



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

JOÃO PEDRO COSTA VIOLANTE

Interface gráfica para o gráfico de controle B-ATTRIVAR SS: uma proposta para o
monitoramento da variabilidade de processos univariados

Guaratinguetá

2024

João Pedro Costa Violante

Interface gráfica para o gráfico de controle B-ATTRIVAR SS: uma proposta para o monitoramento da variabilidade de processos univariados

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marcela Aparecida Guerreiro Machado de Freitas
Co-orientadora: Me. Amanda Santos Mendes

V796i	Violante, João Pedro Costa Interface gráfica para o gráfico de controle B-ATTRIVAR SS: uma proposta para o monitoramento da variabilidade de processos univariados / João Pedro Costa Violante - Guaratinguetá, 2024. 62 f : il. Bibliografia: f. 61-62 Trabalho de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024. Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Marcela A. Guerreiro Machado de Freitas Coorientadora: Me. Amanda Santos Mendes 1. Gráficos em engenharia. 2. Interfaces gráficas de usuário. 3. Controle de qualidade. I. Título. CDU 658.56
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

JOÃO PEDRO COSTA VIOLANTE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

Prof. Dr. MAURÍCIO CÉSAR DELAMARO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente

MARCELA APARECIDA GUERREIRO MACHADO DI

Data: 17/01/2024 17:13:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Marcela Aparecida Guerreiro Machado de Freitas
Orientador(a)/UNESP-FEG

Prof. Dr. Fernando Augusto Marins
UNESP-FEG

Prof. Me. Suélio Alves de Moura
Membro Externo

Janeiro de 2024

DADOS CURRICULARES

JOÃO PEDRO COSTA VIOLANTE

NASCIMENTO 02/03/2000 – Limeira / SP

FILIAÇÃO Carlos Eduardo Violante
 Paula Alessandra Bonin Costa Violante

2018/2024 Graduação em Engenharia de Produção Mecânica
 Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida e por todas as oportunidades que Ele me concedeu até aqui,

à minha orientadora Prof.^a Dr.^a Marcela Aparecida Guerreiro Machado de Freitas, que, além de tornar possível minha iniciação científica, que deu início a este trabalho, sempre me apoiou e me ensinou

aos meus pais, Carlos e Paula, que além de sempre serem grande fonte de inspiração e referência para mim, nunca deixaram de me incentivar, guiar e me apoiar sempre que necessário,

aos meus avós, que me orientaram por toda a minha vida e me trouxeram mais calma e sabedoria para lidar com os estudos e o trabalho,

à toda minha família, que nunca deixa de me incentivar e trazer mais compreensão e calma com relação aos meus deveres,

aos moradores da República Coidiloco, que assumiram o papel de uma família em vários momentos, e permitiram que a minha trajetória na graduação fosse mais leve, junto às outras amizades que fiz na faculdade,

e à Prof.^a Dr.^a Arminda Eugênia Marques Campos, que também me orientou durante toda a graduação e, principalmente com relação ao trabalho de graduação, em sua disciplina, no quinto ano.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – EDITAL PIBIC 2020.

RESUMO

Dentro do tema de Planejamento e Controle da Qualidade, uma das áreas da Engenharia da Qualidade, este trabalho tem foco no monitoramento da variabilidade de processos univariados por meio da variância com o gráfico de controle denominado ATTRIVAR-SS, assim como em Violante e Machado (2021). O gráfico em questão combina a inspeção por atributo e a inspeção por variável, explorando, ao mesmo tempo, o caráter menos dispendioso da primeira, junto ao caráter mais informativo e à maior eficiência da segunda em detectar perturbações em processos produtivos. Para facilitar a aplicação e a utilização desse gráfico no controle de qualidade de processos produtivos, é desenvolvido, neste trabalho, um aplicativo para computador, na linguagem R, com uma interface, utilizando o pacote *Shiny*, que permite que os usuários insiram os parâmetros do processo, e, a partir disso, obtenham o gráfico de controle ATTRIVAR-SS para o monitoramento da variabilidade de processos univariados por meio da variância. Ao final, comparando os dados obtidos pelo aplicativo desenvolvido com os provenientes do código de Violante e Machado (2021), pôde-se validá-lo, à medida que seus resultados se apresentaram bastante próximos.

PALAVRAS-CHAVE: gráfico de controle; ATTRIVAR; monitoramento da variabilidade; variância; aplicativo; interface; R; pacote *Shiny*.

ABSTRACT

Within the theme of Quality Planning and Control, one of the areas of Quality Engineering, this work focuses on monitoring the variability of univariate processes through variance with the control chart called ATTRIVAR-SS, as in Violante and Machado (2021). The chart in question combines inspection by attribute and inspection by variable, while exploiting the less expensive nature of the first, together with the more informative nature and greater efficiency of the second in detecting disturbances in production processes. In order to facilitate the application and use of this graph in the quality control of production processes, this work involves the development of a computer application, in the R language, with an interface, using the Shiny package, which allows users to enter process parameters and, from this, obtain the ATTRIVAR-SS control graph for the variability monitoring of univariate processes through variance. In the end, by comparing the data obtained by the application developed with that from the code by Violante and Machado (2021), it was possible to validate it, as the results were very similar.

KEYWORDS: control chart; ATTRIVAR; variability monitoring; variance; application; interface; R; Shiny package.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “ <i>control chart</i> ” no título.....	18
Figura 2 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “ <i>mixed control chart</i> ” no título.....	18
Figura 3 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “ <i>mixed control chart</i> ” como palavras-chave, ou no resumo ou no título.....	19
Figura 4 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “ <i>ATTRIVAR</i> ”.....	19
Figura 5 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “ <i>control chart</i> ” e “ <i>variability</i> ” no título.....	20
Figura 6 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “ <i>quality control</i> ” e “ <i>app</i> ”.....	20
Figura 7 – Típico gráfico de controle.....	23
Figura 8 – Os limites de controle e as regiões delimitadas por eles.....	24
Figura 9 – Gráfico de controle com um padrão cíclico (não aleatório).....	25
Figura 10 – Gráfico de controle com um padrão de agrupamento em torno de LC.....	25
Figura 11 – Mudanças na média e na variabilidade aumentando as não conformidades.....	28
Figura 12 – Gráfico da distribuição qui-quadrado.....	29
Figura 13 – Fluxograma de aplicação do gráfico S^2	31
Figura 14 – Fluxograma de aplicação do gráfico np	34
Figura 15 – Fluxograma de aplicação do gráfico np_{S^2}	36
Figura 16 – Fluxo do primeiro estágio do gráfico misto de Aslam <i>et al.</i> (2015).....	38
Figura 17 – Fluxograma de aplicação do gráfico misto para o monitoramento da variância de Ho e Quinino (2016).....	40
Figura 18 – Fluxograma de aplicação do gráfico B-ATTRIVAR SS S^2	43
Figura 19 – Fluxograma do processo de obtenção dos limites discriminantes para cada combinação de W_y e CL_y	48
Figura 20 – Fluxograma do processo de obtenção dos limites de controle por variável para cada combinação de W_y e CL_y	50
Figura 21 – Fluxograma do processo de verificação do requisito de $\beta_{máx}$ para todas as combinações de W_y e CL_y	51
Figura 22 – Fluxograma do processo de definição dos resultados definitivos.....	52
Figura 23 – <i>Layout</i> principal da interface desenvolvida.....	53

Figura 24 – Resultados e gráfico mostrados no aplicativo.....	54
Figura 25 – Tabela editável do aplicativo.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre a performance dos gráficos para o monitoramento de S^2 com $n=5$	42
Tabela 2 – Comparação e validação de resultados finais ($\mu_0 = 0, \sigma_0 = 1$).....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>app</i>	<i>Application</i> / Aplicativo
ATTRIVAR	<i>Attribute + Variable</i>
ATTRIVAR DS	<i>Attribute + Variable Different Sample</i>
ATTRIVAR SS	<i>Attribute + Variable Same Sample</i>
B-ATTRIVAR	<i>Attribute + Variable</i> Binomial
CEP	Controle Estatístico de Processos
LC / CL	Limite de Controle / <i>Control Limit</i>
LSC / UCL	Limite Superior de Controle / <i>Upper Control Limit</i>
LIC / LCL	Limite Inferior de Controle / <i>Lower Control Limit</i>
NAS	Número de Amostras até o Sinal
NMA	Número Médio de Amostras até o Sinal
T-ATTRIVAR	<i>Attribute + Variable</i> Trinomial

LISTA DE SÍMBOLOS

np_{S^2}	Gráfico do número de itens não conformes para o controle da variância
np	Gráfico do número de itens não conformes / Número de itens não conformes do processo
H_0	Hipótese “nula” do teste de hipóteses estatístico
H_1	Hipótese “alternativa” do teste de hipóteses estatístico
α	Probabilidade de erro do tipo I no teste de hipóteses
β	Probabilidade de erro do tipo II no teste de hipóteses
$P\{\}$	Probabilidade de algo
$ $	“dado que” (dentro de $\{\}$ da probabilidade)
Pd	Poder do gráfico
σ	Desvio padrão do processo
σ_0	Desvio padrão do processo em controle
σ_1	Desvio padrão do processo fora de controle
μ	Média do processo
μ_0	Média do processo em controle
μ_1	Média do processo fora de controle
$\bar{X}$	Média amostral
R	Amplitude do processo
S^2	Variância amostral / Gráfico da variância
$\chi^2_{(v, p)}$	Valor crítico da distribuição qui-quadrado com “ v ” graus de liberdade e referente à probabilidade “ p ”
LC_{S^2}	Limite de controle único do gráfico S^2
Σ	Somatório
n	Tamanho ou número de itens da amostra
k_{np}	Fator de abertura do gráfico np
np_0	Número de itens não conformes do processo em controle
p	Proporção de itens reprovados (no contexto do gráfico np)
Y_D	Número de itens não conformes de uma amostra
CL_y	Limite de controle por atributo nos gráficos mistos
W_y	Limite de alerta para o controle por atributo nos gráficos mistos
λ	Fator de variação do desvio padrão

$\%S^2$	Porcentagem de amostras submetidas ao controle por variável no gráfico ATTRIVAR para o monitoramento da variância
$\%S^2_{m\acute{a}x}$	Porcentagem máxima desejada de amostras submetidas ao controle por variável no gráfico ATTRIVAR para o monitoramento da variância
$\alpha_{m\acute{a}x}$	Probabilidade máxima desejada para o erro do tipo I do teste de hipóteses
$\beta_{m\acute{a}x}$	Probabilidade máxima desejada para o erro do tipo II do teste de hipóteses
X_i	Medição da característica monitorada para cada item i da amostra
L	Fator de abertura dos limites de controle por variável no aplicativo desenvolvido
ΔNMA_0	Desvio percentual entre os NMA ₀ obtidos
ΔNMA_1	Desvio percentual entre os NMA ₁ obtidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2 PERGUNTAS DE PESQUISA, OBJETIVOS E DELIMITAÇÕES	16
1.3 JUSTIFICATIVA	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 A QUALIDADE E O CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS	22
2.2 OS GRÁFICOS DE CONTROLE	23
2.3 GRÁFICOS DE CONTROLE POR VARIÁVEL	27
2.3.1 Gráfico S^2	29
2.4 GRÁFICOS DE CONTROLE POR ATRIBUTO	31
2.4.1 Gráfico np	33
2.4.2 Gráfico npS^2	35
2.5 GRÁFICOS DE CONTROLE MISTOS	36
3 MÉTODOS	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 DEFINIÇÃO DE ENTRADAS E SAÍDAS DO APLICATIVO	45
4.2 OBTENÇÃO DOS LIMITES DE CONTROLE	46
4.2.1 Seção A	47
4.2.2 Seção B	49
4.2.3 Seção C1	50
4.2.4 Seção C2	51
4.3 INTERFACE, RESULTADOS, TABELA E GRÁFICO	52
4.3.1 Layout da interface e exibição dos resultados	53
4.3.2 Gráfico	54
4.3.3 Tabela editável	55
4.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	57
5 CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A qualidade é um fator de alta importância na diferenciação de produtos e serviços, à medida em que tem se mostrado crucial nas decisões dos consumidores, e, conseqüentemente, decisiva para a competitividade das empresas (HO; QUININO, 2016).

Assim, elas investem em formas de controle e monitoramento de qualidade para promover uma melhoria contínua em seus produtos e serviços, e com isso, reduzir desperdícios e custos, e muitas vezes aumentar sua produtividade, seus lucros e a satisfação de seus clientes, os quais não aceitariam bem as altas variabilidades e seus impactos negativos na qualidade dos produtos e serviços dos quais eles usufruem (BEZERRA; HO; QUININO, 2018).

Uma dessas formas utilizadas para controle e monitoramento da qualidade de processos é o gráfico de controle, que foi desenvolvido pela primeira vez por Shewhart, e são considerados ferramentas de suma importância para a engenharia de produção, sendo utilizados para monitorar processos de fabricação, produzir produtos de acordo com as especificações definidas, reduzir custos de inspeções, e indicar causas de variações em processos (ASLAM *et al.*, 2015). Dentre eles, há alguns nos quais emprega-se o controle por variável, utilizado para características de qualidade contínuas; e outros nos quais emprega-se o controle por atributo, utilizado para características de qualidade não contínuas.

Embora este tenha sido o propósito primordial dos gráficos por atributo, há cerca de 70 anos, pesquisadores fazem contribuições sugerindo sua utilização para o controle de características de qualidade contínuas, e mais recentemente, estudos têm procurado propor melhores formas de fazê-lo (HO; APARISI, 2016).

Muitas pesquisas mencionam comparações entre esses dois tipos de gráfico, como: Ho e Quinino (2013; 2016), que evidenciam que os de inspeções por variável são mais eficientes na detecção de perturbações no processo; e Aparisi e Ho (2018) e Bezerra, Ho e Quinino (2018), que explicam que os gráficos que utilizam apenas inspeções por variável são mais informativos em comparação aos de inspeção por atributo.

Aparisi e Ho (2018); Aslam *et al.* (2015); Bezerra, Ho e Quinino (2018); Ho e Aparisi (2016); e Ho e Quinino (2013, 2016), também mencionam, por outro lado, que os gráficos de controle por atributo já demonstram ser mais simples, rápidos e baratos em sua implementação em comparação aos por variável.

Buscando continuamente melhorar a performance e baratear o uso dos gráficos de controle, diversos pesquisadores exploram a utilização dos gráficos por atributo, como Ho e Quinino (2013), que propuseram o gráfico np_{s^2} , o qual utiliza as inspeções por atributo para monitorar a variância, e já apresenta uma maior performance que os mais tradicionais, como o np .

Pouco depois, Sampaio, Ho e Medeiros (2014) propuseram, pela primeira vez, uma estratégia que combina as inspeções por atributo e por variável, utilizando-a, no caso, para o monitoramento da média de processos univariados. Nessa estratégia, eles dividiram a inspeção em dois estágios: no primeiro, adotou-se a inspeção por atributos, na qual os itens eram classificados em aprovados ou reprovados; e dependendo do número de itens reprovados, utilizava-se o segundo estágio, em que era adotada a inspeção por variável, na qual a característica de qualidade seria medida, e a estatística de monitoramento seria calculada.

Em Ho e Aparisi (2016), foi desenvolvido um gráfico semelhante ao proposto anteriormente por Sampaio, Ho e Medeiros (2014), ao qual eles deram o nome de ATTRIVAR (*attribute + variable*). A partir disso, passou-se a adotar esta terminologia para se referir ao gráfico que utiliza inspeção mista (por atributo e por variável).

Sampaio, Ho e Medeiros (2014) utilizaram amostras diferentes nos dois estágios de inspeção, método para o qual Violante e Machado (2021) adotaram a terminologia ATTRIVAR *Different Sample*, ou ATTRIVAR DS. Uma estratégia de inspeção semelhante à ATTRIVAR-DS também foi utilizada em Aparisi e Ho (2018); Ho e Aparisi (2016); e Ho e Quinino (2016).

Já no gráfico *Mixed*, de Aslam *et al.* (2015), os itens da amostra submetidos à inspeção por atributo são os mesmos submetidos à inspeção por variável, ou seja, utiliza-se a mesma amostra para ambas as inspeções, método para o qual Violante e Machado (2021) adotaram a terminologia ATTRIVAR *Same Sample*, ou ATTRIVAR SS. Essa estratégia, ATTRIVAR SS, também foi utilizada por Leoni e Costa (2019).

A partir disso, Simões, Costa e Machado (2020) propuseram os gráficos ATTRIVAR Binomial (chamado de B-ATTRIVAR) e ATTRIVAR Trinomial (chamado de T-ATTRIVAR) para o monitoramento da média.

O T-ATTRIVAR se diferencia do B-ATTRIVAR pela utilização de três possíveis classificações para os itens na etapa da inspeção por atributo, ao invés de apenas duas.

Violante e Machado (2021) propuseram, em seguida, a aplicação dos gráficos B-ATTRIVAR SS e B-ATTRIVAR DS para o monitoramento da variabilidade de processos univariados por meio da variância.

Visando dar continuidade a essa pesquisa, e tendo em vista o fato de que não há registros acadêmicos que tratem do desenvolvimento de formas para a aplicação prática desses gráficos, este trabalho procura contribuir nesse sentido, criando, para isso, uma interface que possibilite a aplicação do gráfico B-ATTRIVAR SS no controle e no monitoramento da qualidade em um processo industrial.

1.2 PERGUNTAS DE PESQUISA, OBJETIVOS E DELIMITAÇÕES

Tendo em vista o tema e a lacuna acadêmica aos quais este trabalho procura contribuir, estas são as questões que ele busca responder:

- Como criar uma interface para a geração dos limites de controle e do gráfico de controle ATTRIVAR-SS Binomial?
- Como calcular os limites do gráfico de controle ATTRIVAR-SS Binomial a partir das informações inseridas pelo usuário?
- Como realizar a aplicação do gráfico de controle ATTRIVAR-SS Binomial em um processo produtivo?

