliada



Fonte: Elaborada pelos autores.

Por outro lado, o processo de extração do café é semelhante ao do coador doméstico, onde os grãos de café torrados e moídos são percolados em água quente. No processo industrial, os grãos fragmentados sofrem infusão em água quente em percoladores de aço inoxidável pressurizados. Ademais, a tecnologia utilizada foi desenvolvida internamente para, otimizando os parâmetros operacionais, produzir um extrato solúvel que preservasse as características do café torrado, rico e aromático. No processo de concentração, uma parte da água adicionada na etapa de extração é removida.

O extrato concentrado é atomizado em forma de gotículas no topo de uma torre de secagem ao mesmo tempo em que é submetido a uma corrente de ar quente, provocando a evaporação da água. O produto coletado na base dessa torre é o café solúvel, que pode ser transformado em café aglomerado se submetido a uma etapa adicional de processamento.

A Indústria analisada produz, ainda, café solúvel aglomerado através de equipamento especial. O processo preserva a essência natural desse produto aromatizado pela adição de óleo de café, resultando em grânulos de ótima solubilidade. O produto final pode então ser comercializado em embalagens a granel (20,40 kg) e em frascos com 50g, 100g e 200g.

4.2 USO DA CARTA DE CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS

A importância em controlar o processo produtivo é de fundamental importância sob o ponto de vista financeiro, haja vista que as alterações no peso do

produto acima do que fora especificado pode mudar os planos de produção da empresa, já que o peso estando muito acima leva a um aumento dos custos de produção que no longo prazo pode vir a ser repassado para o consumidor. Enquanto que as alterações no peso abaixo do que fora especificado pode deixar um campo propício para constantes reclamações por parte dos consumidores nos órgãos fiscalizadores e órgãos de defesa do consumidor, o que obriga o empresário a reprocessar o café, aumentando assim os custos de produção.

Inicialmente testou-se a hipótese de normalidade e independência da variável estudada, com o objetivo de garantir o correto uso da carta de somas acumuladas (*CUSUM*). Desse modo, espera-se que tal processo seja normal, independente e identicamente distribuído (*i. i. d.*). O resultado dos cálculos para o teste de aderência (normalidade) de *Kolmogorov-Smirnov* encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Teste de Normalidade de *Kolmogorov-Smirnov* (K-S)

Variáveis	Média	Desvio Padrão	D ⁻	D ⁺	D _{Máx}	P-Valor
Peso do Café 50g	54,24 g	2,92g	0,056	0,045	0,056	< 0,01
Peso do Café 100g	103,99g	3,39g	0,073	0,051	0,073	< 0,01

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da Tabela 1 percebe-se que as duas distribuições dos pesos do café parecem seguir uma distribuição próxima de uma normal, levando-se em conta um nível de significância menor que 1% para a estatística K-S.

Para verificar a independência temporal das observações, utilizou-se a estatística Portemanteau (*Q*) que fora proposta por Ljung e Box (1979). A partir dessa estatística evidencia-se que todos os pesos não podem ser considerados independentes ao nível de significância estatística de 5%, considerando-se 7 defasagens temporais, que corresponde ao período semanal de funcionamento da indústria, uma vez que possuem padrões de autocorrelação (ρ) que são estatisticamente significantes segundo a estatística *Q*, tal como encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Aplicação da Estatística (Q) para os Pesos do Café

