

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Diego Rosa Lakus

**GRÁFICOS DE CONTROLE DE SHEWHART, CUSUM E EWMA:
UM ESTUDO COMPARATIVO EM VERIFICAÇÃO INTERMEDIÁRIA
DE BALANÇAS**

Santa Maria, RS
2017

Diego Rosa Lakus

**GRÁFICOS DE CONTROLE DE SHEWHART, CUSUM E EWMA: UM ESTUDO
COMPARATIVO EM VERIFICAÇÃO INTERMEDIÁRIA DE BALANÇAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia de Produção**.

Orientadora: Morgana Pizzolato

Santa Maria, RS
2017

GRÁFICOS DE CONTROLE DE SHEWHART, CUSUM E EWMA: UM ESTUDO COMPARATIVO EM VERIFICAÇÃO INTERMEDIÁRIA DE BALANÇAS

SHEWHART, CUSUM AND EWMA CONTROL CHARTS: A COMPARATIVE STUDY ON INTERMEDIATE CHECK OF WEIGHING BALANCES

Diego Rosa Lakus¹, Morgana Pizzolato²

RESUMO

A garantia da qualidade dos resultados de medição gerados por laboratórios de ensaios e calibrações baseados na ABNT NBR ISO/IEC 17025, está diretamente associada ao monitoramento dos processos realizados pelos seus instrumentos de medição. Esse monitoramento pode ser realizado através da aplicação de gráficos de controle (GC) e, para este estudo, escolheram-se como instrumentos de medição analisados quatro balanças eletrônicas pertencentes a dois laboratórios de uma Instituição Federal de Ensino Superior. O objetivo principal desta pesquisa é identificar, entre os GC CUSUM, EWMA e Shewhart, o mais adequado para monitorar as tendências dessas balanças. Fez-se necessário definir os períodos de análises dos dados coletados pelos laboratórios, calcular os limites de controle de cada gráfico (fase I), realizar o monitoramento do processo (fase II), seguidos pela comparação entre os três tipos de GC. Utilizou-se o aplicativo computacional Minitab Statistical Software 17 para a construção desses GC. Este estudo identificou que o GC EWMA é a melhor alternativa a ser utilizada para monitorar as tendências em todos os pontos da verificação intermediária, pois é o único que pode ser utilizado tanto com dados normais quanto não normais. Não foi possível identificar qual dos GC detecta mais cedo as causas especiais.

Palavras-chave: Gráficos de controle; CUSUM; EWMA; Shewhart; Balanças; Verificação intermediária.

ABSTRACT

The quality assurance of measurements results generated by testing and calibration laboratories based on ABNT NBR ISO/IEC 17025 is directly associated with process monitoring undertaken by their measuring instruments. This process monitoring may be carried out through the application of control charts (CC) and, for this study, four electronic weighing balances pertaining to two laboratories at a Federal Institution of High Education were chosen as measuring instruments to be analyzed. The main objective of this research is to identify the most appropriated CC for monitoring trends on these electronic scales, between CUSUM, EWMA and Shewhart CC. It became necessary to define the period of data analyzes collected by these laboratories, to calculate the control limits for each CC (phase I), to carry out the process monitoring (phase II), following by the comparison between these three CC. Minitab Statistical Software 17 was used for the CC construction. This study identified the EWMA CC as the best alternative to be used for monitoring trends in all points of the intermediate checks because it is the only CC that can be applied for both normal and non-normal data. It was not possible to identify which of the CC detects the special-causes earlier.

Keywords: Control charts; CUSUM; EWMA; Shewhart; Weighing balances; Intermediate checks.

¹ Autor; Discente do Curso de Graduação em Engenharia de Produção – UFSM/CT

² Orientadora; Doutora em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Professora adjunta do Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas – UFSM/CT

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de processos e desenvolvimento em inovação desses e de produtos, a partir de processos de medições que “visam comprovar que a grandeza específica em questão (mensurando) está em conformidade com os requisitos especificados” (DUARTE JÚNIOR, 2008), está diretamente associada à garantia da qualidade de resultado de medições em laboratórios de ensaio e calibração, tema deste estudo.

A norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração estabelece os fundamentos para laboratórios implantarem um Sistema de Gestão de Qualidade que institui mecanismos para promover a confiança em laboratórios, garantindo que os mesmos atuem conforme requisitos previamente estabelecidos (ALBANO; RAYA-RODRIGUES, 2009).

Essa norma (ABNT, 2005), também apresenta requisitos que dizem que os laboratórios devem monitorar a validade de seus ensaios e calibrações através de procedimentos de controle da qualidade, detectando tendências a partir dos dados obtidos e “quando praticável, devem ser aplicadas técnicas estatísticas para a análise crítica dos resultados” (ABNT, 2005, p. 21). Baseados nisso, Albano e Raya-Rodrigues (2009) afirmam que a garantia da qualidade dos resultados gerados pelos laboratórios implica em uma maior confiabilidade dos métodos utilizados para a realização dos ensaios e calibrações. Dentre os instrumentos de medição utilizados em laboratórios destacam-se as balanças eletrônicas, foco desse trabalho.

Os gráficos de controle (GC), ferramentas do Controle Estatístico do Processo (CEP), são utilizados para acompanhar os processos de medição dos laboratórios ao longo do tempo, verificando sua estabilidade e permitindo averiguar quando os resultados obtidos passam a ser afetados por causas especiais de variação (ALBANO; RAYA-RODRIGUES, 2009).

Os GC de Shewhart atingiram alta popularidade por conta de sua simplicidade e facilidade de interpretação embora sejam insensíveis a pequenas mudanças no processo. Considerando essa desvantagem, há duas alternativas eficazes que podem ser utilizadas quando ocorrem pequenas variações: o GC da Soma Cumulativa (CUSUM) e o GC da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA) (MONTGOMERY, 2016).

Autores como Albano e Raya-Rodriguez (2009), Werkema (2006), e até mesmo a AIAG (2010), apresentam como forma de monitoramento dos processos de medição apenas os GC de Shewhart, sem citar a existência e aplicação de outros tipos de GC. Em

contrapartida, Walter et al. (2013) aplicou em um processo do setor metal mecânico os GC Shewhart e CUSUM, comparando-os, para identificar qual é o mais apropriado para detectar as variações no processo, concluindo, ao final do estudo, que o GC CUSUM é o mais sensível. Nenhum dos autores cita o GC EWMA. Com isso, pode-se questionar: (i) Seria possível utilizar o gráfico de controle CUSUM e o EWMA para monitorar estabilidade e tendências de balanças eletrônicas? (ii) Comparando esses gráficos (Shewhart, CUSUM e EWMA), qual é o mais indicado para identificar falta de estabilidade e tendências em balanças eletrônicas de laboratórios de calibração e ensaios?

Conforme o MSA (AIAG, 2010), caso ocorra falta de estabilidade e tendências excessivas ao analisar um sistema de medição, aponta-se entre as possíveis causas a falta de calibração do instrumento utilizado na medição. Dessa maneira, este estudo se justifica, pois pode auxiliar na definição adequada, e de base estatística, da frequência de calibração, visto que o mesmo propõe analisar qual GC identifica mais rápido as causas especiais.

Ainda de acordo com Montgomery (2016), um GC pode ser considerado como um teste de hipótese para verificar se o processo de medição está sob controle estatístico. Portanto, existe a probabilidade da ocorrência de erros do tipo I (concluir que o processo de medição está fora de controle quando, efetivamente, ele está sob controle) e tipo II (afirmar que o processo de medição está sob controle, sendo que está fora de controle) tanto para testes de hipótese quanto para GC. Sendo assim, a escolha de um tipo de GC capaz de detectar de modo mais eficaz as causas especiais é de grande importância, implicando na diminuição da probabilidade de ocorrência desses erros, evitando, portanto, que os laboratórios forneçam e/ou trabalhem com resultados incorretos. A partir do exposto, fica clara a justificativa tanto prática como teórica da realização desta pesquisa com vistas a responder as questões citadas.

No que diz respeito aos objetivos, este estudo buscou identificar o GC mais adequado (entre os de Shewhart, CUSUM e EWMA), para monitoramento do processo de medição de balanças eletrônicas de laboratórios de ensaios e calibrações. Como objetivos específicos, elencam-se: (i) propor uma sistemática para coleta e análise dos dados para realizar o monitoramento; (ii) analisar os resultados dos GC de Shewhart, CUSUM e EWMA.

A estrutura deste trabalho é composta por cinco seções. A primeira seção apresenta a introdução e a segunda seção é composta pelo referencial teórico. Sequencialmente, a terceira seção aborda a metodologia empregada na pesquisa enquanto a quarta seção exibe os resultados obtidos e discussões pertinentes a este estudo. Por fim, as considerações finais são discutidas na quinta seção, juntamente com as sugestões de estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Serão apresentados nesta seção os referenciais teóricos referentes à norma ABNT NBR ISO/IEC 17025, ao Controle Estatístico do Processo e aplicações dos Gráficos de Controle.

2.1 A NORMA ABNT NBR ISO/IEC 17025

Os laboratórios que desejam realizar serviços de calibração e ensaios de modo a assegurar os padrões de qualidade internacionais e a afirmar sua competência técnica por meio de resultados confiáveis devem atender aos requisitos gerais da ISO/IEC 17025. No Brasil, a Coordenação Geral de Acreditação (CGCRE) do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) reconheceu essa norma, publicando-a através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Criou-se assim a ABNT NBR ISO/IEC 17025 cujo objetivo é estabelecer um guia para elaboração e implementação da Gestão da Qualidade do laboratório, bem como garantir a confiabilidade analítica dos ensaios e calibrações realizados pelo mesmo (ALBANO, RAYA-RODRIGUEZ, 2009; FELIPPES, AGUIAR, DINIZ, 2011; MOURA, COSTA, 2009).

Dessa forma, a norma é composta pelos aspectos de qualidade e aspectos técnicos. Os aspectos de qualidade referem-se ao sistema de gestão do laboratório (composto pelos sistemas da qualidade e administrativos) e estão presentes na seção 4 da norma. Já os aspectos técnicos são compostos pela junção da competência técnica para a realização dos ensaios ou calibrações do laboratório, compondo, assim, a seção 5 da norma (ABNT, 2005; FELIPPES, AGUIAR, DINIZ, 2011).

Nessa quinta seção da norma, destacam-se os pontos relacionados a este estudo: verificações intermediárias e garantia da qualidade dos resultados, que serão aprofundados, respectivamente nas seções terciárias 2.1.1 e 2.1.2 deste trabalho.

2.1.1 Verificações intermediárias

De acordo com a ABNT (2005), no subitem 5.5.10 da norma dá-se enfoque às verificações intermediárias que os instrumentos de medição devem ser submetidos “para a manutenção da confiança na situação de calibração do equipamento” (ABNT, 2005, p. 18).

Para melhor compreender o que é uma verificação intermediária, é necessário entender a diferença entre a mesma e calibração. O VIM (INMETRO, 2012b, p. 27) define que calibração é a operação que determina “uma relação entre os valores e as incertezas de

medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas” enquanto verificação é “o fornecimento de evidência objetiva de que um dado item satisfaz requisitos especificados” (INMETRO, 2012b, p. 29), estabelecendo assim uma diferenciação que influencia na realidade dos laboratórios. Sommer, Chappell e Kochsiek (2001) complementam que ambas as ações são altamente correlacionadas e importantes para assegurar as corretas indicações dos instrumentos de medição.

Para melhor exemplificar, cita-se o documento orientativo DOQ-CGCRE-36 (INMETRO, 2012a), referente a como proceder as verificações intermediárias de balanças. Esse documento, por sua vez, afirma que o laboratório deve realizá-las com procedimentos e periodicidades definidos pelo mesmo visando identificar as variações ocorridas no período entre duas calibrações, avaliando, assim, se não houveram mudanças significativas a ponto de solicitar uma nova calibração. Isso permite, portanto, a otimização dos prazos de calibração, assim como a detecção antecipada de avarias ou falhas.

Existem distintos métodos para a execução das verificações intermediárias de instrumentos de medição. Essas verificações dependem da tecnologia do instrumento de medição, da existência de documentos oficiais orientativos, bem como da frequência de uso do instrumento que influencia diretamente na periodicidade da calibração e, portanto, na periodicidade de sua verificação intermediária (EURAMET, 2015; INMETRO, 2012a; OIML, 2006; UKAS, 2015).

Considerando que o foco deste estudo envolve balanças, o detalhamento do método de suas verificações intermediárias será apresentado na seção secundária 3.1 deste trabalho.

2.1.2 Garantia da qualidade dos resultados

Segundo a norma (ABNT, 2005, p. 21), no item 5.9 são estabelecidos os requisitos referentes à garantia da qualidade dos resultados do laboratório, onde é determinado que o mesmo deve definir os procedimentos para monitoramento da validade dos ensaios e calibrações para detectar as tendências dos mesmos. É recomendada a utilização de técnicas estatísticas para a viabilização da análise dos resultados. A norma também cita outras formas de monitoramento como o uso de materiais de referência certificados utilizando materiais de referência secundários, a participação em programas de comparação interlaboratorial, ensaios ou calibrações replicadas utilizando métodos idênticos ou diferentes, entre outros.

Como citado anteriormente na Introdução, os Gráficos de Controle (GC) de Shewhart são utilizados para monitoramento dos processos de medição visando detectar tendências e falta de estabilidade. De acordo com o VIM (INMETRO, 2012b, p. 42), tendências são “estimativas de erros sistemáticos”, enquanto estabilidade é descrita como uma característica que o instrumento de medição possui para manter suas propriedades metrológicas ao longo do tempo. Montgomery (2016) complementa que, tratando-se de GC, tendência é um comportamento contínuo dos dados em uma determinada direção, e estabilidade é a ausência de causas especiais, como pontos fora dos limites de controle.

2.2 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP)

O CEP é considerado um dos maiores desenvolvimentos tecnológicos do século 20 por ser fundamentado em princípios capazes de gerar um ambiente que preze pela melhoria contínua da qualidade. É um conjunto de ferramentas útil para o controle da qualidade de um processo e, dentre essas, encontram-se os gráficos de controle (GC). Esses foram desenvolvidos por Walter A. Shewhart na companhia telefônica *Bell Telephone Laboratories*, nos Estados Unidos da América, ao colocar em prática alguns conceitos básicos de Estatística e Metodologia Científica. Os GC são ferramentas visuais capazes de estimar parâmetros de um processo e monitorar sua estabilidade, agilizando, por exemplo, a identificação de causas especiais (MONTGOMERY, 2016; SAMOHYL, 2009).

O monitoramento e controle do processo pode ser univariado ou multivariado. A perspectiva univariada avalia apenas uma variável de saída, enquanto a multivariada realiza o monitoramento simultâneo de duas ou mais características correlacionadas que influenciam na qualidade de um único processo (HENNING et al., 2011; MONTGOMERY, 2016).

Para este estudo, utilizou-se a perspectiva univariada por se tratar da análise de dados coletados a partir de pesagem realizadas durante verificações intermediárias de balanças.

2.2.1 Gráficos de controle (GC)

Os GC podem ser de variáveis ou de atributos. Os gráficos de variáveis consistem nas características cujo valor é o obtido por meio de alguma medição (variável mensurada), enquanto os gráficos de atributos provêm de resultados de uma classificação ou contagem, como, por exemplo, número de defeituosos ou número de defeitos (ROTONDARO, 2012).