Dessa forma, visando responder às questões mencionadas, o objetivo geral do trabalho é desenvolver um aplicativo computacional com uma interface que possibilite que um usuário forneça dados de entrada e, a partir deles, seja gerado um gráfico de controle B-ATTRIVAR SS, o qual ele possa utilizar de forma prática para o monitoramento da variabilidade de um processo industrial univariado.

Quanto aos objetivos específicos, tem-se:

- Desenvolver os códigos que possibilitem a realização dos cálculos necessários para a geração do gráfico de controle e de seus parâmetros.
- Desenvolver uma interface que permita que as funções do código possam ser desempenhadas a partir da atuação de um usuário.
- Mostrar a funcionalidade do aplicativo desenvolvido.

No que diz respeito às delimitações do presente trabalho, é importante ressaltar que ele se limitará a desenvolver o aplicativo computacional apenas para o gráfico ATTRIVAR Binomial, utilizando a estratégia de inspeção *Same Sample* (B-ATTRIVAR SS), para o monitoramento da variabilidade de processos univariados a partir da variância. Ademais, também se pressupõe que o usuário tenha acesso aos inputs para gerar o gráfico (como o nível máximo de incerteza e a proporção máxima de inspeção por variável).

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com Ali *et al.* (2021), os gráficos de controle são ferramenta do Controle Estatístico de Processos amplamente utilizadas no monitoramento de processos para a detecção de causas especiais de variação e de não conformidades. Além disso, eles dizem, ainda, que essas ferramentas ajudam a detectar essas perturbações antecipadamente, levando a uma minimização das consequências financeiras negativas geradas por essas anormalidades nos processos.

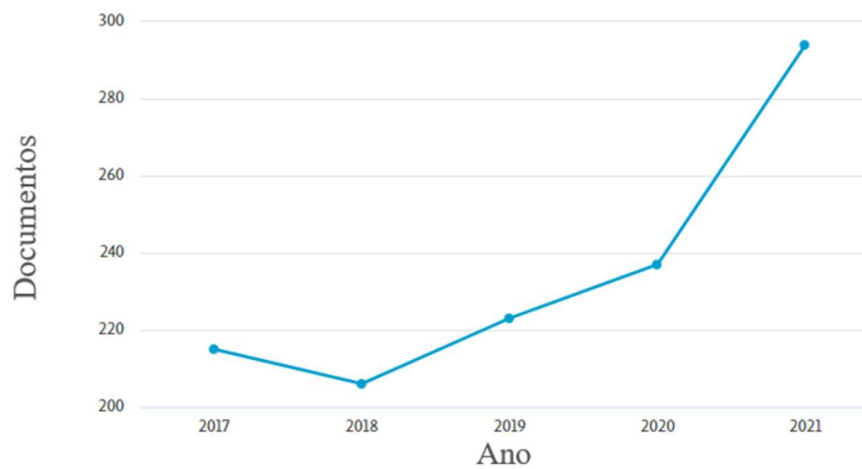
De acordo com Ho e Quinino (2013), quando a mensuração de uma característica de qualidade é dispendiosa e consome muito tempo, é interessante avaliar a possibilidade de se utilizar um gráfico de controle baseado na inspeção por atributo (menos custosa e mais rápida) para monitorar a média ou a variância do processo; e embora geralmente o desempenho dos gráficos que utilizam esse tipo de inspeção seja menor do que o daqueles que empregam a inspeção por variável, pode-se obter o mesmo desempenho aumentando o tamanho da amostra dos gráficos de controle por atributo.

Na busca por estratégias cada vez mais eficientes e econômicas que melhorassem o desempenho dos gráficos de controle por variável ou atributo, para o monitoramento tanto da média quanto da variabilidade, surgiu a estratégia de combinar as inspeções por variável com as inspeções por atributo em um mesmo gráfico, proposta pela primeira vez por Sampaio, Ho e Medeiros (2014), e mais tarde chamada de ATTRIVAR por Ho e Aparisi (2016). Este método, então, passou a associar os benefícios das duas formas de inspeção: o maior desempenho e o maior nível de informação da inspeção por variável; com o menor custo, a maior rapidez e a maior simplicidade da inspeção por atributo (APARISI; HO, 2018; HO; QUININO, 2016; VIOLANTE; MACHADO, 2021).

Como forma de complementar a justificativa do tema, realizou-se uma análise da relevância acadêmica e das oportunidades de exploração das lacunas existentes, a partir de uma pesquisa dos artigos provenientes de *Journals* que estariam relacionados à área e às subáreas que eglobam este trabalho.

Na Figura 1, pode-se notar o quanto as pesquisas acerca de gráficos de controle têm se intensificado nos últimos anos, o que só reforça a relevância da área e do tema nos quais este trabalho se enquadra.

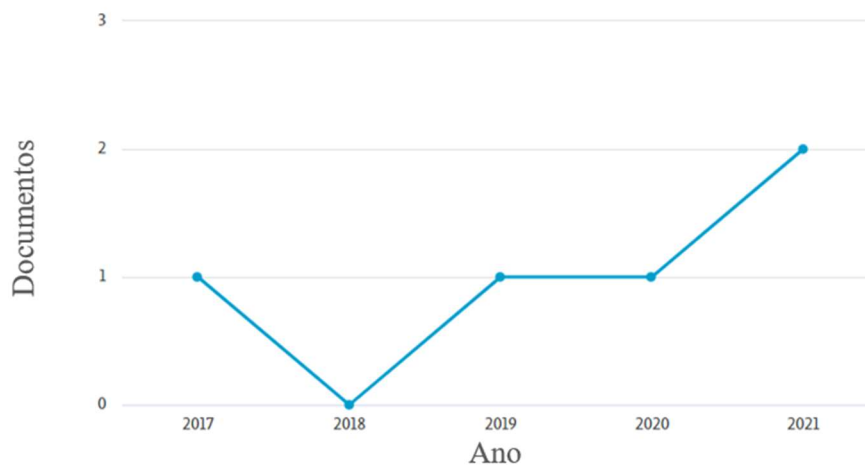
Figura 1 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “*control chart*” no título



Fonte: Scopus (2022)

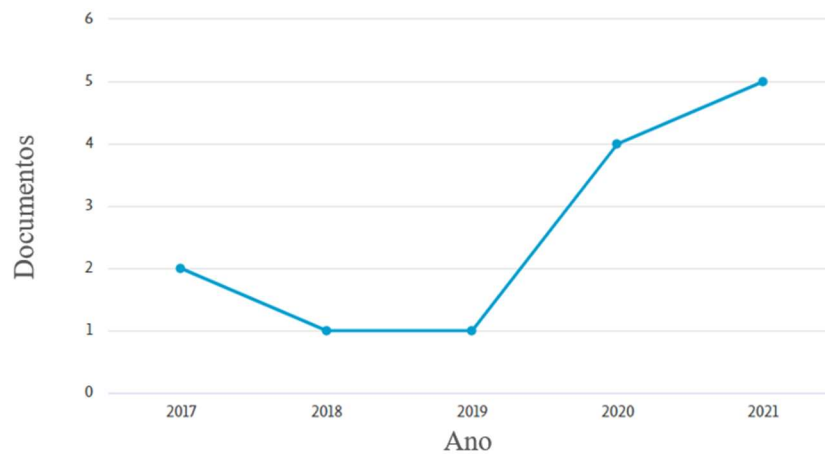
Nas Figuras 2 e 3, mesmo que com valores menores, pelo assunto já ter sido restringido aos gráficos que empregam inspeção mista, ainda se faz evidente a ascendência no número de artigos publicados que tratam do assunto.

Figura 2 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “*mixed control chart*” no título



Fonte: Scopus (2022)

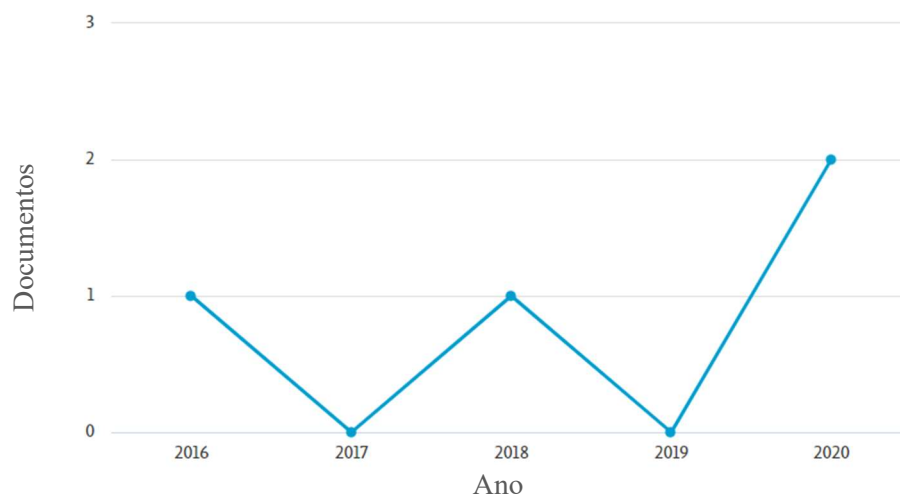
Figura 3 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “*mixed control chart*” como palavras-chave, ou no resumo ou no título



Fonte: Scopus (2022)

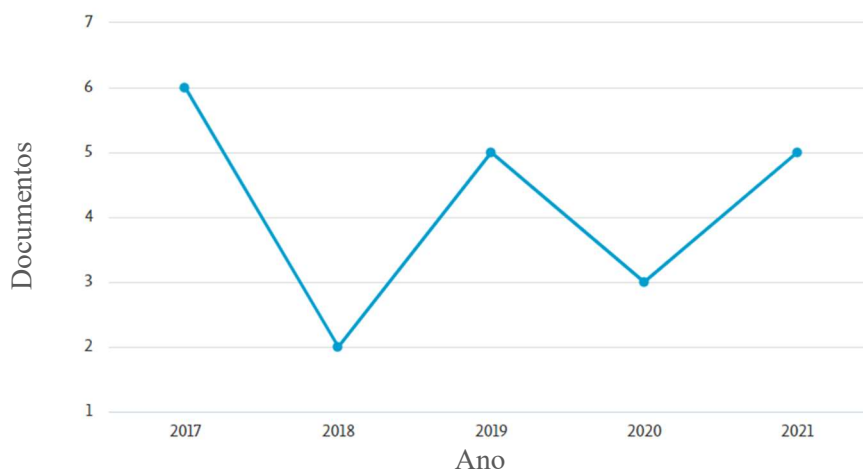
Já nas Figuras 4 e 5, os campos analisados podem ser identificados como maiores especificidades desta pesquisa em questão, ou seja, termos que restringem, especificam e caracterizam este trabalho. E quanto a isso, nos gráficos exibidos nas figuras, nota-se que estes campos representam oportunidades de exploração, visto que ainda há poucas publicações anuais que tratam especificamente do método ATTRIVAR e também que associam gráficos de controle à variabilidade, como se pretende fazer (um gráfico ATTRIVAR para o monitoramento da variabilidade de processos univariados).

Figura 4 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “ATTRIVAR”



Fonte: Scopus (2022)

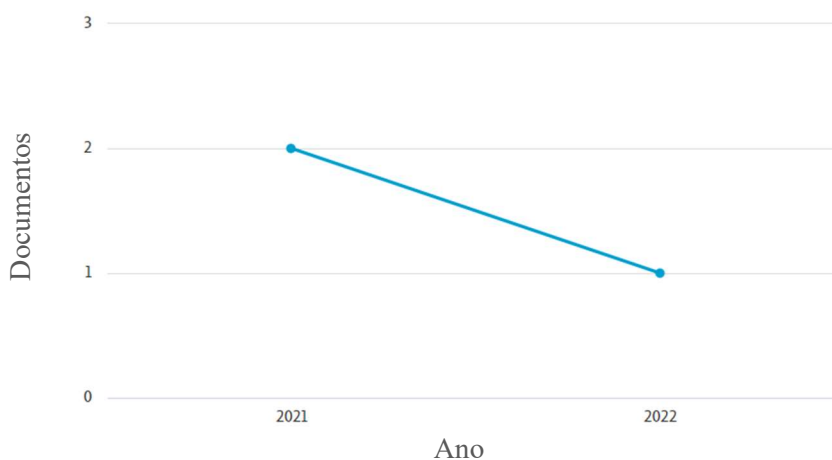
Figura 5 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “*control chart*” e “*variability*” no título



Fonte: Scopus (2022)

E por fim, na Figura 6, verifica-se a maior oportunidade de exploração deste trabalho, que consiste em unir os campos citados anteriormente a um aplicativo, que utilizará uma interface para que o usuário possa inserir seus dados de forma interativa e intuitiva, e, a partir disso, possa ser gerado o gráfico de controle. Isso porque, ao pesquisar a quantidade de artigos publicados nessa área nos últimos 5 anos, foram encontrados na Scopus apenas três, divididos entre 2021 e 2022, como se pode observar.

Figura 6 – Variação temporal do número de artigos publicados que contêm “*quality control*” e “*app*”



Fonte: Scopus (2022)

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além desta introdução, o trabalho possui mais quatro capítulos: o da fundamentação teórica, construído a partir de uma revisão bibliográfica para apresentar e explicar sobre os principais conceitos envolvidos no trabalho; o capítulo dos métodos, que descreve as classificações da pesquisa e os procedimentos utilizados; o capítulo de resultados e discussões, no qual expõe-se o que efetivamente foi realizado e é feita uma análise sobre isso; além, também, do capítulo das considerações finais do autor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A QUALIDADE E O CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS

A qualidade dos processos e produtos é um fator decisivo nas empresas, tendo em vista que sua melhoria ou seu aumento pode ajudá-las a evitar ou reduzir desperdícios e custos, aumentar a produtividade, o lucro, a satisfação dos clientes e a participação no mercado (BEZERRA *et al.*, 2018). Por isso, as empresas investem e buscam constantemente por formas de melhorar a qualidade de seus produtos e processos e aumentar sua competitividade (APARISI; HO, 2018).

De acordo com Montgomery (2009), a qualidade é inversamente proporcional à variabilidade, ou seja, se a variabilidade em características importantes de um produto diminuir, a qualidade do produto será aumentada. Um estudo citado pelo autor que compara uma fábrica doméstica estadunidense com uma empresa fornecedora japonesa que produz transmissões veiculares corrobora com essa definição, à medida em que mostra que sistemas produtivos com menores variabilidades em características importantes para seus processos ou produtos apresentam menos inconformidades e menores custos.

Apesar disso, Chakraborti e Graham (2019) explicam que um certo nível de variabilidade é inerente a todo processo e produto, originado das fontes de variabilidade chamadas “causas comuns”, nunca sendo possível haver unidades de um mesmo produto ou aplicações de um mesmo processo idênticas umas às outras. Porém, ao mesmo tempo, existem outros tipos de variabilidade, oriundos das fontes chamadas “causas especiais”, que poderão ser prejudiciais à qualidade.

Tendo isso em vista, o Controle Estatístico de Processos (CEP) é um conjunto de ferramentas e técnicas baseadas em conceitos estatísticos utilizado com o objetivo de identificar as causas especiais de variabilidade, investigá-las e analisar suas causas-raiz, para então agir em busca de eliminá-las ou minimizá-las para que ocorra a manutenção da estabilidade dos processos e a melhora de suas capacidades, fazendo com que a qualidade seja mantida em níveis satisfatórios (CHAKRABORTI; GRAHAM, 2019; MONTGOMERY, 2009).

Montgomery (2009) explica que o CEP é formado principalmente por sete ferramentas estatísticas, que são: o Histograma, a Folha de Verificação, o Diagrama de Pareto, o Diagrama de Causa e Efeito (Ishikawa), o Diagrama de Dispersão, o Diagrama de Concentração de Defeitos e os Gráficos de Controle, dentre os quais ele comenta que o último é o mais tecnicamente sofisticado e a principal ferramenta dentro do conjunto que compõe o CEP.

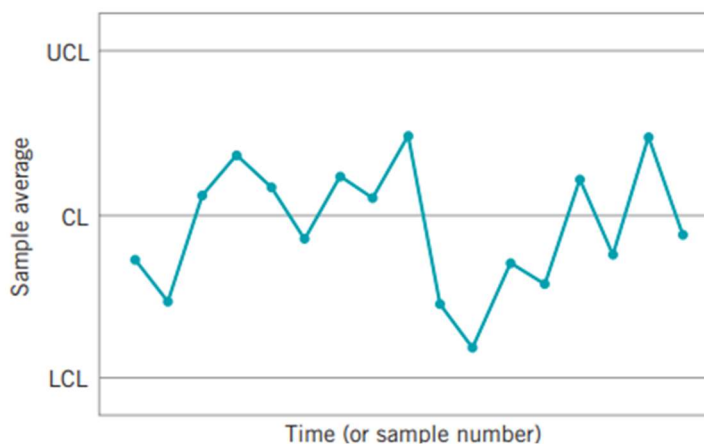
2.2 OS GRÁFICOS DE CONTROLE

Montgomery (2009) menciona que Walter Andrew Shewhart foi o primeiro a introduzir o conceito dos gráficos de controle em 1924, que se concretizou como uma das técnicas primordiais do CEP, utilizada para monitorar as saídas de um processo e detectar quando são necessárias mudanças nas entradas desse processo para que ele volte a estar ou passe a ficar em controle.

Eles são ferramentas gráficas com interfaces visuais que utilizam inspeções e medições de características da qualidade para plotar dados sucessivos de amostras coletadas aleatoriamente e, com isso, possibilitar a análise e a compreensão da performance do processo (CHAKRABORTI; GRAHAM, 2019).