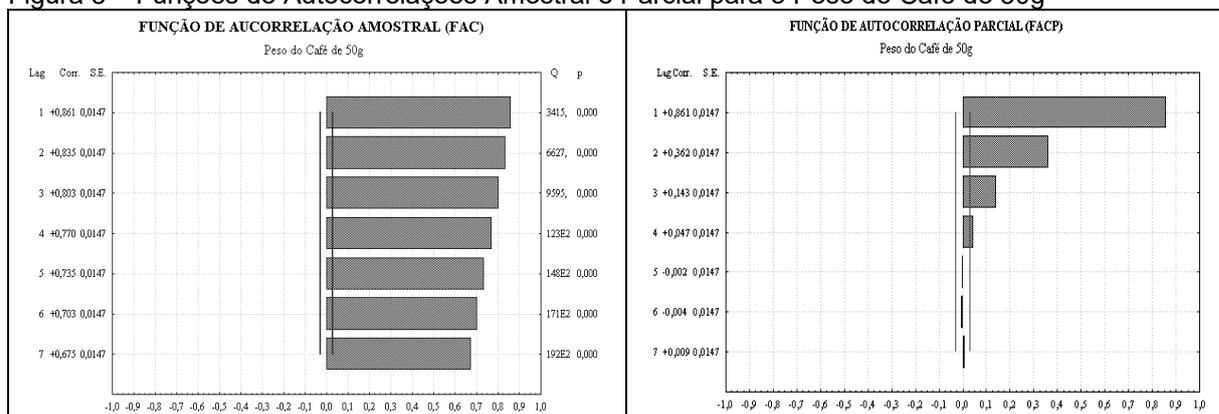
Lags	Peso do Café de 50g				Peso do Café de 100g			
	ρ	Erro Padrão	Q	Significância	ρ	Erro Padrão	Q	Significância
t-1	0,86	0,02	3414,75	0,00	0,66	0,02	2013,97	0,00
t-2	0,84	0,02	6626,87	0,00	0,60	0,02	3685,86	0,00
t-3	0,80	0,02	9594,81	0,00	0,53	0,02	4989,18	0,00
t-4	0,77	0,02	12324,85	0,00	0,47	0,02	5989,18	0,00
t-5	0,74	0,02	14812,44	0,00	0,39	0,02	6676,96	0,00
t-6	0,70	0,02	17089,47	0,00	0,32	0,02	7152,31	0,00
t-7	0,68	0,02	19187,77	0,00	0,24	0,02	7416,18	0,00

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 2 evidencia padrões de autocorrelações (ρ) considerados elevados. Os valores das significâncias foram denotados pela estatística Q com valores de probabilidade menores que 1%. Uma vez que as autocorrelações foram elevadas, o passo seguinte será a modelagem das variáveis valendo-se de uma estrutura Autoregressiva Integrada de Médias Móveis (ARIMA).

Assim, torna-se salutar a identificação dos valores de (p, d, q), diferenciando-se as séries de entrada (X_t), uma vez que na Figura 3, existem evidências de que as variáveis são não estacionárias. Ademais, um processo estacionário é obtido quando a função de autocorrelação amostral (FAC) de $Z_t = \Delta X_t$ decresce rapidamente para próximo de zero. Observa-se a partir da mesma figura que a série Z_t decresce rapidamente para próximo de zero após a primeira defasagem, indicando que o processo analisado tornou-se estacionário. Assim, pode-se classificar as séries temporais Z_{ts} como sendo integradas de primeira ordem ($d = 1$).

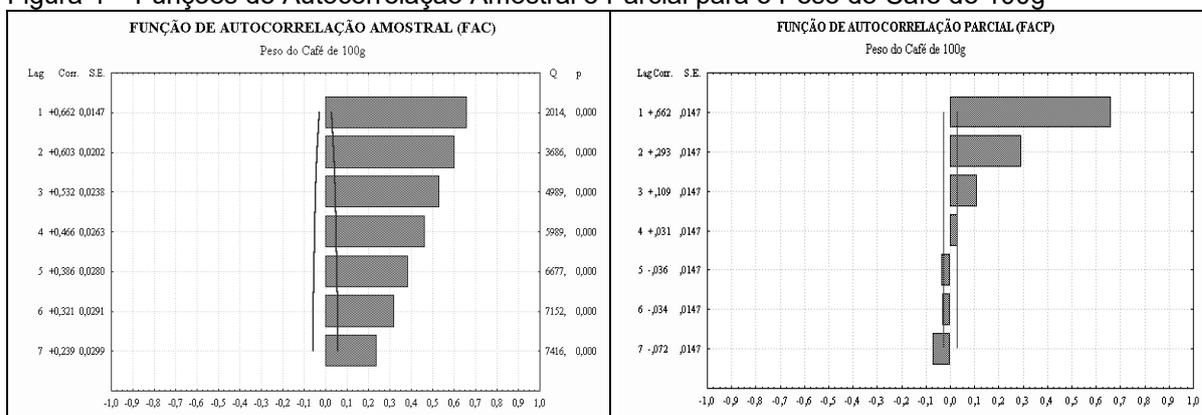
Figura 3 – Funções de Autocorrelações Amostral e Parcial para o Peso do Café de 50g



Fonte: Elaborada pelos autores.

