

GUSTAVO MORONI ZAMBELLI

**Gráficos de Controle $\bar{X}$ e R utilizando Regras Especiais de Decisão para o
monitoramento de processos univariados e bivariados**

Gustavo Moroni Zambelli

Gráficos de Controle $\bar{X}$ e R utilizando Regras Especiais de Decisão para o monitoramento de processos univariados e bivariados

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.

Orientador: Cleginaldo Pereira de Carvalho
Coorientador: Messias Borges Silva

Z23g	Zambelli, Gustavo Moroni Gráficos de controle $\bar{X}$ e R utilizando regras especiais de decisão para o monitoramento de processos univariados e bivariados / Gustavo Moroni Zambelli. – Guaratinguetá, 2018. 60 f : il. Bibliografia: f. 43-44 Trabalho de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Cleginaldo Pereira de Carvalho Coorientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva 1. Controle de processo 2. Gráficos em engenharia 3. Processo decisório I. Título. CDU 658.511.3
------	---

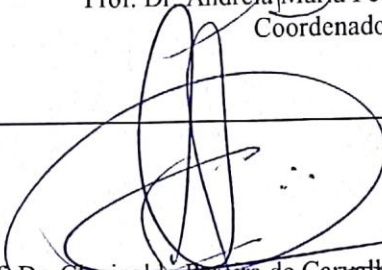
Gustavo Moroni Zambelli

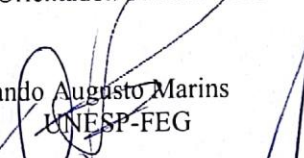
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA"

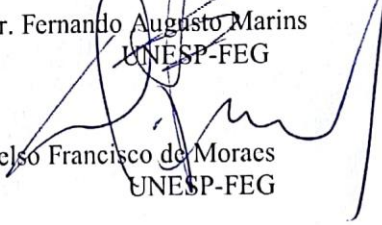
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA


Prof. Dr. Andréia Maria Pedro Salgado
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Cleginaldo Pereira de Carvalho
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Fernando Augusto Marins
UNESP-FEG


Prof. Celso Francisco de Moraes
UNESP-FEG

Novembro de 2018

GUSTAVO MORONI ZAMBELLI

NASCIMENTO	03.03.1993 – Araraquara / SP
FILIAÇÃO	Waldomiro José Zambelli Stella Maris Moroni Zambelli
2013/2018	Curso de Graduação - Engenharia de Produção Mecânica FEG - UNESP

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Stella e Waldomiro, por proverem todas as condições necessárias para que eu tivesse bons estudos, uma boa criação e pudesse sonhar e buscar meus objetivos, por todo o apoio em todas as minhas decisões até hoje, e por acompanharem e serem parte de cada uma de minhas conquistas.

ao meu irmão, Daniel, que sempre foi um elo muito forte e fundamental em minha caminhada, alguém que sempre esteve presente em cada etapa e que me orgulho de ter como irmão.

à minha avó, Nina, que sempre foi muito presente em minha criação, me ensinou ótimos valores e me deu muito amor.

à República Intrómetemos, minha segunda família, pela amizade sensacional que tornou muitos dos momentos da faculdade ainda melhores e que me transformou, em grande parte, na pessoa que sou hoje, após estes anos na faculdade.

aos amigos feitos ao longo da universidade, cujos laços foram fortalecidos em cada dificuldade e cada momento de alegria, e que espero carregar por mais muitos anos.

e aos funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá que se fizeram fundamentais para que tudo isso acontecesse desde 2013.

*“Confidence is deciding you’re unstoppable.
Not that you’ll never fail.”*

Tom Bilyeu

RESUMO

Os investimentos em torno do monitoramento e controle da qualidade se fazem cada vez maiores e importantes no cenário empresarial atual, marcas da constante e acirrada competitividade nos negócios. De modo a suportar a melhoria contínua de processos e produtos, o uso de regras especiais de decisão tem interessado cada vez mais os usuários por aumentar a eficiência dos gráficos de controle. Este estudo mostra os resultados para as diferentes regras sob diversas perturbações no processo e tamanho de amostra, tanto na média como na variabilidade. O uso da regra *Side-sensitive* se mostrou mais eficiente para alguns casos, enquanto a regra básica de Shewhart se mostrou mais eficiente para outros. Isso significa que a escolha entre uma regra e outra deve ser feita baseada nas características específicas do processo monitorado, no que diz respeito às possíveis perturbações, bem como das implicações de uma possível intervenção. Para o caso bivariado, uma análise inicial mostrou que a utilização da regra *Side-sensitive* se faz bem aplicada para altos deslocamentos da média, não importando o nível de correlação entre as características, mas preferível a ser utilizado com menores níveis de correlação, para menores deslocamentos. Vale lembrar que o uso de uma regra ou outra vai variar de acordo com o processo a ser monitorado, sendo necessário um conhecimento mais preciso do mesmo para a escolha das regras.

PALAVRAS-CHAVE: Gráficos de controle. Controle de processos. Regra *Side-sensitive*. Regra *Synthetic*.

ABSTRACT

Investments concerning quality monitoring and control are growing every day when it comes to business, marked by the constant and fiercely present competitiveness among companies. As to ensure continuous improvement on both products and processes, the use of control charts with run rules has become very attractive to users since it enhances control charts' performances. This paper shows the obtained results for different rules being implemented for several cases of mean shifts and/or variability increases. The Side-sensitive chart has proven to be more efficient in some cases, whilst Shewhart $\bar{X}$ chart seemed more efficient in others. Therefore, choosing between one and the other is a matter of knowing the specifics of your process in terms of possible disturbances and consequences of interventions to establish the best usage of each of the rules. For the bivariate scenario, initial analysis has shown that the Side-sensitive rule is well used regardless of the correlation between characteristics. However, it has proven to be more effective when it comes to lower correlation levels, regarding lower mean deviations. It is worth remembering that choosing between each of the run rules will occur depending on each process characteristics.

KEYWORDS: Control charts. Process control. Side-sensitive chart. Synthetic chart.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produtividade do trabalho trimestral na Indústria de transformação brasileira	14
Figura 2 – Publicações de artigos com <i>control charts</i> e <i>Synthetic</i> por área (2000 a 2017).....	17
Figura 3 – Publicações de artigos sobre <i>control charts</i> e <i>Synthetic</i> por ano (2000 a 2017)....	18
Figura 4 – Representação do gráfico de controle	22
Figura 5 – Representação do alarme falso em um gráfico de controle.....	23
Figura 6 – Representação do alarme verdadeiro em um gráfico de controle	24
Figura 7 – Processo isento de causas especiais	26
Figura 8 – Processo sob efeito de causas especiais alterando a média.....	26
Figura 9 – Processo sob efeito de causas especiais alterando média e dispersão.....	27
Figura 10 – Gráfico de $\bar{X}$ com regra <i>Synthetic</i>	28
Figura 11 – Gráfico de $\bar{X}$ baseado na regra <i>Side-Sensitive Synthetic</i>	29
Figura 12 – Classificação do Método de Pesquisa	30
Figura 13 – Processo de modelagem de simulação	31
Figura 14 – NMA de $\bar{X} + R$ para cada regra sob condições diferentes	39
Figura 15 – Gráfico bivariado de $\bar{X}$ para a regra <i>Side-sensitive Synthetic</i>	40
Figura 16 – Testes de hipótese <i>one-sample t test</i> para o caso bivariado	41
Figura 17 – Efeito de ρ na eficiência do gráfico bivariado de $\bar{X}$ para a regra <i>Side-sensitive Synthetic</i>	43
Quadro 1 – Atividades para a realização da pesquisa	32
Quadro 2 – Erros percentuais entre NMA_S e NMA_T para o gráfico de $\bar{X}$ SS <i>Synthetic</i> bivariado ($n=4$, $L=3$)	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Testes de hipótese <i>one-sample t test</i>	34
Tabela 2 – Erro percentual entre NMA_T e NMA_S para o caso $\bar{X}$ SS <i>Synthetic</i> (n=1; L=1).....	34
Tabela 3 – Comparação entre os NMA_S para diferentes valores de L (n=5)	35
Tabela 4 – Valores de NMA e Percentual de redução para os gráficos de R (n=4).....	36
Tabela 5 – Valores de NMA e Percentual de redução para os gráficos de R (n=4).....	36
Tabela 6 – Valores de NMA para os gráficos de $\bar{X} + R$ para cada regra de decisão (n=4)	37
Tabela 7 – Valores de NMA para os gráficos de $\bar{X} + R$ para cada regra de decisão (n=5)	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNI	Confederação Nacional da Indústria
LSC	Limite Superior de Controle
LIC	Limite Inferior de Controle
LM	Linha Média
NMA	Número Médio de Amostras
NMA ₀	Número Médio de Amostras com o processo sob controle
NMA _T	Número Médio de Amostras até o sinal teórico
NMA _S	Número Médio de Amostras até o sinal da simulação
SS	<i>Side-Sensitive</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{X}$	média amostral
R	amplitude amostral
μ_0	média do processo sob controle
σ_0	desvio-padrão do processo sob controle
n	tamanho do subgrupo amostrado
H_i	hipótese i a ser testada (hipótese nula, $i = 0$)
k	fator de abertura dos limites de controle de $\bar{X}$
p_d	poder de detecção do gráfico
L	distância entre amostras para sinalizar um alarme
δ	deslocamento da média do processo
λ	deslocamento da dispersão do processo
W	fator de abertura dos limites de controle de R
ρ	fator de correlação entre as características monitoradas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	DELIMITAÇÃO DE PESQUISA	16
1.4	JUSTIFICATIVA	16
1.5	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
2.2	GRÁFICOS DE CONTROLE.....	22
2.2.1	Alarmes nos gráficos de controle	23
2.2.2	Desempenho dos gráficos de controle	24
2.2.3	Gráficos de controle de $\bar{X}$ e R	25
2.3	GRÁFICOS DE CONTROLE COM REGRAS ESPECIAIS DE DECISÃO	27
2.3.1	Gráfico de $\bar{X}$ <i>Synthetic</i>	27
2.3.2	Gráfico de $\bar{X}$ <i>Side-sensitive Synthetic</i>	28
3	MÉTODO DE PESQUISA	30
4	RESULTADOS	33
4.1	VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL INICIAL.....	33
4.2	GRÁFICO DE $\bar{X}$ <i>SIDE-SENSITIVE SYNTHETIC</i>	35
4.3	GRÁFICO DE R E R <i>SYNTHETIC</i>	35
4.4	GRÁFICOS DE $\bar{X}$ E R, $\bar{X}$ E R <i>SYNTHETIC</i> E $\bar{X}$ E R <i>SIDE-SENSITIVE SYNTHETIC</i>	37
4.5	GRÁFICO DE $\bar{X}$ <i>SIDE-SENSITIVE SYNTHETIC</i> BIVARIADO.....	39
5	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICE A – Código de $\bar{X}$ <i>Side-sensitive Synthetic</i>.....	48
	APÊNDICE B – Código de R	50
	APÊNDICE C – Código de R <i>Synthetic</i>	52
	APÊNDICE D – Código de $\bar{X}$ + R.....	54

APÊNDICE E – Código de $\bar{X} + R$ <i>Synthetic</i>	56
APÊNDICE F – Código de $\bar{X} + R$ <i>Side-sensitive Synthetic</i>	59
APÊNDICE G – $\bar{X}$ <i>Side-sensitive Synthetic</i> bivariado	62

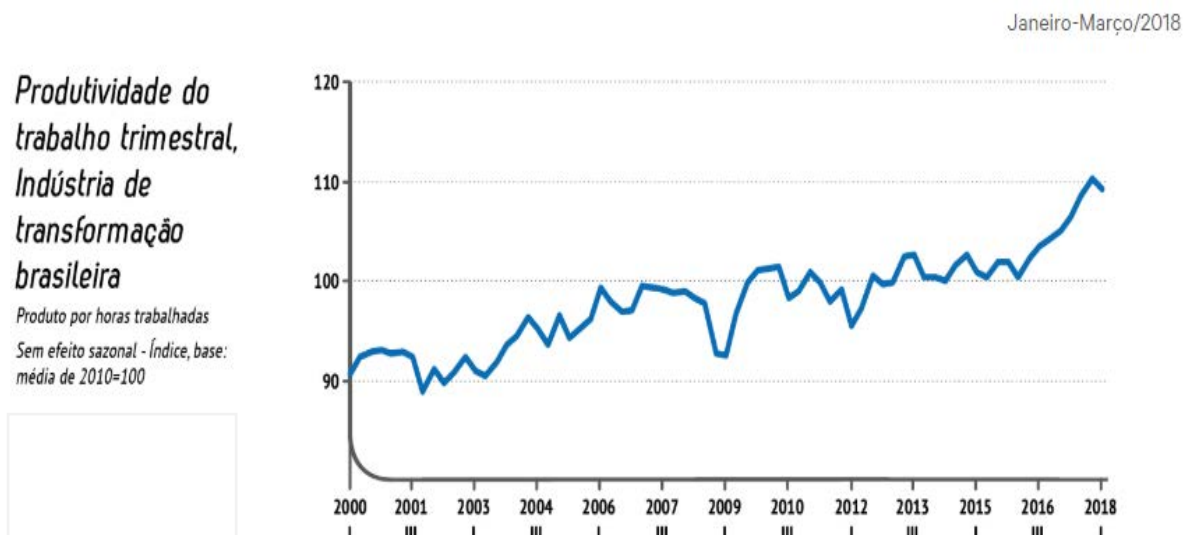
1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em um cenário de enorme competitividade em todos os segmentos da indústria e serviços, vê-se uma crescente necessidade e pressão em cima das empresas para alcançar a excelência operacional e melhorar seu desempenho, de modo a reduzir *lead time* e custos, enquanto se aumenta a qualidade. Dentro destas expectativas, e do crescente nível de automação e tecnologias presentes no mercado hoje, o uso de gráficos de controle se faz cada vez mais presente (MACHADO, 2009).