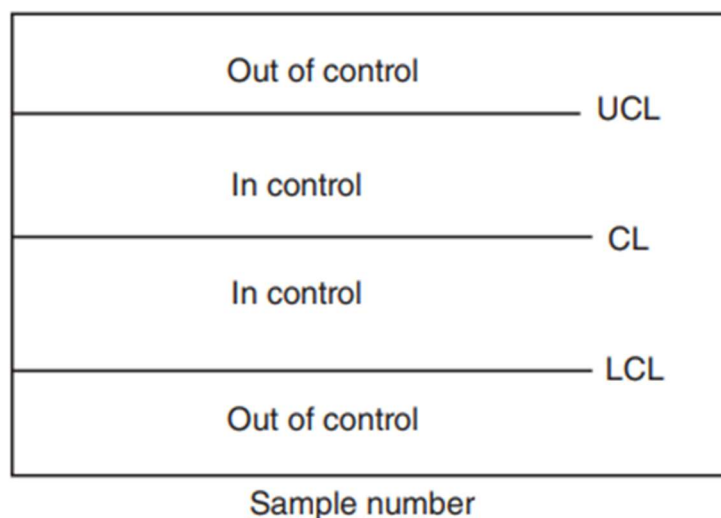
Como Montgomery (2009) explica, e como ilustrado nas Figuras 7 e 8, os típicos gráficos de controle apresentam três linhas horizontais: a linha central (LC em português e CL em inglês), que representa o valor nominal ou valor alvo da característica de qualidade monitorada, e os limites de controle superior (LCS em português e *UCL* em inglês) e inferior (LCI em português e *LCL* em inglês), que delimitam a faixa de valores aceitável da característica de qualidade, dentro da qual todos os pontos plotados implicarão em um processo em controle. Seguindo essa mesma lógica, quando algum ponto for plotado fora desses limites, seja ele abaixo do LCI ou acima do LCS, consistirá no que é chamado de “sinal”, ou seja, o gráfico sinalizará que o processo não está em controle.

Figura 7 – Típico gráfico de controle



Fonte: Montgomery (2009)

Figura 8 – Os limites de controle e as regiões delimitadas por eles

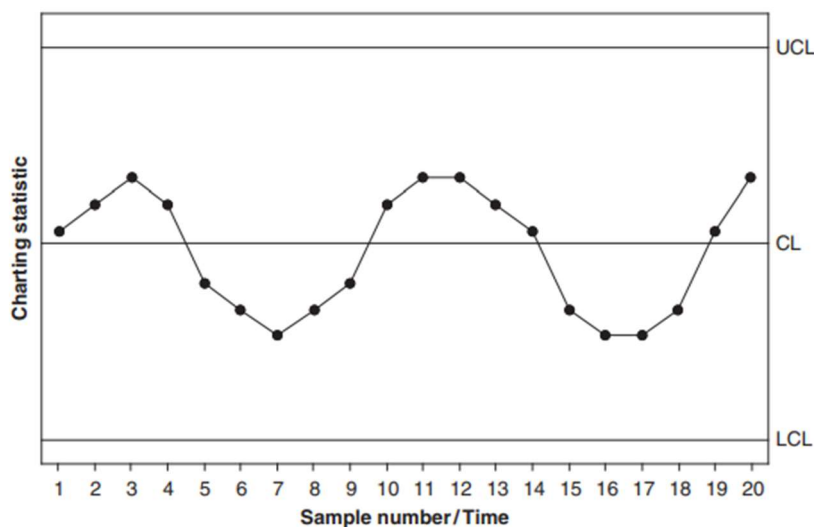


Fonte: Aslam, Saghir e Ahmad (2021)

É importante esclarecer que é denominado “em controle” aquele processo que opera com resultados e parâmetros dentro do que é esperado ou almejado para quando na presença de apenas causas comuns de variabilidade e com desvios aleatórios; enquanto é considerado “fora de controle” ou é dito que “não está em controle” o processo que apresentar indícios da influência de causas especiais de variabilidade (CHAKRABORTI; GRAHAM, 2019).

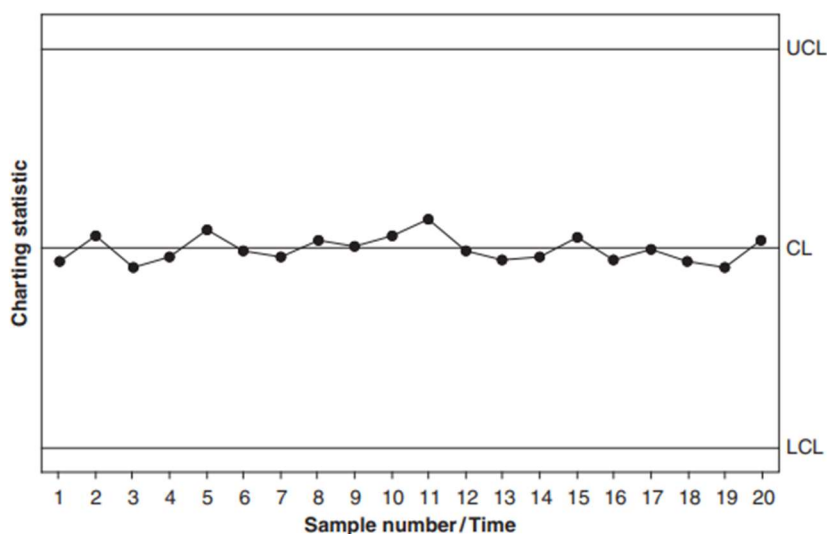
Chakraborti e Graham (2019) ainda explicam que, mesmo que os dados sejam todos plotados entre os limites de controle, ainda pode haver outros indícios de que o processo está sob a influência de causas especiais, dentre os quais dois deles são comentados. O primeiro caso, como exemplificado na Figura 9, é quando os pontos apresentam variações que indicam algum tipo de padrão não aleatório; enquanto o segundo, como exemplificado na Figura 10, é quando os pontos demonstram uma significativa falta de variabilidade, estando demasiadamente agrupados em torno da LC. Dessa forma, compõem-se então as três principais formas de indício de que um processo está fora de controle.

Figura 9 – Gráfico de controle com um padrão cíclico (não aleatório)



Fonte: Chakraborti e Graham (2019)

Figura 10 – Gráfico de controle com um padrão de agrupamento em torno de LC



Fonte: Chakraborti e Graham (2019)

Algo importante para compreender os gráficos de controle, seus limites e suas capacidades de detecção de anomalias ou não conformidades, também mencionado por Chakraborti e Graham (2019) e Montgomery (2009), é a conexão dessas ferramentas com os testes de hipóteses, conceito bastante conhecido no meio estatístico. Isso porque o gráfico de controle pode ser interpretado como um teste para a hipótese de que o processo está em controle. Dessa forma, a chamada “hipótese nula”, ou H_0 , é de que o processo está em controle, e a chamada “hipótese alternativa”, ou H_1 , é de que o processo está fora de controle. Assim, nota-

se cada plotagem de uma amostra no gráfico como um teste de hipóteses, em que se o ponto é plotado dentro dos limites de controle, a hipótese H_0 de que o processo está em um estado de controle estatístico é aceita, enquanto se alguma amostra é plotada fora dos limites, H_0 é rejeitada. As expressões que representam as hipóteses descritas são:

$$H_0: \text{Processo em controle;} \quad (1)$$

$$H_1: \text{Processo fora de controle.} \quad (2)$$

E a partir disso, é considerado que o “erro do tipo I”, ou “ α ”, seria referente à probabilidade de o processo ser declarado como fora de controle quando na verdade ele estiver em controle; e o “erro do tipo II”, ou “ β ” seria, por sua vez, a probabilidade de o processo ser declarado como em controle, quando, na verdade, ele não estiver (MONTGOMERY, 2009a). As expressões que representam os erros mencionados são as seguintes:

$$\alpha = P \{ \text{erro do tipo I} \} = P \{ \text{rejeitar } H_0 \mid H_0 \text{ é verdadeira} \}; \quad (3)$$

$$\beta = P \{ \text{erro do tipo II} \} = P \{ \text{aceitar } H_0 \mid H_0 \text{ é falsa} \}. \quad (4)$$

Levando isso em consideração, os testes de hipóteses e as relações descritas entre eles e os gráficos de controle podem ser úteis para analisar a performance dos gráficos. E uma das formas de fazê-lo seria por meio do cálculo do que é chamado de “poder” do gráfico, que representa a capacidade de ele detectar anomalias ou não conformidades em um processo que está fora de controle, ou seja, a probabilidade de ele gerar um “sinal”, quando ele realmente deve fazê-lo (MONTGOMERY, 2009a). A expressão que representa o “poder” é a descrita a seguir:

$$\text{Poder (Pd)} = (1 - \beta) = P \{ \text{rejeitar } H_0 \mid H_0 \text{ é falsa} \}. \quad (5)$$

A forma mais conhecida e utilizada para mensurar e analisar a performance dos gráficos de controle é por meio do NMA, que representa o número médio de amostras que devem ser plotadas no gráfico até que ele gere o primeiro sinal (CHAKRABORTI; GRAHAM, 2019).

A expressão geral que define o NMA é:

$$\text{NMA} = 1 / (\text{Probabilidade de a amostra ser rejeitada pelo gráfico}). \quad (6)$$

Dessa forma, pode-se defini-la, também, em termos de α e β (ASLAM; SAGHIR; AHMAD, 2021), como descrito a seguir:

$$\text{NMA} = 1 / \alpha. \quad (7)$$

$$NMA = 1 / (1 - \beta) = 1 / Pd. \quad (8)$$

Quando o processo está em controle, o NMA pode ser definido pela expressão 7 (já que α é a probabilidade de o gráfico rejeitar a amostra quando o processo está em controle), e quando fora de controle, pode ser definido pela expressão 8 (já que $1 - \beta$ é a probabilidade de o gráfico rejeitar a amostra quando o processo está fora de controle).

Ainda sobre α e β , Montgomery (2009) também comenta que as probabilidades desses erros estatísticos do teste de hipóteses também podem ser utilizadas na especificação dos limites de controle, que é uma questão crítica a ser decidida na construção dos gráficos. Isso porque, quanto mais distantes os limites de controle estiverem da linha central, maior a probabilidade β , do erro do tipo II, e menor a probabilidade α , do erro do tipo I.

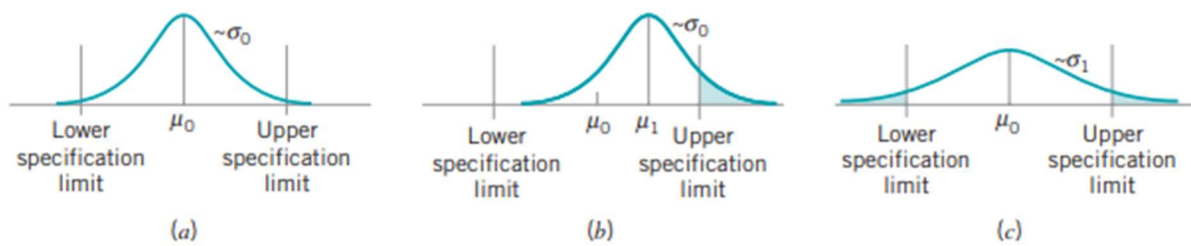
Como mencionado na introdução deste trabalho, podem ser utilizadas nos gráficos de controle as chamadas inspeções por variável e as inspeções por atributo, que serão tratadas nas duas seções seguintes deste capítulo.

2.3 GRÁFICOS DE CONTROLE POR VARIÁVEL

Os gráficos de controle por variável são utilizados quando as características a serem monitoradas são mensuráveis em uma escala contínua, assumindo-se geralmente que elas seguem uma distribuição normal, podendo ser exemplificadas por massa, comprimento, ou temperatura (ASLAM; SAGHIR; AHMAD, 2021).

Para um monitoramento dos processos eficaz e eficiente, é necessário que seja monitorada não só a média, como mais comumente é realizado, mas também a variabilidade, que é crucial para a melhora ou a manutenção da qualidade. A Figura 11 ajuda a ilustrar e esclarecer como não só um desvio na média gera não conformidades, mas um aumento da variabilidade, que pode ser representada pelo desvio padrão (σ), também poderá provocar uma quantidade muito significativa de não conformidades (MONTGOMERY, 2009).

Figura 11 – Mudanças na média e na variabilidade aumentando as não conformidades



Fonte: Montgomery (2009)

Na Figura 11, na parte “a”, tem-se a distribuição da característica com tanto a média quanto a variabilidade em seus valores nominais, ou seja, o processo está em controle e ocorrerão poucos sinais no gráfico. Na parte “b”, nota-se que o desvio padrão se manteve, mas há um desvio na média de μ_0 para μ_1 , ocorrendo uma maior quantidade de não conformidades, e, portanto, de sinais no gráfico. Já na parte “c”, observa-se que a média se mantém em seu valor nominal, mas o desvio padrão aumenta de σ_0 para σ_1 , e isso também provoca maiores quantidades de não conformidades e sinais no gráfico.

Além disso, Aslam, Saghir e Ahmad (2021) ainda explicam que, se a variabilidade de um processo é maior que sua própria média, então o monitoramento da média se torna inexpressivo.

De acordo com Chakraborti e Graham (2019), os gráficos de controle por variável do tipo Shewhart têm seus limites de controle, no geral, podendo ser representados da seguinte forma:

$$LCS = \theta + k \cdot \sigma; \quad (9)$$

$$LC = \theta; \quad (10)$$

$$LCI = \theta - k \cdot \sigma. \quad (11)$$

Para essas expressões, assume-se que θ seja um parâmetro da distribuição da característica monitorada (como a média, por exemplo), e σ seja o desvio padrão da distribuição. k , que deve ser maior que zero, é uma constante utilizada como um parâmetro de construção do gráfico, que quantifica a distância dos limites de controle superior e inferior da linha central, expressa em termos de desvio padrão.

Os gráficos de controle por variáveis mais comumente utilizados para o monitoramento da média e da variabilidade são o $\bar{X}$ e o R (da amplitude), respectivamente (MONTGOMERY, 2009). Contudo, neste trabalho, será dado destaque ao S^2 , que monitora a variância, por conta de estar mais ligado ao gráfico ao qual esse estudo propõe uma interface: o ATTRIVAR para o monitoramento da variabilidade *por meio da variância*.

2.3.1 Gráfico S^2

Considerando o monitoramento de uma característica da qualidade à qual assume-se uma distribuição normal, com a média e o desvio padrão em controle sendo μ_0 e σ_0 , respectivamente, o gráfico S^2 terá o seguinte teste de hipóteses, representado pelas expressões 12 e 13, e os seguintes limites de controle superior (LSC) e inferior (LIC), representados respectivamente pelas expressões 14 e 15 (ASLAM; SAGHIR; AHMAD, 2021; FARAZ; HEUCHENNE; SANIGA, 2018):

$$H_0: S^2 = \sigma_0^2; \quad (12)$$

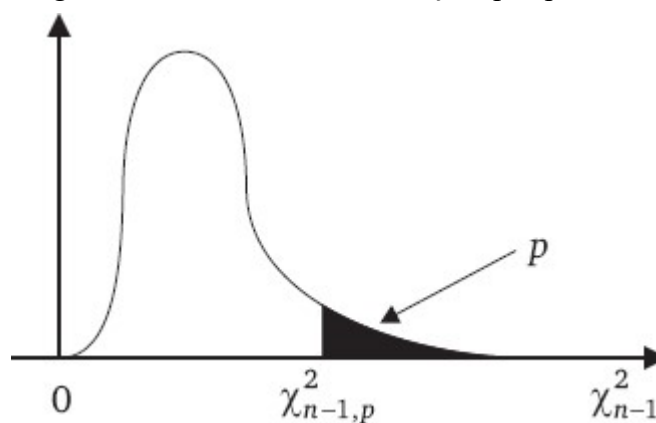
$$H_1: S^2 \neq \sigma_0^2; \quad (13)$$

$$LSC = \frac{\sigma_0^2}{n-1} \cdot \chi^2_{(n-1, \alpha/2)}; \quad (14)$$

$$LIC = \frac{\sigma_0^2}{n-1} \cdot \chi^2_{(n-1, 1-\alpha/2)}. \quad (15)$$

Em que “n” representa o tamanho da amostra, “ α ” representa a probabilidade de erro do tipo I, e “ $\chi^2_{(v, p)}$ ” representa o valor crítico da distribuição qui-quadrado com “v” graus de liberdade e referente à probabilidade “p” (utilizando-a como a probabilidade relativa à *cauda direita* da distribuição qui-quadrado), como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Gráfico da distribuição qui-quadrado



Fonte: Costa, Epprechet, Carpinetti (2005)

Já que é desejável que a variabilidade de um processo seja a menor possível, e que o gráfico S^2 se torna mais efetivo em detectar aumentos na variância do processo quando apresenta apenas o limite superior (LSC), é muito comum que se construa esse gráfico apenas

com esse limite de controle, que pode passar a ser chamado apenas de LC_{S^2} (APARISI; MOSQUERA; EPPRECHET, 2018). Nesse caso, o limite de controle do gráfico passa a ser representado pela seguinte expressão (utilizando α como a probabilidade da *cauda direita* da distribuição qui-quadrado):