Observe que a Figura 4 indica a existência de padrões de autocorrelação que são estatisticamente significativos até o 7º período de defasagem. Do lado esquerdo, tem-se o número de defasagens (lag), a correlação (Corr) e o respectivo erro padrão de estimativa (S. E). Do lado direito, apresenta-se a estatística Portmanteau (Q) e sua respectiva significância estatística, dada pelo valor de p. Neste caso, considera-se o nível de significância de 1%, aceitando-se a hipótese da presença de autocorrelação no processo, sugerindo-se assim, o ajuste dos dados a modelos de série temporal adequados às observações individuais, aplicando-se posteriormente a carta de Somas Acumuladas (CUSUM) nos resíduos provenientes deste modelo.

Figura 4 – Funções de Autocorrelação Amostral e Parcial para o Peso do Café de 100g



Fonte: Elaborada pelos autores.

Observe que as autocorrelações anteriores sugerem que o processo investigado é autocorrelacionado, evidenciando que todas essas autocorrelações são diferentes de zero. Isso sugere que tal processo pode ser descrito por uma estrutura autoregressiva de terceira ordem ou $AR(3)$, no caso do peso do café de 50g. Os parâmetros do modelo $AR(3)$ foram obtidos por meio das estimativas de máxima verossimilhança e encontram-se descrito através da expressão denotada por (7).

$$\Delta \hat{p}_t = -0,487 p_{t-1} - 0,203 p_{t-2} - 0,070 p_{t-3} \tag{7}$$

(-33,081)
(-12,608)
(-4,722)

Note que o modelo que melhor descreve o processo de produção do peso de café de 100g também é uma estrutura autoregressiva de terceira ordem ou $AR(3)$. Os parâmetros do modelo $AR(3)$ também foram obtidos por meio das estimativas de

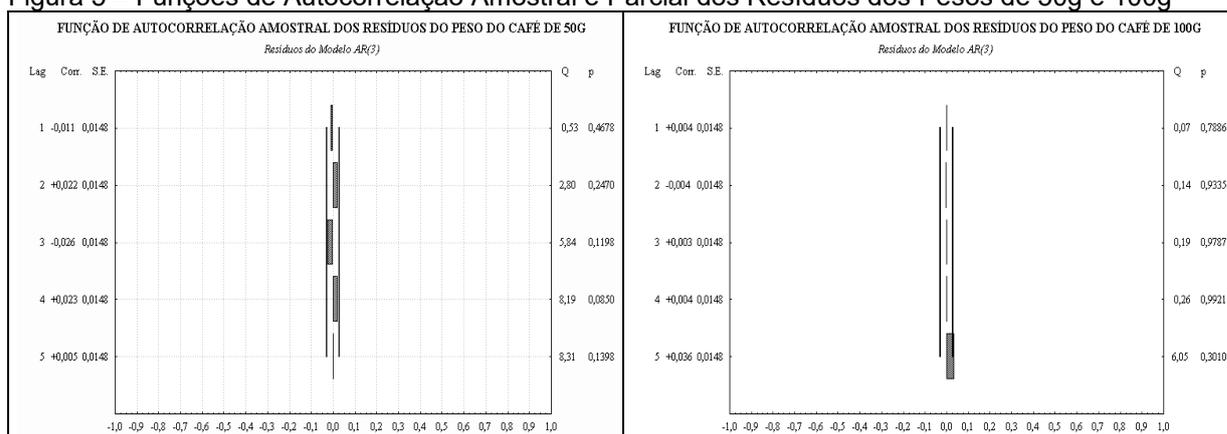
máxima verossimilhança e encontram-se descrito por meio da expressão denotada por (8).

$$\Delta \hat{p}_t = -0,508 p_{t-1} - 0,231 p_{t-2} - 0,093 p_{t-3} \quad (8)$$

(-34,596)
(-14,338)
(-6,294)

Vale destacar que as variáveis analisadas foram diferenciadas uma vez visando garantir a estabilidade da média e variância da série temporal. Por outro lado, a Figura 5 evidencia o comportamento dos resíduos provenientes dos modelos (7) e (8), respectivamente, cuja função de autocorrelação amostral e o teste Portmanteu, conduz à hipótese de erro do tipo *ruído branco* ao nível de significância de 1%.