Segundo dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI), o Brasil ocupa, há anos, a mesma posição do ranking de competitividade industrial composto por 18 países, sendo esta a penúltima posição. Isso significa que esforços devem ser despendidos para que investimentos no cenário industrial brasileiro tragam resultados diretamente ligados ao desenvolvimento econômico do país. Vale ressaltar, porém, a tendência de subida da produtividade brasileira desde o segundo trimestre de 2016, mesmo que acompanhada de pequena queda no primeiro trimestre de 2018, segundo a Figura 1.

Figura 1 – Produtividade do trabalho trimestral na Indústria de transformação brasileira



Fonte: Adaptado de Estatísticas de Produtividade na Indústria pela CNI (2018)

O controle estatístico de processos propriamente dito surgiu, formalmente, por volta de 1924, quando Walter A. Shewhart desenvolveu e implementou a aplicação dos gráficos de

controle na Bell Telephone Laboratories. Condizente com a época, esta ferramenta de monitoramento não demanda recursos computacionais. Porém, dados os recursos existentes atualmente, é interessante explorar as oportunidades de melhoria na eficiência destes gráficos (MACHADO, 2009).

De início, como esperado, nem todos acreditavam no potencial desta nova ferramenta e, pouco a pouco, os gráficos de controle foram ganhando fama como poderosas ferramentas de monitoramento de processos. A década de 70, em especial, foi considerada a década dos gráficos de Shewhart. Sua disseminação acentuada, no entanto, teve seu lado positivo e seu lado negativo. O positivo é, obviamente, a divulgação potencial das diversas técnicas desenvolvidas e estudadas na aplicação destes gráficos a processos industriais. Por outro lado, pode-se dizer que a crescente pressão para que os gráficos fossem aplicados a qualquer custo implicou em aplicações com uso indevido ou, em alguns casos, desnecessárias, caindo no descrédito (MONTEIRO, 2010).

Segundo Schoonhoven e Does (2013), o gráfico de controle de $\bar{X}$ é uma técnica amplamente aplicada no monitoramento de processos. Quando os parâmetros da característica de qualidade a ser monitorada são desconhecidos, os gráficos de controle podem ser aplicados em duas fases: (i) a Fase I consiste no estudo retroativo de dados históricos para determinar as amostras que estão fora de controle. Com base nas amostras coletadas e estudadas, os parâmetros de processo são estimados e os limites de controle são calculados para a Fase II. (ii) Na Fase II, os gráficos de controle são utilizados para o monitoramento em tempo real dos processos (VINING, 2009). Dentre as mais recentes iniciativas, destacam-se os gráficos de controle da média e desvio-padrão dos processos (CHEN e PAO, 2011), gráfico de $\bar{X}$ com amostras de tamanho variável (ZHANG et al., 2012), uso de estimadores alternativos (SCHOONHOVEN et al., 2009) e, também, o uso de regras especiais de decisão (MACHADO, 2009; WU e SPEEDING, 2000; MACHADO e COSTA, 2014a; MACHADO e COSTA, 2014; COSTA e MACHADO, 2015).

O gráfico de controle de $\bar{X}$ proposto por Shewhart é utilizado para detectar causas especiais, responsáveis por alterações nos parâmetros de um processo. Este gráfico, porém, é pouco sensível a alterações de pequenas a moderadas magnitudes. Por conta disso, diversas regras especiais vêm sendo propostas para tentar solucionar este problema, de modo a torná-lo mais eficiente (COSTA et al., 2005).

Assim, este trabalho tem como proposta responder à seguinte questão de pesquisa: quais são as regras especiais de decisão mais eficientes para o monitoramento de processos univariados e bivariados por meio de gráficos de controle?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar as regras especiais de decisão mais eficientes para o monitoramento de processos univariados e bivariados, quando do uso de gráficos de controle.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Validar, por meio de simulações computacionais, utilizando a linguagem de programação Fortran, os valores obtidos teoricamente para as regras de decisão.
2. Comparar a eficiência dos gráficos de controle utilizados com cada uma das regras apresentadas neste trabalho para cada situação descrita.

1.3 DELIMITAÇÃO DE PESQUISA

As simulações computacionais foram realizadas pelo *software Microsoft Developer Studio*©1994-95, utilizando a linguagem de programação Fortran.

Os valores tomados como base para validação dos resultados provêm da literatura estudada, servindo como premissa a validade dos resultados dentro de uma variação de $\pm 5\%$ para que sejam condizentes a simulação e as pesquisas da literatura.

1.4 JUSTIFICATIVA

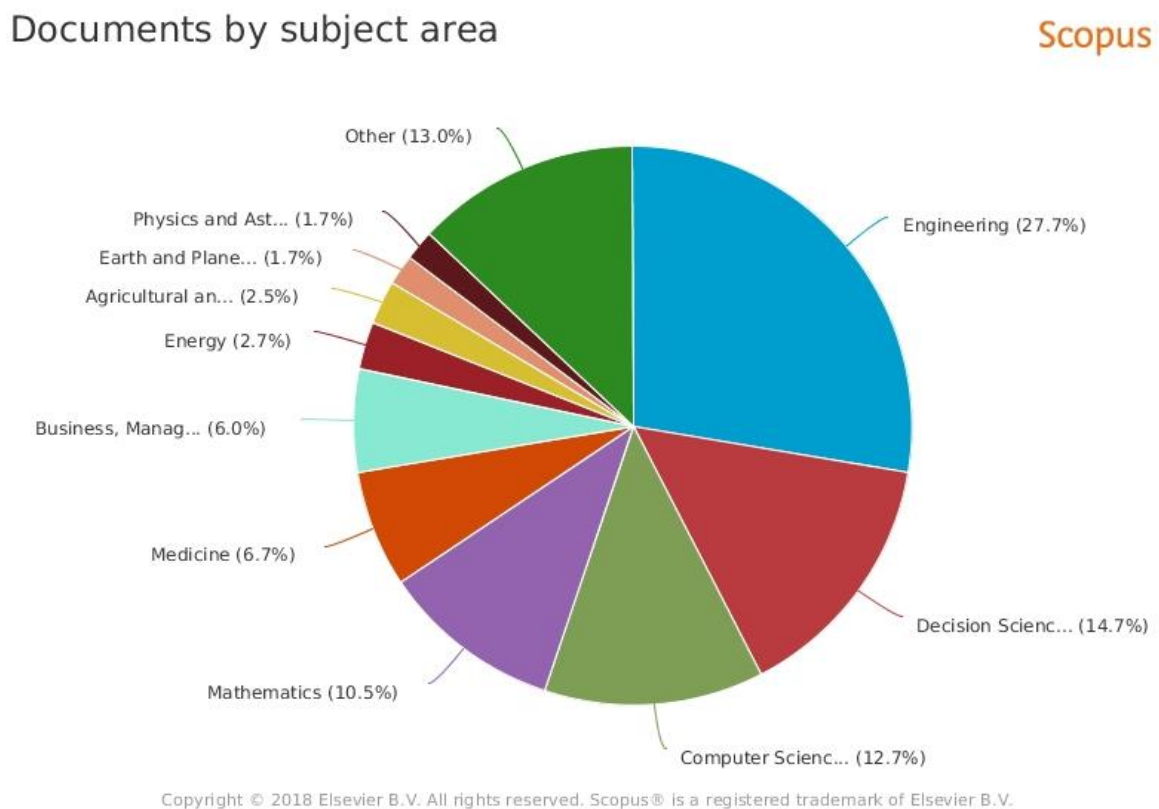
Em face ao estreitamento da margem para desperdícios nos processos produtivos, em que as empresas crescentemente buscam o padrão classe mundial de produção, o monitoramento dos processos, seja de características de qualidade, seja de parâmetros de processos ou até de índices de segurança, a obtenção de medidas mais eficientes na detecção de desajustes de processos pode significar ganhos enormes. Estes ganhos podem significar tempo, dinheiro, qualidade, segurança e, como somatória destes, lucro e produtividade.

Nos últimos anos, a área de Engenharia, por si só, contém um terço do total dos estudos sobre gráficos de controle, como mostra a Figura 2. Além disso, de acordo com a Figura 3, observa-se uma tendência de subida nas publicações relacionadas ao tema, com uma média de

71 artigos ao ano. Vale ressaltar que, para ambas as Figuras 2 e 3, os dados coletados representam a totalidade do ano de 2013 até apenas o mês de maio de 2018. Significando que em apenas 4 meses de 2018, 39 artigos já haviam sido publicados sobre o tema, o que significa que, em um terço do ano, já havia superado a metade do total de artigos do ano anterior. Toda a coleta de artigos foi realizada utilizando a base *Scopus*.

Além disso, vale ressaltar a realização do presente trabalho como extensão e melhor exploração dos resultados obtidos pelo próprio autor ao longo de dois anos de Iniciação Científica com bolsa CNPq. O trabalho de iniciação científica se deu pela criação do código computacional e comparação dos valores obtidos com os valores teóricos determinados por Machado (2009), para o caso univariado, e por Simões et al. (2016), para o caso bivariado.

Figura 2 – Publicações de artigos com *control charts* e *Synthetic* por área (2000 a 2017)



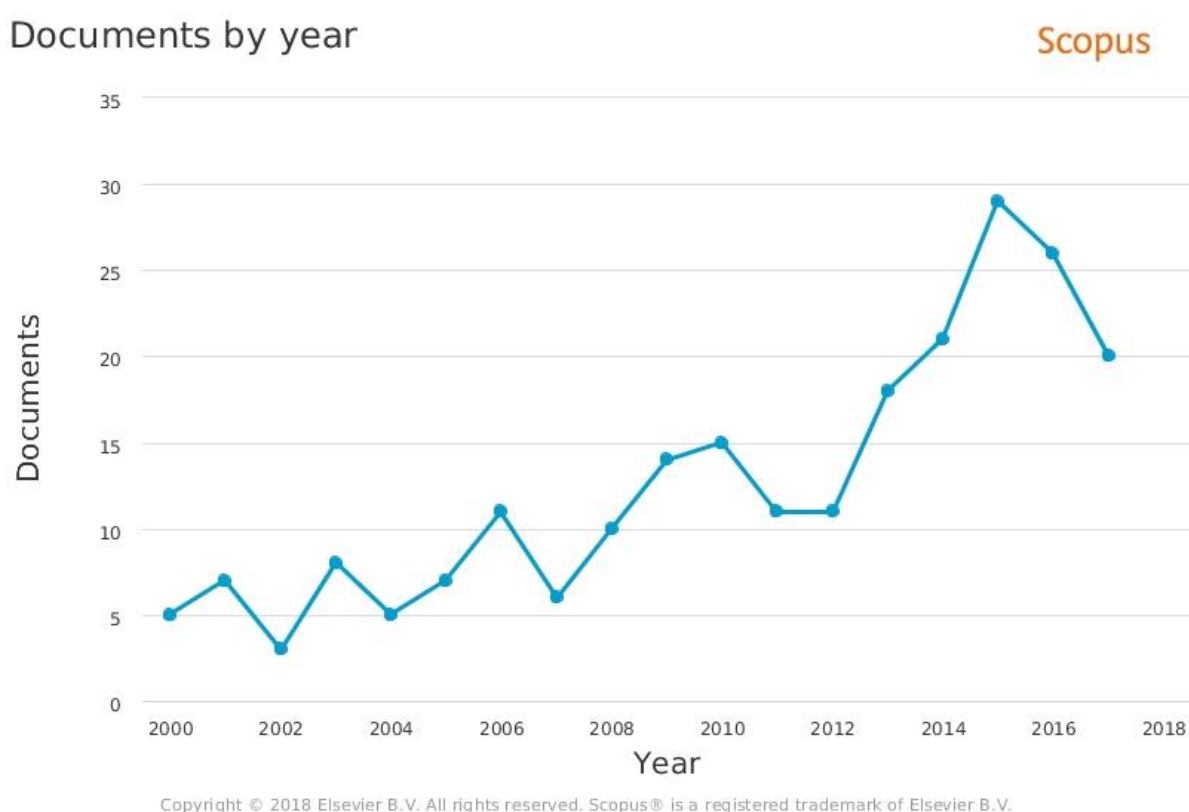
Fonte: Scopus (2018)

O fato de a Engenharia representar a maior parte dos estudos sobre o tema pode ser explicado pelas origens do controle estatístico de processos, que se deu no meio industrial e se disseminou, principalmente, na indústria automotiva. Contudo, a aplicação prática de tais gráficos pode ser feita em qualquer processo propriamente dito e é considerada como

ingrediente essencial para a melhoria da qualidade na manufatura e em serviços (MASON e ANTONY, 2000).