Os principais tipos de GC univariados são os Gráficos de Shewhart (valores individuais e amplitude móvel, média e amplitude, média e desvio padrão), Gráficos de Controle da Soma Cumulativa (CUSUM) e Gráficos de Controle da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA). Os GC Shewhart são amplamente utilizados por conta de sua facilidade de construção e interpretação, enquanto os GC CUSUM e EWMA, elaborados cerca de 30 anos após os de Shewhart, possuem maior grau de complexidade para sua aplicação. Esses últimos são muito eficazes para o monitoramento do processo (fase II) e são comumente chamados de GC ponderados pelo tempo. Essa é a principal vantagem que esses dois tipos de gráficos possuem sobre os GC de Shewhart, que por sua vez é insensível a pequenas mudanças (na ordem de $1,5 \sigma$) no processo pelo fato de utilizar apenas a informação da última amostra coletada (MONTGOMERY, 2016).

Em seguida, são apresentadas as características de cada um dos GC que serão utilizados para atender aos objetivos deste estudo.

2.2.1.1 Gráficos de Controle de Shewhart para Valores Individuais e Amplitude Móvel (I/AM)

Os Gráficos de Controle (GC) de Shewhart devem se basear em dados de, no mínimo, 20 subgrupos de tamanho n e, quando o tamanho da amostra para monitoramento do processo é $n = 1$ (uma única unidade individual), utiliza-se o GC para valores individuais (I). Esse GC é composto por uma linha central (LC), uma linha de limite de controle superior (LCS) e outra de limite de controle inferior (LCI). Utilizam-se as Equações 1 e 3 para definir LCS e LCI, respectivamente, e a Equação 2 para calcular a linha de centro (LC), sendo \bar{x} correspondente à média das amostras, \overline{MR} à média das amplitudes de duas observações e d_2 ao fator para construção de GC para variáveis (valor tabelado, elaborado para facilitar a construção dos gráficos) (MONTGOMERY, 2016).

$$LCS = \bar{x} + 3(\overline{MR}/d_2) \quad (1)$$

$$LC = \bar{x} \quad (2)$$

$$LCI = \bar{x} - 3(\overline{MR}/d_2) \quad (3)$$

Em conjunto com o GC de valores individuais, é elaborado o GC de amplitude móvel (AM) das duas observações consecutivas para estimar a variabilidade do processo, sendo composto pelo LCS, LC e LCI, obtidos através das Equações 4, 5 e 6, onde D_3 e D_4 são constantes tabeladas assim como A_2 (MONTGOMERY, 2016).

$$LCS = D_4 \bar{R} \quad (4)$$

$$LC = \bar{R} \quad (5)$$

$$LCI = D_3 \bar{R} \quad (6)$$

Para um processo estar sob controle estatístico, todos os pontos amostrais devem estar contidos entre os limites de controle. Contudo, mesmo isso ocorrendo, os dados podem estar se comportando de forma sistemática e não aleatória, demonstrando, por exemplo, tendências e padrões cíclicos. Também se destaca que esses GC são válidos somente se a suposição de normalidade dos dados é verdadeira (LOUZADA et al., 2013).

2.2.1.2 Gráficos de Controle da Soma Cumulativa (CUSUM)

Esse gráfico é capaz de detectar pequenas e constantes mudanças, incorporando toda a sequência de informações das amostras que definem as somas acumuladas dos desvios comparadas a um valor-alvo μ_0 . Para a construção do gráfico, utiliza-se a Equação 7, sendo C_i a soma cumulativa até a i -ésima amostra enquanto \bar{x}_j é a média da j -ésima amostra (MONTGOMERY, 2016).

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{x}_j - \mu_0) \quad (7)$$

Quando o processo estiver sob controle, a soma cumulativa flutuará aleatoriamente próximo ao zero do gráfico, demonstrando assim nenhum padrão de aumento ou redução (tendências). Contudo, a Equação 7 não constitui por si só um GC pois faltam os limites de controle estatístico. Para isso, representa-se o CUSUM padronizado que trabalha com o acúmulo dos desvios da média acima C_i^+ ou abaixo C_i^- do valor alvo, considerando o valor de referência k (Equações 8 e 9), sendo y_i calculado por meio da Equação 10. Quando C_i^+ ou C_i^- ultrapassam o limite de controle h , considera-se que o processo está fora de controle estatístico. Usualmente $k = 0,5$ e $h = 5$. Destaca-se também que o CUSUM não é eficiente quando os dados não atendem a suposição de normalidade (MONTGOMERY, 2016; JOHNSON, BAGSHAW, 1974).

$$C_i^+ = \max[0, C_i^+ + y_i - (\mu_0 + k)] \quad (8)$$

$$C_i^- = \min[0, C_i^- + y_i - (\mu_0 - k)] \quad (9)$$

$$y_i = (x_i - \mu_0)/\sigma \quad (10)$$

2.2.1.3 Gráficos de Controle da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA)

Assim como o CUSUM, o GC EWMA também é capaz de detectar pequenas variações no processo, além de possuir menos complexidade em sua construção. O gráfico pondera os valores de tal forma que as informações mais atualizadas possuam um peso maior que as informações mais remotas. Dessa forma, o gráfico EWMA é constituído pela plotagem

de z_i versus o tamanho de amostras (ou tempo) i , como mostra a Equação 11, sendo $0 \leq \lambda \leq 1$ o peso associado à média da i -ésima média amostral \bar{x}_i (MONTGOMERY, 2016).

$$z_i = \lambda \bar{x}_i + (1 - \lambda)z_{i-1} \quad (11)$$

De modo geral, $0,05 \leq \lambda \leq 0,25$ são os mais utilizados na prática. Quando opta-se por um $\lambda \leq 0,1$, mais eficaz será a detecção de pequenas mudanças no processo. O valor inicial z_0 é o valor alvo do processo μ_0 , que por sua vez é utilizado como a linha central e valor de referência no gráfico. Caso não se tenha definido um valor alvo, utiliza-se a média \bar{x} de dados preliminares (MONTGOMERY, 2016).

Os limites de controle são obtidos através das Equações 12 e 13 e 14, onde L é a largura dos limites de controle (geralmente $L = 3$, os limites 3 sigmas usuais também utilizados nos gráficos de Shewhart) e σ é o desvio padrão (MONTGOMERY, 2016).

$$LSC = \mu_0 + L \sigma \lambda \sqrt{\frac{\lambda}{(2 - \lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad (12)$$

$$LC = \mu_0 \quad (13)$$

$$LSI = \mu_0 - L \sigma \lambda \sqrt{\frac{\lambda}{(2 - \lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad (14)$$

Recomenda-se que para as primeiras dez amostras sejam utilizados limites exatos, pois há uma alta probabilidade de ocorrência do erro tipo II (afirmar que uma amostra fora do controle estatístico está sob controle). Ressalta-se também que o GC EWMA é ideal para observações individuais e que é quase um procedimento não paramétrico, livre de distribuição. (LOUZADA et al., 2013; MONTGOMERY, 2016; SAMOBYL, 2009).

2.3 APLICAÇÕES

Foram encontrados alguns estudos acerca de aplicações de GC em dados de medições com balanças para verificar sua estabilidade ou ocorrência de tendências. No entanto, Souza et al. (2014) aplicou apenas GC de Shewhart em dados coletados em verificações intermediárias de balanças em um ponto específico da faixa (10 g), concluindo que esse gráfico é eficaz, mesmo não realizando a comparação com os outros tipos de GC existentes.

Para NIST (2012), os GC de Shewhart foram pouco sensíveis a pequenas mudanças quando utilizados em dados obtidos através de 177 calibrações de massa (onde se utilizou balanças de alta precisão para comparação com um padrão), uma vez que foram detectadas

apenas duas causas especiais. Utilizando os mesmos dados nos GC EWMA, foram detectadas 26 causas especiais por conta de uma mudança na média que apenas esse GC é capaz de detectar devido à sua sensibilidade a pequenas mudanças. NIST (2012) também recomenda que o peso associado à média (λ) seja entre 0,15 e 0,3 para o GC EWMA.

A fim de atender ao requisito 5.9 na norma ISO/IEC 17025 em Portugal, Carinhas, Borges e Infantes (2016) utilizaram o gráfico EWMA para monitoramento de ensaios de comparação interlaboratorial por conta de suas pequenas alterações do processo, verificando que o mesmo estava sob controle estatístico.

Alguns autores apresentam estudos comparativos entre os mesmos tipos de GC deste trabalho a fim de verificar qual possui melhor desempenho para cada caso. Cruz, Cunha Filho e Falcão (2014) aplicaram os gráficos em parâmetros da qualidade da água (pH e turbidez) fornecida em uma cidade de São Paulo e concluiu que o gráfico EWMA demonstrou-se mais sensível às mudanças do processo. Henning et al. (2016) aplicou os GC CUSUM, EWMA e Shewhart para medidas individuais para o monitoramento do consumo de água em uma universidade, e concluiu que os três gráficos identificaram as primeiras causas especiais (vazamento de água) ao mesmo tempo, embora o CUSUM e o EWMA sinalizaram a redução de consumo de forma mais clara e rápida.

3 METODOLOGIA

Esta seção é composta pela apresentação do cenário onde este estudo foi realizado, método de pesquisa e etapas da pesquisa cumpridas neste trabalho.

3.1 CENÁRIO

O presente estudo foi realizado em dois laboratórios pertencente a uma Instituição Federal de Ensino Superior. O primeiro, denominado Laboratório A, de metrologia química, atua em ensaios de determinação de resíduos de pesticidas e micotoxinas em matrizes de origem vegetal, fazendo uso de variados tipos e modelos de equipamentos e instrumentos de medição. O segundo, denominado Laboratório B, de metrologia mecânica, atua em ensaios e calibrações das áreas de força, dimensional e massa. Ambos os laboratórios estão em processo de adequação da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025.

Buscando atender os requisitos dessa norma, os laboratórios executam verificações intermediárias em alguns de seus instrumentos de medição. Dentre esses, encontram-se três

balanças eletrônicas no Laboratório A e uma no Laboratório B, de diferentes faixas de medições, resoluções e pontos específicos em que ocorrem as verificações intermediárias (Tabela 1). Essas verificações intermediárias são realizadas semanalmente no Laboratório A e três vezes por semana pelo Laboratório B. Em ambos, as verificações são compostas por três repetições/pesagens de um mesmo peso padrão (calibrado por laboratórios acreditados) para cada ponto da faixa de medição da balança, conforme DOQ-CGCRE-36 (INMETRO, 2012a).

Tabela 1 - Especificações individuais das balanças eletrônicas e seus pontos de verificação

Laboratório	Autenticação	Faixa de medição	Resolução	Pontos de verificação
A	BAL 015	0,02 – 230 g	0,0001 g	10 mg; 50 mg; 100 mg
A	BAL 016	0,01 – 600 g	0,01 g	0,5 g; 10 g; 500 g
A	BAL 017	0,2 – 500 g	0,01 g	5 g; 100 g; 500 g
B	BAL 002	0,5 – 3200 g	0,01 g	50 g; 500 g; 1000 g; 3000 g

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.2 MÉTODO DE PESQUISA

Este estudo é classificado quanto a sua natureza como aplicado, possuindo uma abordagem quantitativa. Segundo Gil (2010), denomina-se pesquisa aplicada aquela que engloba estudos que visam a resolução de problemas identificados no ambiente de convivência do pesquisador, ampliando o conhecimento científico e propondo novos questionamentos a serem estudados. Quanto à abordagem quantitativa, Prodanov e Freitas (2013) afirmam que essa considera que tudo pode ser traduzido em números, de modo a classificar e analisar as informações, requerendo, para tal, a utilização de técnicas estatísticas.

Com relação aos objetivos, esta pesquisa é classificada como explicativa, visto que, de acordo com Gil (2010), essas possuem como principais propósitos identificar fatores que colaboram para a ocorrência dos fenômenos estudados, aprofundando-se no conhecimento da realidade, podendo afirmar ainda que o conhecimento científico está baseado nos resultados obtidos nesse tipo de estudo. Klein et al. (2015) complementam que esse tipo de pesquisa tem a finalidade de testar uma teoria e suas relações de causa e efeito.

Sequentemente, estudos de casos correspondem ao procedimento técnico desta pesquisa, pois serão analisados dados de quatro balanças distintas. Berto e Nakano (2000) afirmam que constitui estudo de caso a análise aprofundada de um ou mais objetos (casos), fazendo o uso de múltiplos instrumentos para se coletar os dados, havendo interação entre pesquisador e objeto de pesquisa. Eisenhardt (1989) complementa que o estudo de 4 a 10 casos em conjunto com métodos da literatura permite resultar em uma maior validade

construtiva da pesquisa, pois com menos de quatro casos é difícil gerar alguma teoria com muita complexidade, tornando-se não convincente, enquanto com mais de 10 casos resulta em dificuldades para o pesquisador de trabalhar com tamanha complexidade e volume de dados.

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

As etapas cumpridas para a realização deste estudo estão descritas a seguir:

Etapa 1 – Identificação dos gráficos de controle (GC) que podem ser utilizados: o objetivo desta etapa é verificar em quais tipos de GC os dados coletados podem ser utilizados. Fez-se isso a partir da verificação da suposição de que os dados possuem uma distribuição normal. Para tal, utilizou-se os testes Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para um nível de significância de 5%. Esta etapa possui uma elevada importância uma vez que apenas o GC EWMA é robusto à não-normalidade dos dados, enquanto os GC de Shewhart e CUSUM possuem dependência da distribuição normal dos dados.

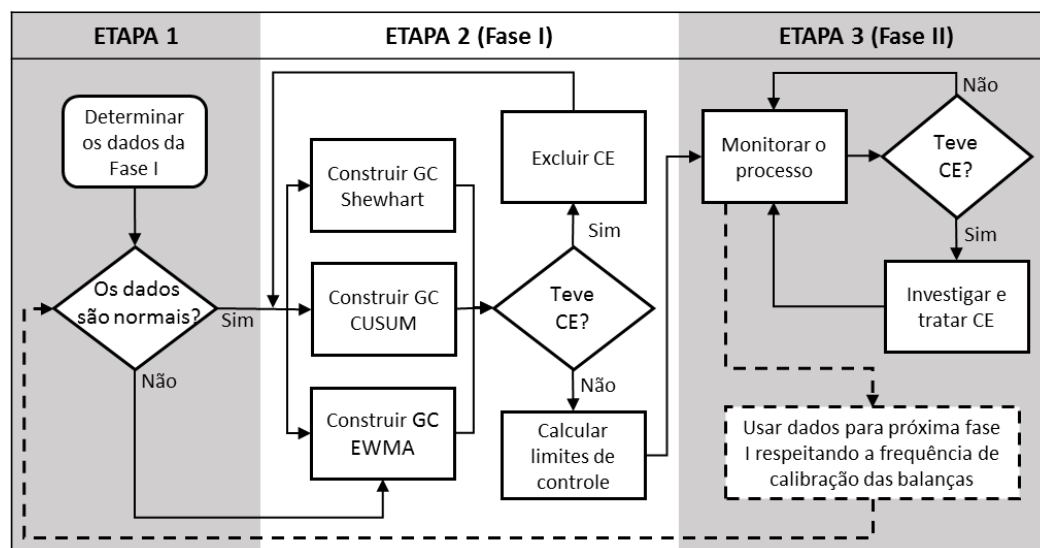
Etapa 2 – Realizar a construção e análise retrospectiva dos gráficos de controle (GC): nesta etapa realizou-se a construção, seguida pela análise retrospectiva, fase I da aplicação dos GC (Montgomery, 2016, p. 141), de todos os pontos de verificação de cada uma das balanças em estudo para que fossem estabelecidos os limites de controle de cada um dos GC. Quando esses GC sinalizaram causas especiais (CE) nesta fase, essas foram excluídas até obter-se um processo estável para que somente então os limites de controle fossem recalculados e definidos. As análises foram feitas considerando as frequências de calibração. Para a construção dos GC foi utilizado o aplicativo computacional Minitab Statistical Software 17.