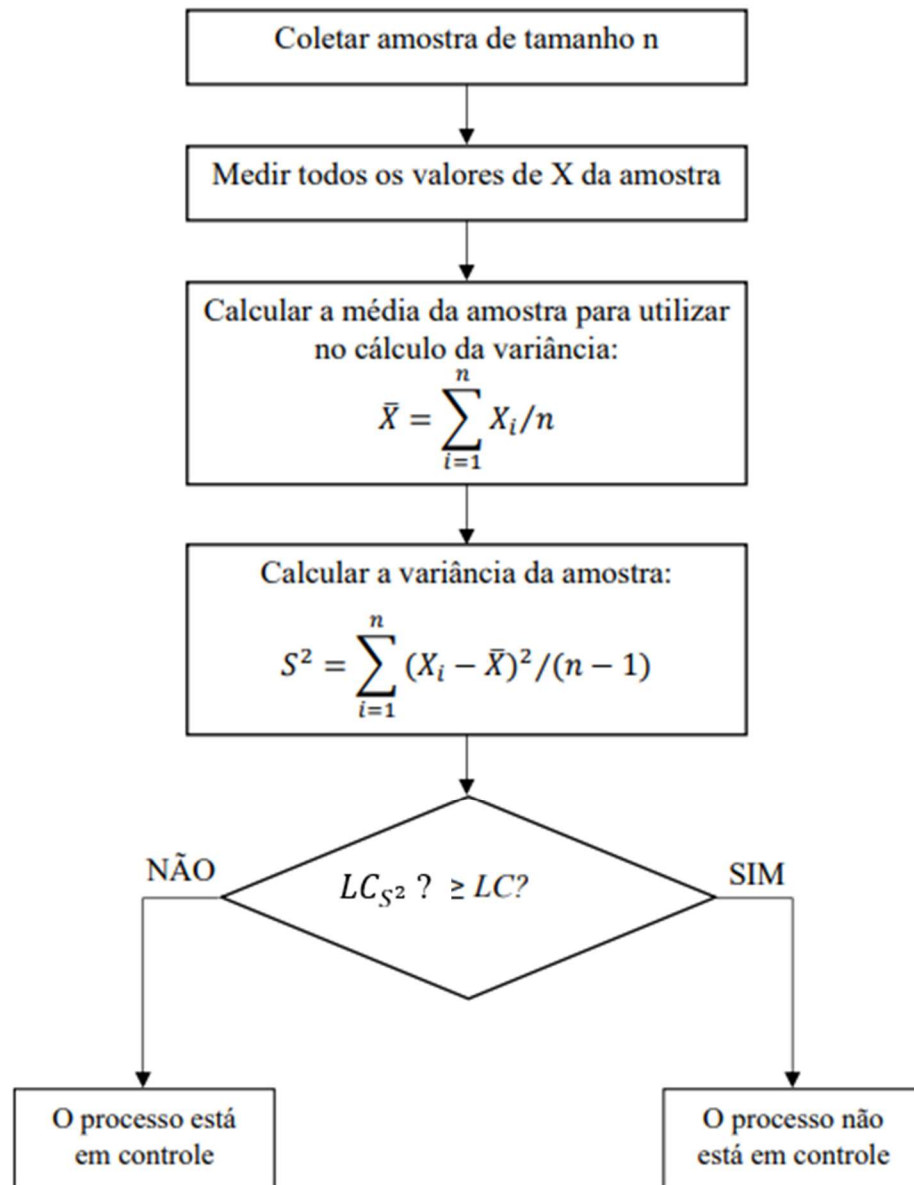
$$LC_{S^2} = \frac{\sigma_0^2}{n-1} \cdot \chi^2_{(n-1, \alpha)}. \quad (16)$$

Na prática, é comum que os parâmetros do processo em controle não sejam conhecidos, e por isso, seja necessário estimá-los a partir de dados históricos (FARAZ; HEUCHENNE; SANIGA, 2018). Contudo, nesse trabalho, não será tratada a construção de gráficos com parâmetros estimados, sobre os quais existem artigos que dissertam mais especificamente.

Com os parâmetros do processo conhecidos ou estimados de forma confiável, e os limites de controle do gráfico definidos, inicia-se a sua implementação e a coleta das amostras para o monitoramento do processo (ASLAM; SAGHIR; AHMAD, 2021).

Nessa fase, no gráfico S^2 , as amostras são coletadas e são medidas suas respectivas variâncias, e essas, são plotadas no gráfico para analisar se estão abaixo ou acima do limite de controle definido (considerando *apenas o* LC_{S^2} , como comentado anteriormente) (MONTGOMERY, 2009). Isso pode ser mais bem elucidado e ilustrado pela Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma de aplicação do gráfico S^2



Fonte: Adaptado de Aslam, Saghir e Ahmad (2021); Montgomery (2009); e Simões, Costa e Machado (2020)

2.4 GRÁFICOS DE CONTROLE POR ATRIBUTO

Aslam, Saghir e Ahmad (2021) explicam que, em suma, os *atributos* são características de qualidade para as quais não são especificados valores numéricos, e que, com isso, são medidas em termos de uma escala nominal ou um esquema de rótulos definido, como: defeituoso / não defeituoso; aceitável / inaceitável; excepcional / bom / regular / ruim; atende / não atende aos critérios; conforme / não conforme. Itens como pregos, parafusos ou lâmpadas, por exemplo, podem ser simplesmente classificados como defeituosos ou não defeituosos (COSTA; EPPRECHET; CARPINETTI; 2005).

Os gráficos de controle por atributos mais comumente conhecidos e utilizados são os chamados p , utilizado para monitorar a *proporção* de itens não conformes, e np , utilizado para monitorar o *número* de itens não conformes, sendo ambos voltados a processos que se adequam a uma distribuição binomial (ASLAM; SAGHIR; AHMAD, 2021).

De acordo com Aslam, Saghir e Ahmad (2021), os gráficos de controle por atributos foram introduzidos por Shewhart em 1926 e 1927, e eram utilizados, originalmente, para monitorar características de qualidade que não são possíveis de serem avaliadas por meio de mensurações. Contudo, Ho e Aparisi (2016) explicam que já há cerca de 70 anos que pesquisadores fazem contribuições sugerindo sua utilização para o controle de características de qualidade contínuas, e mais recentemente, estudos têm procurado propor melhores formas de fazê-lo.

A utilização da inspeção por atributos para o monitoramento de características contínuas se baseia principalmente em explorar o fato de que, nela, importa apenas se o item é conforme ou não conforme, não necessitando de medições para isso, e podendo, então, ser utilizados sistemas ou ferramentas que classifiquem os itens entre os atributos, como o conhecido exemplo do dispositivo “passa-não-passa” (WU *et al.*, 2009).

Geralmente, ao se comparar o desempenho do gráfico de controle por atributos com o desempenho do gráfico de controle por variável, com o mesmo tamanho da amostra, o gráfico de controle por variáveis apresentará melhor desempenho. No entanto, pode-se aumentar o tamanho da amostra do gráfico por atributos até este ter o mesmo desempenho que o gráfico por variáveis. No caso univariado, por exemplo, o tamanho da amostra do gráfico por atributos não chega a dobrar para atingir o mesmo desempenho que o por variáveis (HO, QUININO, 2013).

Tendo isso em consideração, ao comparar os dois tipos de gráfico de controle, aqueles que utilizam apenas inspeções por variável apresentam uma eficiência significativamente maior na detecção de perturbações nos processos, como é evidenciado por Ho e Quinino (2013; 2016), que mostram um exemplo do livro “Introduction to Statistical Quality Control”, de Montgomery (2009), com os gráficos mais comuns de cada um dos tipos para o monitoramento da média (o gráfico $\bar{X}$ para variável e o np para atributo). No exemplo, para detectar um mesmo deslocamento da média, o tamanho da amostra no gráfico $\bar{X}$ foi 6,667 vezes menor que a utilizada no gráfico np . Além disso, estes que utilizam inspeções por variável também são mais informativos, e, portanto, contribuem mais na identificação de problemas eminentes, já que utilizam um controle mais quantitativo, com as medições dos valores da característica de qualidade analisada, enquanto aqueles que utilizam as inspeções por atributo apresentam um

controle mais qualitativo, ao fazer uma classificação da amostra (APARISI; HO, 2018; BEZERRA; HO; QUININO, 2018).

Em contrapartida, continuando a comparação, Aparisi e Ho (2018); Aslam *et al.* (2015); Bezerra, Ho e Quinino (2018); Ho e Aparisi (2016); e Ho e Quinino (2013, 2016) comentam que a mensuração e a coleta dos dados na inspeção por atributo normalmente são mais simples, rápidas e baratas que na inspeção por variável. Aparisi e Ho (2018) ainda complementam que o controle por atributo apresenta maior facilidade operacional de implementação, já que requer menos habilidade e conhecimento por parte dos operadores; e também evita possíveis desperdícios advindos de danos e descartes de amostras que podem ser submetidas a procedimentos destrutivos para sua mensuração.

Por isso, quando a mensuração de uma característica de qualidade é cara e demorada, é interessante avaliar a possibilidade de se utilizar um gráfico de controle por atributo para monitorar a média ou a variância do processo (HO; QUININO, 2016).

Com o objetivo de desenvolver gráficos cada vez mais eficientes e econômicos para o controle e monitoramento dos processos, pesquisadores têm explorado a utilização dos gráficos de controle por atributo e melhorando cada vez mais sua performance, em busca de aproveitar melhor suas vantagens.

Ho e Quinino (2013), por exemplo, propuseram o gráfico np_{S^2} , que utiliza a inspeção por atributo para o monitoramento da variância, o qual mostra um desempenho já significativamente maior que o exemplo que eles citam de Montgomery (2009). Nesse último, utilizava-se o gráfico np para o monitoramento da média, e necessitava-se de uma amostra 6,667 vezes maior para ter o mesmo desempenho que o gráfico $\bar{X}$. Mesmo que para o monitoramento da variância, na nova proposta deles, o np_{S^2} já precisou de uma amostra menos que 2 vezes maior que a utilizada no gráfico de controle por variável (o S^2) para mostrar o mesmo desempenho que ele.

2.4.1 Gráfico np

De acordo com Aslam, Saghir e Ahmad (2021) e Montgomery (2009), o teste de hipóteses do gráfico np pode ser representado pelas expressões 17 e 18, que condizem ao processo estar ou não gerando o número desejado ou aceitável de não conformidades; e seus limites superior e inferior são definidos segundo as expressões 19 e 20, respectivamente, sendo n o tamanho da amostra, k_{np} , o fator de abertura dos limites do gráfico, e p , a proporção de itens reprovados:

$$H_0: np = np_0; \quad (17)$$

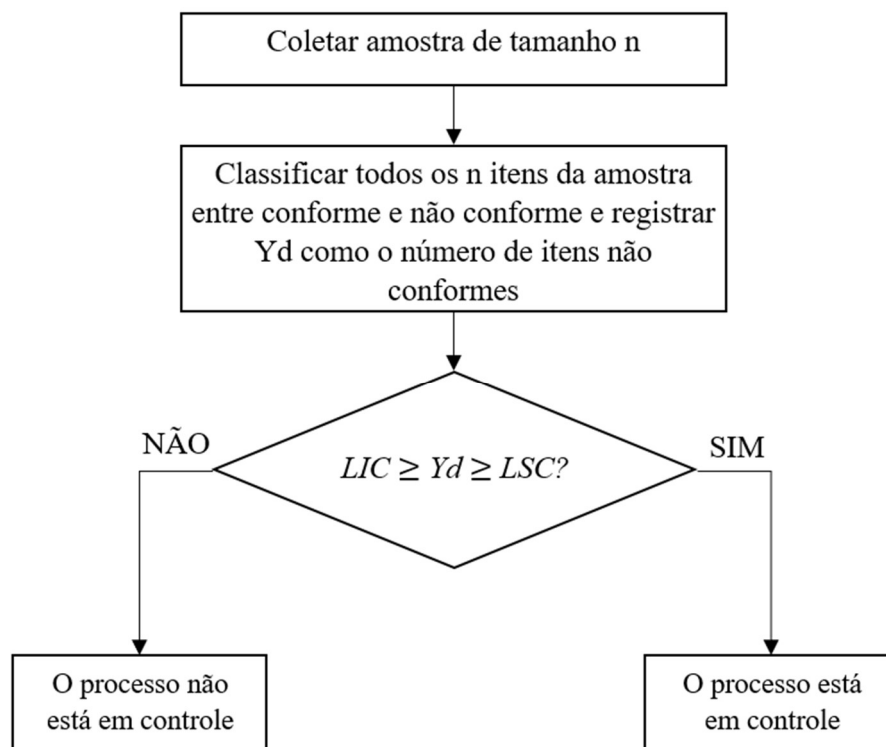
$$H_1: np \neq np_0; \quad (18)$$

$$LSC = np + k_{np} \cdot \sqrt{np \cdot (1 - p)}; \quad (19)$$

$$LIC = np - k_{np} \cdot \sqrt{np \cdot (1 - p)}. \quad (20)$$

E então, como esquematizado no fluxograma da Figura 14, no processo de monitoramento por meio desse gráfico, as amostras são coletadas, e seus itens, classificados entre conformes ou não conformes. Com isso, o número de itens não conformes da amostra é plotado no gráfico para verificar se ele está dentro do intervalo delimitado pelos limites de controle, e assim determinar se a amostra é aceita ou rejeitada (COSTA; EPPRECHET; CARPINETTI, 2005; MONTGOMERY, 2009).

Figura 14 – Fluxograma de aplicação do gráfico np



Fonte: Adaptado de Aslam, Saghir e Ahmad (2021); Montgomery (2009); e Simões, Costa e Machado (2020)

2.4.2 Gráfico np_{S^2}

O gráfico de controle por atributo que mais se assemelha à etapa de inspeção por atributo do gráfico ao qual este trabalho se propõe a desenvolver um aplicativo é o já mencionado np_{S^2} , proposto por Ho e Quinino (2013).

Eles explicam que, nesse gráfico, à medida em que cada item da amostra é submetido a uma inspeção por atributo com os limites de controle discriminantes LDS e LDI (ou UDL e LDL), de forma a ser categorizado entre conforme e não conforme, já vai sendo contabilizado o número de itens em cada categoria até que a itens sejam aprovados ou b itens sejam reprovados primeiro. Assim, se o primeiro caso acontece, o processo é reconhecido como em controle, e no segundo caso, o processo é classificado como fora de controle, como mostrado na Figura 15.

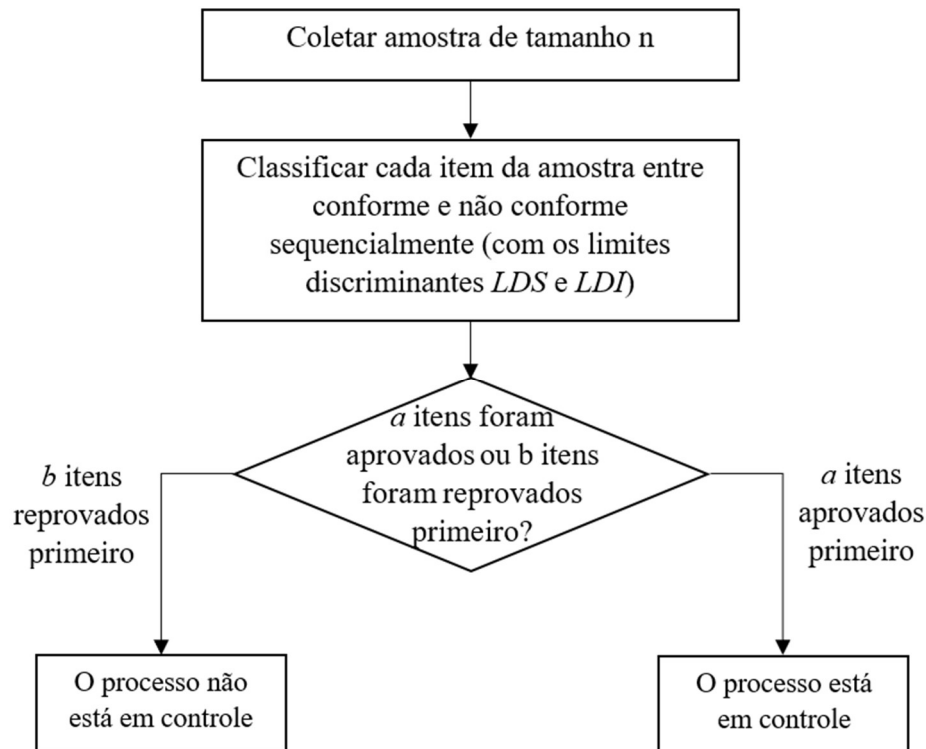
Tendo isso em vista, eles destacam que, além de não necessitar de medições da característica da qualidade, por utilizar apenas inspeções por atributo, outra vantagem prática desse gráfico em relação ao S^2 e ao R é que, no np_{S^2} , pode ser que nem todos os n itens da amostra necessitem ser inspecionados.

Ho e Quinino (2013) explicam que, para esse gráfico, os limites de controle discriminantes (LDS e LDI), que delimitam o intervalo por meio do qual cada item das amostras é classificado como conforme ou não conforme, são representados pelas expressões 21 e 22:

$$LDI = \mu_0 - k \cdot \sigma_0; \quad (21)$$

$$LDS = \mu_0 + k \cdot \sigma_0. \quad (22)$$

Além disso, explicam também que, tanto esses limites quanto os parâmetros a e b , utilizados para aceitar ou rejeitar as amostras com base no número de itens classificados como não conformes, são otimizados para que o valor de NMA_0 (número médio de amostras até o sinal quando o processo está em controle) seja o mais próximo de possível de um valor predeterminado, e NMA_1 (número médio de amostras até o sinal quando o processo não está em controle) seja o mínimo possível.

Figura 15 – Fluxograma de aplicação do gráfico np_{s^2} 

Fonte: Adaptado de Ho e Quinino (2013, 2016) e Simões, Costa e Machado (2020)

2.5 GRÁFICOS DE CONTROLE MISTOS

Tendo em vista que a simplicidade dos gráficos Shewhart pode tornar esses dispositivos lentos na detecção de pequenas e moderadas alterações nos parâmetros dos processos monitorados, há tempos, pesquisadores vêm estudando e propondo novas estratégias para melhorar a aplicabilidade, a eficiência e a performance desses gráficos (HO; APARISI, 2016; MONTGOMERY, 2009). E para isso, assim como a inspeção por atributo passou a ser sugerida para o monitoramento de variáveis contínuas, surgiu, também, a proposta de unir os dois tipos de inspeção, visando conciliar as vantagens de ambos, para o monitoramento tanto da média quanto da variabilidade de processos univariados ou multivariados.