Imaginando um processo de produção de bens, em que, ao se detectar um processo desajustado, deve-se intervir no mesmo para que se possa realizar os devidos reparos e ajustes, é desejável que tais intervenções sejam realizadas no momento correto e da maneira mais precisa possível.

Figura 3 – Publicações de artigos sobre *control charts* e *Synthetic* por ano (2000 a 2017)



Fonte: Scopus (2018)

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho tem sua divisão em 5 capítulos, sendo o primeiro deles dedicado à introdução do tema e sua sintetização. Nele, é abordada a contextualização do assunto tratado, bem como as justificativas para o presente trabalho e as questões de pesquisa que este deve responder.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica do tema Controle Estatístico de Processos, caracterizando os diferentes tipos de gráfico de controle conhecidos e utilizados, assim como as respectivas vantagens e desvantagens de cada um.

Para o terceiro capítulo, encontra-se o método de pesquisa que detalha a caracterização do tipo de pesquisa e o fluxo de atividades seguido para a execução do trabalho.

Em seguida, o quarto capítulo apresenta o desenvolvimento geral do trabalho, bem como os resultados e discussões pertinentes ao que foi realizado. O capítulo aborda todas as simulações computacionais executadas e os dados coletados, comparando a eficiência de cada uma das regras especiais de decisão para posterior auxílio na tomada de decisão considerando o uso de cada uma delas de acordo com o processo monitorado.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões acerca desta pesquisa, bem como sugestões de trabalhos científicos futuros. Na sequência, tem-se, nos apêndices, os códigos computacionais utilizados para as simulações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os processos naturalmente possuem variações inerentes a eles. Estas variações podem ser caracterizadas entre “causas comuns” e “causas especiais”. As causas comuns são consideradas aleatórias e inevitáveis. Um processo com sua variação sob efeito apenas de causas comuns se caracteriza como “sob controle” ou “isento de causas especiais” e seus valores seguem uma distribuição normal. Um processo “fora de controle” ou “sob efeito de causas especiais” caracteriza-se por variações provenientes de causas assinaláveis, possíveis de serem identificadas e eliminadas (COSTA et al., 2005).

Vale ressaltar que a classificação entre causa comum e causa especial é dependente do contexto em que a característica está inserida. O que hoje é considerado como causa comum pode, de acordo com mudanças no processo, passar a ser considerada como uma causa especial. Contudo, só se busca atuar nos processos quando a causa apresenta impacto suficiente que justifique a atuação em termos práticos e econômicos, melhorando a qualidade (WOODAL, 2000).

Os gráficos de controle são compostos por seus limites de controle superior e inferior (LSC e LIC), a linha média (LM) e os valores medidos nas amostras. Segundo Martins e Laugeni (2005), o processo de controle de variáveis deve, normalmente, seguir cinco fases. São elas:

1. Determinar os limites do gráfico de controle utilizado (média, amplitude, média e amplitude) para cada variável a ser controlada.
2. Criar um plano de coleta das amostras.
3. Para cada amostra coletada, realizar as medições referentes às variáveis controladas.
4. Colocar os valores medidos nos gráficos de controle e verificar se o processo está sob controle ou fora de controle.
5. Analisar os resultados obtidos, verificando a necessidade ou não de atuação sobre o processo.

Vale lembrar que, no que tange à construção dos gráficos de controle, a mesma é dividida em Fase I e Fase II. Esta distinção é relativamente recente na literatura, e os trabalhos originais sobre gráficos de controle tem esta distinção um pouco nebulosa. A Fase II trata do gráfico com seus parâmetros conhecidos, enquanto a Fase I usa de um “período base”, que consiste no período usado para estimar os parâmetros do gráfico de controle. De certa forma, a Fase I pode

ser vista como uma ferramenta analítica de dados, enquanto a Fase II como sua consequência, aplicada como um teste de hipóteses. Certamente, quanto melhor estimados forem os parâmetros na Fase I, melhor será o desempenho do gráfico de controle na Fase II (VINING, 2009).

O gráfico de controle de $\bar{X}$ proposto por Shewhart é utilizado para detectar causas especiais, responsáveis por alterações nos parâmetros de um processo. Este gráfico, porém, é pouco sensível a alterações de pequenas a moderadas magnitudes. Por conta disso, diversas regras especiais de decisão vêm sendo propostas para tentar solucionar este problema, de modo a torná-lo mais eficiente.

Para o gráfico de controle simples, o original de Shewhart, sem regras suplementares de decisão, define que um processo está sob controle se os pontos dos gráficos se encontram todos dentro dos limites de controle. Isso constitui, basicamente, uma tomada de decisão binária com base nos valores coletados e as regiões de decisão (MACHADO, 2014; WOODALL, 2000; COSTA, 2005; MACHADO, 2009).

Existem diversos pontos a se considerar no que diz respeito à Fase I dos gráficos de controle. O desempenho do gráfico depende de quão bem são estimados os parâmetros do gráfico. Sendo assim, quanto maior o número de subgrupos no período base, melhor são estimados os parâmetros, visto que a Fase I é realizada a partir de estimativas.

Tomando como exemplo os gráficos da média e da amplitude ($\bar{X}$ e R), seus limites são calculados como segue nas equações (1) a (3):

- Limite Superior de Controle (LSC) = $\mu_0 + 3 \sigma_0 / \sqrt{n}$ (1)

- Linha Média (LM) = μ_0 (2)

- Limite Inferior de Controle (LIC) = $\mu_0 - 3 \sigma_0 / \sqrt{n}$ (3)

Tal que μ_0 é a média do processo sob controle, σ_0 é o desvio-padrão do processo sob controle e n é o tamanho do subgrupo amostrado. Como, na Fase I, μ_0 e σ_0 são desconhecidos, devem ser estimados. Para μ_0 , isso é feito por meio da equação (4):

$$\hat{\mu}_0 = \bar{\bar{X}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i, \quad (4)$$

Tal que $\bar{X}_i$ seja a média amostral do i -ésimo subgrupo, e m o número de subgrupos do período base. Similarmente, o mesmo é feito para σ_0 , resultando na equação (5):

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i, \quad (5)$$

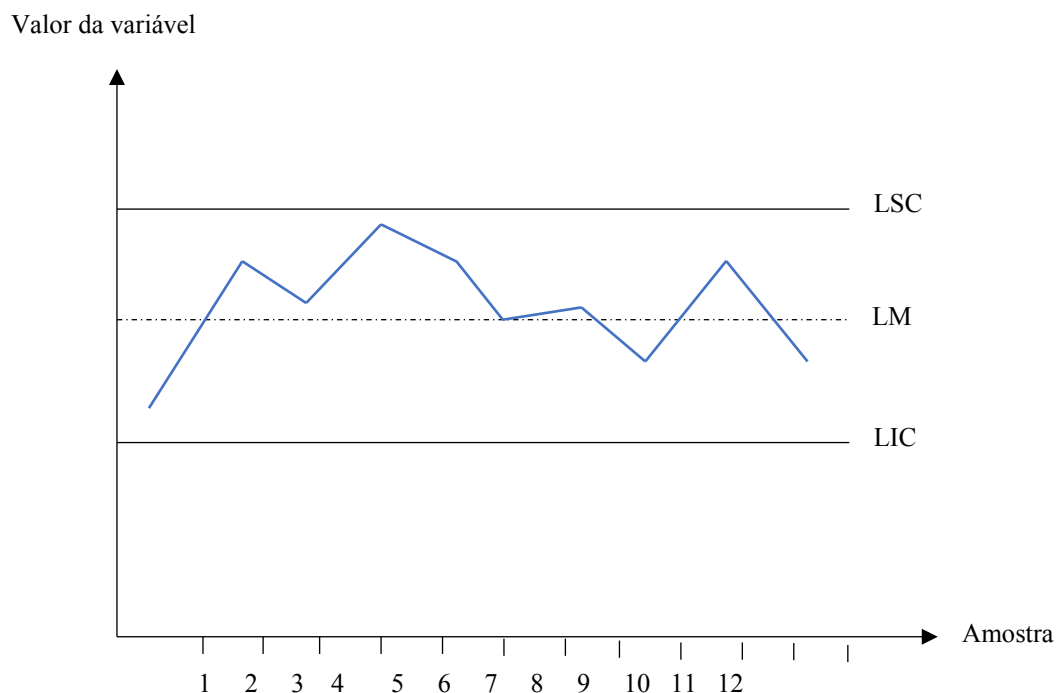
Em que R_i denota a amplitude no i -ésimo subgrupo.

Sendo assim, deve-se considerar que, para melhor estimar os parâmetros na Fase I, maior deve ser o número de amostras coletadas. E, para isso, deve-se assumir o processo como sob controle, para confiabilidade do que se estima. Por outro lado, quanto mais tempo for necessário para a coleta dos dados, maiores as chances do processo se tornar fora de controle, fazendo com que os subgrupos coletados distorçam os parâmetros avaliados. Além disso, vale lembrar que o objetivo é usar o gráfico de controle para monitorar o processo propriamente dito, e quanto mais tempo se passa na Fase I, mais se demora para iniciar o monitoramento propriamente dito. (VINING, 2009).

2.2 GRÁFICOS DE CONTROLE

Segundo Costa et al. (2005), o poder dos gráficos de controle é medido pelo número médio de amostras, ou NMA, até que seja detectada uma alteração no processo. Gráficos de controle são desenhados para detectar causas especiais, responsáveis por alterações nos parâmetros de um processo produtivo. Sua representação se dá conforme a Figura 4.

Figura 4 – Representação do gráfico de controle



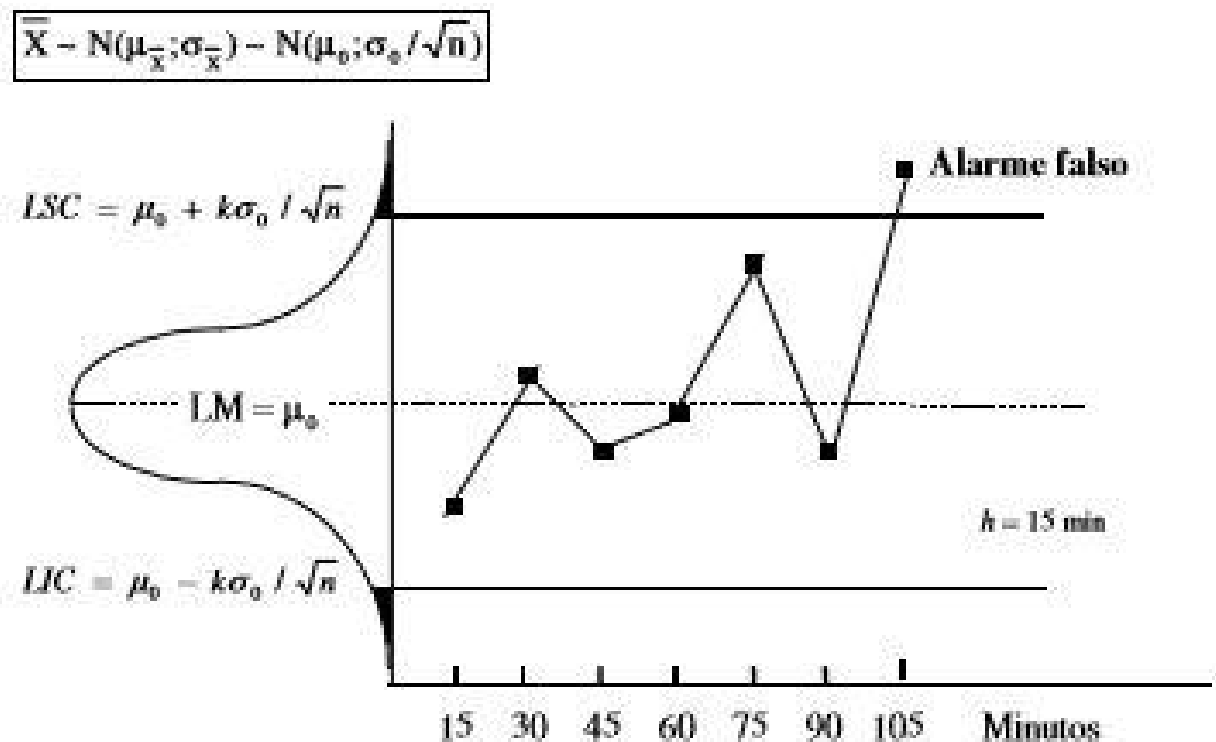
Fonte: Adaptado de Martins e Laugeni (2005)

O gráfico de controle de $\bar{X}$ de Shewhart é, porém, pouco sensível a alterações de pequenas a moderadas magnitudes, o que levou a propostas de novas regras de decisão que pudesse tornar o uso dos gráficos de controle mais eficientes, como o *Synthetic $\bar{X}$ Chart* (Wu e Spedding, 2000) e o *Side-sensitive $\bar{X}$ Chart* (Machado e Costa, 2014).