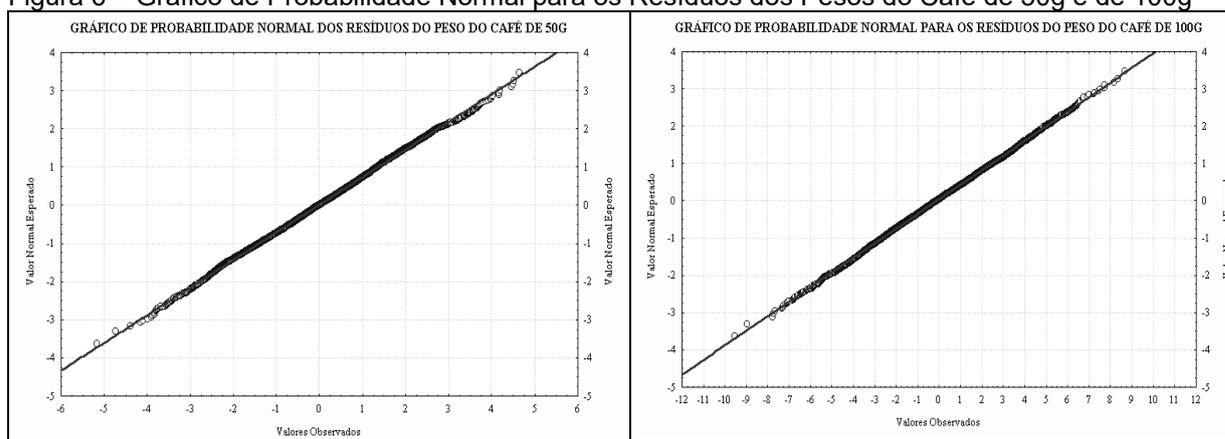
Figura 5 – Funções de Autocorrelação Amostral e Parcial dos Resíduos dos Pesos de 50g e 100g



Fonte: Elaborada pelos autores.

Como os limites de controle do gráfico *CUSUM* são bastante sensíveis à violação da suposição de que as observações da variável de interesse p_t seguem uma distribuição normal, a hipótese de normalidade do conjunto de dados disponíveis para a avaliação da estabilidade do processo pode ser visualizada pelo gráfico de probabilidade normal na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos dos Pesos do Café de 50g e de 100g