Os primeiros a propor essa estratégia foram Sampaio, Ho e Medeiros (2014), que desenvolveram um gráfico que chamaram de $np_x-\bar{X}$, no qual combinava-se dois gráficos já existentes para o monitoramento da média: o np_x , que utiliza inspeções por atributo, e o $\bar{X}$, que utiliza inspeções por variável.

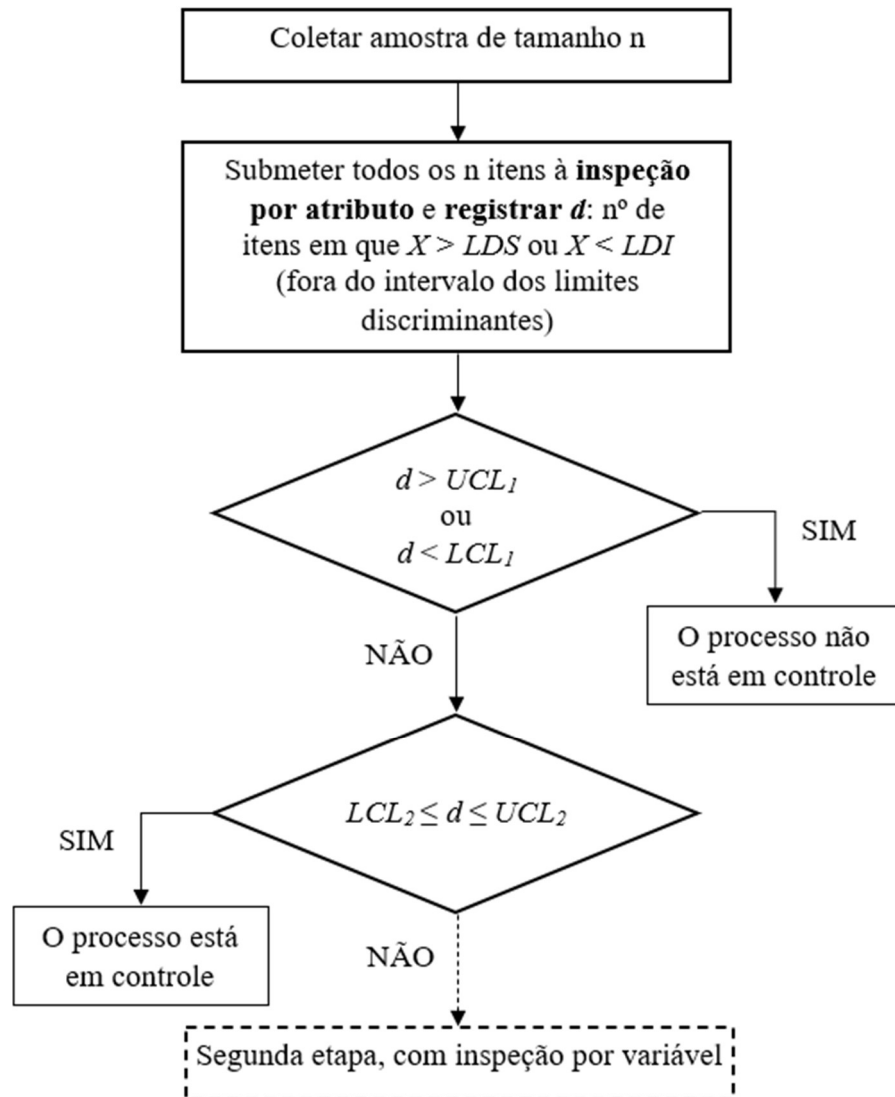
Os autores explicam que, para monitorar um processo por meio desse gráfico, os gráficos np_x e o $\bar{X}$ deveriam ser construídos separadamente, mas utilizados em conjunto para avaliar o estado do processo. Então, para isso, coleta-se amostras que são divididas entre duas

subamostras, das quais uma delas passa pelo processo de avaliação do gráfico np_x , e, caso ela seja rejeitada, a segunda passa pela avaliação do gráfico $\bar{X}$.

Assim, para a primeira fase da avaliação, cada item da subamostra é classificado entre conforme e não conforme, de acordo com os limites discriminantes definidos, e se o número de itens não conformes for maior que o LC_{np_x} , a subamostra é rejeitada e segue-se para a segunda fase, de inspeção por variável, com a outra subamostra. Nessa etapa, a característica é medida para todos os itens da subamostra, e a média é calculada e plotada no gráfico $\bar{X}$. Caso esteja fora do intervalo delimitado pelos limites de controle, o processo será definido como fora de controle; caso contrário, o processo é classificado como em controle.

Após Sampaio, Ho e Medeiros (2014), Aslam *et al.* (2015) também propõem um gráfico misto que segue uma lógica similar, porém, nele, a amostra já não é subdividida entre duas subamostras (utilizando-se, assim, a mesma para os dois estágios), e são utilizados dois pares de limites de controle na fase de inspeção por atributo. Como esquematizado na Figura 16, isso ocorre de forma que, no primeiro estágio do gráfico, Aslam *et al.* (2015) propõem que, se o número de itens não conformes da amostra (d) estiver fora do intervalo delimitado pelos limites que eles chamam de LCL_1 e UCL_1 , o processo já é declarado como fora de controle. Caso contrário, é avaliado se d está dentro do intervalo delimitado por LCL_2 e UCL_2 , e se isso for verdadeiro, o processo é declarado como em controle. E quando nenhuma dessas opções for verdadeira, segue-se para o segundo estágio, de inspeção por variável.

Figura 16 – Fluxo do primeiro estágio do gráfico misto de Aslam *et al.* (2015)



Fonte: Adaptado de Aslam *et al.* (2015) e Simões, Costa e Machado (2020)

Em seguida, Ho e Aparisi (2016) propuseram, pela primeira vez, os gráficos ATTRIVAR-1 e ATTRIVAR-2 (para o monitoramento da média), cujas estratégias são chamadas, neste trabalho, de B-ATTRIVAR SS e B-ATTRIVAR DS, respectivamente.

Eles explicam que, nessas versões, a primeira etapa ocorre da mesma forma nos dois gráficos, a qual é semelhante à estratégia de Aslam *et al.* (2015). Nela, todos os itens da amostra coletada passam pela inspeção por atributo com os limites discriminantes e, caso o número de itens não conformes Y for maior ou igual que CL_y , a amostra é rejeitada e o processo é declarado como fora de controle; enquanto, caso contrário, é avaliado se Y é menor que w (*warning limit*). Caso isso seja verdadeiro, a amostra é aceita, e o processo, declarado como em controle. Se nenhuma das opções citadas for verdadeira, ou seja, se $w \leq Y < CL_y$, segue-se para a etapa com inspeção por variável.

Nesse estágio, os dois gráficos se diferenciam, pois no ATTRIVAR SS, é utilizada *a mesma amostra* para realizar a inspeção por variável, enquanto no ATTRIVAR DS, é utilizada *a próxima amostra* para isso. Por esse motivo, são utilizadas, aqui, as siglas *SS* e *DS* para se referir às estratégias mencionadas, sendo *SS* referente ao termo *same sample* (*mesma amostra*, em inglês) e *DS*, a *different sample* (*amostra diferente*, em inglês) (VIOLANTE; MACHADO, 2021).

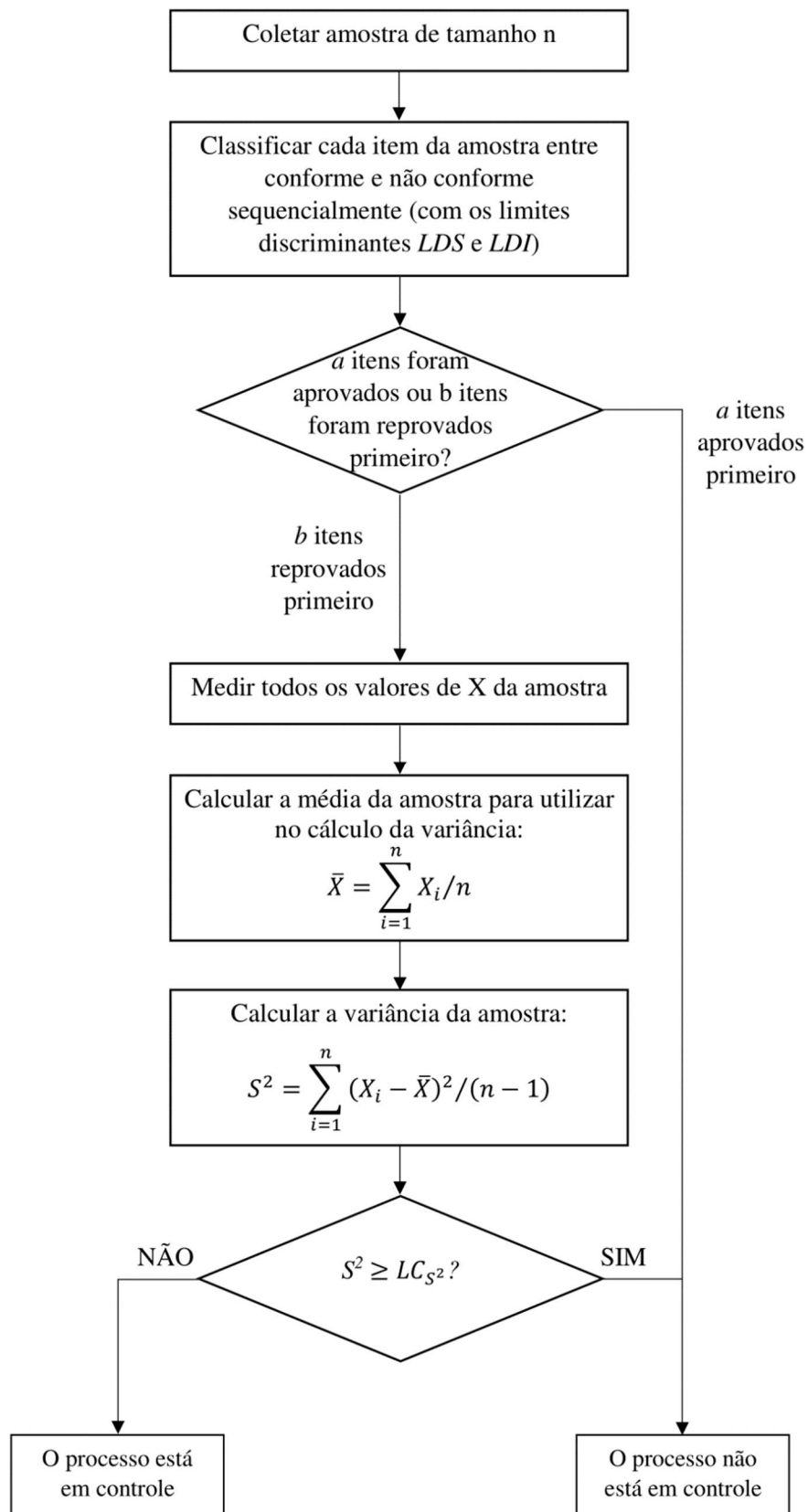
No mesmo ano, Ho e Quinino (2016) propuseram um gráfico misto para o monitoramento da variabilidade por meio da variância, e nessa estratégia, eles combinaram o gráfico np_{S^2} , de Ho e Quinino (2013), para o estágio de inspeção por atributo, e o gráfico S^2 , para a etapa de inspeção por variável, para a qual eles propõem utilizar uma nova amostra.

Assim, para esse gráfico, cada item da amostra é classificado entre conforme e não conforme, e se a itens são aprovados primeiro, o processo é declarado como em controle, e caso contrário, se b itens são desaprovados primeiro, é coletada uma nova amostra e, com ela, segue-se para a fase de inspeção por variável. Para isso, é medida a característica da qualidade de cada um dos itens da nova amostra e calculada a variância S^2 . E em seguida, é avaliado se $S^2 > LC_{S^2}$ para que o processo seja declarado como fora de controle caso isso seja verdadeiro, ou em controle, caso contrário (ou seja, caso $S^2 \leq LC_{S^2}$). Todo o fluxo desse processo pode ser mais bem compreendido na Figura 17, que o ilustra.

Posteriormente, Simões, Costa e Machado (2020) propuseram o gráfico ATTRIVAR Trinomial, que eles também chamam de T-ATTRIVAR, para o monitoramento da média. Nessa estratégia, eles utilizam a lógica já explicada dos gráficos ATTRIVAR SS, porém, nas inspeções por atributo, os itens da amostra são classificados entre *três* categorias excludentes, ao invés de duas, como antes. Por isso, também, eles se referiram aos gráficos propostos anteriormente por Ho e Aparisi (2016) como ATTRIVAR Binomiais, ou B-ATTRIVAR, que é a nomenclatura utilizada no presente trabalho.

No ano seguinte, Violante e Machado (2021) propuseram um estudo sobre os gráficos B-ATTRIVAR SS e DS para o monitoramento da variabilidade dos processos por meio da variância (S^2), sendo o primeiro deles, o principal gráfico do presente trabalho, para o qual se propõe fazer um aplicativo.

Figura 17 – Fluxograma de aplicação do gráfico misto para o monitoramento da variância de
Ho e Quinino (2016)



Fonte: Adaptado de Ho e Quinino (2016) e Simões, Costa e Machado (2020)

Nesse gráfico, chamado de B-ATTRIVAR SS S^2 por Violante e Machado (2021), o fluxo na primeira etapa, de inspeção por atributo é o mesmo que o descrito anteriormente para o gráfico ATTRIVAR de Ho e Aparisi (2016). Então, após a amostra ser coletada, todos os seus n itens são inspecionados por atributo por meio de algum dispositivo configurado com os limites de controle discriminantes LDS e LDI , e cada item que não se encontra dentro desses limites, é classificado como não conforme. Depois de classificar todos os itens da amostra, é registrado Y_D como o número de itens desaprovados, e se $Y_D \geq CL_y$, o processo é declarado como fora de controle. Caso contrário, é avaliado se $Y_D < W_y$, e caso isso seja verdadeiro, o processo é declarado como em controle, mas caso não, segue-se para o processo de inspeção por variável com a mesma amostra.

Para a fase de inspeção por variável, é medida a característica de qualidade em todos os itens da amostra, e calculada a variância S^2 . Se S^2 estiver abaixo do limite de controle LC_{S^2} , o processo é declarado como em controle, e se não, é declarado como fora de controle. Todo esse processo pode ser mais bem visualizado na Figura 18, que o esquematiza.

Nesse gráfico, na etapa de inspeção por atributo, os limites de controle são definidos da mesma forma que no gráfico np_{S^2} , explicado na sessão 2.4.2 deste trabalho. Isso quer dizer que tanto os limites discriminantes quanto os parâmetros chamados aqui de W_y e CL_y são otimizados para atingir valores aceitáveis de performance determinados por NMA_0 e NMA_1 ou por α e β .

Na etapa de inspeção por variável, os limites de controle podem ser definidos pelas expressões 14 e 15, da mesma forma que no gráfico S^2 , explicado na sessão 2.3.1, embora nesse trabalho eles também são otimizados em função de α e β .

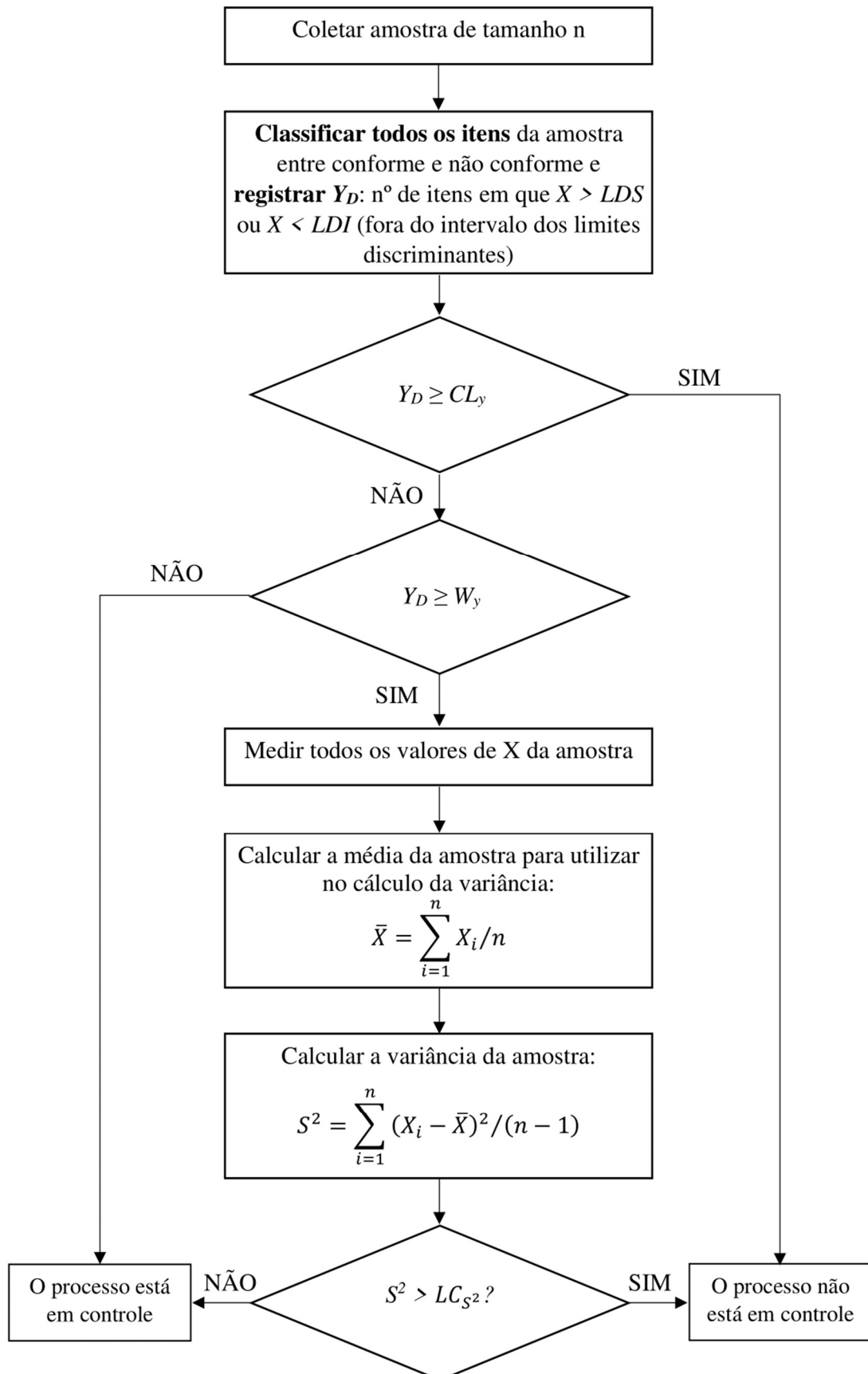
Violante e Machado (2021) compararam a performance do gráfico B-ATTRIVAR SS S^2 (inspeção mista) com a dos gráficos S^2 (inspeção por variável) e np (inspeção por atributo), como mostra a Tabela 1, que compila os valores de NMA simulados em R, com amostras de tamanho 5 ($n=5$), variando, em cada linha, o desvio padrão das amostras simuladas, por meio de λ . Os resultados do trabalho evidenciaram uma performance do gráfico estudado similar à do gráfico np . Contudo, vale lembrar que, ainda assim, existem vantagens desse gráfico em relação ao np , principalmente pelo fato de que as medições da característica de qualidade necessárias na fase de inspeção por variável do B-ATTRIVAR SS S^2 fornecem mais informações que serão úteis para a investigação do processo.