2.2.1 Alarmes nos gráficos de controle

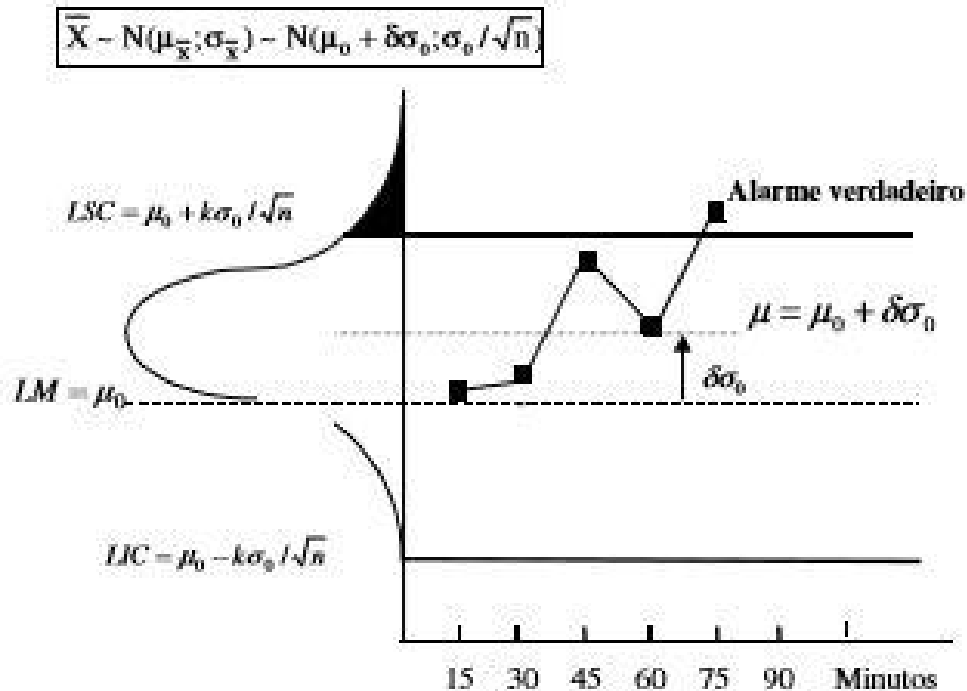
No que diz respeito aos alarmes nos gráficos de monitoramento de $\bar{X}$, tem-se dois tipos de riscos envolvidos: (i) em se tratando de um processo em estado de controle estatístico, existe o risco α de um valor de $\bar{X}$ estar fora dos LC, sinalizando, de maneira indevida, uma causa especial (este sinal indevido é chamado “alarme falso”), e (ii) considerando um processo fora de controle, existe o risco β de um valor de $\bar{X}$ estar dentro dos LC, não detectando a existência de uma causa especial no processo. Ambas as situações são respectivamente retratadas nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Representação do alarme falso em um gráfico de controle



Fonte: Costa et al. (2005)

Figura 6 – Representação do alarme verdadeiro em um gráfico de controle



Fonte: Costa et al. (2005)

Dessa forma, Leoni (2015), afirmar poder se considerar que o monitoramento de processos pelos gráficos de controle funciona bem similarmente a uma sequência de testes de hipóteses. A cada ponto que se plota no gráfico, são testadas, por exemplo, as seguintes hipóteses:

H_0 : processo isento de causas especiais

H_1 : processo sob efeito de causas especiais

Ou:

H_0 : processo sob controle

H_1 : processo fora de controle

2.2.2 Desempenho dos gráficos de controle

Vale lembrar que o desempenho dos gráficos de controle é medido através do número médio de amostras (NMA) até o sinal (COSTA et al. 2005). Durante o período em que o processo está sob controle estatístico, o número médio de amostras é calculado por $NMA = 1/\alpha$, e denominado NMA_0 . Este valor deve ser esperado como alto, o que representa ocorrência de poucos alarmes falsos no processo. Para o caso de o processo estar fora de controle, o cálculo se dá por $NMA = 1/p_d$, em que p_d representa o poder de detecção do gráfico e $p_d = 1 - \beta$. Neste

caso, é desejável que o número seja pequeno, garantindo uma rápida detecção de desajustes no processo (MACHADO, 2009).

Se o processo estiver em controle, qualquer sinal indicado pelo gráfico é um alarme falso. Para tal, quanto maior o NMA, menor a taxa de alarmes falsos. Para um processo em controle, o NMA é dado por NMA_0 . Sendo assim, um NMA baixo quando há uma alteração na média do processo reflete sua rapidez na detecção do problema. O deslocamento da média, dado por δ , é passível de ocorrer a qualquer momento após o início do monitoramento do processo.

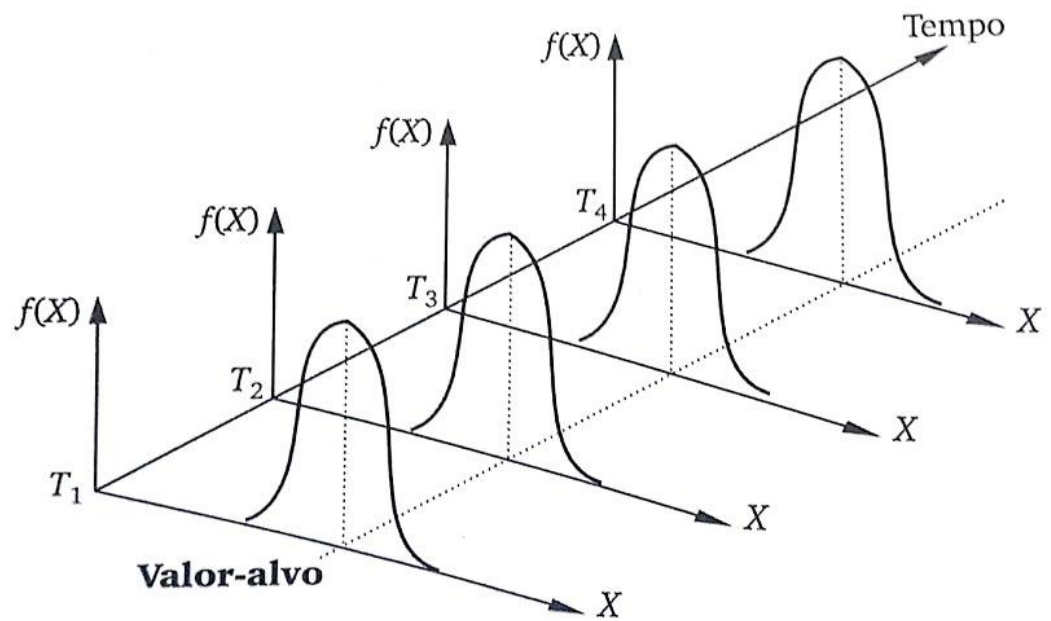
2.2.3 Gráficos de controle de $\bar{X}$ e R

Este trabalho tem como foco principal o estudo dos gráficos de controle de $\bar{X}$ e R, sendo o controle da média e seus desvios realizado com uso do gráfico de controle das médias (gráfico de $\bar{X}$), ao passo que o monitoramento da variabilidade do processo é feito com uso do gráfico de controle da amplitude (gráfico de R). Desta forma, enquanto o controle da variabilidade entre amostras é feito por meio do gráfico de $\bar{X}$, o controle da variabilidade dentro de cada amostra é feito pelo gráfico de R (SUZUMURA, 2016).

Basicamente, o funcionamento dos gráficos de controle se dá pela retirada de amostras de tamanho n a cada intervalo de tempo fixo. Para cada amostra, calcula-se a média $\bar{X}$ dos valores medidos, bem como sua amplitude amostral R. Esta se dá pela diferença entre a amostra de maior e menor valores medidos. Quando um processo está sob efeito de causas especiais, a detecção é mais eficiente se forem utilizados os gráficos de controle de $\bar{X}$ e R combinados, o que permite melhor análise do processo.

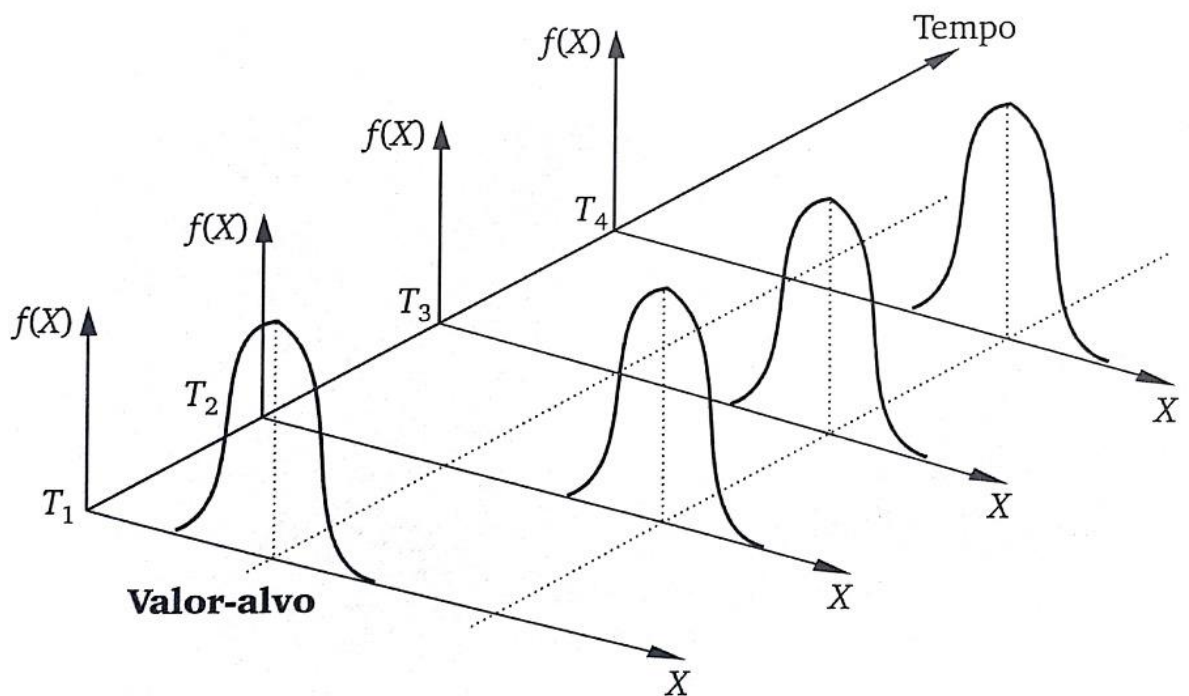
No que tange as causas especiais e suas influências no processo, as Figuras 7, 8 e 9 apresentam graficamente, respectivamente, dado processo isento de causas especiais, sob ação de causa especial deslocando a média do processo e, por fim, sob ação de causa especial deslocando ambas média e variabilidade.

Figura 7 – Processo isento de causas especiais



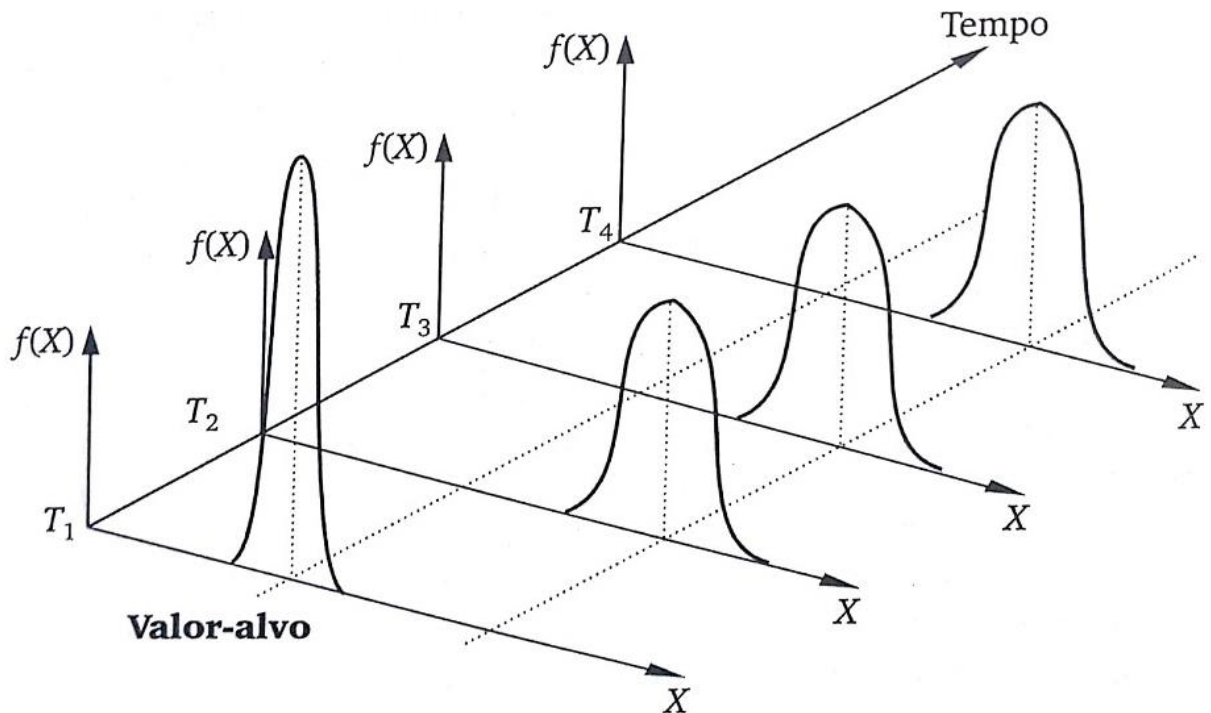
Fonte: Costa et al. (2005)

Figura 8 – Processo sob efeito de causas especiais alterando a média



Fonte: Costa et al. (2005)

Figura 9 – Processo sob efeito de causas especiais alterando média e dispersão



Fonte: Costa et al. (2005)

2.3 GRÁFICOS DE CONTROLE COM REGRAS ESPECIAIS DE DECISÃO

Com o objetivo de melhorar a sensibilidade dos gráficos de controle de Shewhart na detecção de alterações de pequenas a médias magnitudes, foram sendo propostas as regras especiais de decisão. Múltiplos autores vêm elaborando e propondo novas regras de decisão que auxiliem no monitoramento e detecção em tais casos (RAKITZIS, 2017).