Etapa 3 – Realizar o monitoramento do processo de medição: esta etapa configura a fase II (Montgomery, 2016, p. 141) do monitoramento do processo de medição, onde os dados coletados *online* foram plotados nos GC que tiveram seus limites estabelecidos a partir dos dados históricos analisados na Etapa 2 (fase I) deste estudo. Desse modo, realizou-se o monitoramento do processo de medição para verificar, de semana a semana, se os dados se mantiveram, ou não, estáveis. Foi utilizado o mesmo aplicativo computacional da Etapa 2 para a construção dos GC;

Etapa 4 – Analisar os resultados dos GC construídos: esta etapa visa identificar qual GC foi mais adequado para monitoramento do processo de medição da balança, a fim de identificar falta de estabilidade, de forma a sinalizar a perda da calibração ou qualquer outro comportamento atípico no instrumento de medição.

A Figura 1 apresenta o fluxograma seguido para a execução das etapas de 1 a 3 da pesquisa que define a sistemática geral para coleta e análise dos dados para realizar o monitoramento do processo.

Figura 1 – Fluxograma da sistemática geral empregada



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões referentes aos gráficos de controle das balanças do Laboratório A (seção 4.1) e do Laboratório B (seção 4.2), bem como a análise comparativa desses gráficos (seção 4.3) estão apresentados nesta seção.

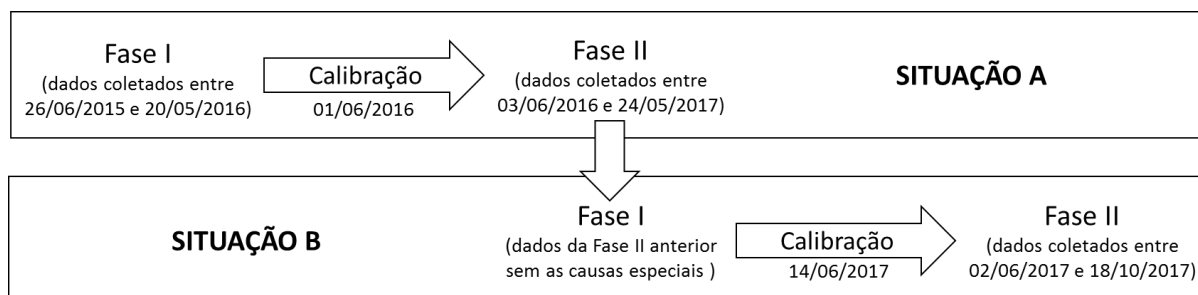
4.1 ANÁLISES DOS GRÁFICOS DE CONTROLE DO LABORATÓRIO A

Para cada ponto de verificação de cada uma das três balanças do laboratório de metrologia química foram estabelecidas duas situações: A e B. Cada situação é constituída pela fase I (análise retrospectiva dos dados) e fase II (monitoramento do processo), conforme Figura 1. O momento em que se encerra a fase I foi escolhido com base nas datas das calibrações, que ocorrem anualmente, em que as balanças foram submetidas.

A situação A estipulada para cada ponto de verificação de cada balança é composta por 82 dados, sendo que 42 desses (coletados entre 26/06/2015 e 20/05/2016) foram utilizados para a análise retrospectiva da construção dos gráficos de controle (GC) (fase I), enquanto 40 dados (coletados entre 03/06/2016 e 24/05/2017) foram utilizados para o monitoramento do processo (fase II). Já a situação B, é composta pelos mesmos 40 dados utilizados na fase II

anterior, sendo que, nesta situação, constituem a fase I, acrescidos por mais 20 dados (coletados entre 02/06/2017 e 18/10/2017) que foram utilizados para a nova fase II. Essa sistemática do uso dos dados (Figura 2) foi utilizada apenas para o Laboratório A.

Figura 2 – Sistemática do uso dos dados coletados



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Para iniciar a construção de um GC, é necessário que a suposição de normalidade dos dados seja verificada. Neste estudo, utilizaram-se os testes Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk nos dados que constituem as fases I das duas situações explicadas anteriormente, uma vez que esses dados darão origem aos limites de controle dos gráficos.

Os resultados obtidos através dos testes de normalidade estão demonstrados na Tabela 2. Nota-se que, exceto nos pontos de verificação de 500 g da BAL 016 e BAL 017, todos os *p-valores* obtidos foram inferiores ao nível de significância ($\alpha = 5\%$), sendo, portanto, dados não normais. Dessa forma, em todos os pontos em que o *p-valor* $< 0,05$, pode-se construir apenas GC EWMA, uma vez que esses são insensíveis à não normalidade dos dados.

Tabela 2 - Testes de normalidade dos dados das fases I das balanças do laboratório A

Autenticação da balança	Ponto de verificação	<i>p-valor</i> ($\alpha=5\%$)					
		SITUAÇÃO A			SITUAÇÃO B		
		Anderson-Darling	Kolmogorov-Smirnov	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Kolmogorov-Smirnov	Shapiro-Wilk
BAL 015	10 mg	0,00000796	0,00000059	0,00040588	0,00025847	0,00003262	0,00300054
	50 mg	0,00011247	0,00000786	0,00468620	0,00008151	0,00001123	0,00059432
	100 mg	0,00005833	0,00000110	0,00409817	0,00000009	0,00000003	0,00006354
BAL 016	0,5 g	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
	10 g	0,00000000	0,00000000	0,00000002	0,00000000	0,00000000	0,00000000
	500 g	0,10360226	0,15236001	0,15159372	0,00876380	0,02345559	0,01176595
BAL 017	5 g	0,00000000	0,00000000	0,00000020	0,00000000	0,00000000	0,00000030
	100 g	0,00000000	0,00000000	0,00000116	0,00001374	0,00003676	0,00058413
	500 g	0,42005912	0,46651503	0,41881497	0,54010900	0,45800430	0,70130679

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Verificadas as suposições de normalidade dos dados das fases I das aplicações dos GC, pode-se partir para a construção dos mesmos, os quais estão nas subseções 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3.

4.1.1 Gráficos de controle para a BAL 015

Os dados coletados a partir da BAL 015 não seguem uma distribuição normal, como mostrado na Tabela 2. Dessa forma, construiu-se apenas GC EWMA, considerando $\lambda = 0,25$.

Inicialmente, para a elaboração dos limites de controle dos gráficos EWMA na situação A, foram identificadas três causas especiais (CE), sendo uma delas no ponto de verificação de 10 mg e duas em 50 mg. Essas CE foram excluídas e os limites de controle recalculados, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de controle dos GC de 10 mg, 50 mg e 100 mg da situação A (BAL 015)

Ponto de verificação	Limite inferior	Limite central	Limite superior
10 mg	9,94887	10,00081	10,05275
50 mg	49,96936	50,01833	50,06730
100 mg	99,97668	100,02222	100,06775

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Em seguida, os dados que constituem o monitoramento do processo (fase II) também foram plotados nos gráficos cujos limites de controle já haviam sido calculados (Tabela 3). Os pontos de verificação 50 mg e 100 mg apresentaram um processo estável, enquanto em 10 mg foram sinalizadas duas causas especiais (Figura 3a). Essas, por sua vez, ocorreram nos dias 22/07/2016 e 31/03/2017, e podem ter como motivo a dificuldade de manuseio e posicionamento dos pesos padrão no centro do prato de pesagem da balança.

Para a elaboração da situação B, foram excluídas as causas especiais identificadas na fase II da situação A e utilizados os dados restantes dessa fase para o cálculo dos limites de controle (Tabela 4) dessa nova situação.

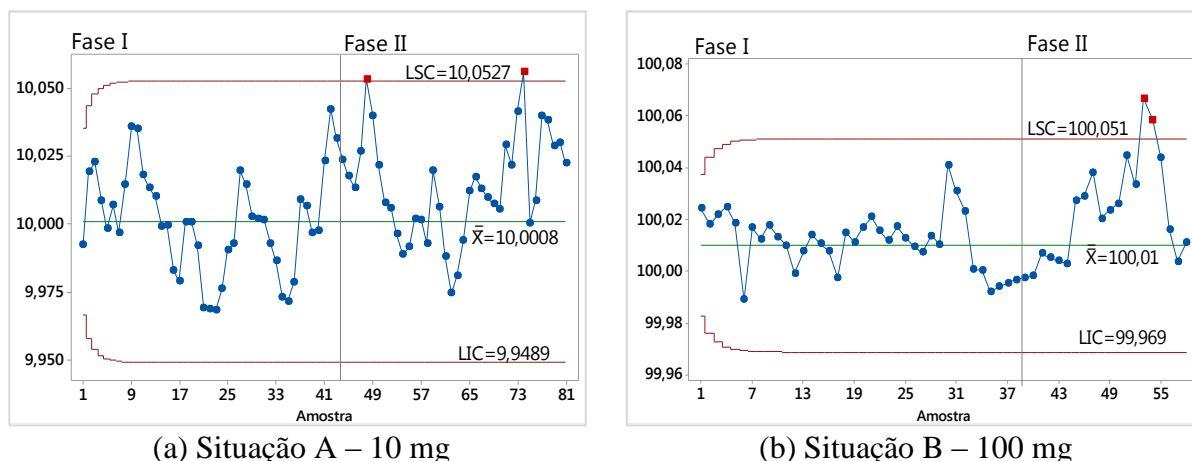
Tabela 4 - Limites de controle dos GC de 10 mg, 50 mg e 100 mg da situação B (BAL 015)

Ponto de verificação	Limite inferior	Limite central	Limite superior
10 mg	9,95440	10,00964	10,06489
50 mg	49,9524	50,01083	50,06925
100 mg	99,96876	100,0108	100,05124

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Inseridos nesses limites de controle os dados do monitoramento do processo (fase II) da situação B, foram detectadas apenas duas causas especiais (Figura 3b) no ponto de verificação de 100 mg (em 04/10/2017 e 12/10/2017), fato que pode estar relacionado à troca de operador, em junho de 2017, que realiza as verificações intermediárias. Os GC dos demais pontos de verificação mostraram-se estáveis (ver Apêndice A).

Figura 3 - GC EWMA (BAL 015): (a) Situação A – 10 mg; (b) Situação B – 100 mg



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

4.1.2 Gráficos de controle para a BAL 016

De acordo com os testes de normalidade desta balança, apenas no ponto de verificação de 500 g da situação A os dados são normais. Sendo assim, nesse ponto de verificação pode-se utilizar os três tipos de GC em estudo neste trabalho e compará-los. Em contrapartida, os dados pertencentes aos pontos de verificação de 0,5 g e 10 g não são normais, implicando na construção exclusiva do GC EWMA. Por se tratar de pesos padrão de pequenos valores de referência e de uma balança com uma resolução baixa (0,01 g), foi necessário utilizar $\lambda = 0,1$ pois, somente assim, o EWMA é capaz de detectar as pequenas mudanças desse processo.

Durante a fase I da situação A de 0,5 g e 10 g, foram detectadas seis causas especiais apenas nesse último, que foram excluídas para a definição dos limites de controle (Tabela 5).

Tabela 5 - Limites de controle dos GC de 0,5 g e 10 g da situação A (BAL 016)

Ponto de verificação	Limite inferior	Limite central	Limite superior
0,5 g	0,499148	0,499922	0,500697
10 g	9,99954	10,00064	10,00173

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Quanto ao monitoramento do processo (fase II, situação A), foi detectada uma causa especial para 0,5 g (Figura 4a), para um dado coletado em 26/05/2017. Já a Figura 4b apresenta duas causas especiais para 10 g coletadas em 03/02/2017 e 10/02/2017 e seu efeito causado nas nove amostras subsequentes. No que tange à situação B de 0,5 g e 10 g, foram excluídas as causas especiais apontadas na fase II da situação A para a instauração dos novos limites de controle (Tabela 6).

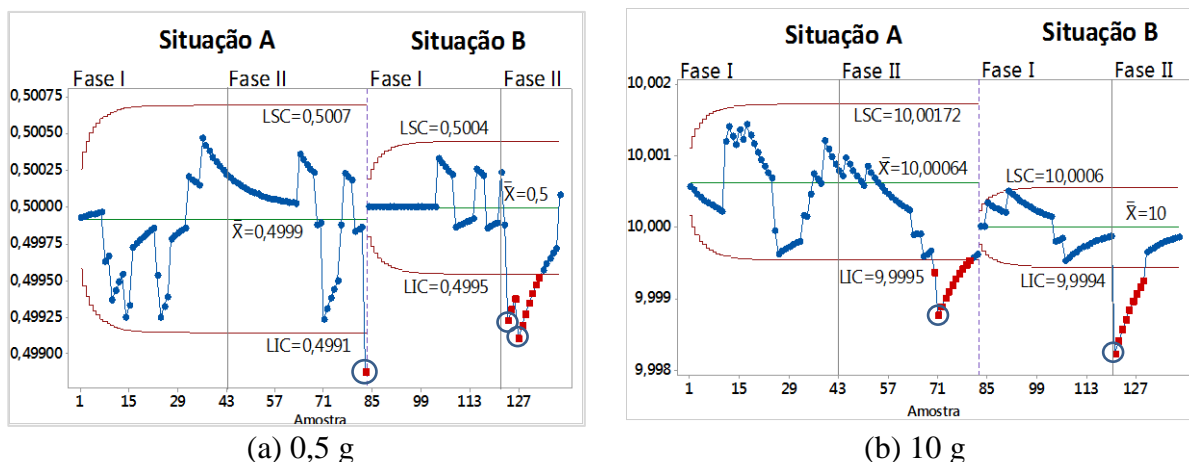
Tabela 6 - Limites de controle dos GC de 0,5 g e 10 g da situação B (BAL 016)

Ponto de verificação	Limite inferior	Limite central	Limite superior
0,5 g	0,49955	0,50000	0,50045
10 g	9,99944	10,00000	10,00056

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

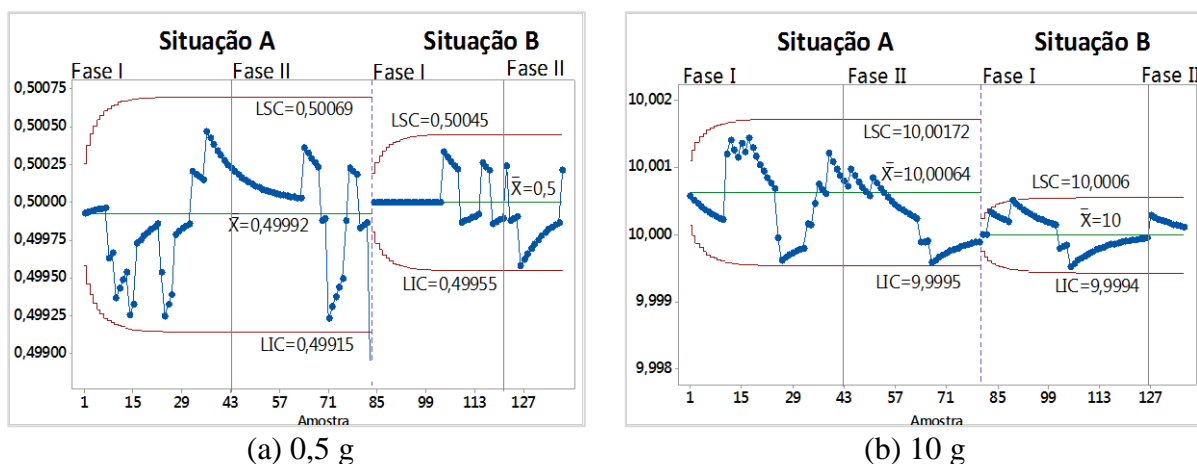
Durante o monitoramento *online* do processo na situação B, detectaram-se duas e uma causas especiais para 0,5 g e 10 g, respectivamente, que interferiram em oito amostras subsequentes em ambos os casos (Figura 4), todas ocorridas a partir do dia 02/06/2017. A Figura 5 mostra os GC sem essas causas especiais iniciais, pois, ao serem identificadas, devem ser investigadas e excluídas dos GC. Como possível fonte das causas especiais, tem-se a troca de operador que realiza as coletas dos dados.