Tabela 1 – Comparação entre a performance dos gráficos para o monitoramento de S^2 com $n=5$

λ (lambda)	NMA		
	S^2	np	B-ATTRIVAR SS S^2
1,0	367,28	371,71	370,71
1,1	107,93	118,87	120,12
1,2	42,79	50,26	51,54
1,3	21,21	26,72	26,31
1,4	12,32	15,61	15,48
1,5	8,10	10,19	10,22
1,6	5,72	7,18	7,33
1,7	4,33	5,44	5,51
1,8	3,52	4,37	4,34
1,9	2,92	3,54	3,56
2,0	2,51	3,00	3,04

Fonte: Violante e Machado (2021)

Figura 18 – Fluxograma de aplicação do gráfico B-ATTRIVAR SS S²



3 MÉTODOS

Tendo em vista que este trabalho tem como base uma pesquisa na área do controle estatístico de processos, da engenharia da qualidade, utilizando variáveis, valores numéricos, cálculos estatísticos e resultados de simulações para seu desenvolvimento e para a geração e a análise dos dados; sua abordagem pode ser classificada como quantitativa, já que, assim como escreve Martins (2018), no capítulo 3 do livro “Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações”, a mensuração de variáveis, utilizada para obter dados que permitam o teste das hipóteses da pesquisa, é o que mais caracteriza este tipo de abordagem.

A classificação do tipo desta pesquisa não é tão evidentemente clara, mas pode-se dizer que ela tem características compatíveis às categorias de modelagem e simulação, já que utiliza programação e cálculos para representar e simular o funcionamento de uma ferramenta utilizada no processo de gestão e controle de qualidade, o que se define como uma característica que, de acordo com Nakano (2018), no mesmo livro citado acima, remete a essas duas categorias citadas, considerando que, para ele, elas são identificadas pelo uso de técnicas matemáticas e computacionais para descrever e/ou simular sistemas ou partes de um processo.

Contudo, a categoria mais compatível aos métodos utilizados no desenvolvimento dos objetivos finais desta pesquisa é a de experimento. Isso porque, assim como Martins, Mello e Turrioni (2013) explicam, a principal característica da pesquisa experimental é que nela, estabelece-se e controla-se os valores experimentados para comprovar, utilizando dados e resultados quantitativos, os efeitos disso no objeto em questão.

O aplicativo que este trabalho se propôs a fazer foi elaborado no ambiente de desenvolvimento RStudio, que é gratuito e conta com vários pacotes e funcionalidades disponíveis para instalação, utilizando a programação computacional na linguagem R, que, de acordo com Giorgi, Ceraolo e Mercatelli (2022), está entre as 10 linguagens de programação mais populares no mundo e se tornou uma ferramenta computacional fundamental para pesquisas em diversos campos, como estatística, matemática, física, química, medicina, entre outros.

Além disso, o pacote *Shiny* foi utilizado para o desenvolvimento da interface, o qual, de acordo com Giorgi, Ceraolo e Mercatelli (2022), foi lançado em 2012 e tem continuamente ganhado popularidade na elaboração de *websites* interativos utilizando as funcionalidades da linguagem R.

Além disso, para a medição da eficiência ou do desempenho dos gráficos de controle, é utilizado o número médio de amostras até o sinal (NMA).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DEFINIÇÃO DE ENTRADAS E SAÍDAS DO APLICATIVO

Para que fosse desenvolvido um código que respondesse às questões de pesquisa e cumprisse o objetivo geral deste trabalho, primeiramente, foram definidas suas entradas e saídas.

Assim, visando criar um aplicativo que gerasse um gráfico de controle B-ATTRIVAR SS, e visando responder à questão de pesquisa que se refere a como calcular os limites de controle do gráfico, seria necessário que o código fosse capaz de gerar os limites de controle por atributo W_y e CL_y , e os limites de controle por variável LIC e LSC (ou LC_{σ^2}). Com esses quatro parâmetros de saída, o aplicativo já poderia fazer o que se espera de um gráfico de controle: aceitar ou rejeitar amostras em função de classificar o processo como em controle ou fora de controle.

Para isso, as primeiras entradas necessárias seriam a média e o desvio padrão do processo, e o tamanho das amostras, parâmetros imprescindíveis para o programa realizar as simulações de amostras normais.

Para o cálculo dos limites de controle por atributo e por variável, seria necessário que o usuário fornecesse a probabilidade máxima desejável de erro do tipo I ($\alpha_{máx}$), e a probabilidade máxima desejável de erro do tipo II ($\beta_{máx}$) para uma determinada variação no desvio padrão (λ). Assim, o $\alpha_{máx}$ definiria o $NMA_{0\text{ mín}}$ e o $\beta_{máx}$ para um determinado λ definiria o $NMA_{1\text{ máx}}$, e com isso, seria possível, por sua vez, determinar os intervalos de aceitação delimitados pelos limites de controle.

Contudo, faz parte, também, do objetivo deste trabalho, desenvolver um aplicativo funcional na prática para o monitoramento da variabilidade de processos industriais univariados. Para esse monitoramento, é necessário que o usuário colete amostras, classifique seus itens entre conforme e não conforme, e que, a depender do número de itens não conformes (Y_D), sejam feitas e inseridas as medições da característica da qualidade monitorada. Dessa forma, para isso, fez-se necessário também definir como saídas do aplicativo os limites discriminantes LDI e LDS , para que o usuário pudesse fazer suas inspeções por atributo configuradas com esses limites (configurar esses valores em um dispositivo do tipo passa não passa, por exemplo). Assim, ele poderia inserir no aplicativo o número de itens não conformes de cada amostra para que o aplicativo sinalize se será necessário realizar as medições e a inspeção por variável.

E finalmente, para a definição dos limites discriminantes, seria necessário que o usuário fornecesse a porcentagem máxima de amostras a serem inspecionadas por variável ($\%S^2_{\text{máx}}$).

Assim, em suma, os parâmetros de entrada para a etapa de geração do gráfico e de seus limites de controle foram definidos como:

- tamanho das amostras (n);
- média do processo (μ_0);
- desvio padrão do processo (σ_0);
- porcentagem máxima de amostras a serem submetidas à inspeção por variável ($\%S^2_{\text{máx}}$);
- probabilidade máxima de erro do tipo I ($\alpha_{\text{máx}}$);
- probabilidade máxima de erro do tipo II ($\beta_{\text{máx}}$) para um determinado λ ;
- variação no desvio padrão (λ) para o $\beta_{\text{máx}}$ definido.

Enquanto isso, os parâmetros de saída para essa etapa foram definidos como: os limites de controle discriminantes (LDI e LDS); os limites de controle por atributo (W_y e CL_y); e os limites de controle por variável (LIC e LSC).

Já na etapa de monitoramento do processo, os parâmetros de entrada são: a quantidade de itens rejeitados da amostra (Y_D); e, caso esse valor seja sinalizado como maior ou igual a W_y e menor que CL_y , outros parâmetros de entrada serão as medições da característica da qualidade referente a cada item da amostra (X_i).

E para essa etapa, não haverá *parâmetros* de saída, mas sim os pontos plotados no gráfico e a sinalização de quais deles representam um sinal de que o processo não está em controle.

Tendo as entradas e saídas determinadas, prosseguiu-se à definição do processo de cálculo e geração das saídas a partir das entradas, e primeiramente, foi dado foco ao cálculo dos limites de controle.

4.2 OBTENÇÃO DOS LIMITES DE CONTROLE

O processo de obtenção dos limites de controle foi programado de forma a ocorrer por meio de simulações e iterações de tentativa e erro. A lógica é que o programa faz a primeira iteração com valores mais baixos para os limites de controle e, em cada iteração, o programa chega a um resultado de $\%S^2$, α ou β . No final de cada uma delas, é verificado se esses valores são menores que os valores máximos estabelecidos pelo usuário, e, caso não seja, o programa altera os limites e passa para a próxima iteração.

Para melhor organização do código, ele foi dividido entre 4 seções, chamadas de A, B, C1 e C2. Cada uma delas tem início e fim, e suas próprias iterações, que chegam a um resultado e o registram em uma matriz.

4.2.1 Seção A

Na seção A, cujo fluxograma é representado pela Figura 19, a primeira coisa realizada pelo programa é acessar as possíveis combinações de W_y e CL_y . Como esses parâmetros são mensurados em número de itens da amostra, para acessar suas combinações, a partir do tamanho das amostras (n) inserido pelo usuário, um *laço* externo assume, para W_y , os valores de 1 a $n/2$ (arredondado para baixo), e um *laço* interno assume, para CL_y , os valores de $n/2$ (arredondado para cima) até n . Por exemplo, se $n = 5$, W_y assume os valores de 1 e 2, e CL_y assume os valores de 3, 4 e 5.

Essa lógica foi adotada tendo em vista que o W_y é um limite de alerta e CL_y é o limite de controle de fato para as inspeções por atributo. Ou seja, quando Y_D é maior que W_y , significa apenas um *alerta*, já que só será um *signal* se Y_D for maior que CL_y . Dessa forma, infere-se que W_y deve ser sempre menor que CL_y , e a lógica adotada faz com que todas as combinações atendam a esse requisito.

Algo importante a ser destacado é que o código foi programado para não aceitar nenhuma combinação de W_y e CL_y em que o módulo da diferença entre os dois parâmetros fosse menor ou igual a 1 (o programa pula as combinações que satisfazem essa condição). Isso foi planejado porque:

1. quando $|CL_y - W_y| = 0$, quer dizer que $CL_y = W_y$, e W_y deve ser sempre menor que CL_y ;
2. e quando $|CL_y - W_y| = 1$, foi observado, por meio de testes, que o programa ficava estagnado na seção B, tentando encontrar os limites de controle por variável (LIC e LSC) para a combinação de W_y e CL_y , já que o α calculado não se aproximava do $\alpha_{\text{máx}}$ a cada iteração (como acontecia nas outras combinações).

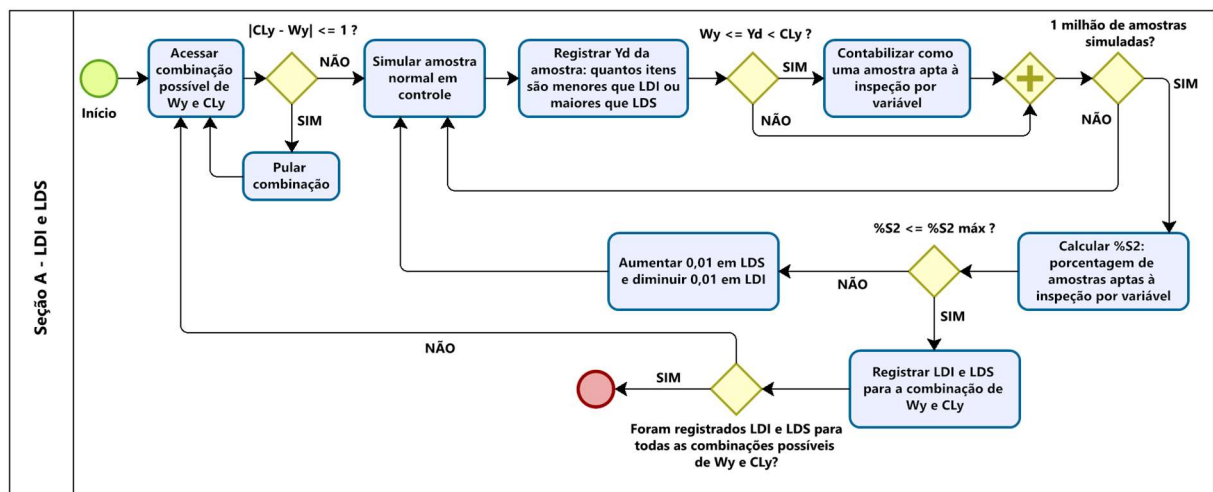
Provavelmente, o que é descrito no item 2 acima ocorria por conta de que, com a diferença entre W_y e CL_y sendo de apenas 1, as amostras só passariam para a etapa de inspeção por variável se Y_D assumisse um valor específico (W_y). Já nos outros casos, quando $|CL_y - W_y| = x, x > 1$, Y_D poderia assumir x valores diferentes para os quais as amostras passariam para a etapa de inspeção por variável. Ou seja, provavelmente, quando $|CL_y - W_y| = 1$, aumentar o intervalo

entre os limites de controle por variável não influenciava o valor de NMA_0 (e consequentemente de α) a cada iteração, já que muito poucas amostras seriam submetidas a inspeções por variável.

Visto isso, ao acessar cada uma das possíveis combinações de W_y e CL_y válidas, o programa simula um milhão de amostras de distribuição normal com n , μ e σ definidos pelo usuário (em controle). Para cada amostra, o programa registra Y_D (quantos de seus itens estão fora do intervalo estabelecido pelos limites discriminantes) e verifica se $W_y \leq Y_D < CL_y$. Se sim, a amostra é contabilizada como apta a ser submetida à inspeção por variável (soma-se 1 a uma variável de contagem) e segue-se para a próxima amostra. Se não, apenas segue-se para a próxima amostra. Isso é repetido até que um milhão de amostras sejam simuladas e analisadas pela inspeção por atributo.

Então, o programa calcula a porcentagem de amostras, dentre o um milhão, que seria submetida a inspeções por variável $\left(\frac{\text{número de amostras que seriam submetidas a inspeção por variável}}{1\,000\,000} \right)$ e verifica se esse valor é menor ou igual a $\%S^2_{m\acute{a}x}$, estabelecido pelo usuário. Se sim, o programa registra os valores utilizados para os limites discriminantes (LDI e LDS), e repete todo o processo descrito até aqui para as outras combinações. Se não, o programa irá incrementar 0,01 em LDS e decrementar 0,01 em LDI , e repetir o processo a partir da simulação de um milhão de amostras com a mesma combinação de W_y e CL_y .

Figura 19 – Fluxograma do processo de obtenção dos limites discriminantes para cada combinação de W_y e CL_y



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.2 Seção B

Na seção B, representada pela Figura 20, o programa acessa cada uma das combinações de W_y e CL_y , agora já com os valores de LDI e LDS para cada uma delas, e segue para a obtenção dos limites de controle por variável que atendam ao requisito de α ser menor que $\alpha_{m\acute{a}x}$ estabelecido pelo usuário.

Para cada combinação dos quatro parâmetros citados acima, o programa atribui os valores $[\sigma^2 - L \cdot \sigma^2]$ e $[\sigma^2 + L \cdot \sigma^2]$ aos limites LIC e LSC , respectivamente; calcula o NMA_0 e, se $\frac{1}{NMA_0} \leq \alpha_{m\acute{a}x}$, registra esses valores na matriz de resultados. Se $\frac{1}{NMA_0} > \alpha_{m\acute{a}x}$, ele incrementa 0,01 no fator L , recalcula os limites, e reinicia o processo.

Para obter cada NMA_0 , o programa simula amostras de distribuição normal com n , μ e σ definidos pelo usuário (em controle), e calcula o NMA_0 quando conta dez mil sinais (dez mil amostras rejeitadas, não importa se na etapa por atributo ou na etapa por variável).