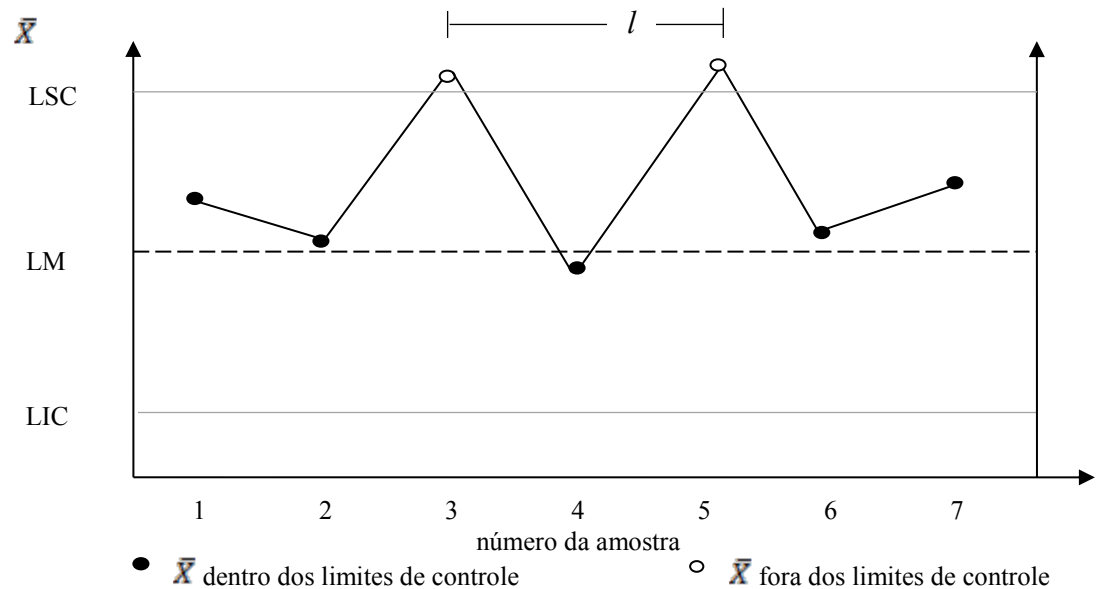
2.3.1 Gráfico de $\bar{X}$ Synthetic

O *Synthetic $\bar{X}$ Chart*, gráfico de $\bar{X}$ com regra especial de decisão, de Wu e Spedding (2000) é capaz de detectar mais rapidamente as perturbações na média do processo, mesmo que sejam pequenas. A regra especial *Synthetic* se trata de intervir no processo apenas para casos nos quais dois pontos sejam plotados fora dos limites de controle com curta distância entre eles. Esta regra especial é bem interessante para os usuários, visto que preferem esperar um segundo ponto fora dos LC antes de investigar, de fato, a possível causa especial que perturba o processo.

A regra especial de decisão *Synthetic*, proposta por Wu e Spedding (2000) para o gráfico de $\bar{X}$, acusa o alarme somente quando dois pontos ocorrerem fora dos limites de controle (LIC ou LSC), distantes de um valor menor ou igual a L amostras, sendo L é um valor inteiro

especificado pelo usuário. O fator de abertura dos LC é dado por k , e o tamanho das amostras por n . A Figura 10 ilustra a aplicação da regra.

Figura 10 – Gráfico de $\bar{X}$ com regra *Synthetic*



Fonte: Próprio autor (2015)

Além de detectar mais rapidamente as perturbações na média do processo, esta regra ainda é atrativa aos usuários por permitir que atuem no processo apenas após a ocorrência de um segundo ponto fora dos limites de controle, evitando possíveis atuações desnecessárias por alarmes falsos.

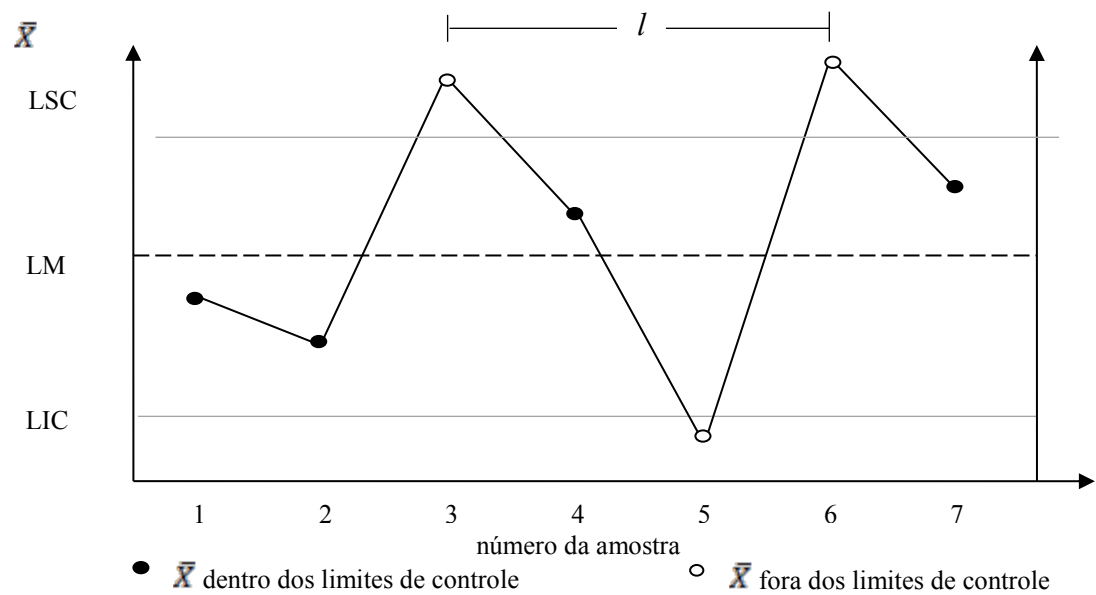
2.3.2 Gráfico de $\bar{X}$ *Side-sensitive Synthetic*

Machado e Costa (2014) propuseram, a fim de se obter um gráfico ainda mais eficiente, o *Side-sensitive Synthetic $\bar{X}$ Chart*, gráfico de $\bar{X}$ com regra especial de decisão *side-sensitive* (gráfico de $\bar{X}$ SS *Synthetic*). Esta regra propõe que a intervenção ocorra quando dois pontos forem plotados, com curta distância entre eles, fora dos limites de controle, dessa vez sendo os dois pontos do mesmo lado com relação à linha média (LM). A regra *side-sensitive* também foi adotada em Costa e Machado (2015, 2016) e Machado e Costa (2014a).

A regra especial de decisão *Side-sensitive Synthetic* acusa o alarme quando dois pontos, distantes de um valor menor ou igual a um valor inteiro L , forem ambos plotados acima do limite superior controle (LSC) ou ambos plotados abaixo do limite inferior de controle (LIC).

Assim como a regra *Synthetic*, o fator de abertura dos limites de controle é dado por k e o tamanho das amostras por n . A Figura 11 ilustra o gráfico com $L=5$, visto que o número de pontos entre dois pontos fora dos limites, incluindo o segundo ponto, é $l=3$. Vale ressaltar que a regra *side-sensitive* não se aplica ao gráfico de $\bar{X}$, visto que o mesmo só possui o limite superior de controle.

Figura 11 – Gráfico de $\bar{X}$ baseado na regra *Side-Sensitive Synthetic*

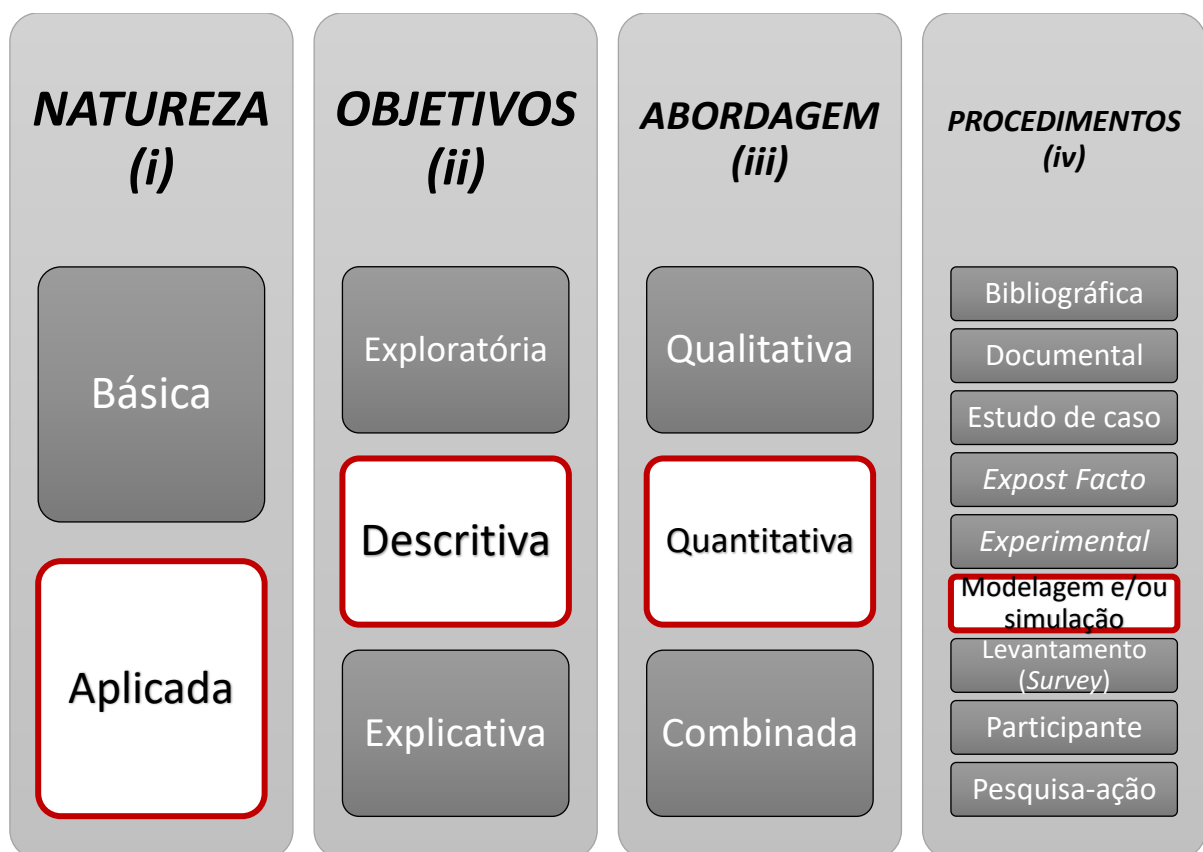


Fonte: Próprio autor (2015)

3 MÉTODO DE PESQUISA

A Figura 12 representa a classificação do método de pesquisa utilizado neste trabalho. No caso, a pesquisa tem uma natureza (i) aplicada, visto que visa desenvolver conceitos possíveis de serem aplicados de imediato no mercado. No que diz respeito à abordagem (ii) da pesquisa, esta se caracteriza como quantitativa, devido ao uso de valores gerados por meio de simulações computacionais. Em termos dos objetivos (iii), caracteriza-se como descritiva, dado que sua finalidade é analisar e interpretar resultados de simulações sem, de fato, intervir no processo. Quanto aos procedimentos (iv), trata-se de modelagem e simulação. A simulação trata-se de uma ferramenta que permite a elaboração de cenários a partir dos quais se pode orientar o processo de tomada de decisão, proceder análises e avaliações de sistemas e propor soluções de melhoria. (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Figura 12 – Classificação do Método de Pesquisa

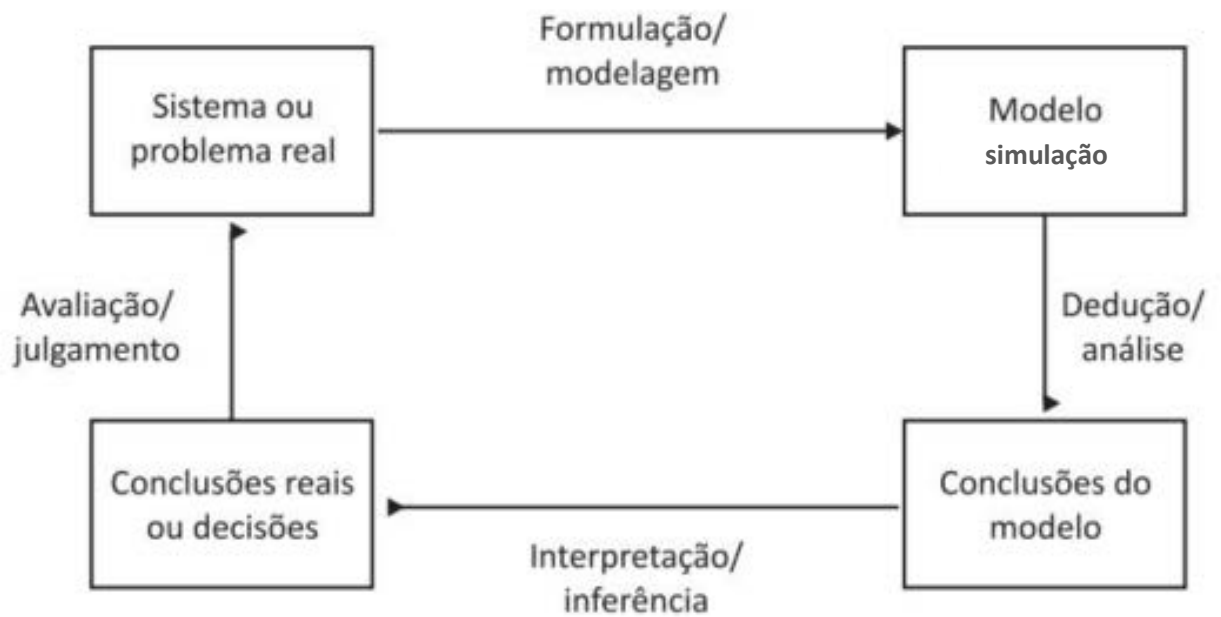


Fonte: Adaptado de Oliveira (2015).