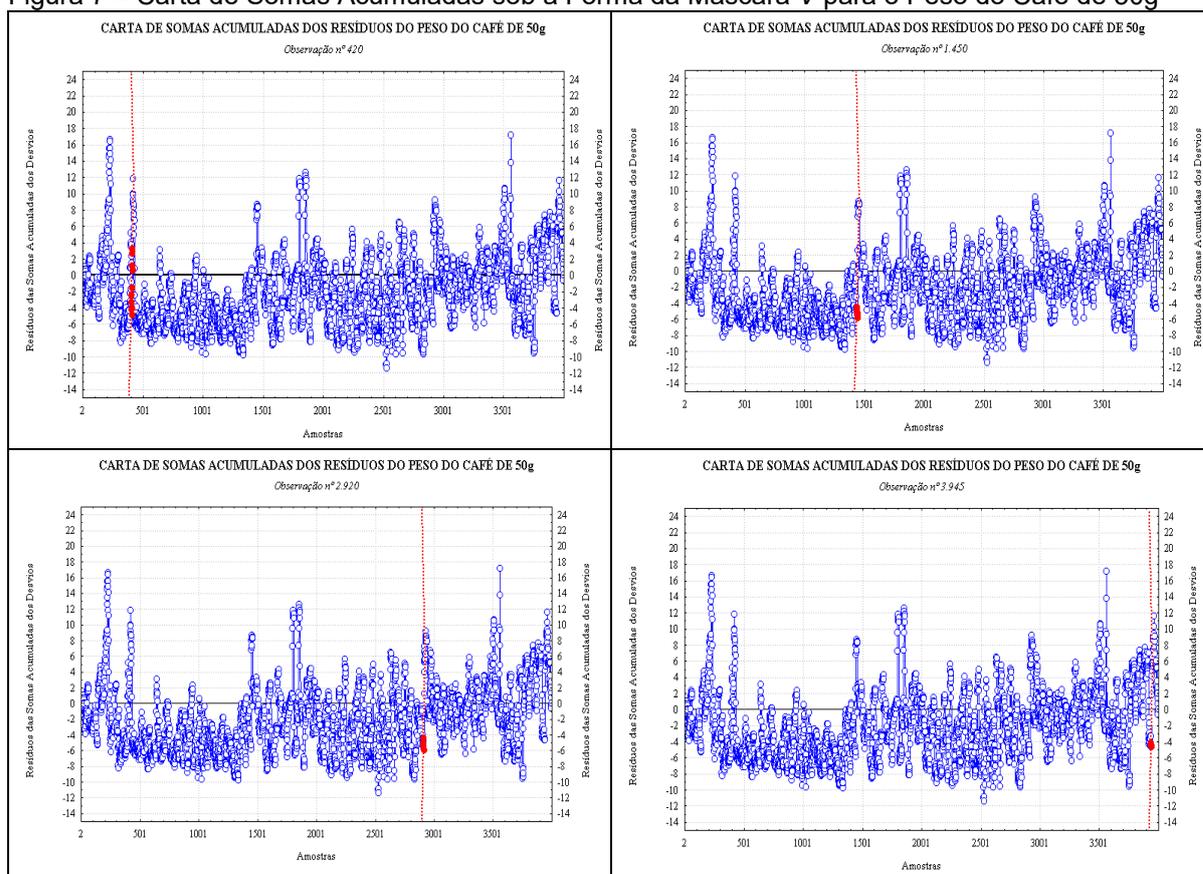


Fonte: Elaborada pelos autores.

Veja por meio da Figura 6 que a hipótese de que os resíduos provenientes dos modelos $AR(3)$, seguem uma distribuição normal, uma vez que todos os resíduos oriundos das expressões (7) e (8), respectivamente, encontram-se alinhados sobre a reta teórica de normalidade designada em cor vermelha. Obtidas as estimativas anteriores, e garantidas as não violações das hipóteses básicas para se utilizar a carta de controle, utilizou-se o vetor de resíduos do tipo *ruído branco*, para construir o gráfico de controle estatístico de processos *CUSUM*, visando realizar o monitoramento do processo produtivo, já que o desvio padrão para os vasilhames de 50g e 100g foram de 0,02g e 0,026g, respectivamente, indicando assim que a aplicação da Carta *CUSUM* é a mais indicada para detectar pequenas variabilidades no processo produtivo.

No que tange à carta *CUSUM*, a análise realizada para a característica de qualidade peso do café de 50g, verificou-se que as observações 420, 1.450, 2.920 e 3.945, respectivamente, indicam que o processo investigado encontra-se fora de controle, tal como atesta o gráfico de somas acumuladas sob a forma da máscara V, visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Carta de Somas Acumuladas sob a Forma da Máscara V para o Peso do Café de 50g