Figura 4 - GC EWMA com causas especiais (BAL 016): (a) 0,5 g (b) 10 g



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 5 - GC EWMA sem causas especiais (BAL 016): (a) 0,5 g (b) 10 g



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Acerca do ponto de verificação de 500 g, apenas na situação A tem-se a suposição de normalidade atendida, sendo possível a construção dos três tipos de GC. Ao calcular dos limites de controle do CUSUM ($h = 3$ e $k = 0,5$), EWMA e Shewhart (contidos na Tabela 7), foram detectadas 13 causas especiais nos dos dois primeiros GC e 12 no último.

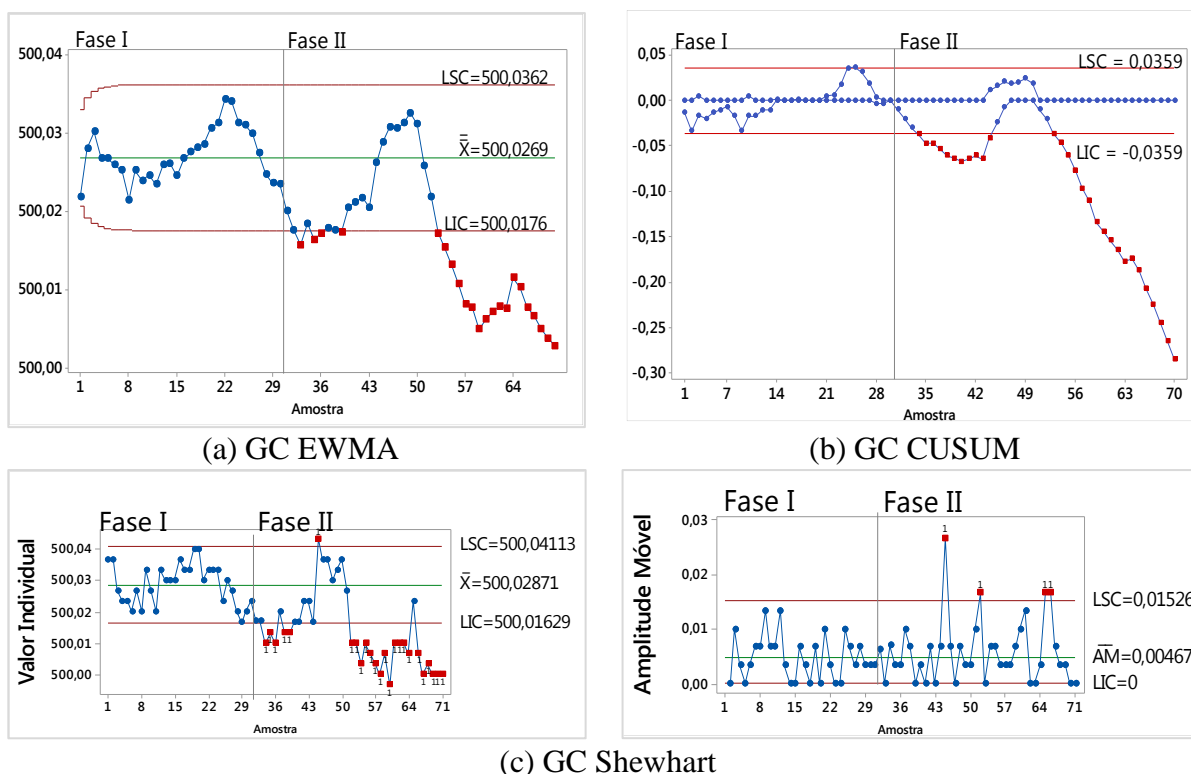
Tabela 7 – Limites de controle dos GC de 500 g da situação A (BAL 016)

Tipo de gráfico de controle	Limite inferior	Limite central	Limite superior
CUSUM	-0,03591	0,00000	0,03591
EWMA	500,01756	500,02690	500,03623
Shewhart (I)	500,01630	500,02871	500,04112
Shewhart (AM)	0,00000	0,00467	0,01525

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Para a fase II dessa situação A, todos os GC identificaram causas especiais. Os GC EWMA (Figura 6a) e Shewhart-I (Figura 6c) sinalizaram a suas primeiras causas especiais no dia 01/07/2016, enquanto o CUSUM (Figura 6b) revela duas semanas após, no dia 15/07/2016. Essa mudança no processo pode ter como fonte a calibração da balança, realizada no dia 01/06/2016. A partir dessa calibração, nota-se que a média das amostras foi deslocada para um valor mais próximo do valor nominal do peso padrão (500 g), podendo-se afirmar, portanto, que essa causas especiais abaixo do limite de controle inferior são desejadas.

Figura 6 - GC da Situação A de 500 g (BAL 016): (a) EWMA; (b) EWMA; (c) Shewhart



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Evidenciou-se também que apenas os GC de Shewhart identificaram causas especiais (uma no GC de valores individuais e duas no GC de amplitude móvel) acima dos limites de controle superior. Essas causas especiais podem ter como origem a não espera do tempo de estabilização da balança ou estabilização térmica dos pesos, que pode indicar falta de treinamento do operador, ou alguma outra situação atípica no laboratório.

Em seguida, o processo retorna para um período de estabilidade de aproximadamente três meses em todos os GC, quando posteriormente, esses retornam a indicar causas especiais (também desejadas), sinalizando uma acentuada diminuição da média dos valores coletados.

Como exposto anteriormente, os dados da fase II da situação A (em 500 g) que constituem a fase I da situação B não são normais, construiu-se apenas o GC EWMA. Neste caso em particular, as causas especiais antes identificadas foram mantidas para o cálculo dos limites de controle da situação B visto que essas são desejadas. Durante a fase I dessa nova situação, ao serem calculados os limites de controle, foram identificadas 15 causas especiais que foram excluídas posteriormente. Esses limites de controle são os seguintes: (i) LCI = 500,001924; (ii) LC = 500,0063333; (iii) LCS = 500,0107422. Ao decorrer do monitoramento *online* desse processo, não foram sinalizadas causas especiais e descontrole do mesmo (ver Apêndice B).

4.1.3 Gráficos de controle para a BAL 017

Assim como na BAL 016, a BAL 017 também teve a suposição de normalidade aceita somente no ponto de verificação de 500 g, sendo possível, por tanto, a construção dos gráficos de controle CUSUM, EWMA e Shewhart (ver Apêndice C). Para o restante (5 g e 100 g), pode-se construir apenas o EWMA.

Para a construção dos gráficos de controle EWMA da situação A nos pontos de 5 g e 100 g, foram detectadas durante a fase I, respectivamente, cinco e três causas especiais que foram excluídas, obtendo-se, assim, os limites de controle dos gráficos (Tabela 8). Durante a fase II dessa balança nessa situação, não foram detectadas causas especiais.

Tabela 8 - Limites de controle dos GC de 5 g e 100 g da situação A (BAL 017)

Ponto de verificação	Limite inferior	Limite central	Limite superior
5 g	4,99523	4,99873	5,00224
100 g	99,99388	99,99783	100,00178

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Destaca-se que, assim como nos menores pontos de verificação da BAL 016, foi utilizado um $\lambda = 0,1$ para 5 g da BAL 017, fato que se deve à resolução (0,01 g) da balança e ao pequeno valor de referência do peso padrão. Para os demais, utilizou-se $\lambda = 0,25$.

Ao utilizar apenas os dados restantes da fase II da situação anterior para a determinação dos limites de controle desta nova situação, foram detectadas três novas causas especiais pelo GC EWMA de 100 g. Essas causas foram excluídas, os limites de controle recalculados (Tabela 9).

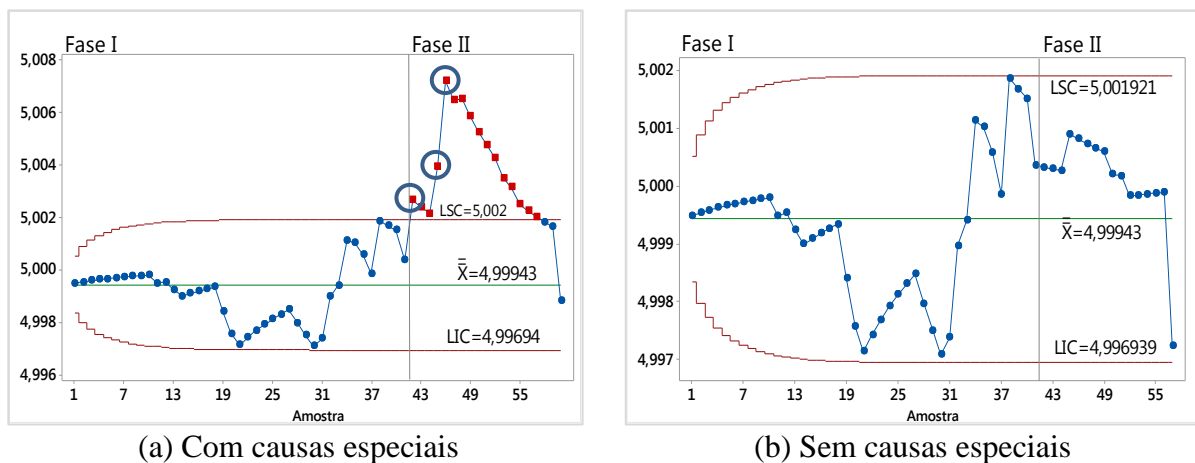
Tabela 9 – Limites de controle dos GC de 5 g e 100 g da situação B (BAL 017)

Ponto de verificação	Limite inferior	Limite central	Limite superior
5 g	4,99694	4,99943	5,00192
100 g	99,99560	99,99886	100,00212

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Durante o monitoramento *online* da situação B, os dados para o ponto de verificação de 5 g apresentaram três causas especiais acima dos limites de controle que foram coletadas nos dias 01/06/2017, 07/07/2017 e 14/07/2017. A Figura 7a apresenta o GC EWMA com essas três principais causas especiais (em destaque) e sua influência nos dados subsequentes. Já a Figura 7b, representa o GC EWMA de tal forma que, detectada cada uma das três causas especiais originais, parou-se o processo e investigaram-se os possíveis fatores que levaram ao seu descontrole estatístico.

Figura 7 - GC EWMA da Situação B de 5 g (BAL 017): (a) Com CE ; (b) Sem CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Como possíveis fatores da alteração no processo, tem-se à troca de operador ocorrida no dia da primeira causa especial e o não funcionamento do ar condicionado (desde 15/05/2017) da sala onde a balança se encontra. Esse último fator pode estar relacionado ao

aumento considerável da média do processo ocorrido antes mesmo de serem sinalizadas as causas especiais. Quanto ao GC EWMA do ponto de verificação de 100 g, não foram apresentadas causas especiais, estando, portanto, sob controle estatístico.

Tendo em vista que os dados do ponto de verificação de 500 g são normais, pode-se construir os três tipos de GC. Sendo assim, para a situação A, calcularam-se os limites de controle para cada um desses gráficos (Tabela 10). Para isso, foram detectadas e excluídas, na fase I, catorze causas especiais no CUSUM ($h = 3$ e $k = 0,5$), onze no EWMA e uma no GC de Shewhart para valores individuais.

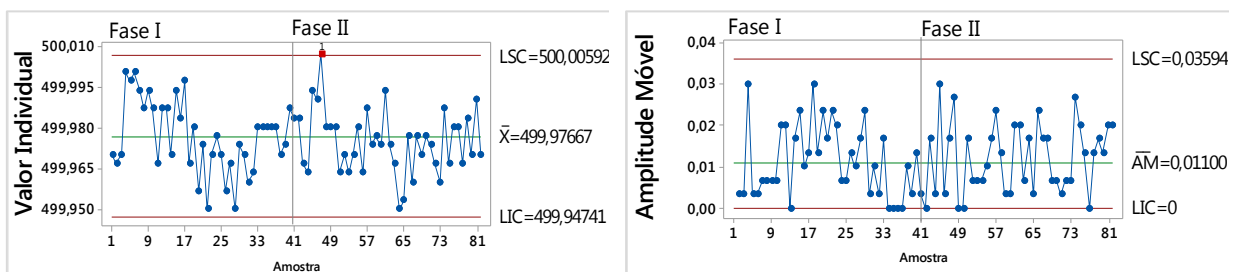
Tabela 10 – Limites de controle dos GC para 500 g da situação A (BAL 017)

Tipo de gráfico de controle	Limite inferior	Limite central	Limite superior
CUSUM	-0,04169	0,00000	0,04169
EWMA	499,96439	499,97645	499,98851
Shewhart (I)	499,94741	499,97667	500,00592
Shewhart (AM)	0,00000	0,01100	0,03594

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Ao serem inseridos os dados coletados durante o monitoramento dessa situação, apenas o GC de Shewhart de valores individuais detectou uma causa especial (dado coletado em 15/07/2016). Considerando que cada dado plotado nos GC restantes sofrem ponderação a partir dos dados anteriores, tem-se essa causa especial identificada em Shewhart como algo dentro dos limites de controle, concluindo-se, assim, que o processo está estável. Portanto, pode-se inferir que essa causa especial detectada pelo GC de Shewhart é, na realidade, um erro do tipo I, tendo como possíveis fontes: (i) a movimentação de pessoas na sala durante a realização da pesagem; (ii) resíduo deixado pelo pano utilizado para a limpeza do prato de pesagem da balança antes da medição.

Figura 8 – GC de Shewhart da Situação A de 500 g (BAL 017)



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Já para a situação B ponto de verificação de 500 g, foram calculados os limites de controle a partir dos dados restantes da fase II da situação anterior, excluindo as novas causas especiais, caso identificadas. Apenas o CUSUM sinalizou causas especiais, seis ao todo,

durante a definição dos limites de controle dessa etapa. Esses limites de cada um dos gráficos de controle estão contidos na Tabela 11. Durante a fase II dessa situação, todos os GC não apresentaram causas especiais, estando, portanto, o processo sob controle estatístico.

Tabela 11 – Limites de controle dos GC de 500 g da situação B (BAL 017)

Tipo de gráfico de controle	Limite inferior	Limite central	Limite superior
CUSUM	0,03397	0,00000	-0,03397
EWMA	499,96191	499,97447	499,98704
Shewhart (I)	499,94184	499,97367	500,00549
Shewhart (AM)	0,00000	0,01197	0,03910

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

4.2 ANÁLISES DOS GRÁFICOS DE CONTROLE DO LABORATÓRIO B

Os 41 dados referentes a cada ponto de verificação da balança desse laboratório foram coletados entre 29/05/2017 a 16/10/2017, sendo coletados em três dias por semana, desconsiderando o período de férias em que o laboratório não esteve em funcionamento. A fim de calcular os limites de controle durante a análise retrospectiva dos dados de cada ponto de verificação (fase I), foram utilizados 30 dados coletados entre 29/05/2017 e 21/08/2017, tendo, portanto, outros 11 dados coletados para o monitoramento *online* do processo (fase II).