Vale ressaltar, também, que a pesquisa experimental que se utiliza de simulações consiste em, como no caso do presente trabalho, modelar um sistema, realizar as simulações e, em

seguida, analisar os resultados obtidos para que se possa tirar conclusões sobre o modelo e, por consequência, tirar conclusões sobre o sistema real por inferências, como ilustrado na Figura 13 (MIGUEL, 2012).

Figura 13 – Processo de modelagem de simulação



Fonte: Adaptado de Miguel (2012).

Para realizar o trabalho por completo, tomou-se por necessidade as atividades descritas no Quadro 1.

Quadro 1 – Atividades para a realização da pesquisa

Atividade
1. Definição do projeto de pesquisa 2. Revisão sistemática 3. Caracterização do método de pesquisa 4. Apresentação do Pôster 5. Compilação e implementação das melhorias 6. Elaboração do programa inicial de simulação em linguagem FORTRAN 7. Validação do programa por comparação aos resultados existentes na teoria 8. Extensão do programa para atender aos objetivos 9. Coleta e análise dos resultados obtidos nas simulações 10. Resposta às questões de pesquisa 11. Redação do trabalho 12. Qualificação da monografia 13. Elaboração de artigos científicos 14. Defesa do trabalho

Fonte: Próprio autor (2018).

4 RESULTADOS

A forma de trabalho adotada para a obtenção dos resultados desta pesquisa consistiu na validação do código computacional por meio da comparação com a literatura, seguida da comparação entre os desempenhos de cada um dos gráficos abordados, fazendo o uso das regras especiais de decisão para os gráficos de $\bar{X}$ e de $\bar{X}$ e R para processos univariados e bivariados. Os valores em negrito nas tabelas de resultados desta seção representam os menores valores de NMA para cada situação.

4.1 VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL INICIAL

Nesta seção, são comparados os valores de NMA obtidos via simulação na linguagem Fortran (dez mil simulações para cada situação de interesse). Os valores teóricos de NMA foram obtidos matematicamente por Machado e Costa (2014). Para este estudo, foram realizados diferentes testes de hipótese para validação do programa. Foi feito o *one-sample t test* com amostras de tamanho 50 e intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 5%, utilizando o *software* Minitab 18©. A Tabela 1 mostra as 6 hipóteses testadas, uma para cada situação avaliada (uma para cada valor de deslocamento da média δ). A Tabela 2 apresenta um exemplo dos valores obtidos por meio das simulações, com seu erro dado pela diferença percentual entre o valor simulado (NMA_S) e o valor teórico (NMA_T).

Tabela 1 – Testes de hipótese *one-sample t test*

$\delta = 0$ $H_0: \mu = 390,0$ $H_1: \mu \neq 390,0$ $p\text{-value} = 0,622$	$\delta = 1,0$ $H_0: \mu = 26,4$ $H_1: \mu \neq 26,4$ $p\text{-value} = 0,056$	$\delta = 2,0$ $H_0: \mu = 4,6$ $H_1: \mu \neq 4,6$ $p\text{-value} = 0,086$
$\delta = 0,5$ $H_0: \mu = 112,8$ $H_1: \mu \neq 112,8$ $p\text{-value} = 0,261$	$\delta = 1,5$ $H_0: \mu = 9,3$ $H_1: \mu \neq 9,3$ $p\text{-value} = 0,095$	$\delta = 2,5$ $H_0: \mu = 3,0$ $H_1: \mu \neq 3,0$ $p\text{-value} = 0,806$
$\delta = 3,0$ $H_0: \mu = 2,4$ $H_1: \mu \neq 2,4$ $p\text{-value} = 0,843$		

Fonte: Próprio autor (2018).

Para este caso, foi utilizado um tamanho de amostra $n=1$ e fator $L=1$.

Tabela 2 - Erro percentual entre NMA_T e NMA_S para o caso $\bar{X}$ SS *Synthetic* ($n=1$; $L=1$)

L	1		
k	1,794		
δ	NMA_T	NMA_S	Erro (%)
0	390,0	390,0	0
0,5	112,8	112,4	0,34
1	26,4	26,2	0,76
1,5	9,3	9,4	0,65
2	4,6	4,6	0,43
2,5	3,0	3,9	0,67
3	2,4	2,4	1,67

Fonte: Próprio autor (2015).

O código utilizado para esta validação está representado no Apêndice A.

4.2 GRÁFICO DE $\bar{X}$ *SIDE-SENSITIVE SYNTHETIC*

Com a validação do código computacional, iniciou-se o trabalho de simulações e coleta dos dados. Dessa forma, o primeiro gráfico analisado foi o de $\bar{X}$ *Side-sensitive Synthetic*, com seus resultados apresentados na Tabela 3. Vale lembrar que L e n são parâmetros com valores inteiros determinados pelo usuário, k é o fator de abertura dos limites de controle e δ é a magnitude de perturbação na média do processo.

Tabela 3 - Comparação entre os NMAs para diferentes valores de L ($n=5$)

L	1	5	10
k	1,783	2,112	2,239
δ	NMAs	NMAs	NMAs
0	370,16	370,48	371,14
0,5	107,28	94,49	92,88
1	25,41	22,41	22,24
1,5	9,12	8,21	8,70
2	4,52	4,34	4,64
2,5	2,95	2,94	3,11
3	2,35	2,35	2,4

Fonte: Próprio autor (2015).

Pode-se notar, na Tabela 3, que a eficiência do gráfico varia de acordo com as perturbações na média do processo. Para o caso de menores deslocamentos da média ($\delta \leq 1$), $L=10$ é mais eficiente na detecção de desajustes. Já para o caso de maiores deslocamentos da média ($\delta > 1$), tem-se $L=5$ mais eficiente que os demais.

O código utilizado para esta simulação está representado, também, no Apêndice A.

4.3 GRÁFICO DE R E R *SYNTHETIC*

Pelo fato de alterações na média do processo não afetarem o desempenho do gráfico da amplitude, os valores foram analisados somente no que tange perturbações na dispersão do processo. A Tabela 4 mostra os valores de NMAs para os gráficos de R com e sem o uso da regra especial *Synthetic* (WU e SPEDDING, 2000), com tamanho de amostra $n=4$, com cada

respectivo percentual de redução do NMA e consequente aumento da eficiência do gráfico. A magnitude do aumento na variabilidade do processo é dada por λ e W é o fator de abertura do limite de controle.

Tabela 4 - Valores de NMA e Percentual de redução para os gráficos de R ($n=4$)

L		2		5			7		
W	4,938	3,77		4,938	3,98		4,938	4,055	
λ	R Shewhart	R Synthetic	%	R Shewhart	R Synthetic	%	R Shewhart	R Synthetic	%
1	369,53	370,54		369,53	371,3		369,53	370,88	
1,25	38,21	31,72	16,99	38,21	26,8	29,86	38,21	20,9	45,3
1,5	11,06	9,49	14,2	11,06	7,36	33,45	11,06	6,83	38,25
1,75	5,22	4,46	14,56	5,22	3,51	32,76	5,22	2,95	43,49
2	3,35	2,83	15,52	3,35	2,22	33,73	3,35	2,09	37,61

Fonte: Próprio autor (2015).

Segundo os dados da Tabela 4, a regra especial *Synthetic* se mostra mais eficiente quando sob o espectro do gráfico da amplitude, apresentando uma redução mais significativa do número médio de amostras até o sinal. Conforme o valor de L aumenta, também aumenta a redução do NMA, chegando a uma redução de até 45%, com $L=7$ (reduzindo de 38,2 para 20,9).

Analogamente, a Tabela 5 apresenta os valores de NMA para os gráficos de R, porém utilizando uma amostra de tamanho $n=5$, a qual sinaliza a melhora na eficiência do gráfico conforme se aumenta o valor de L . Percebe-se que a melhoria se faz presente para todos os valores de L , mas ela é notavelmente maior para maiores valores de L .

Os códigos utilizados para estas simulações estão representados nos Apêndices B e C.

Tabela 5 - Valores de NMA e Percentual de redução para os gráficos de R ($n=5$)

L		2		5			7		
W	5,12	3,988		5,12	4,195		4,938	4,265	
λ	R Shewhart	R Synthetic	%	R Shewhart	R Synthetic	%	R Shewhart	R Synthetic	%
1	374,31	370,96		374,31	371,35		374,31	370,99	
1,25	32,27	26,43	18,1	32,27	22,43	30,49	32,27	21,26	34,11
1,5	8,97	7,28	18,84	8,97	5,62	37,35	8,97	5,35	40,35
1,75	4,29	3,41	20,51	4,29	2,71	36,83	4,29	2,56	40,32
2	2,73	2,2	19,41	2,73	1,83	32,47	2,73	1,83	32,47

Fonte: Próprio autor (2015).

4.4 GRÁFICOS DE $\bar{X}$ E R, $\bar{X}$ E R *SYNTHETIC* E $\bar{X}$ E R *SIDE-SENSITIVE SYNTHETIC*

Nesta seção, são comparados os valores de NMA para os gráficos simultâneos de $\bar{X}$ e R com cada uma das regras especiais de decisão, tanto para amostras de tamanho $n=4$ como $n=5$. No que diz respeito à eficiência de cada uma das regras, nota-se pelas Tabelas 6 e 7 que seus resultados foram semelhantes mesmo com alteração no tamanho da amostra. Os valores destacados nas tabelas são os mínimos valores de NMA encontrados para uma dada condição de deslocamento na média e na dispersão do processo (δ , λ).

Analizando os resultados, percebe-se maior vantagem na escolha da regra *Synthetic* ou da regra *Side-sensitive Synthetic*, quando se tratando de deslocamentos da média inferiores a $\delta=1,5$ (para $n=4$) e $\delta=2$ (para $n=5$), com a dispersão do processo não ultrapassando $\lambda=1,5$. Contudo, para desajustes no processo superiores a $\lambda=1,5$, é mais vantajoso utilizar os gráficos de $\bar{X}$ e R simples de Shewhart, sem nenhuma das regras especiais de decisão.

Os códigos utilizados para estas simulações estão representados nos Apêndices D, E e F.

Tabela 6 - Valores de NMA para os gráficos de $\bar{X}$ + R para cada regra de decisão ($n=4$)

L		2			5		7	
k		3,205	2,211	2,08	2,377	2,252	2,435	2,313
W		5,19	3,948	3,948	4,158	4,158	4,225	4,225
λ	δ	X + R Shewhart	X + R Synthetic	X + R SS Synthetic	X + R Synthetic	X + R SS Synthetic	X + R Synthetic	X + R SS Synthetic
1	0	370,95	369,85	367,66	369,39	372,87	369,64	370,2
	0.5	204,37	190,39	142,36	178,71	132,19	175,62	127,18
	1	66,93	45,94	32,22	42,61	30,74	41,14	29,78
	1.5	21,89	13,88	10,69	12,76	10,25	12,95	10,37
	2	8,74	5,91	5,01	5,85	5,09	5,88	5,2
1.5	0	10,13	9,99	10,83	9,08	9,62	9	9,34
	0.5	9,48	9,46	9,89	8,46	8,72	8,49	8,47
	1	7,23	7,88	7,6	7,08	6,85	7,16	6,95
	1.5	5,38	5,85	5,54	5,53	5,31	5,56	5,31
	2	3,76	4,38	4,11	4,22	4,05	4,31	4,06
2	0	2,93	3,83	3,97	3,74	3,86	3,78	3,89
	0.5	2,9	3,75	3,88	3,68	3,78	3,71	3,81
	1	2,68	3,62	3,69	3,52	3,63	3,56	3,64
	1.5	2,43	3,37	3,35	3,3	3,33	3,34	3,41
	2	2,18	3,08	3,06	3,07	3,06	3,08	3,07

Fonte: Próprio autor (2015).