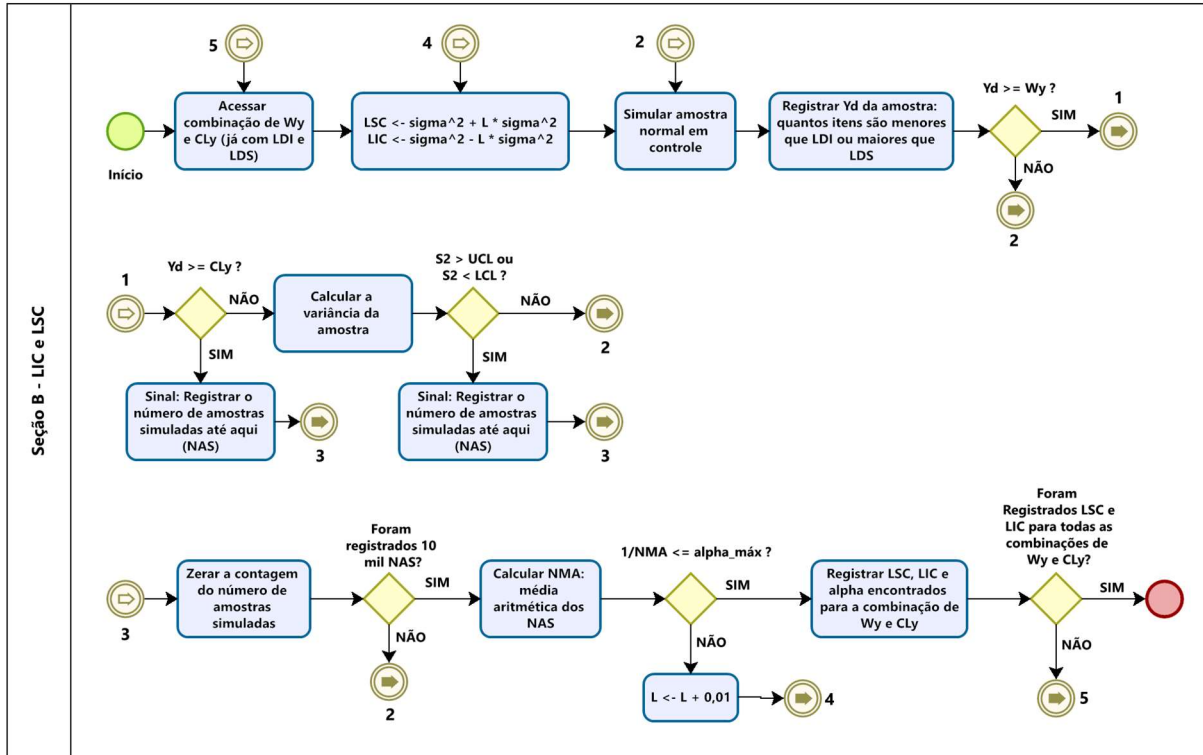
Para cada amostra simulada, o programa registra Y_D , e verifica se é maior ou igual a W_y . Se não for, ele segue para a simulação de uma próxima amostra (já que essa foi aceita). Se for maior ou igual a W_y , o programa confere, em seguida, se Y_D é maior ou igual a CL_y . Se for, configura-se um sinal, e o programa registra o NAS, ou seja, quantas amostras precisaram ser simuladas até esse sinal (por meio de uma variável à qual soma-se 1 toda vez que uma amostra nova é simulada). Se Y_D for menor que CL_y ($W_y \leq Y_D < CL_y$), o programa submete a amostra à inspeção por variável.

Na inspeção por variável, ele calcula a variância da amostra e verifica se ela está dentro do intervalo delimitado por LIC e LSC . Se sim, ele segue para a simulação de uma próxima amostra (já que essa foi aceita), e caso não, ele registra o NAS.

Depois de registrar qualquer NAS, o programa zera a variável de contagem de amostras e, se já tiverem sido registrados dez mil NAS, ele calcula o NMA_0 e segue para a parte final, já explicada. Se ainda não tiverem sido registrados dez mil NAS, ele segue simulando novas amostras.

O processo se repete até haver limites LIC e LSC registrados para cada combinação de W_y e CL_y (em cada linha da matriz de resultados).

Figura 20 – Fluxograma do processo de obtenção dos limites de controle por variável para cada combinação de W_y e CL_y



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.3 Seção C1

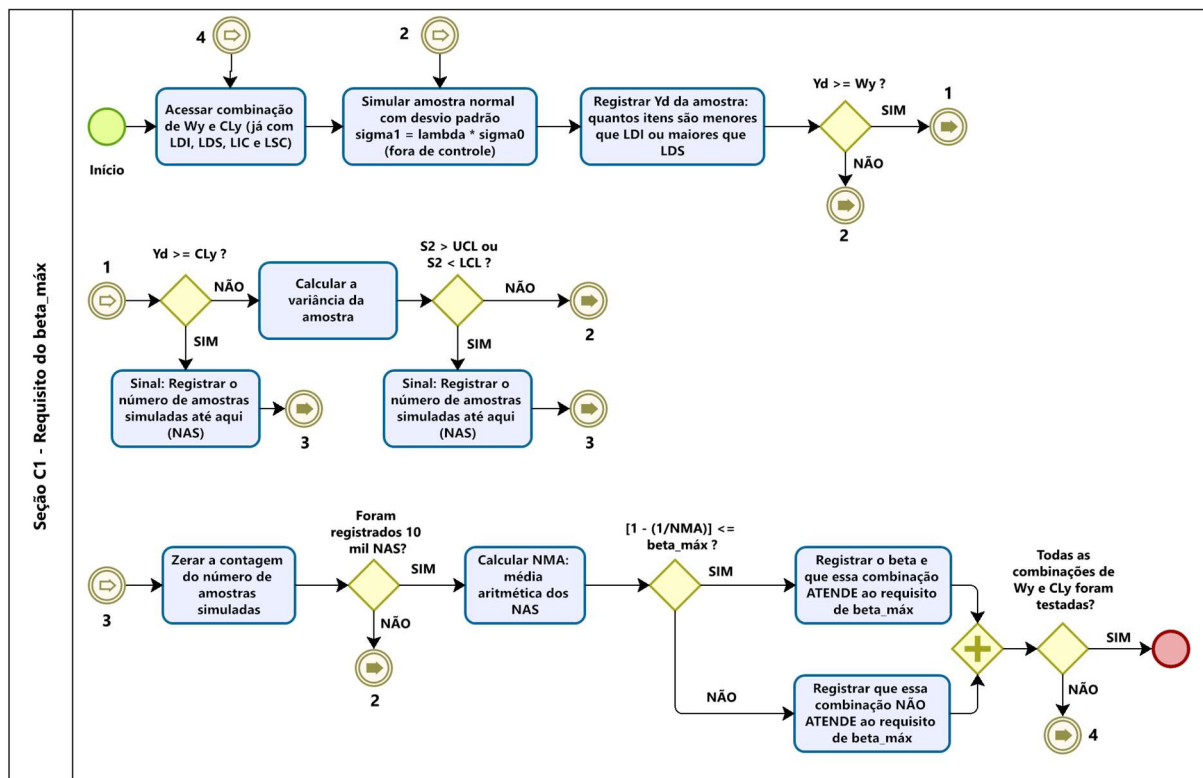
Com diferentes valores para todos os limites (W_y , CL_y , LDI , LDS , LCI e LCS) em cada linha da matriz de resultados, o programa inicia a seção C1.

Nela, o programa irá testar se cada linha da matriz de resultados satisfaz o requisito de $\beta_{máx}$ estabelecido pelo usuário. Ao inserir, no início, um valor para λ e um valor para $\beta_{máx}$, o usuário estabelece que, para o caso de o processo se tornar fora de controle com seu desvio padrão tendo variado de forma a se tornar $\sigma_1 = \lambda \cdot \sigma_0$, a probabilidade máxima de erro do tipo II que ele aceitaria seria $\beta_{máx}$, ou então o poder (Pd) mínimo do gráfico que ele aceitaria seria $1 - \beta_{máx}$.

Assim, nessa seção, o programa acessa cada linha da matriz de resultados (ou cada combinação de W_y e CL_y) uma única vez, e realiza um processo muito semelhante ao descrito na sessão B para o cálculo do NMA_0 , porém, agora, para testar β , o processo deve estar fora de controle, e por isso são simuladas amostras com n , μ e o desvio padrão alterado $\sigma_1 = \lambda \cdot \sigma$ (n , μ , λ e σ definidos pelo usuário). E nessa seção, o NMA (agora chamado de NMA_1) é utilizado

para verificar se $1 - \frac{1}{NMA_1} \leq \beta_{m\acute{a}x}$. Se sim, o programa registra na matriz de resultados que aquela linha atende ao requisito (com um valor *TRUE*), e se não, ele apenas registra que aquela linha não atende (com um valor *FALSE*), e segue para a próxima linha (até a última). Esses registros serão utilizados na próxima sessão para determinar a solução definitiva (se houver).

Figura 21 – Fluxograma do processo de verificação do requisito de $\beta_{m\acute{a}x}$ para todas as combinações de W_y e CL_y



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.4 Seção C2

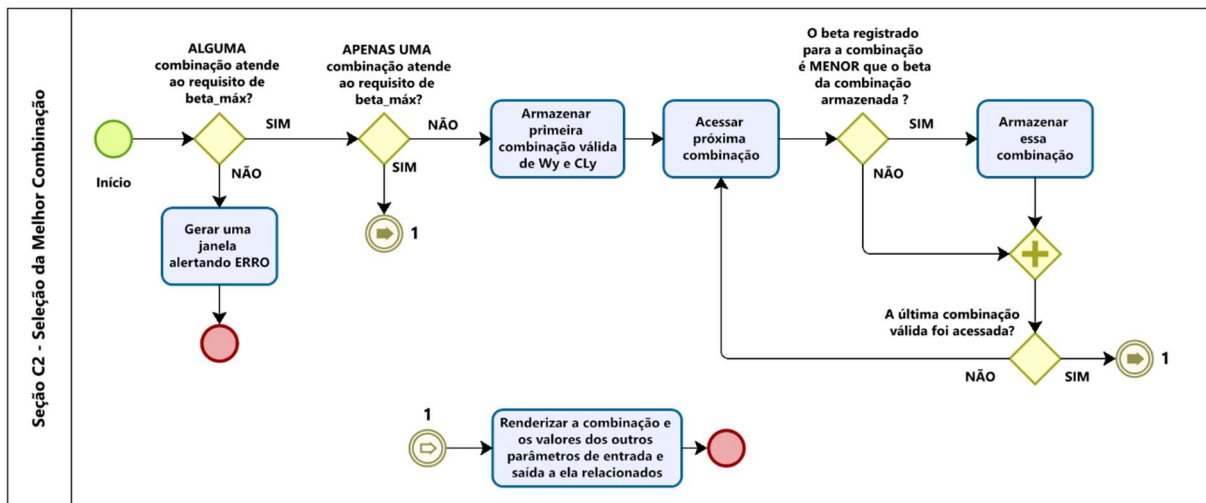
Na seção chamada de C2, cujo processo está esquematizado na Figura 22, o programa acessa cada linha da matriz de resultados e verifica se ela atende ao requisito de $\beta_{m\acute{a}x}$ (se contém *TRUE* na última posição da linha). Se sim, ele armazena essa linha em uma outra matriz, e se não, ele não armazena e segue para a próxima linha (até a última).

Se nenhuma linha atender ao requisito do $\beta_{m\acute{a}x}$, irá aparecer um aviso de erro no aplicativo. Se houver apenas uma linha que atenda o requisito o programa renderiza uma tabela com os valores dessa linha como solução final. Já se houver mais linhas que atendam o requisito, o programa acessa cada uma delas na nova matriz, que contém apenas as combinações que

satisfazem o requisito do $\beta_{m\acute{a}x}$, e renderiza uma tabela com os valores da linha que contiver o menor β calculado.

Os resultados definitivos poderão ser visualizados pelo usuário e serão utilizados pelo programa para realizar outras etapas e garantir o funcionamento do gráfico de controle em si. São eles os parâmetros: $n, \mu, \sigma, W_y, CL_y, LDI, LDS, \%S^2, LIC, LSC, \alpha, \lambda, \beta$.

Figura 22 – Fluxograma do processo de definição dos resultados definitivos



Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 INTERFACE, RESULTADOS, TABELA E GRÁFICO

Tendo em vista o objetivo principal deste trabalho, de desenvolver uma interface que permita a utilização do gráfico B-ATTRIVAR SS para monitoramento da variância de processos industriais univariados, é necessário compreender a dinâmica que se espera para o usuário realizar esse monitoramento.

Primeiramente, espera-se que ele insira os parâmetros iniciais necessários para a obtenção dos limites de controle (já descritos anteriormente). Então, assim que o programa finalizar a obtenção deles, o usuário deve poder visualizar um gráfico com linhas horizontais representando-os, e deve inserir o Y_D da sua amostra, que deverá ser plotado no gráfico. Caso o Y_D esteja entre W_y e CL_y , algo que o usuário poderá verificar no gráfico, ele deverá inserir as medições da característica da qualidade para todos os itens da amostra. Com isso, o programa deve calcular e plotar a variância da amostra no gráfico, e sinalizar de alguma forma se ela representar que o processo não está em controle.

4.3.1 Layout da interface e exibição dos resultados

O *layout* principal da interface foi configurado como representado na Figura 23, onde, na área demarcada com o número 1, há uma barra lateral com os campos nos quais o usuário pode inserir os valores, ou manter os valores pré-estabelecidos no programa (que são os mostrados na Figura 23). Abaixo dessa barra, na área demarcada com o número 2, tem-se o botão *EXECUTAR*, no qual o usuário deve clicar para executar o código e obter os resultados. Ao lado, pode-se ver, na área demarcada com o número 3, as *duas abas* do aplicativo, dentre as quais pode-se alternar clicando em uma delas. Abaixo, a área demarcada com o número 4 representa o local em que serão mostrados: os resultados decorrentes dos cálculos e o gráfico em si, na aba *RESULTADOS E GRÁFICO*; e a tabela editável para os dados das amostras, na aba *INSERIR DADOS*.

Figura 23 – Layout principal da interface desenvolvida

Fonte: Produção do próprio autor.

Então, após pressionar o botão *EXECUTAR*, serão mostrados os resultados definitivos e o gráfico na aba *RESULTADOS E GRÁFICO*, como ilustra a Figura 24.

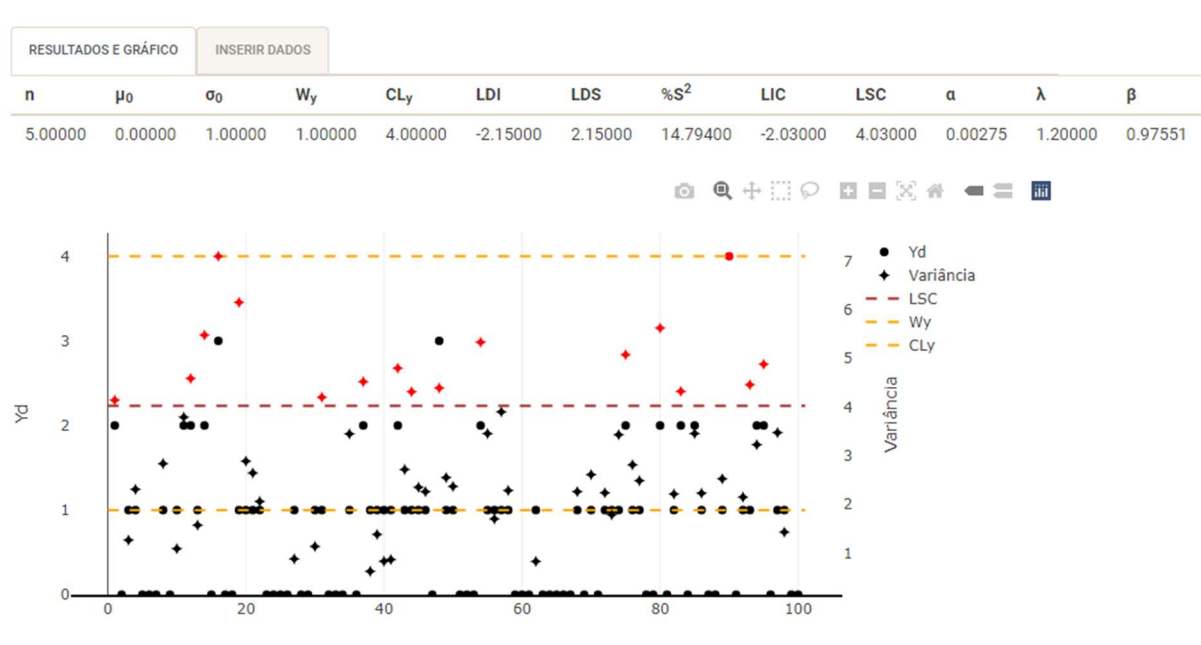
Abaixo do nome das abas e acima do gráfico, são mostrados alguns parâmetros inseridos pelo usuário (n , μ_0 , σ_0 e λ) e os resultados obtidos para os outros parâmetros por meio das simulações e dos cálculos (W_y , CL_y , LDI , LDS , $\%S^2$, LIC , LSC , α e β).

4.3.2 Gráfico

O gráfico gerado possui um eixo das abscissas, que representa o número das amostras, e dois eixos das coordenadas; o do lado esquerdo, representando o Y_D , e o do lado direito, representando a variância calculada da amostra.

Como pode ser observado na Figura 24, são mostrados, no gráfico, os limites W_y , CL_y , relativos ao eixo de Y_D , e LSC , relativo ao eixo da variância (as três linhas tracejadas). Concomitantemente, os pontos circulares representam a série de dados de Y_D , e os pontos com um formato diferente representam a série de dados da variância calculada das amostras. É importante destacar que, para respeitar a dinâmica do monitoramento do gráfico B-ATTRIVAR SS, os pontos da série da variância, com o formato não circular, só são plotados no gráfico se os Y_D das amostras estiverem entre W_y e CL_y , já que se ele estiver abaixo de W_y , a amostra é aceita, e se estiver acima de CL_y , a amostra é rejeitada, não devendo ser submetida à inspeção por variável em ambos os casos.

Figura 24 – Resultados e gráfico mostrados no aplicativo



Fonte: Produção do próprio autor.

Por padrão, os pontos são plotados com a cor preta, mas para representar os sinais (ou seja, quando as amostras são rejeitadas) os pontos são mostrados em vermelho, tanto se eles ocorrerem na inspeção por atributo (pontos circulares) quanto se ocorrerem na inspeção por variável (pontos não circulares).