Diferentemente do outro laboratório em análise, o Laboratório B faz a coleta de dados para as correções médias conforme orienta o documento DOQ-CGCRE-036 (INMETRO, 2012a, p. 4). Dessa forma, realizaram-se os testes de normalidade (Tabela 12) dessas correções médias que constituem a fase I de cada ponto de verificação.

Tabela 12 – Testes de normalidade dos dados das fases I da BAL 002

Autenticação da balança	Ponto de verificação	<i>p</i> -valor ($\alpha=5\%$)		
		Anderson- Darling	Kolmogorov-Smirnov	Shapiro-Wilk
BAL 002	50 g	0,00290453	0,003177735	0,006159472
	500 g	0,00586060	0,002605562	0,026600045
	1000 g	0,63980560	0,693115273	0,693382012
	3000 g	0,08397134	0,051119383	0,293851864

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Observa-se que apenas nos dois maiores pontos de verificação (1000 g e 3000 g) tem-se a suposição de normalidade das correções médias aceita (p -valor > 0,05). Dessa forma, o EWMA é o único gráfico de controle (GC) que pode ser construído para os pontos de verificação restantes com um $\lambda = 0,25$.

A Tabela 13 apresenta os limites de controle calculados durante a fase I das correções médias resultantes dos dados coletados para os pontos de verificação de 50 g e 500 g, onde

foram necessárias as exclusões de duas e três causas especiais, respectivamente. Em ambos os casos, durante o monitoramento do processo (fase II), não foram identificadas causas especiais, concluindo-se, portanto, que o mesmo está estável.

Tabela 13 – Limites de controle dos GC das correções de 50 g e 500 g (BAL 002)

Ponto de verificação	Limite inferior	Limite central	Limite superior
50 g	-0,00442	-0,00107	0,00228
500 g	0,00141	0,00570	0,00999

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Quanto aos pontos de verificação de 1000 g e 3000 g, pode-se construir os GC CUSUM, EWMA e Shewhart. Para a construção dos limites de controle para os valores das correções médias calculadas a partir dos dados coletados em 1000 g, foram identificadas e posteriormente excluídas, três causas especiais no CUSUM, duas no EWMA e nenhuma nos GC de Shewhart (I/AM). Os limites de controle calculados estão contidos na Tabela 14.

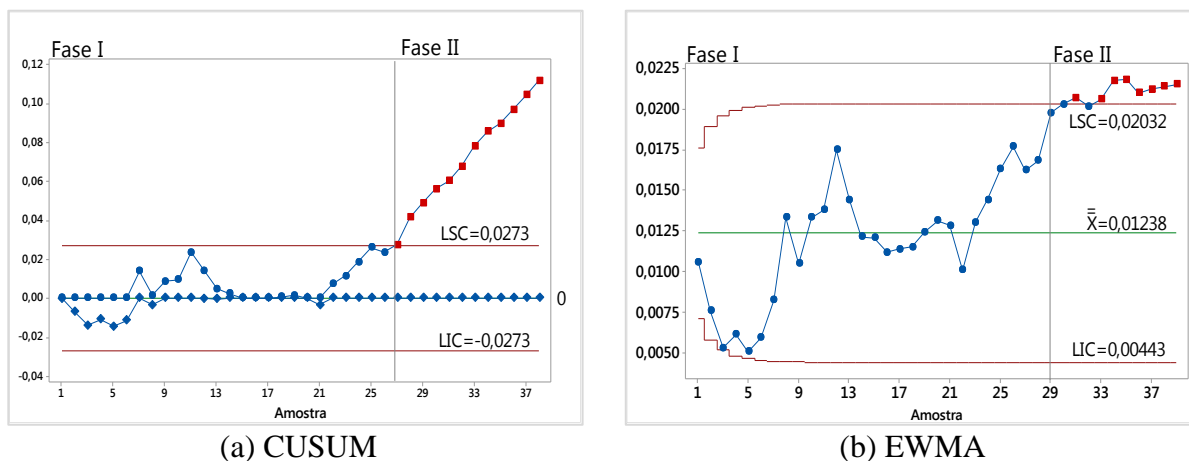
Tabela 14 – Limites de controle dos GC das correções médias de 1000 g (BAL 002)

Tipo de gráfico de controle	Limite inferior	Limite central	Limite superior
CUSUM	-0,02725	0,00000	-0,02725
EWMA	0,00443	0,01238	0,02032
Shewhart (I)	-0,01200	0,01123	0,03447
Shewhart (AM)	0,00000	0,00873	0,02854

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Durante a fase II da aplicação desses GC, o CUSUM (Figura 9a) e o EWMA (Figura 9b) apresentaram um processo em descontrole estatístico, enquanto os GC de Shewhart mostram um processo estável. Ao todo, o CUSUM ($h = 3$ e $k = 0,5$) sinalizou que todas as onze correções médias calculadas ao decorrer da fase II são causas especiais, ao mesmo tempo que o EWMA identificou oito pontos além do limite de controle superior.

Figura 9 – GC para a correção de 1000 g (BAL 002): (a) CUSUM; (b) EWMA



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Destaca-se que o aumento da média das correções médias do processo nos últimos pontos plotados é detectada de forma mais sensível nos GC CUSUM e EWMA, enquanto nos GC de Shewhart é sinalizada apenas uma pequena tendência de acréscimo acima do limite central (ver Apêndice D). Essa mudança no processo pode ter relação com os seguintes fatos: (i) a partir do dia 01/08/2017, a balança passou a ficar conectada à fonte de energia em tempo integral; (ii) as últimas quatro coletas foram realizadas por um novo operador.

Em relação ao ponto de verificação de 3000 g, os limites de controle (Tabela 15) foram obtidos do mesmo modo que o anterior e os GC não sinalizaram causa especial nessa fase I.

Tabela 15 – Limites de controle dos GC das correções médias de 3000 g (BAL 002)

Tipo de gráfico de controle	Limite inferior	Limite central	Limite superior
CUSUM	-0,02476	0,00000	0,02476
EWMA	-0,00958	-0,00022	0,00914
Shewhart (I)	-0,02498	-0,00022	0,02454
Shewhart (AM)	0,00000	0,00931	0,03042

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

As correções médias que compõe a fase II (monitoramento *online*) foram inseridas nos GC e não foram identificadas causas especiais, sendo, portanto, um processo estável comprovado por todos os gráficos (Apêndice D).

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA

A partir dos resultados apresentados nas subseções anteriores, destacam-se algumas circunstâncias e fatos. Como pode-se observar na Tabela 16, nos pontos de verificação inferiores a 10 g das balanças de menor resolução (0,01 g) foi necessária a utilização de $\lambda = 0,1$ para que o GC EWMA detectasse as pequenas mudanças do processo. Já para a balança de maior resolução (0,0001 g), foi possível empregar $\lambda = 0,25$, mesmo sendo utilizados pesos padrão de valores em milésimos de grama. Outro fato que deve ser evidenciado é que em 83% das situações em que se estudou o ponto de verificação de 500 g foi possível a construção dos três tipos de GC deste estudo (CUSUM, EWMA e Shewhart), fato que se deve à normalidade dos dados. Salienta-se também que o GC EWMA é o único que pode ser utilizado em 100% dos pontos de verificação e também de forma exclusiva para 77% das situações estabelecidas, fato atribuído à falta de normalidade dos dados.

Tabela 16 – Gráficos de controle (GC) e λ utilizados para cada situação das balança

Balança	Resolução	Ponto de verificação	GC para situação A	GC para a situação B	λ para o EWMA
BAL 015	0,0001 g	10 mg	EWMA	EWMA	0,25
		50 mg	EWMA	EWMA	0,25
		100 mg	EWMA	EWMA	0,25
BAL 016	0,01 g	0,5 g	EWMA	EWMA	0,10
		10 g	EWMA	EWMA	0,10
		500 g	CUSUM, EWMA, Shewhart	EWMA	0,25
BAL 017	0,01 g	5 g	EWMA	EWMA	0,10
		100 g	EWMA	EWMA	0,25
		500 g	CUSUM, EWMA, Shewhart	CUSUM, EWMA, Shewhart	0,25
BAL 002	0,01 g	50 g		EWMA	0,25
		500 g		EWMA	0,25
		1000 g		CUSUM, EWMA, Shewhart	0,25
		3000 g		CUSUM, EWMA, Shewhart	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Com relação às causas especiais (CE), tem-se que essas foram identificadas em 41% dos GC, sendo sinalizadas em 33% dos GC das situações da BAL 015, 87,5% dos GC da BAL 016, 20% dos GC da BAL 017 e 25% dos GC da BAL 002. De forma geral, as CE identificadas durante as fases II da situação A da BAL 015 podem ser atribuídas à dificuldade de manuseio dos pesos padrão uma vez que são muito pequenos e difíceis de serem posicionados precisamente no centro do prato de pesagem da balança. Para as balanças BAL 016 e BAL 017, em 67% das CE identificadas em 500 g podem ser atribuídas à calibração das mesmas, uma vez que podem ter sido submetidas a algum tipo de alteração, como seu nivelamento e outros ajustes, por exemplo. Esse fato ficou evidenciado pela maior aproximação da média do processo ao valor nominal do peso padrão, gerando causas especiais desejadas na BAL 016. No que se refere às situações B, todas as CE identificadas na BAL 015, BAL 016 e BAL 017 podem estar relacionadas à troca de operador que realiza as verificações intermediárias, bem como o fato do ar condicionado da sala em que as duas últimas estão situadas ter sido danificado, em 15/05/2017, impossibilitando o funcionamento do mesmo. Quanto a BAL 002, tem-se como possível fontes das CE o fato dessa passar a estar conectada em tempo integral na fonte de energia e a troca de operador nas últimas quatro coletas.

A nível de comparação entre os GC CUSUM, EWMA e Shewhart nas situações em que foram possíveis suas construções (em 23% do total), a Tabela 17 apresenta o número de amostras que foram necessárias para cada GC sinalizar, a partir do início das fases II, as CE dos períodos de descontrole de cada balança.

Tabela 17 – N° de amostras necessárias para sinalizar causas especiais e n° de causas especiais

Balança	Descontrole	CUSUM		EWMA		Shewhart (I)		Shewhart (AM)	
		N° de amostras	N° de CE	N° de amostras	N° de CE	N° de amostras	N° de CE	N° de amostras	N° de CE
BAL 016	1°	3	11	2	9	2	5	14	1
	2°	22	18	22	18	24	15	34	2
BAL 017	Único	-	0	-	0	6	1	-	0
BAL 002	Único	0	12	1	8	-	0	-	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Tratando-se do monitoramento das correções médias (BAL 002), o CUSUM indicou as CE de forma mais rápida que os outros GC. Contudo, ao ser comparado ao GC EWMA, não há uma diferença expressiva na detecção das CE, visto que esse sinalizou antes as causas especiais do monitoramento do primeiro descontrole da BAL 016 e ao mesmo instante que o CUSUM no segundo descontrole. Observa-se também, nessa mesma balança (onde não é calculada a correção média), que o GC de Shewhart (I) também apresentaram a primeira causa especial do primeiro descontrole uma semana antes que o CUSUM. Quanto à BAL 017, somente o GC de Shewhart (I) apresentou uma causa especial, enquanto os outros GC indicaram um processo estável, podendo ser, essa CE um erro do tipo I.

Sendo assim pode-se concluir com esse estudo de caso que o GC EWMA pode ser utilizado em 100% dos pontos de verificação, sendo, portanto, o mais adequado para monitoramento do processo de medição de balanças eletrônicas. Ressalta-se também que, devido aos problemas de linearidade que as balanças possuem, explicitados pelo DOQ-CGCRE-036 (INMETRO, 2012a), a probabilidade dessas fornecerem dados normais ao realizar a pesagem de massas com valores nominais acima de 500 g é maior. Dessa forma, ao serem construídos os três tipos de GC, não foi possível concluir entre o CUSUM e o EWMA qual indica as CE primeiro uma vez que, para o monitoramento das correções médias (Laboratório B) o CUSUM detectou as CE antes, enquanto para o monitoramento dos valores coletados sem o cálculo dessa correção (Laboratório A) o EWMA demonstrou-se mais adequado. Recomenda-se ainda ao Laboratório A que realize sua coleta de dados conforme o INMETRO (2012a) para que possa ser realizado o cálculo da correção média e seu respectivo monitoramento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizar o monitoramento dos processos de medição de laboratórios de ensaio e calibração pertence à garantia da qualidade dos resultados gerados pelos mesmos. Uma das maneiras para fazer esse monitoramento é através do uso dos gráficos de controle (GC). Dessa

forma, este trabalho foi aplicado em dois laboratórios de ensaios e calibrações que estão em fase de adequação à norma ABNT NBR ISO/IEC 17025.

Propôs-se realizar a comparação entre três tipos de GC (CUSUM, EWMA Shewhart) com o objetivo identificar qual é o mais adequado para sinalizar mudanças no processo de pesagem realizado durante as verificações intermediárias de quatro balanças eletrônicas, sendo três dessas pertencentes a um laboratório de metrologia química, e uma a um laboratório de metrologia mecânica.

Para dar início às etapas desta pesquisa, foi necessária a estruturação de uma sistemática de uso dos dados (Figura 2), onde foram estabelecidos os períodos em que as análises dos GC ocorreram. Iniciada a Etapa 1, identificou-se que em 77% das situações dos pontos de verificação das balanças a distribuição de probabilidade dos dados não é normal, implicando no uso exclusivo do GC EWMA (robusto à não normalidade). Durante a Etapa 2 (fase I da aplicação dos GC), evidenciou-se que, para pontos de verificação menores que 10 g em balanças de resolução de 0,01 g, deve-se utilizar $\lambda = 0,1$ para que o GC EWMA detecte as pequenas mudanças do processo. Para o restante das situações, empregou-se $\lambda = 0,25$. No que se refere à Etapa 3 (fase II), foram identificadas causas especiais em 41% das situações. Essas causas especiais podem ser atribuídas, por exemplo, à dificuldade de manuseio dos pesos padrão de menor tamanho (BAL 015), à calibração das balanças e ao não funcionamento do ar condicionado da sala (BAL 016 e BAL 017), à presença de terceiros na sala durante a coleta de dados (BAL 016), à troca de operador que realiza as verificações intermediárias (em todas as balanças) e à balança passar a estar conectada *full-time* na fonte de energia (BAL 002).

Quanto à comparação entre os três GC em análise neste estudo, concluiu-se que o EWMA é a melhor alternativa a ser utilizada pelos laboratórios para o monitoramento do processo de medição em balanças eletrônicas, uma vez que podem ser utilizados para todos os pontos de verificação, independentemente da normalidade dos dados. Também se recomenda ao Laboratório A que monitore as correções médias, de acordo com o documento orientativo DOQ-CGCRE-036 (INMETRO, 2012a, p. 05).