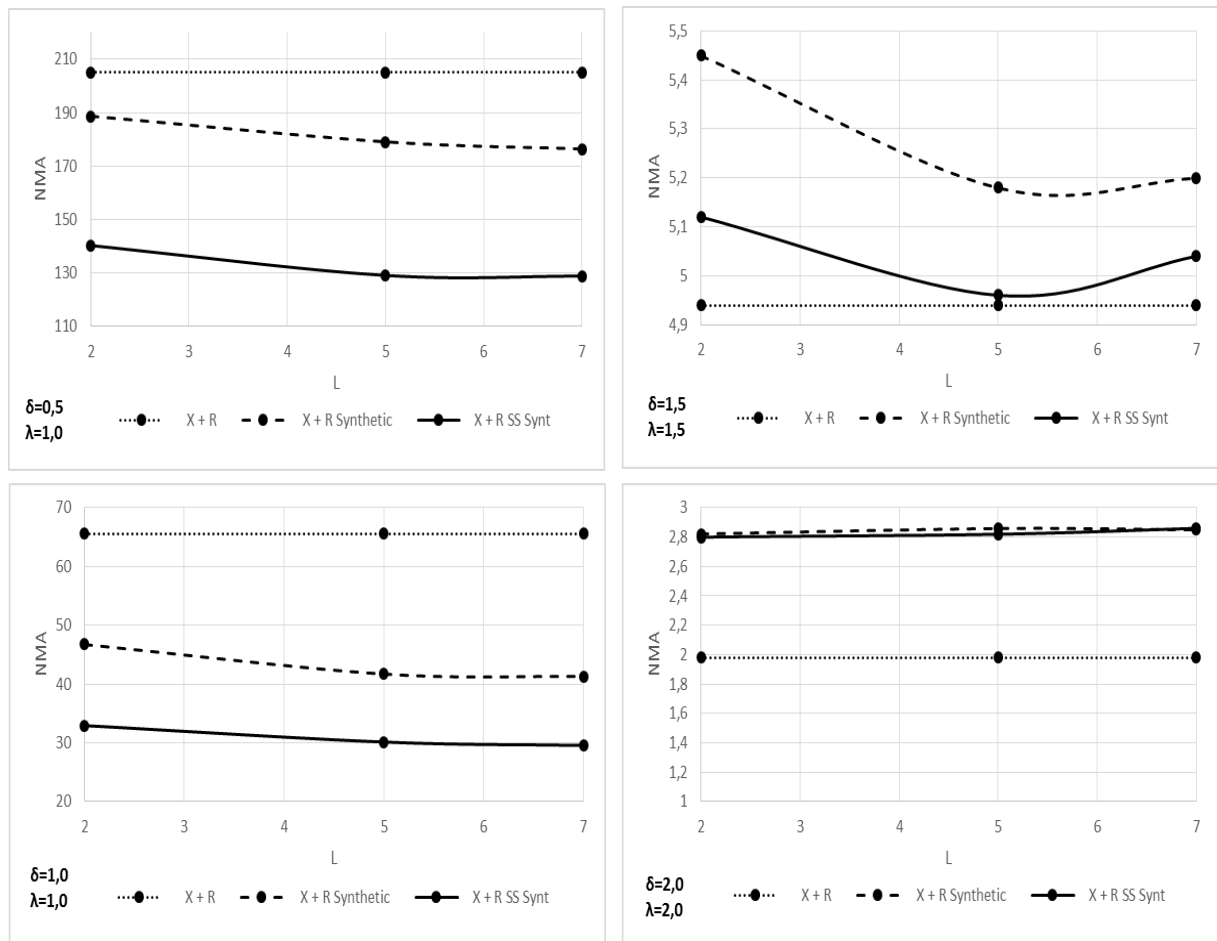
Tabela 7 - Valores de NMA para os gráficos de $\bar{X} + R$ para cada regra de decisão (n=5)

L		2			5		7	
k		3,205	2,213	2,08	2,377	2,253	2,435	2,313
W		5,37	4,162	4,162	4,36	4,36	4,43	4,43
λ	δ	X + R Shewhart	X + R Synthetic	X + R SS Synthetic	X + R Synthetic	X + R SS Synthetic	X + R Synthetic	X + R SS Synthetic
1	0	373,77	371,33	370,56	368,98	370,68	372,76	368,69
	0.5	205,04	188,51	140,27	178,98	129,07	176,3	128,83
	1	65,59	46,77	32,92	41,73	30,13	41,31	29,55
	1.5	22,11	13,63	10,85	12,66	10,29	12,89	10,32
	2	8,78	5,78	5,06	5,79	5,05	6	5,25
1.5	0	8,75	8,61	8,87	7,78	7,97	7,8	8,09
	0.5	8,13	7,98	8,19	7,46	7,4	7,33	7,5
	1	6,55	6,87	6,73	6,35	6,21	6,44	6,28
	1.5	4,94	5,45	5,12	5,18	4,96	5,2	5,04
	2	3,61	4,17	3,94	4,08	3,89	4,14	3,95
2	0	2,55	3,34	3,43	3,28	3,34	3,31	3,41
	0.5	2,49	3,26	3,35	3,25	3,32	3,28	3,36
	1	2,34	3,16	3,2	3,15	3,2	3,21	3,24
	1.5	2,19	3,02	3,03	3	3,03	3,02	3,05
	2	1,98	2,82	2,8	2,86	2,82	2,85	2,86

Fonte: Próprio autor (2015).

Desta forma, infere-se que, no momento da escolha do gráfico a ser utilizado, deve-se levar em consideração os tipos e magnitudes de desvios presentes no processo. Por isso, investigando o processo a ser controlado, escolher-se-á a regra a ser aplicada de acordo com a maior proximidade da relação entre as Tabelas 6 e 7, evidenciada mais claramente na Figura 14.

Figura 14 – NMA de $\bar{X} + R$ para cada regra sob condições diferentes



Fonte: Próprio autor (2015).

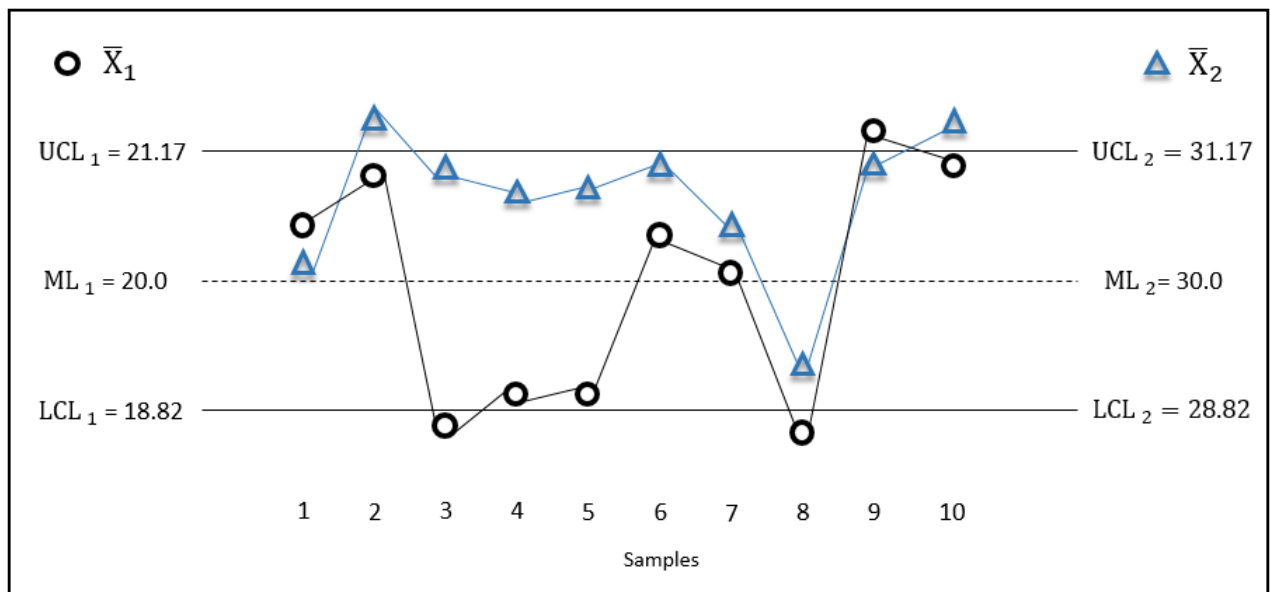
4.5 GRÁFICO DE $\bar{X}$ SIDE-SENSITIVE SYNTHETIC BIVARIADO

Dando continuidade ao trabalho, foi realizado o estudo do controle de processos com duas variáveis simultaneamente no mesmo gráfico. A regra consiste em avaliar as médias de ambas as variáveis paralelamente, de modo a sinalizar um desajuste quando as médias de ambas as variáveis são plotadas fora dos limites de controle, do mesmo lado com relação à LM. No que diz respeito à análise de duas variáveis, é levada em conta a correlação ρ existente entre ambas, sendo este um novo parâmetro que passa a fazer parte do estudo.

Como mostra a Figura 15, o seguinte gráfico não sinalizaria um desajuste quanto às amostras 3 e 4 nem tampouco quanto às amostras 8 e 9, mesmo apresentando um valor de $1 < L$, pelo fato de se encontrarem em lados opostos com relação à LM. Contudo, o sinal ocorreria na amostra 10, visto que, além do fator $1 < L$, $\bar{X}_1$ se encontra acima do LSC_1 , bem como $\bar{X}_2$ está acima do LSC_2 .

Analogamente às seções anteriores, foram realizadas simulações por meio de programação para comprovar os valores obtidos em teoria Simões *et al.* (2016). Com a intenção de realizar uma análise de sensibilidade de tal gráfico, foram realizadas simulações alterando individualmente dois a dois os parâmetros ao qual o gráfico é submetido, sendo eles os deslocamentos das médias (δ_1 e δ_2) e a correlação entre ambas as características de qualidade (ρ_1 e ρ_2).

Figura 15 – Gráfico bivariado de $\bar{X}$ para a regra *Side-sensitive Synthetic*



Fonte Simões et al. (2016).

Em um momento inicial, foi necessária a validação do programa utilizado para os estudos. Analogamente ao caso anterior, foi realizado o *one-sample t test* para testar as hipóteses para alguns dos cenários evidenciados no Quadro 2 (variando o deslocamento δ da média e a correlação ρ entre as variáveis), utilizando tamanho de amostra $n=4$ e $L=5$. A Figura 16 mostra os resultados dos testes de hipótese para o caso bivariado. Por se tratarem de muitas simulações para cada possível combinação, foram utilizadas três combinações de δ para cada valor de correlação ρ . Estas são:

➤ **Combinação 1:**

- $\rho = 0,3$
- $\delta_1 = 0,3$
- $\delta_2 = 1,0$

➤ **Combinação 2:**

- $\rho = 0,5$
- $\delta_1 = 0,25$
- $\delta_2 = 1,0$

➤ **Combinação 3:**

- $\rho = 0,7$
- $\delta_1 = 0,5$
- $\delta_2 = 1,0$

Pode-se verificar que, para todos os casos, foram utilizadas amostras de tamanho $n=40$ e o *p-value* superou, em todos os casos, o valor de 0,05 (nível de significância de 5%), assumindo a hipótese nula como verdadeira.

Figura 16 - Testes de hipótese *one-sample t test* para o caso bivariado

One-Sample T: 0,3 / 1,0

Descriptive Statistics

N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI for μ
40	3,10350	0,01748	0,00276	(3,09791; 3,10909)

μ : mean of 0,3 / 1,0

Test

Null hypothesis $H_0: \mu = 3,1$
 Alternative hypothesis $H_1: \mu \neq 3,1$

T-Value	P-Value
1,27	0,213

One-Sample T: 0,5 / 0,25;1,0

Descriptive Statistics

N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI for μ
40	6,72068	0,00459	0,00073	(6,71921; 6,72214)

μ : mean of 0,5 / 0,25;1,0

Test

Null hypothesis $H_0: \mu = 6,72$
 Alternative hypothesis $H_1: \mu \neq 6,72$

T-Value	P-Value
0,93	0,358

One-Sample T: 0,7 / 0,5;1,0

Descriptive Statistics

N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI for μ
40	7,37042	0,00343	0,00054	(7,36933; 7,37152)

μ : mean of 0,7 / 0,5;1,0

Test

Null hypothesis $H_0: \mu = 7,37$
 Alternative hypothesis $H_1: \mu \neq 7,37$

T-Value	P-Value
0,78	0,437

Fonte: Próprio autor (2018).