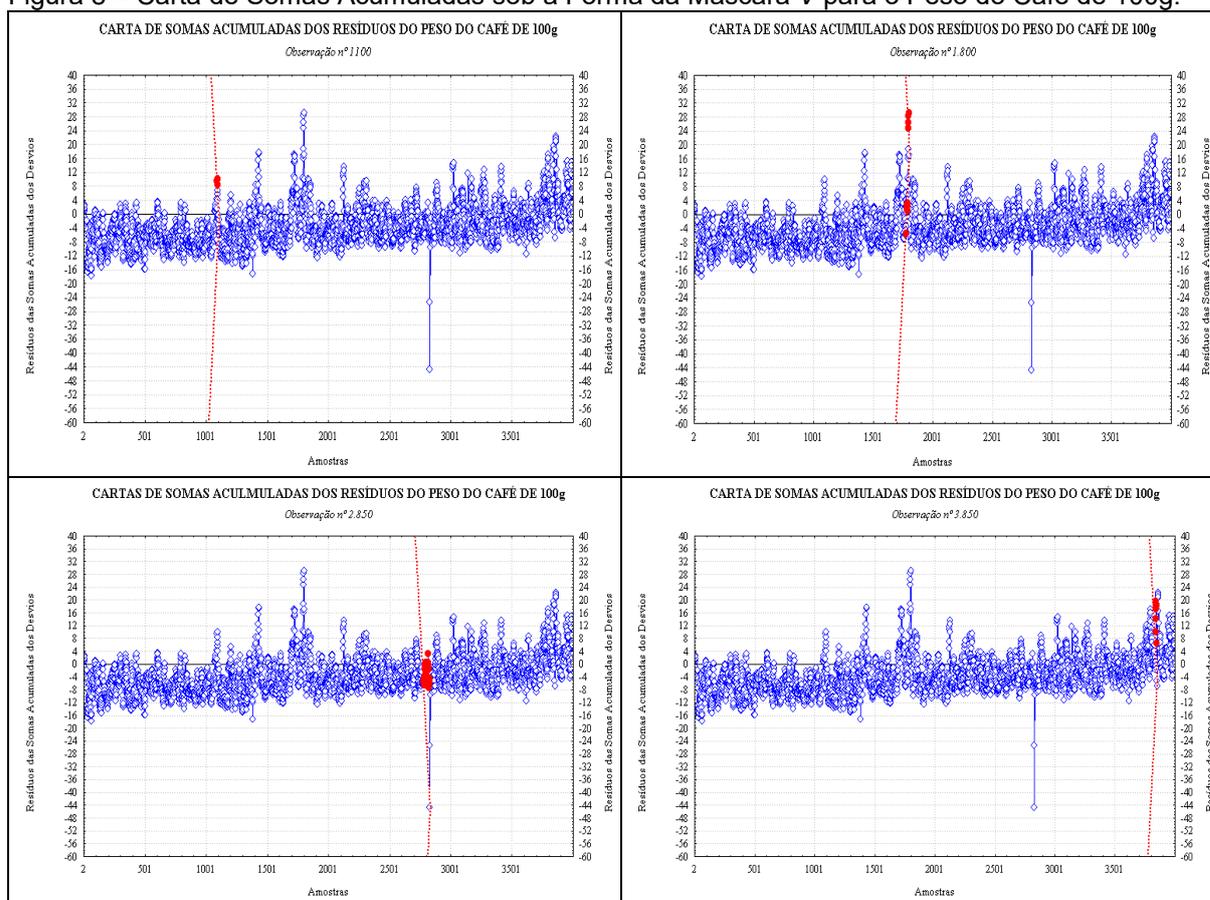


Fonte: Elaborada pelos autores.

Veja que a Figura 7 revela que os pesos estão acima daquilo que é determinado pelo órgão fiscalizador, que seria uma variação de 5% para mais e para menos. Os pesos do café de 50g encontram-se sobreavaliados, em média, cerca de 8,47%, levando-se em conta apenas o período amostral que fora estudado, o que representaria uma economia adicional para a indústria investigada caso esse desajuste fosse minimizado. Só para se ter uma idéia da instabilidade do processo, alguns pesos chegam, inclusive a terem seus valores majorados em até 34,6% acima daquilo que determina a lei nacional.

Observe a partir da Figura 8, que os 4 gráficos que evidenciam a carta *Cusum* sob a forma da máscara V para o peso do café de 100g, estes encontram-se fora de controle estatístico de processo. As observações de número 1.100, 1.800, 2.850 e 3.850, respectivamente, atestam evidências de um processo produtivo fora de controle.