Como estudos futuros, sugere-se a coleta de novos dados de balanças eletrônicas a fim de investigar se os resultados obtidos neste estudo se repetem. Outra possibilidade de estudo é a comparação dos três tipos de gráficos de controle desta pesquisa em dados coletados a partir de verificações intermediárias de outros tipos de instrumentos de medição para comparar se as conclusões aqui obtidas serão idênticas ou distintas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO/IEC 17025:2005**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005.
- ALBANO, F. M.; RAYA-RODRIGUEZ, M. T. **Validação e garantia da qualidade de ensaios laboratoriais**. 1. ed. Porto Alegre: Rede Metrológica RS, 2009.
- AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG). **Análise do Sistema de Medição – MSA**. Trad. Instituto da Qualidade Automotiva. 4. ed. São Paulo, 2010.
- BERTO, R. M. S.; NAKANO, D. N. A Produção Científica nos Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção: Um Levantamento de Métodos e Tipos de Pesquisa. **Produção**, v. 9, n. 2, p. 65-76, 2000.
- CARINHAS, D.; BORGES, C.; INFANTE, P. Aplicação de cartas de controlo na monitorização de resultados de ensaios de comparação interlaboratorial. In: JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA, 4., 2016, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Instituto Hidrográfico, 2016. p. 295-298.
- CRUZ, D. V.; CUNHA FILHO, M.; FALCÃO, A. P. S. T. Controle estatístico de processos aplicado ao monitoramento do pH e turbidez das águas no abastecimento de Campina Grande – PB. **Rev. Bras. Biom.**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 459-477, 2014.
- DUARTE JÚNIOR, N. S. F. Sistema de Gestão de Medição: importante, mas nem sempre reconhecido. **Revista Metrologia & Instrumentação**, v. 7, n. 56, 2008.
- EISENHARDT, K. M. Building Theories from Case Study Research. **Academy of Management Review**, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.
- EUROPEAN ASSOCIATION OF NATIONAL METROLOGY INSTITUTES (EURAMET). **Calibration Guide No. 18**: Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments – Version 4.0. Brunsvique (Alemanha): EURAMET, 2015.
- FELIPPES, B. A.; AGUIAR, J. G.; DINIZ, A. C. G. C. Sistema da qualidade em laboratórios universitários: incentivo ao ensino, pesquisa e extensão. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 30, n. 2, p. 14-23, 2011.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- HENNING, E.; ARAUJO, N. G. A.; ALVES, C. C.; ZVIRTES, L. Aplicação de gráficos de controle multivariados baseados na projeção de dados via Análise de Componentes Principais. **Revista Eletrônica Produção em Foco**, v. 1, p. 44-66, 2011.
- HENNING, E.; KONRATH, A. C.; KALBUSCH, A.; ZOLDAN, I. M.; CORREA, N. M. Aplicação de gráficos de controle em redes de abastecimento predial de água. **Ciência & Engenharia**, v. 25, n. 2, p. 09-17, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **DOQ-CGCRE-036**: Orientações sobre verificação intermediária das balanças – Revisão 00. Duque de Caxias: INMETRO, 2012a.

_____. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM). Duque de Caxias: INMETRO, 2012b.

JOHNSON, R. A.; BAGSHAW M. The Effect of Serial Correlation on the Performance of CUSUM Tests. **Technometrics**, v. 16, n. 1, 1974.

KLEIN, A. Z.; SILVA, L. V.; MACHADO, L.; AZEVEDO, D. **Metodologia de pesquisa em administração**: uma abordagem prática. São Paulo: Atlas, 2015.

LOUZADA, F.; DINIZ, C.; FERRIERA, P.; FERREIRA, E. **Controle Estatístico de Processo**: Uma abordagem prática para cursos de Engenharia e Administração. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MOURA, S. S.; COSTA, S. R. R. Estudo da utilização de materiais de referência nas análises de água por laboratórios envolvidos no sistema de acreditação. **Produção**, v. 19, n. 2, p. 304-316, 2009.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods - Measurement Process Characterization**. Gaithersburg (Estados Unidos da América), 2012. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>>. Acesso em: 05 ago. 2017.

ORGANISATION INTERNATIONALE DE MÉTROLOGIE LÉGALE (OIML). **International Recommendations 76-1**: Nonautomatic weighing instruments Part 1: Metrological and technical requirements – Tests. Paris (França): OIML, 2006.

PRODANOV, C. C; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

ROTONDARO, R. G. **Seis sigma**: Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços. São Paulo: Atlas, 2012.

SAMOHYL, R.W. **Controle Estatístico da Qualidade**. Rio de Janeiro: Campus, 2009.

SOMMER, K.; CHAPPELL, S.; KOCHSIEK, M. Calibration and verification: Two procedures having comparable objectives and results. **OIML Bulletin**, v. 42, n. 1, p. 5-12, 2001.

SOUZA, D. R. C.; MARIN, S. A.; FERRACINI, V. L.; TURUTA, T. B.; OLIVARES, T. B. Aplicação de cartas controle para avaliar resultados na verificação de balança. In: CONGRESSO VIRTUAL IBEROAMERICANO SOBRE GESTIÓN DE CALIDAD EN LABORATORIOS, 7., 2014, Espanha. **Anais eletrônicos...** [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em:

<<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/117206/1/2014AA63.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2017.

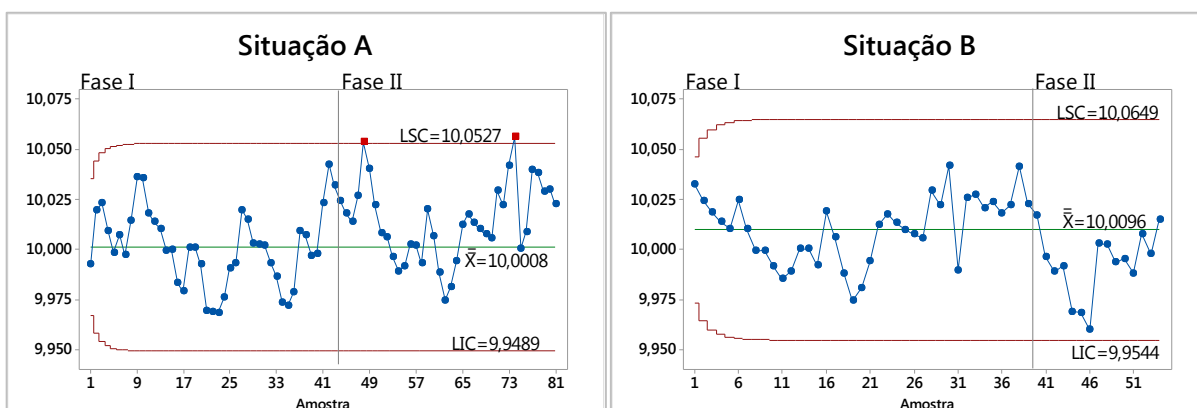
UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE (UKAS). **LAB 14:** In-house Calibration and Use of Weighing Machines (Edition 5). Middlesex: UKAS, 2015.

WALTER, O. M. F. C.; HENNING, E.; CARDOSO, M. E.; SAMOHYL, R. W. Aplicação individual e combinada dos gráficos de controle Shewhart e CUSUM: uma aplicação no setor metal mecânico. **Gest. Prod.**, v. 20, n. 2, p. 271-286, 2013.

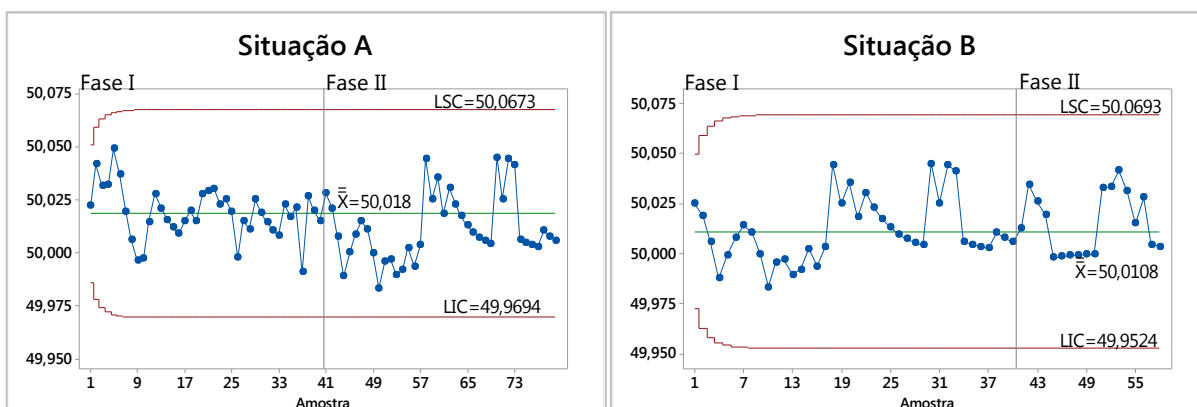
WERKEMA, M. C. C. **Avaliação de Sistemas de Medição**. 1. ed. Belo Horizonte: Werkema, 2006.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE CONTROLE PARA BAL 015

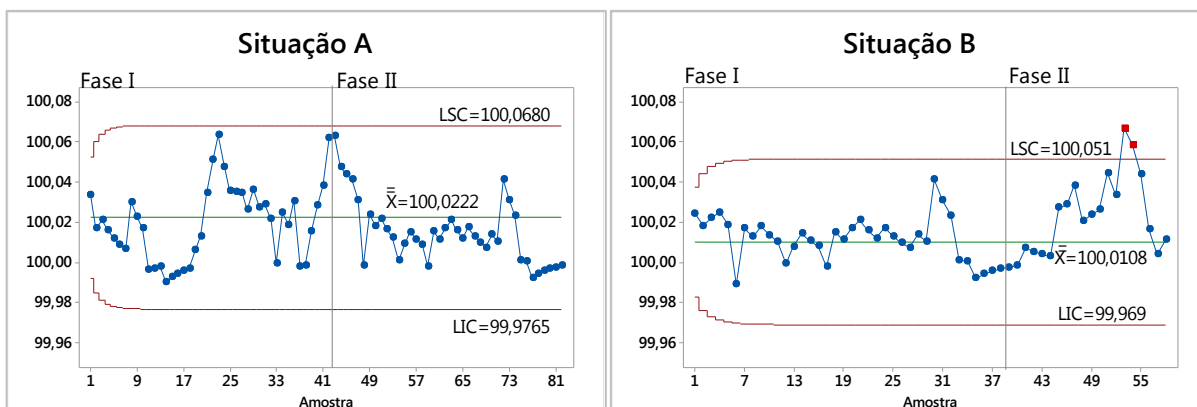
Gráficos de controle EWMA para 10 mg da BAL 015