O gráfico é bastante dinâmico, já que qualquer alteração nos dados da tabela editável, que será explicada em seguida, gera alterações automáticas nos pontos plotados no gráfico. Além disso, é possível segurar o botão do *mouse* em cima de qualquer um dos dois eixos das abscissas e *arrastá-los* para baixo ou para cima, *arrastando* tanto os rótulos do eixo, quanto os pontos referentes a ele. Ademais, também é possível utilizar o recurso de *zoom* em qualquer área do gráfico, segurando o botão do *mouse* em cima de qualquer ponto na área de plotagem, e *arrastando* para formar um retângulo que delimitará a área para a qual o programa irá ampliar.

4.3.3 Tabela editável

Os dados plotados no gráfico são oriundos da tabela editável ilustrada na Figura 25 e localizada na aba *INSERIR DADOS*. Ela contém um número de colunas dependente do n inserido pelo usuário no início, embora a primeira e a última coluna sempre representem, respectivamente, o Y_D e a variância calculada de cada amostra, independentemente do n inserido. Já as outras colunas, entre a primeira e a última, são destinadas para a inserção das medições da característica da qualidade, e por isso, dependem do tamanho das amostras (no caso da Figura 25, $n = 5$, e portanto, há 5 colunas para as medições).

Figura 25 – Tabela editável do aplicativo

Tabela editável

Show 5 entries Search:

Yd	X1	X2	X3	X4	X5	S2
1	0.2497182328447651	0.8027552979600928	-1.727935942397521	0.06775090493744862	-2.355848076993601	1.872652787768565
0	-1.344199984807289	-0.3835789874496796	-1.039928287964333	-1.704730422009682	1.526182895588613	1.633678467956801
0	0.3124504843811904	0.05331176391892034	1.660056376905269	-1.72591470342119	-0.4113955207519214	1.50044909662954
0	1.356498419867663	-0.4822478938552936	-0.3418256332651081	1.816507478204707	1.792106318705088	1.31779986964357
2	-3.341840903650781	1.162072532551546	0.1818678660002239	1.325778760839038	-2.591459109526266	4.723636689526562

Showing 1 to 5 of 100 entries

APAGAR DADOS

RECALCULAR OS YD'S

PREVIOUS 1 2 3 4 5 ... 20 NEXT

Fonte: Produção do próprio autor.

Todas as colunas nela são editáveis, com exceção da última, que, apesar do usuário poder tentar alterar o valor dela, a tabela a recalculará automaticamente, já que os valores das variâncias não podem ser arbitrários, mas sim calculados por meio das medições da característica da qualidade monitorada.

Para o usuário ter uma prévia de como o aplicativo e o gráfico funcionam antes de começar a monitorar de fato algum processo, o aplicativo gera os dados de 100 amostras de distribuição normal (fora de controle) a partir dos resultados definitivos dos limites de controle, e as plota no gráfico. Por isso, ao clicar no botão *EXECUTAR*, na barra lateral, assim que o aplicativo obtiver os resultados, já irá automaticamente mostrar os dados dessas 100 amostras na tabela e no gráfico.

A tabela editável mostra, por padrão, apenas cinco linhas, mas logo abaixo do título *Tabela Editável*, pode-se alterar isso onde está escrito *Show 5 entries*. Basta clicar no 5 e alterar para a quantidade de linhas que se deseja visualizar.

Abaixo da tabela, pode-se encontrar os botões *APAGAR DADOS* e *RECALCULAR OS Y_D 'S*. Ao pressionar o primeiro, o usuário apagará todos os valores registrados na tabela, deixando todos os campos vazios para inserir outros dados, e consequentemente apagando todos os pontos plotados no gráfico também. O segundo botão irá recalculer todos os Y_D 's da tabela (primeira coluna) com base nos valores das medições da característica da qualidade monitorada.

Naturalmente, como já explicado, seguindo a lógica do monitoramento de um processo por meio de um gráfico ATTRIVAR, o usuário começaria fazendo as inspeções por atributo sem realizar as medições, já que um dos principais ganhos desse tipo de estratégia em comparação ao controle por variável é evitar que se faça muitas medições. Isso porque, muitas vezes, elas podem ser caras e/ou demasiadamente demoradas. Então, por essa perspectiva, não haveria sentido calcular o Y_D por meio das medições.

Por outro lado, também não faria sentido se o usuário alterasse algum dado das medições e o Y_D fosse mantido mesmo que o número de itens não conformes pudesse ter mudado. E ao mesmo tempo, fazer com que essa coluna fosse calculada automaticamente também não seria apropriado, já que não permitiria que o usuário inserisse um Y_D independente das medições, e isso iria contra a lógica natural da estratégia ATTRIVAR.

Por isso, a solução foi deixar os campos dos Y_D 's editáveis, de forma que o usuário possa inserir neles o número de itens não conformes de cada amostra; mas também disponibilizar um botão no qual o usuário pode clicar para que, a qualquer momento, ele recalcule todos os Y_D 's da tabela com base nas medições.

4.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Como não foram encontrados os cálculos teóricos dos parâmetros desse gráfico ainda, para validar os resultados obtidos por meio do aplicativo, e assim verificar se as simulações e os cálculos dos limites de controle são coerentes, utilizou-se o código desenvolvido por Violante e Machado (2021) para a simulação dos NMAs do gráfico B-ATTRIVAR $SS\ S^2$.

No código desenvolvido pelos autores citados acima, configura-se os limites de controle e, a partir disso, o código retorna os NMAs para diferentes variações no desvio padrão.

Assim, para validar os resultados do aplicativo desenvolvido neste trabalho, optou-se por executar primeiramente o aplicativo, que retornaria os limites de controle entre seus resultados, e utilizá-los como parâmetros de entrada para o código de Violante e Machado (2021). Assim, poder-se-ia comparar os resultados obtidos em ambos com relação ao $\%S^2$, ao NMA_0 e ao NMA_1 .

Como se pode observar na Tabela 2, foram testados alguns cenários, todos com $\mu_0 = 0$ e $\sigma_0 = 1$, e as colunas com o termo *referência* correspondem aos valores obtidos pelo código de Violante e Machado (2021).

As primeiras cinco linhas da tabela representam a execução das simulações com os valores pré-estabelecidos por padrão na interface do aplicativo, que podem ser vistos na Figura 23. Nas próximas cinco linhas, o aplicativo foi executado com a alteração apenas do parâmetro $\%S^2_{máx}$, que antes assumia o valor de 15%, e agora assume 10%. Já as nove linhas seguintes contiveram alterações não só no $\%S^2_{máx}$, como também em n e em λ .

A comparação foi realizada dessa forma para que os resultados pudessem ser comparados não só em um cenário, mas também em outros, com a alteração ou de um só parâmetro, ou com a alteração de vários. Dessa forma, a comparação permite que seja analisado se alterações em um ou mais parâmetros invalidam ou não os resultados do aplicativo.

É importante observar que não são todos os valores contidos na tabela que são mostrados na interface do aplicativo, pois na verdade, ela mostrará apenas a linha que corresponde à solução definitiva (na Tabela 2, essas linhas são as que contêm os valores em itálico e com fundo em laranja, verde e azul). Logo, para capturar todos esses dados, foi adicionado comandos no código do aplicativo para que os resultados intermediários das simulações fossem impressos no *console* do *RStudio*. Além disso, vale destacar que as linhas de dados em itálico e com fundo em laranja, verde e azul representam a linha mostrada

Observando os dados exibidos, infere-se que os resultados do aplicativo estão bastante compatíveis com os obtidos por meio do código de Violante e Machado (2021), já que tanto

$\%S^2$, quanto NMA_0 e NMA_1 apresentaram valores notavelmente semelhantes. Quando se analisa as colunas ΔNMA_0 e ΔNMA_1 , por exemplo, as maiores diferenças percentuais em cada uma delas, respectivamente, foram de 5,66% e 2,77%.

Tabela 2 – Comparação e validação de resultados finais ($\mu_0 = 0$, $\sigma_0 = 1$)

<i>n</i>	<i>Wy</i>	<i>CLy</i>	$\%S^2_{\max}$	LDS	LSC	$\%S^2$	$\%S^2$ Referência	NMA ₀	NMA ₀ Referência	Δ NMA ₀	λ	NMA ₁	NMA ₁ Referência	Δ NMA ₁
5	1	3	15%	2,15	4,09	14,81%	14,81%	379,221	368,596	2,88%	1,2	41,9332	41,8994	0,08%
5	1	4	15%	2,15	4,07	14,82%	14,81%	385,416	383,675	0,45%	1,2	42,0345	43,2341	2,77%
5	1	5	15%	2,15	4,07	14,80%	14,80%	392,364	375,318	4,54%	1,2	42,8538	42,4327	0,99%
5	2	4	15%	1,47	4,50	14,74%	14,74%	377,595	362,952	4,03%	1,2	48,7047	49,3499	1,31%
5	2	5	15%	1,47	4,03	14,95%	14,93%	377,669	370,022	2,07%	1,2	43,0950	42,1248	2,30%
5	1	3	10%	2,31	4,06	9,99%	10,01%	374,161	373,848	0,08%	1,2	41,8840	42,1619	0,66%
5	1	4	10%	2,32	4,05	9,75%	9,73%	378,737	371,406	1,97%	1,2	42,7068	42,6622	0,10%
5	1	5	10%	2,32	4,06	9,74%	9,75%	375,552	378,126	0,68%	1,2	43,2554	42,3157	2,22%
5	2	4	10%	1,59	4,12	9,84%	9,84%	376,320	372,540	1,01%	1,2	44,0206	43,6339	0,89%
5	2	5	10%	1,59	4,01	9,96%	9,93%	378,703	367,040	3,18%	1,2	44,0304	43,0009	2,39%
6	1	3	10%	2,38	3,63	9,94%	9,94%	388,136	367,356	5,66%	1,5	6,4295	6,4782	0,75%
6	1	4	10%	2,38	3,63	9,96%	9,93%	386,227	367,750	5,02%	1,5	6,5638	6,5563	0,11%
6	1	5	10%	2,38	3,64	9,97%	9,95%	394,030	376,513	4,65%	1,5	6,6395	6,6466	0,11%
6	1	6	10%	2,38	3,64	9,96%	9,94%	387,306	379,715	2,00%	1,5	6,5732	6,6439	1,06%
6	2	4	10%	1,68	3,74	9,94%	9,98%	377,044	371,606	1,46%	1,5	6,8422	6,7470	1,41%
6	2	5	10%	1,69	3,62	9,70%	9,72%	391,299	377,701	3,60%	1,5	6,8597	7,0055	2,08%
6	2	6	10%	1,69	3,61	9,72%	9,70%	388,899	376,739	3,23%	1,5	6,9539	6,8811	1,06%
6	3	5	10%	1,28	3,89	9,77%	9,79%	383,502	368,495	4,07%	1,5	8,0894	8,1119	0,28%
6	3	6	10%	1,28	3,54	9,94%	9,93%	380,937	365,824	4,13%	1,5	7,1517	7,0933	0,82%

Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista o objetivo principal deste trabalho, conclui-se que ele atendeu todos os requisitos planejados, já que foi criada uma interface que gera e exibe os limites de controle do gráfico B-ATTRVIVAR $SS S^2$, e permite que o usuário utilize o gráfico para o monitoramento da variância de um processo em tempo real. Isso ocorre a partir da entrada de dados do processo e de requisitos definidos pelo usuário, que serão utilizados pelo programa para calcular os limites de controle e renderizar um gráfico com eles e amostras de exemplo. Assim que o usuário tiver dados de seu processo, ele pode substituir os dados de exemplo pelos reais, e utilizar o gráfico de controle para o monitoramento da variabilidade de seu processo de forma segura, posto que, embora o aplicativo não tenha sido testado em processos reais, seus resultados foram validados neste trabalho por meio de comparações com valores de referência, que revelaram baixos desvios percentuais.

Além disso, no texto apresentado, foram explicados todos os fluxos de simulações e cálculos utilizados pelo aplicativo para obter os resultados, e também o *layout* e as funcionalidades da interface, relacionando-os com a dinâmica de utilização planejada para o usuário. Dessa forma, foram cumpridos, também, os requisitos de mostrar a funcionalidade do aplicativo desenvolvido e esclarecer sua utilização.

Visto isso, como uma oportunidade de melhoria e continuação da pesquisa, é importante destacar as possibilidades de estudar acerca de como reduzir o tempo de execução do aplicativo, já que, por conta de haver várias iterações com o intuito de gerar resultados mais precisos, o programa acaba podendo ter um tempo de execução bastante elevado, dependendo da máquina na qual ele for executado. Uma sugestão para realizar esse estudo para a depuração e o aumento de performance do código é de utilizar inteligências artificiais que vêm sendo direcionadas a esse fim.

Outra oportunidade para deixar o aplicativo mais flexível, prático, e possivelmente automatizado em sua aplicação é estudar a viabilidade de possibilitar conexões entre ele e sistemas e/ou *softwares* utilizados nos contextos empresarial e industrial, como os chamados sistemas de execução de manufatura (*MES*), empregados no monitoramento e no controle da produção em tempo real.

Além disso, sugestões de continuação da pesquisa seriam analisar a influência que variações nos parâmetros de entrada geram nos resultados; e também expandir os estudos e o desenvolvimento da interface para considerar a aplicação dessa estratégia de controle com parâmetros estimados, o que permitiria ampliar a aplicabilidade do aplicativo. Outrossim, seria

bastante interessante, também, estudar meios de calcular os NMAs e os limites de controle da estratégia proposta de forma teórica e matemática.

REFERÊNCIAS

- ALI, S.; ABBAS, Z.; NAZIR, H. Z.; RIAZ, M.; ZHANG, X.; LI, Y. On developing sensitive nonparametric mixed control charts with application to manufacturing industry. **Quality and Reliability Engineering International**, Oxford, v. 37, n. 6, p. 2699–2723, 2021. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 01 jun. 2022.
- APARISI, F.; HO, L. L. M-ATTRIVAR: An attribute-variable chart to monitor multivariate process means. **Quality and Reliability Engineering International**, Oxford, v. 34, n. 2, p. 214–228, 2018. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 04 mar. 2023.
- APARISI, F.; MOSQUERA, J.; EPPRECHT, E. K. Simultaneously guaranteeing the in-control and out-of-control performances of the S2 control chart with estimated variance. **Quality and Reliability Engineering International**, Oxford, v. 34, n. 6, p. 1110–1126, 2018. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- ASLAM, M.; AZAM, M.; KHAN, N.; JUN, C. H. A mixed control chart to monitor the process. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 53, n. 15, p. 4684–4693, 2015.
- ASLAM, M.; SAGHIR, A.; AHMAD, L. **Introduction to statistical process control**. [S. l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2021.
- BEZERRA, E. L.; HO, L. L.; QUININO, R. C. GS2: An optimized attribute control chart to monitor process variability. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 195, p. 287–295, 2018. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 03 mar. 2023.
- CHAKRABORTI, S.; GRAHAM, M. A. **Nonparametric Statistical Process Control**. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2019.
- COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas Ltda., 2005.
- FARAZ, A.; HEUCHENNE, C.; SANIGA, E. An exact method for designing Shewhart and S2 control charts to guarantee in-control performance. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 56, n. 7, p. 2570–2584, 2018. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- GIORGI, F. M.; CERAOLO, C.; MERCATELLI, D. The R Language: An Engine for Bioinformatics and Data Science. **Life**, Basileia: MDPI, 2022. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 26 set. 2023.
- HO, L. L.; APARISI, F. ATTRIVAR: Optimized control charts to monitor process mean with lower operational cost. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 182, p. 472–483, 2016. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 17 ago. 2023.
- HO, L. L.; QUININO, R. C. An attribute control chart for monitoring the variability of a process. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 145, n. 1, p. 263–267, 2013. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 02 ago. 2023.

HO, L. L.; QUININO, R. C. Combining attribute and variable data to monitor process variability: MIX S 2 control chart. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 87, n. 9–12, p. 3389–3396, 2016. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 02 ago. 2023.

LEONI, R. C.; COSTA, A. F. B. The performance of the truncated mixed control chart. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, Nova Iorque, v. 48, n. 17, p. 4294–4301, 2019. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 16 mai. 2022.

MARTINS, R. A. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: CAUCHICK-MIGUEL, P. A. (coord.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018. cap. 3, p. 45-62.

MARTINS, R. A.; MELLO, C.H.P.; TURRIONI, J.B. **Guia para elaboração de monografia e TCC em engenharia de produção**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2013. 212 p.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2009. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 8 jul. 2023.

NAKANO, D. N. Métodos de Pesquisa Adotados na Engenharia de Produção e Gestão de Operações. In: CAUCHICK-MIGUEL, P. A. (coord.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018. cap. 4, p. 63-73.

SAMPAIO, E. S.; HO, L. L.; MEDEIROS, P. G. de. A combined np_x $\bar{X}$ control chart to monitor the process mean in a two-stage sampling. **Quality and Reliability Engineering International**, Oxford, v. 30, n. 7, p. 1003–1013, 2014. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 2 jul. 2023.

SIMÕES, F. D.; COSTA, A. F. B.; MACHADO, M. A. G. The Trinomial ATTRIVAR control chart. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 224, 2020. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 21 set. 2023.

VIOLANTE, J. P. C.; MACHADO, M. A. G. Gráficos de controle ATTRIVAR para o monitoramento da variabilidade de processos univariados. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 33., 2021, Guaratinguetá. **Anais [...]**. Guaratinguetá: Unesp, 2021. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/xxxiiicicunesp/457279-graficos-de-controle-attrivar-para-o-monitoramento-da-variabilidade--de-processos-univariados/>. Acesso em: 23 set. 2023.

WU, Z.; KHOO, M. B. C.; SHU, L.; JIANG, W. An np control chart for monitoring the mean of a variable based on an attribute inspection. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 121, n. 1, p. 141–147, 2009. Disponível em: <http://www.scopus.com/>. Acesso em: 3 abr. 2023.