Figura 8 – Carta de Somas Acumuladas sob a Forma da Máscara V para o Peso do Café de 100g.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Note que a Figura 8 mostra que o processo de produção estudado está com o peso superior ao que determina o rótulo impresso no produto. Os pesos investigados também se mostram sobreavaliados em até 4%, em média, evidenciando com isso uma instabilidade no processo sem, contudo, comprometer o cumprimento das leis de defesa do consumidor. Os pesos das latas de 100g chegam a pesar, em alguns casos, até 18% acima daquilo que é recomendável, onerando com isso a planilha de custos da indústria alimentícia.

Ao investigar de maneira mais detalhada o processo produtivo avaliado, pode-se levar a concluir que, dentre todos os fatores considerados, uma calibração errada do equipamento poderia estar interferindo nos pesos dos produtos fabricados. Recomenda-se, para trabalhos futuros, que se utilize modelos *ARIMA* (p, d, q) com intervenção, com o objetivo de classificar o efeito das observações espúrias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o grau de estabilidade do processo produtivo de café solúvel de uma indústria localizada no Estado do Paraná. A metodologia utilizada foi a de séries temporais para modelar a estrutura de dados provenientes dos pesos dos vasilhames de café, a partir da aplicação da carta de controle estatístico de processos de Somas Acumuladas.

Observou-se que os dados violam as suposições básicas de independência estatística e identicamente distribuídos (*i.i.d.*) proposto pelo modelo que fora apresentado. A série de entrada p_t foi submetida ao operador diferença visando induzi-la à estacionaridade nos dados.

Ademais, o modelo de série temporal foi ajustado, encontrando-se uma estrutura do tipo $AR(3)$ para os pesos de 50g e 100g, respectivamente, apresentando coeficientes estatisticamente significantes e estáveis, bem como a menor variância residual. O teste de hipóteses Portmanteu, aplicado para distribuição dos resíduos do modelo estimado, não evidenciou autocorrelações residuais consideradas estatisticamente significativas.

Em relação a problemática de pesquisa enunciada como: *de que forma pode-se avaliar e ao mesmo tempo corrigir possíveis instabilidades do processo de produção de café solúvel?* Esta foi respondida à medida que a carta de controle CUSUM evidenciou resíduos provenientes dos modelos $AR(3)$, onde foram avaliados com base na carta de controle de somas acumuladas (*CUSUM*), mostrando que o processo produtivo era instável estatisticamente, o que corrobora com uma fragilidade do processo no que diz respeito à garantia de produtos não conformes, principalmente o peso dos vasilhames de 50g. Os resultados apresentados propõem uma maior atenção por parte dos funcionários da indústria de fabricação de café, exigindo maior atenção, disciplina e controle nas atividades realizadas no dia a dia, além de dizimar importantes erros cometidos pelos mesmos na rotina de trabalho e que podem ser solucionados com uma boa orientação e mudança de comportamento.

Finalmente, é necessário que a ferramenta aplicada em algumas etapas do processo possa ser expandida para as demais atividades da indústria, a fim de que se consiga atingir a melhoria da qualidade na sua totalidade, e que os custos