Gráficos de controle EWMA para 50 mg da BAL 015

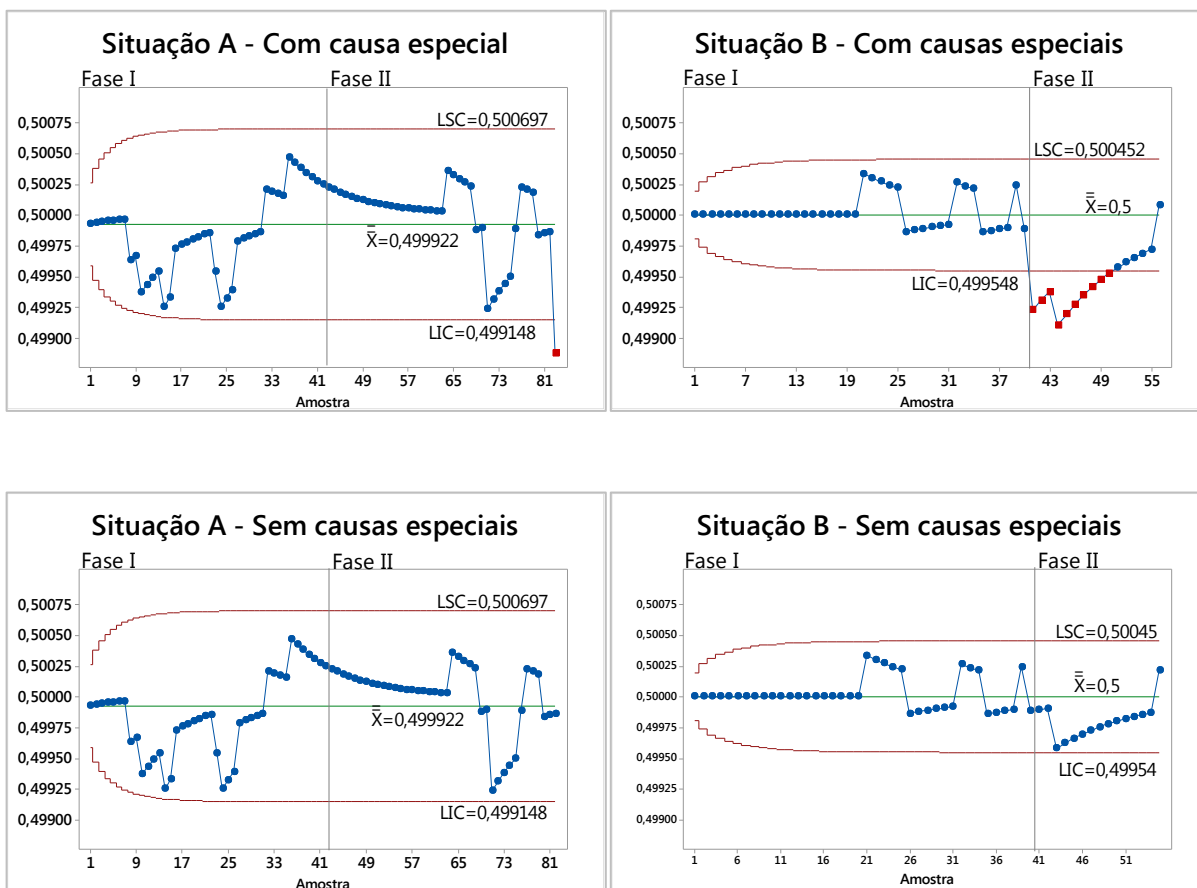


Gráficos de controle EWMA para 100 mg da BAL 015



APÊNDICE B – GRÁFICOS DE CONTROLE PARA BAL 016

Gráficos de controle EWMA para 0,5 g da BAL 016



Gráficos de controle EWMA para 10 g da BAL 016

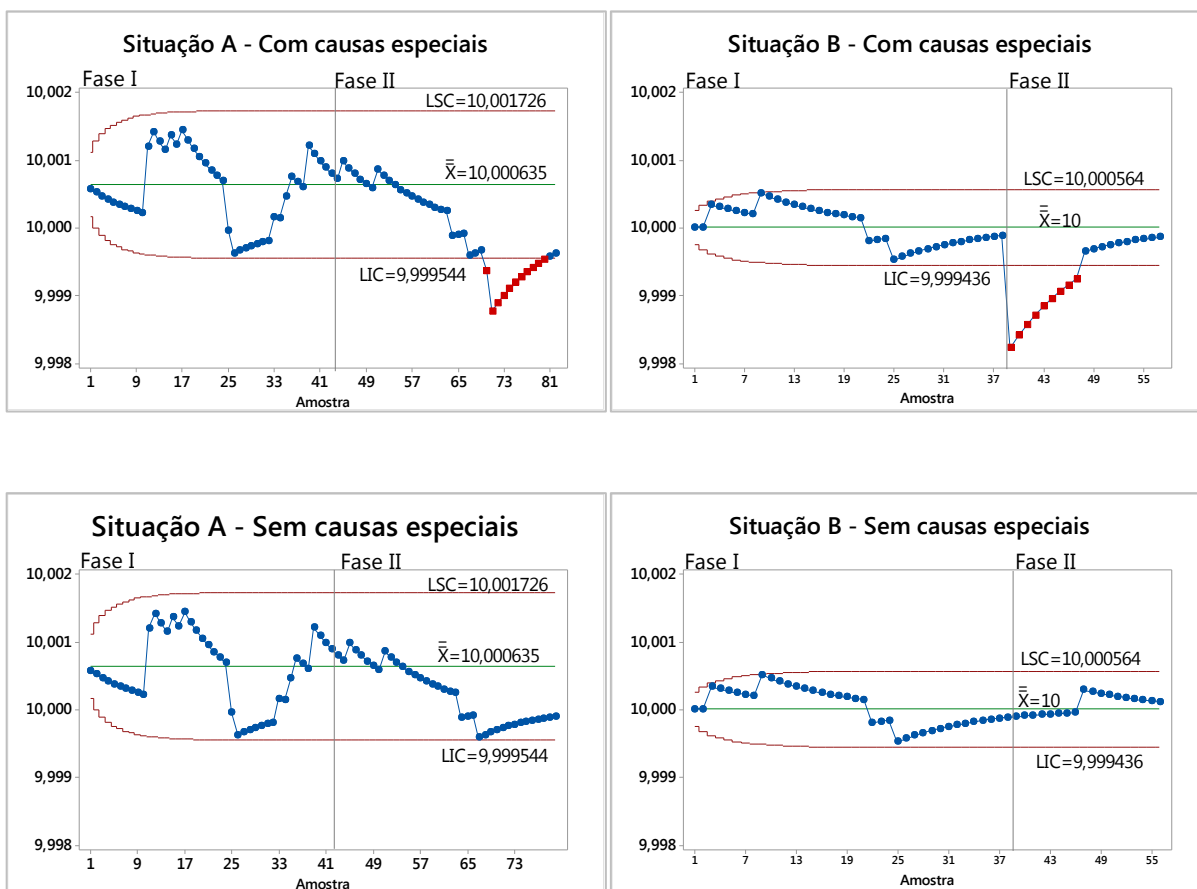
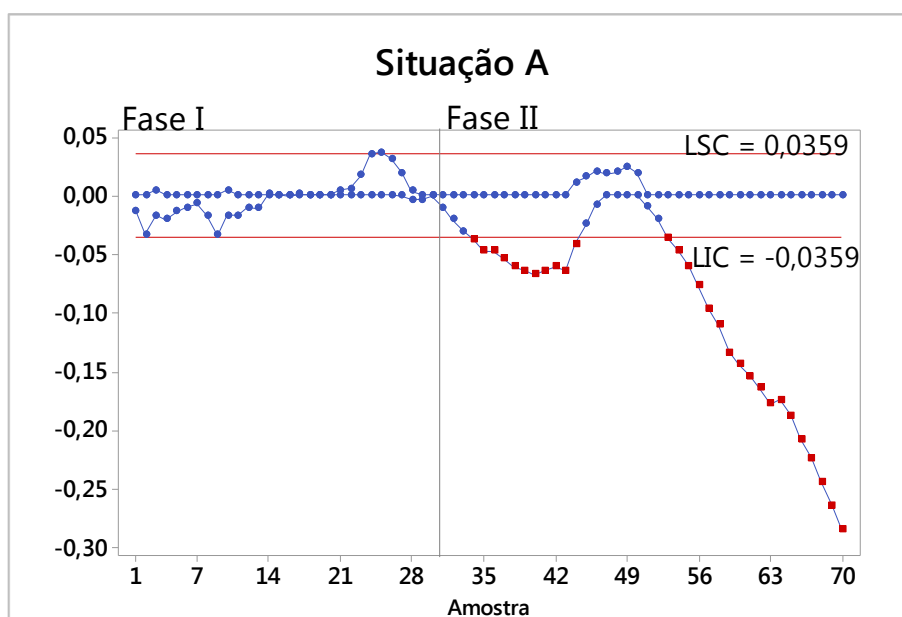
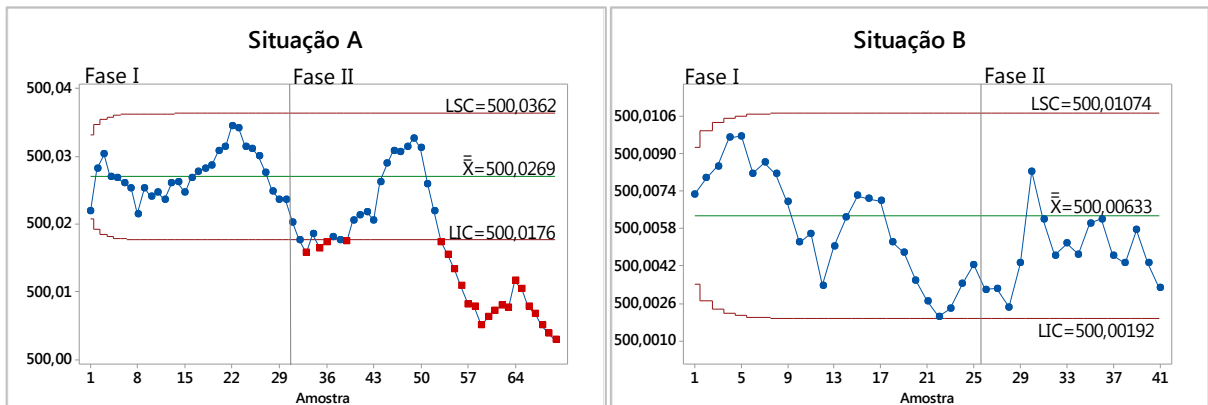


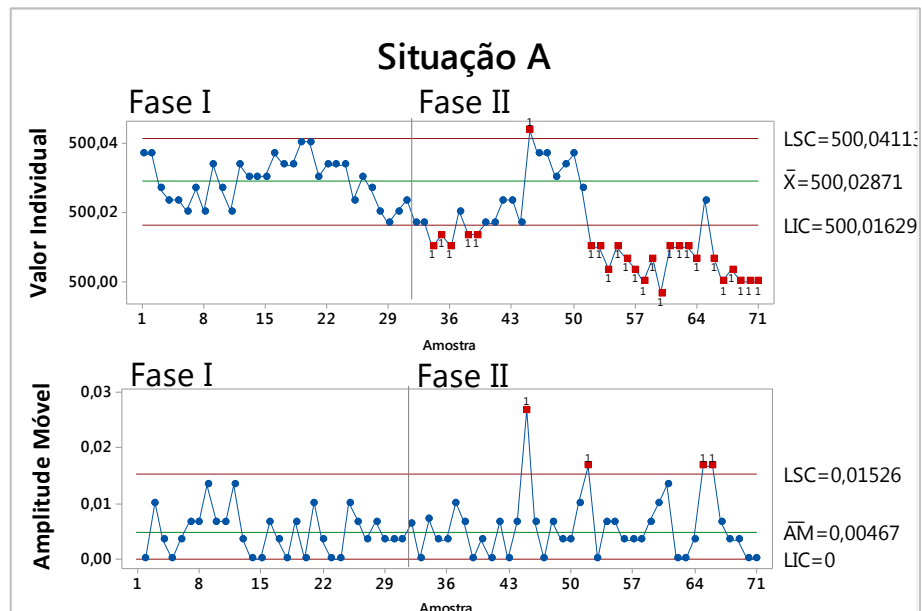
Gráfico de controle CUSUM para 500 g da BAL 016



Gráficos de controle EWMA para 500 g da BAL 016

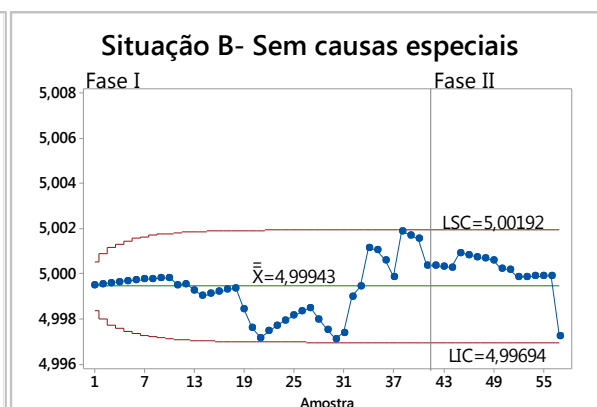
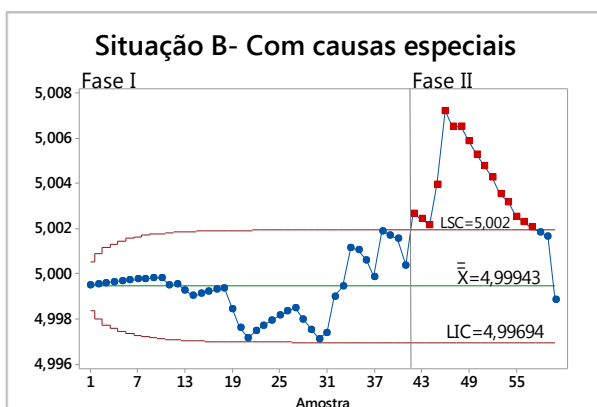
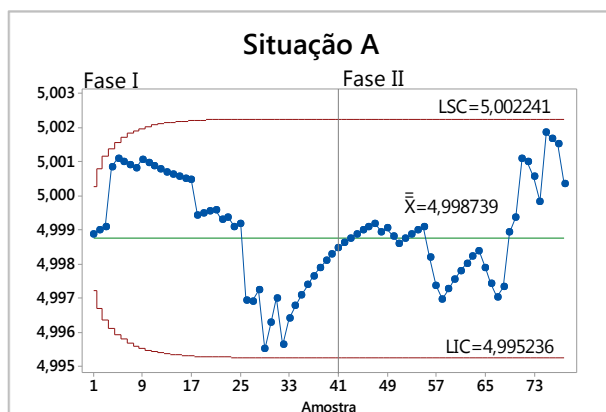


Gráficos de controle de Shewhart para 500 g da BAL 016

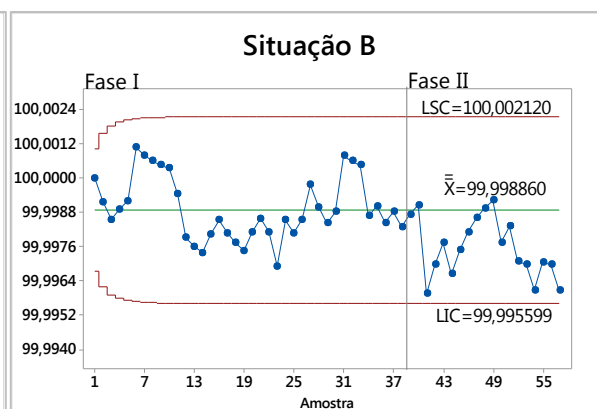
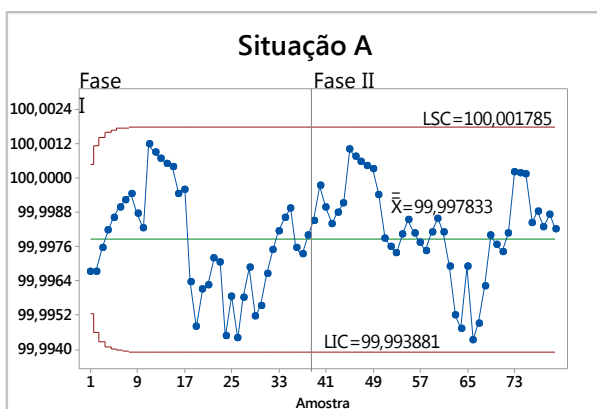


APÊNDICE C – GRÁFICOS DE CONTROLE PARA BAL 017

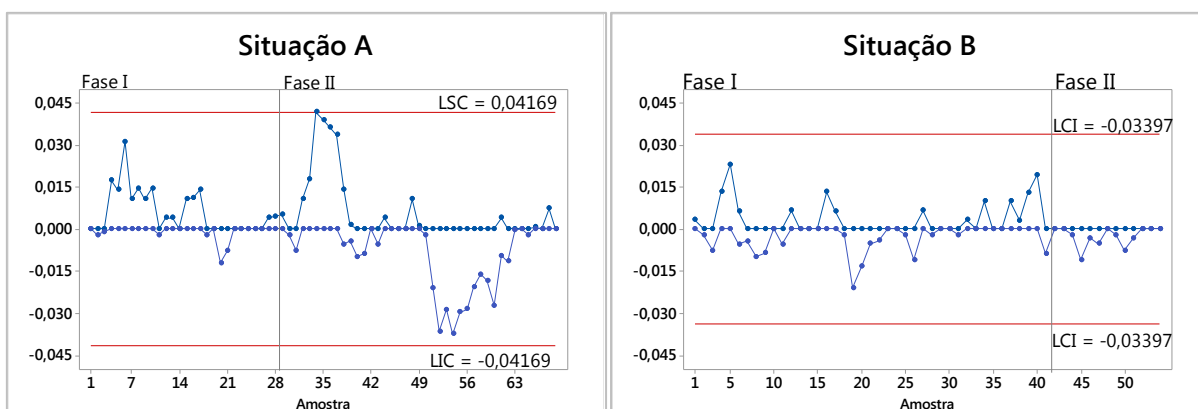
Gráficos de controle EWMA para 5 g da BAL 017



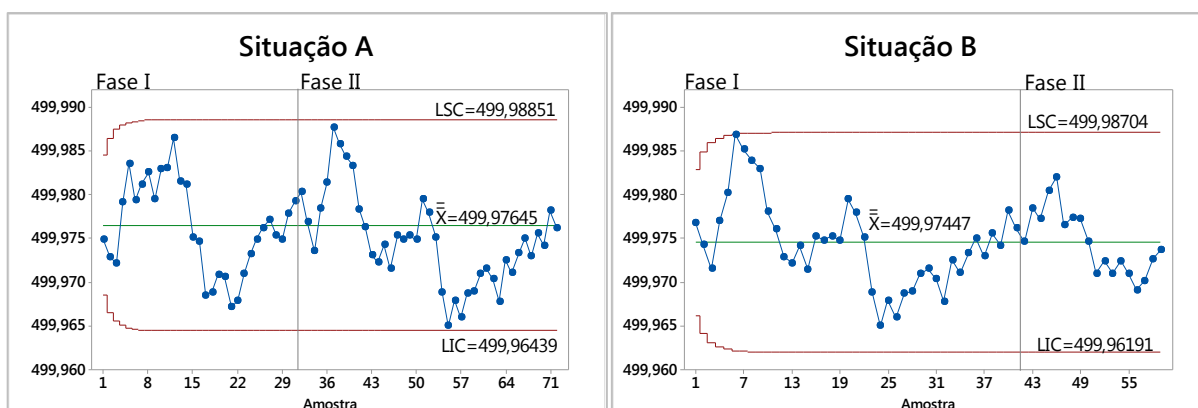
Gráficos de controle EWMA para 100 g da BAL 017



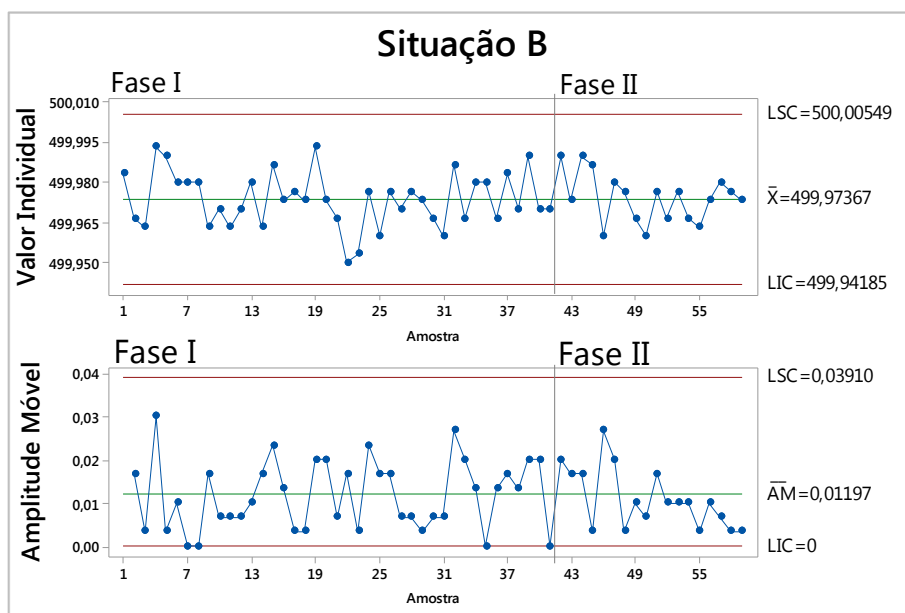
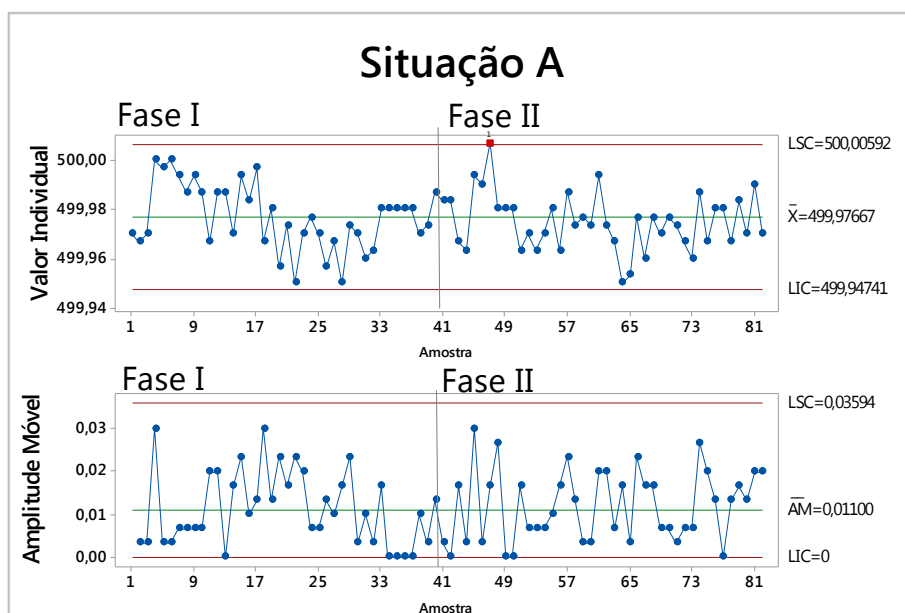
Gráficos de controle CUSUM para 500 g da BAL 017



Gráficos de controle EEMA para 500 g da BAL 017



Gráficos de controle de Shewhart para 500 g da BAL 017



APÊNDICE D – GRÁFICOS DE CONTROLE PARA BAL 002

Gráfico de controle EWMA para 50 g da BAL 002

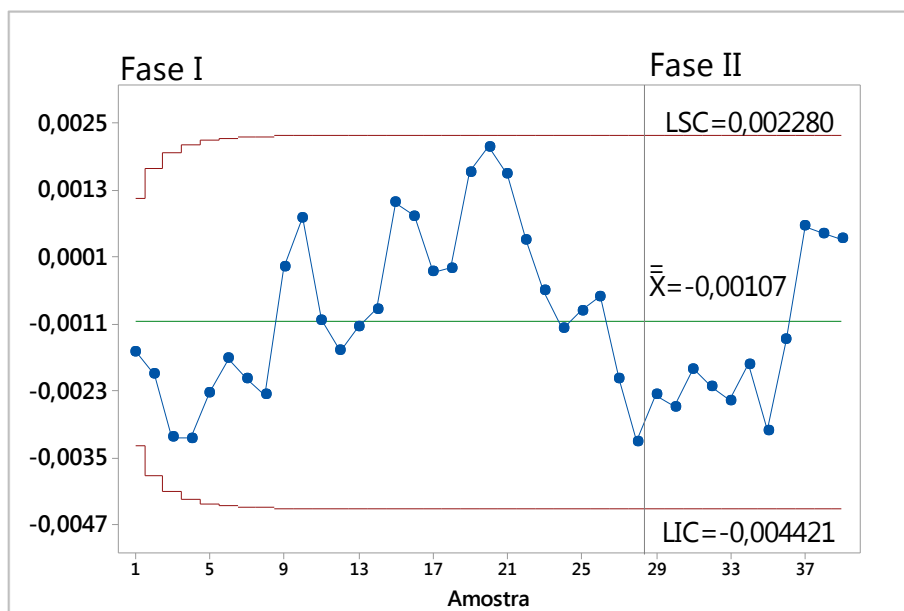


Gráfico de controle de EWMA para 500 g da BAL 002

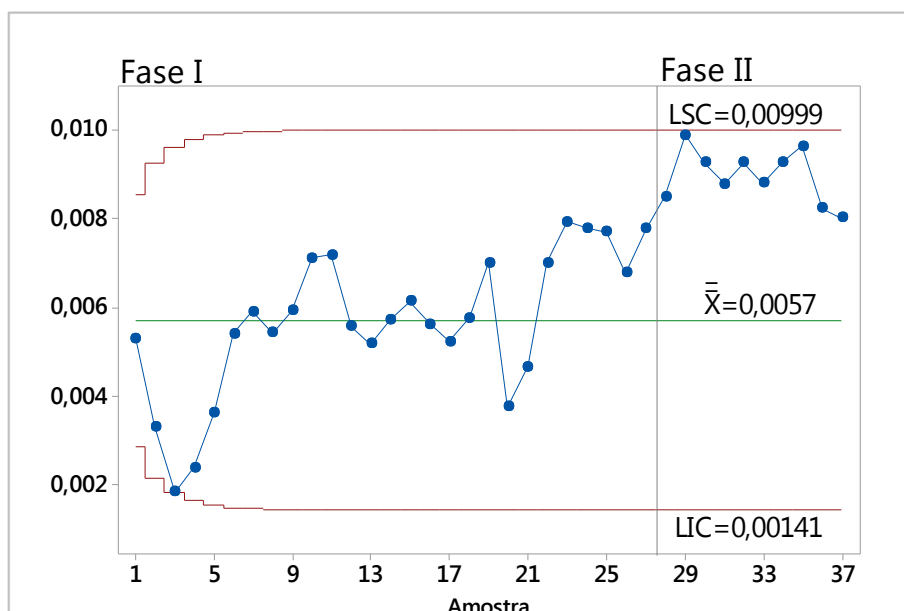


Gráfico de controle CUSUM para 1000 g da BAL 002

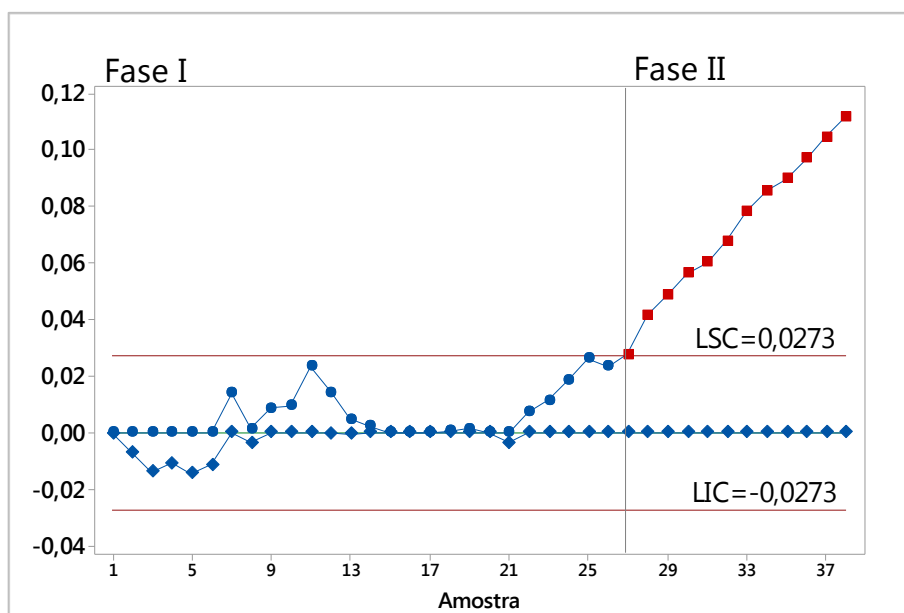
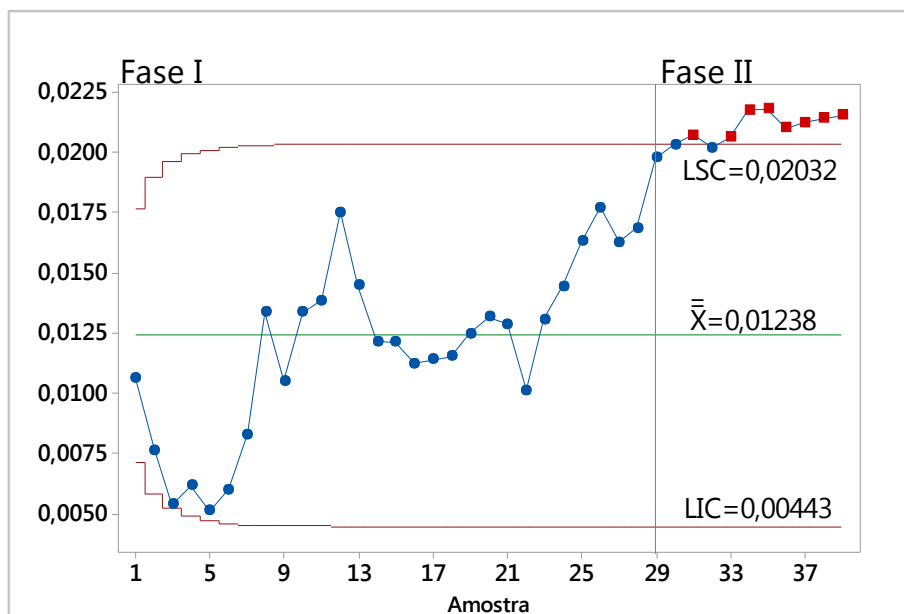
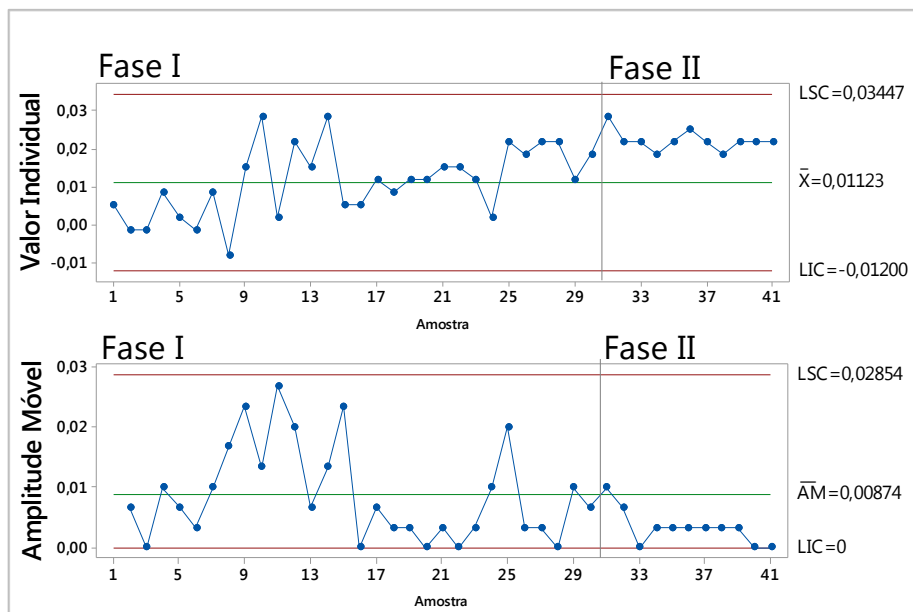


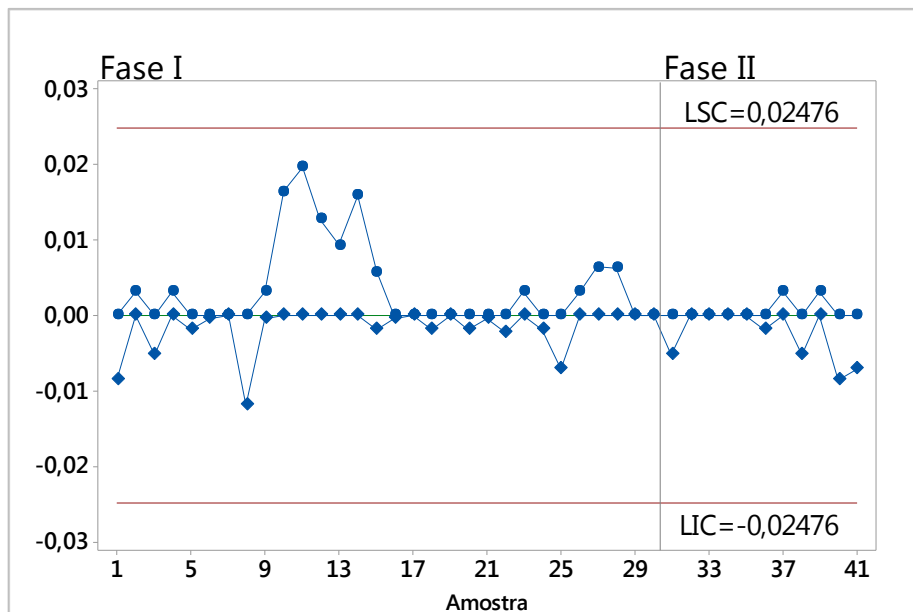
Gráfico de controle EWMA para 1000 g da BAL 002



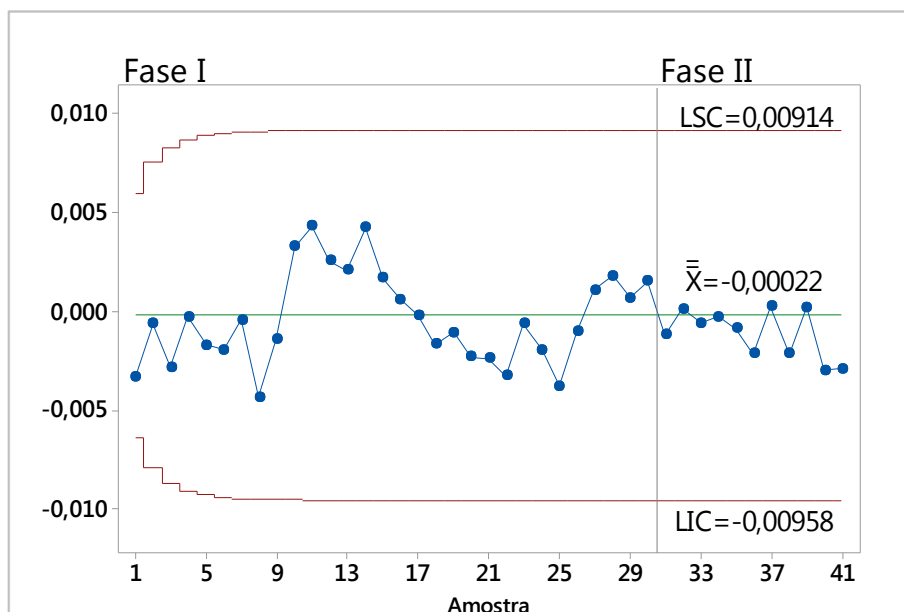
Gráficos de controle de Shewhart para 1000 g da BAL 002



Gráficos de controle CUSUM para 3000 g da BAL 002



Gráficos de controle EWMA para 3000 g da BAL 002



Gráficos de controle de Shewhart para 3000 g da BAL 002