relacionados a cada ponto escolhido possam ser mensurados e otimizados, fazendo com que a relação custo/benefício seja satisfatória para a empresa. Não obstante, as indústrias de laticínios precisam começar a pensar que os resultados reais de melhorias obtidas somente serão visíveis para o consumidor se as medidas adotadas conseguirem abranger toda a estrutura da empresa.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MEJIA, C. A. Monitoring Reduction in Variability with the Range. **IIE Transactions**, v. 30, p. 515–523, 1998.
- ALVES, C. C. et al. Uma aplicação do gráfico de controle de média móvel geralmente ponderada no processo de produção de papel. **INOVAE-Journal of Engineering**, Architecture and Technology Innovation, v. 4, n. 1, p. 105-119, 2017.
- ATIENZA, O. O.; TANG, L. C.; ANG, B. W. A. CUSUM scheme for autocorrelated observations. **Journal of Quality Technology**, v. 34, n. 2, p. 187-199, 2002.
- BAGSHAW, M.; JOHNSON, R. A. The effect of serial correlation on the performance of CUSUM Tests II. **Technometrics**, v. 17, n. 1, p. 73-80, 1975.
- CARDOSO, R. B. Determinação de parâmetros das cartas de controlo CUSUM e CUSUM-LN (S2) com recurso a ferramentas computacionais. Correlated Observations. **Technometrics**, v. 34, n. 1, p. 54–63, fev. 1992.
- CLARO, F. E.; COSTA, A. F. B.; MACHADO, M. A. G. Gráficos de Controle de EWMA e de X-barra para Monitoramento de Processos Autocorrelacionados. **Produção**, São Paulo, v. 17, n. 3, sept/dec, 2017.
- COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. São Paulo: Atlas, 2004.
- CHRISTO, E. S.; FERREIRA, M. B. Uso de gráfico de controle para minimizar erros de previsão em séries de energia elétrica. **ENGEVISTA**, v. 1, n. 2, p. 214-225, ago. 2013.
- DEMING, W. E. **Out of Crisis**. Cambridge, Mass: MIT Center for Advanced Engeneering Study, 1986.
- DIEHL, A. A.; TATIM, D. C. **Pesquisa em ciências sociais aplicadas: métodos e técnicas**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- DURÁN, C. A. A. et al. Café: aspectos gerais e seu aproveitamento para além da bebida. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 107-134, 2017.

HAWKINS, D. M.; OLWELL, D. H. **Cumulative sum charts and charting for quality improvement**. New York: Springer, 1997.

HRADESKY, J. L. **Aperfeiçoamento da Qualidade e da produtividade: guia prático para implementação do controle estatístico de processo – CEP**. Tradução: Maria Cláudia de Oliveira Santos. São Paulo: McGraw-Hill, 1989, p. 151.

JOHNSON, R. A.; BAGSHAW, M. The effect of serial correlation on the performance of CUSUM Tests. **Technometrics**, v. 16, n. 1, p. 103-112, 1974.

LJUNG, G. M.; BOX, G. E. P. The likelihood function of stationary autoregressive: moving average models. **Biometrika**, v. 66, p. 265 – 270, 1979.

LU, C-W.; REYNOLDS, M. R. JR. Cusum charts for monitoring an autocorrelated process. **Journal of Quality Technology**, v. 33, n. 3, p. 316-334, 2001.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. Canada: John Wiley & Sons, Inc, Third Edition, 1997.

MONTGOMERY, D. C., JENNINGS, C. L.; KULAHCI, M. **Introduction to Time Series Analysis and Forecasting**. John Wiley & Sons, 2011.

NUINTIN, A. A. **O Desenvolvimento de indicadores do desempenho e da qualidade para o processo de produção: estudo de casos do processo de produção do café**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2007.

NUNES, T. F. B. et al. Revisão das cartas de controle multivariadas paramétricas. **RAUnP**, v. 10, n. 3, p. 21-34, 2018.

PEREIRA, Z. L.; REQUEIJO, J. G. **Qualidade: planeamento e controlo estatístico de processos**. 2.ed. Lisboa: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2012.

REYNOLDS JUNIOR, M. R.; RAID W. A.; ARNOLD, J. C. *CUSUM* charts with variable sampling intervals. **Technometrics**. v. 32, n. 4. p. 371–384. nov. 1990.

VANBRACKLE, L. N.; REYNOLDS, M. R. EWMA and CUSUM Charts in the presence of correlation. **Communications in Statistics: Simulation and Computation**, v. 26, p. 979-1008, 1997.

WALDMANN, K. H. Bounds for the distribution of the run length of one-sided and two-sided cusum quality control schemes. **Technometrics**, February, v. 28, n. 1, p. 61–67, 1986.

WIERINGA, J. E. **Statistical Process Control for Serially Correlated Data**. Zoutkamp, 1998. Tese (Doutorado em Economia) – Rijksuniversiteit Groningen.

YASHCHIN, E. Performance of CUSUM Control Schemes for Serially Correlated Observations. **Technometrics**, v. 35, n. 1, p. 37-52, 1993.

Artigo recebido em: 28/06/2019

Artigo aprovado em: 05/11/2019

Artigo publicado em: 05/11/2019