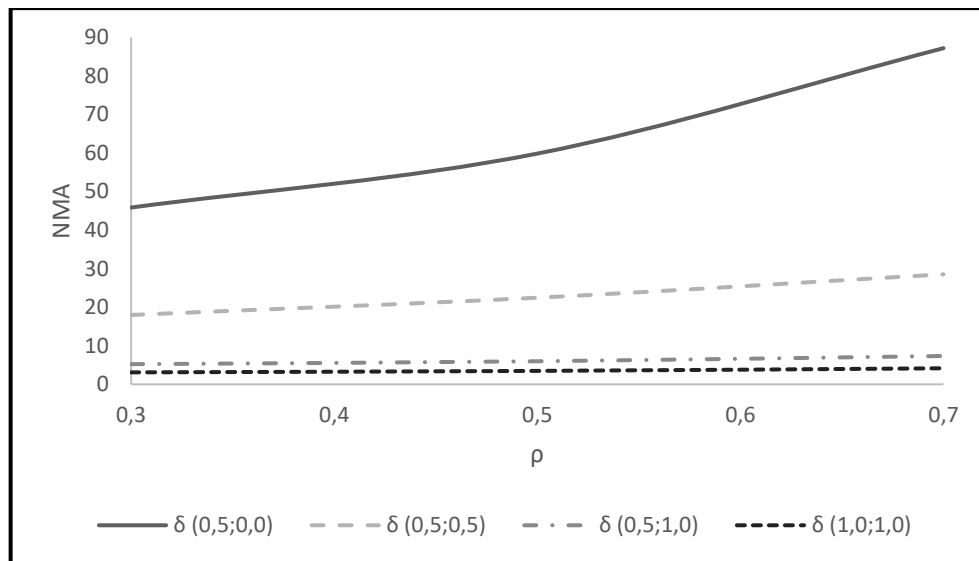
A Figura 15 representa graficamente a influência do parâmetro da correlação no que diz respeito à eficiência da regra na detecção de alarmes para diferentes valores de deslocamentos da média. É possível notar que, para menores valores de δ , quanto maior a correlação entre as características, menor é a eficiência da regra. Contudo, para maiores valores do deslocamento da média, a regra se mostra igualmente eficiente na detecção.

Quadro 2 - Erros percentuais entre NMA_S e NMA_T para o gráfico de $\bar{X}$ SS *Synthetic* bivariado ($n=4$, $L=3$)

k		$\rho=0,3$			$\rho=0,5$			$\rho=0,7$		
		2,35			2,44			2,57		
δ_1	δ_2	Synthetic SS Bivariado			Synthetic SS Bivariado			Synthetic SS Bivariado		
		Teórico	Simulado	Erro	Teórico	Simulado	Erro	Teórico	Simulado	Erro
0	0	370,4	355,28	4%	370,4	375,07	1%	370,4	370,57	0%
0	0,25	177,79	174,2	2%	205,73	210,01	2%	252,21	252,69	0%
0	0,5	46,82	45,25	3%	58,89	60,41	3%	86,57	84,12	3%
0	1	6,26	6,18	1%	7,1	7,17	1%	8,85	8,8	1%
0,25	0	177,79	171,28	4%	205,73	212,89	3%	252,21	252,71	0%
0,25	0,25	87,48	84,89	3%	101,38	103,27	2%	123,36	124,85	1%
0,25	0,5	32,65	32,46	1%	39,71	40,78	3%	53,73	53,84	0%
0,25	1	5,89	5,89	0%	6,72	6,75	0%	8,41	8,36	1%
0,5	0	46,82	45,87	2%	58,89	59,87	2%	86,57	87,22	1%
0,5	0,25	32,65	32,62	0%	39,71	40,05	1%	53,73	53,8	0%
0,5	0,5	18,15	18	1%	21,82	22,48	3%	28,64	28,55	0%
0,5	1	5,13	5,23	2%	5,88	5,98	2%	7,37	7,35	0%
1	0	6,26	6,26	0%	7,1	7,17	1%	8,85	8,9	1%
1	0,25	5,89	5,88	0%	6,72	6,74	0%	8,41	8,37	0%
1	0,5	5,13	5,08	1%	5,88	5,97	2%	7,37	7,43	1%
1	1	3,1	3,1	0%	3,45	3,48	1%	4,12	4,16	1%

Fonte: Próprio autor (2017).

Figura 17 – Efeito de ρ na eficiência do gráfico bivariado de $\bar{X}$ para a regra *Side-sensitive Synthetic*



Fonte: Próprio autor (2017).

O código utilizado para esta simulação está representado no Apêndice G.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho estudou-se, por meio de simulações, os gráficos de controle sob diferentes condições: utilizando a regra básica de Shewhart, utilizando a regra especial *Synthetic* (WU e SPEDDING, 2000) e, por fim, utilizando a regra especial *Side-sensitive Synthetic* para o caso univariado (MACHADO e COSTA, 2014) e para o caso bivariado (MACHADO, 2009; SIMÕES ET AL., 2016). As regras foram aplicadas aos gráficos da média e da amplitude, tanto individualmente como simultaneamente, exceto para o caso bivariado, o qual trabalhou apenas com a média.

É de suma importância ressaltar o fato de que, para uma eficiente escolha da regra de decisão, deve-se conhecer muito bem o processo a ser monitorado. Tendo em vista que os processos vão ter diferentes regras utilizadas de acordo com a sensibilidade que possuem a alterações em suas médias, bem como à correlação entre as variáveis monitoradas, para o caso bivariado.

Respondendo à questão de pesquisa, de quais são as regras especiais de decisão mais eficientes para o monitoramento de processos univariados e bivariados, deve ser reforçada a conclusão de que isso vai depender do processo em questão. No caso univariado, para dispersões menores, a regra *Side-sensitive Synthetic* se mostra mais eficiente, podendo ser substituída sem muitas perdas pela regra *Synthetic*, enquanto para dispersões mais acentuadas, é mais interessante o uso da regra simples de Shewhart. Já para o caso bivariado, a regra *Side-sensitive Synthetic* se fez igualmente eficiente para diferentes níveis de correlação entre as variáveis no caso de altos deslocamentos da média, enquanto que, para menores deslocamentos, se faz mais eficiente para menores níveis de correlação.

Dos objetivos, cumpriu-se o objetivo geral de apresentar as regras especiais de decisão com maior eficiência para cada gráfico de controle e cada processo, seja uni ou bivariado. Quanto aos objetivos específicos, a validação dos valores obtidos na literatura com o uso das simulações em Fortran se fez comprovado estatisticamente, utilizando um nível de significância de 5%. Para o segundo objetivo específico, este se fez cumprido ao determinar o uso de cada uma das regras especiais de decisão de acordo com as características do processo monitorado, sendo a sua determinação e conhecimento fundamentais para a melhor tomada de decisão.

Sendo assim, estudos aprofundados nessa área podem trazer resultados muito positivos no que diz respeito ao aumento da eficiência no Controle Estatístico de Processos. Para trabalhos futuros, sugere-se estudar a autocorrelação entre as variáveis monitoradas, além da

correlação entre as mesmas, além de extrapolar, para o caso bivariado, o uso da regra *Side-sensitive Synthetic* para os gráficos de $\bar{X} + R$.

REFERÊNCIAS

- CHEN, H.; PAO, Y. The Joint economical statistical design of $\bar{X}$ and R charts for nonnormal data. **Quality and Reliability Engineering**, Chichester, v. 27, p. 269-280, 2011.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Competitividade Brasil 2017**. Disponível em: <https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/filer_public/70/23/70233c45-50ea-4897-9346-55ba24cb78d8/competitividadebrasil_2017-2018.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2018.
- COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2005, 334 p.
- COSTA, A. F. B.; MACHADO, M. A. G. The steady-state behavior of the synthetic and side-sensitive synthetic double sampling X charts. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 31, 297-303, 2015.
- MACHADO, M. A. G. **Gráficos de controle para o monitoramento de processos multivariados**. 2009. 154f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.
- MACHADO, M. A. G.; COSTA, A. F. B. A side-sensitive synthetic chart combined with an X chart. **International Journal of Production Research**, Publicado online, v. 52:11, 3404-3416, 2014a.
- MACHADO, M. A. G.; COSTA, A. F. B. Some comments regarding the synthetic Xbar chart. **Communications in Statistics, Theory and Methods**, Publicado online, v. 43, p. 2897-2906, 2014.
- MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da Produção**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2005, 562 p.
- MASON, B.; ANTONY, J. Statistical process control: an essential ingredient for improving service and manufacturing quality. **Managing Service Quality: an international journal**, Publicado online, v. 10 n. 4, p. 233-238.
- MIGUEL, P. A. C. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier/ABEPRO, 2012.
- MONTEIRO, A. F.; COSTA, A. F. B. Gráficos de controle de xbarra para o monitoramento de processos autocorrelacionados com regra especial de decisão. In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos. **Anais ENEGEP/ABEPRO** São Carlos: ABEPRO, 2010.
- LEONI, R. C. **Gráfico de Hotelling com esquemas especiais de amostragem para o monitoramento de processos bivariados autocorrelacionados**. 2015. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Gestão e Otimização) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

OLIVEIRA, O. **Material de aula de Trabalho de Formatura**. Local: UNESP – Campus de Guaratinguetá, 2015.

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

RAKITZIS, A. C. On the performance of modified runs rules charts with estimated parameters. **Communications in Statistics: Simulation and Computation**, New York, v. 46, n. 2, p. 1360-1380, 2017.

SCHOONHOVEN, M.; DOES, R. J. M. M. A Robust $\bar{X}$ Control Chart. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 29 p. 951-970, 2013.

SCHOONHOVEN, M.; RIAZ, M.; DOES, R. J. M. M. Design schemes for the $\bar{X}$ control chart. **Quality and Reliability Engineering**, Chichester, v. 25, p. 581-594, 2009.

SCOPUS. **Base de dados bibliográficos**. Disponível em: <<https://www.scopus.com>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

SIMÕES, F. D. **Gráficos de controle de X com regras especiais de decisão e amostra de tamanho variável**. 2017. 43 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

SIMÕES, F. D. et al. Synthetic charts to control bivariate processes with autocorrelated data. **Computers & Industrial Engineering**, Publicado online, v. 97, p. 15-25, 2016.

SUZUMURA, L. O. **Considerações sobre a utilização de gráficos (X e R) com regra adicional de decisão para o monitoramento de processos univariados**. 2016. 37 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

VINING, G. Technical Advice: Phase I and Phase II Control Charts. **Quality Engineering**, Publicado online, v. 21, p. 478-479, 2009.

WOODAL, W. H. Controversies and Contradictions in Statistical Process Control. **Journal of Quality Technology Session**, Minneapolis, v. 32, n. 4, 2000.

WU, Z.; SPEDDING, T. A. A synthetic control chart for detecting small shifts in the process mean. **Journal of Quality Technology**, Minneapolis, v. 32, p. 32-38, 2000.

ZHANG, Y. et al. The variable sampling interval $\bar{X}$ chart with estimated parameters. **Quality and Reliability Engineering**, Chichester, v. 28, p. 19-34, 2012.

APÊNDICE A – Código de $\bar{X}$ Side-sensitive Synthetic

```

use msimsl
integer i,j,t,cs1,cs2,cs,ci1,ci2,cinf
real n,x,f,y,nma,s0
real p,lic,lsc,soma,nas(10000),k,l,lambda
parameter (xm=1000,s0=1,n=5,l=1,p=0)

call umach(2,nout)
lambda=1
k=1.783
s1=s0*lambda
33  lsc=xm+k*(s0/sqrt(n))
    lic=xm-k*(s0/sqrt(n))
    x=0
    i=1
    do while (i<=10000)
        cs1=0
        ci1=0
        do j=1,200
            do f=1,n
                y=RNNOF()*s0+xm
                x=x+y
            end do
            x=x/n
            if(x>lsc) then
                cs1=j
            end if
            if(x<lic) then
                ci1=j
            end if
            x=0
        end do
        x=0
        j=1
        t=1
        do while(t==1)
            do f=1,n
                y=RNNOF()*s1+xm+s0*(p/sqrt(n))
                x=x+y
            end do
            x=x/n
            if(x>lsc) then
                cs2=j+200
                cs=cs2-cs1
                if(cs<=l) then
                    nas(i)=j
                    t=2
                else
                    cs1=cs2
                end if
            end if
        end do
    end do

```

```
        end if
        if(x<lic) then
            ci2=j+200
            cinf=ci2-ci1
            if(cinf<=1) then
                nas(i)=j
                t=2
            else
                ci1=ci2
            end if
        end if
    end if
    end if
    x=0
    j=j+1
end do

i=i+1
end do
soma=0
do i=1,10000
    soma=soma+nas(i)
end do
nma=soma/10000
print*, 'NMA=',nma

end
```

APÊNDICE B – Código de R

```

use msimsl
integer i,j,f,t
real n,nma,y,s1,r,aux(1000),max,min
real p,lc,soma,nas(10000),w,lambda
parameter (xm=1000,s0=1,n=4,p=0)

call umach(2,nout)
lambda=1
w=4.7
s1=s0*lambda
33 lc=w

i=1
do while(i<=10000)

j=1
t=1
  do while(t==1)
    do f=1,n
      y=RNNOF()*s1+s0*(p/sqrt(n))
      aux(f)=y
    end do
    max=aux(1)
    min=aux(1)
    do f=1,n
      if(max<aux(f)) then
        max=aux(f)
      else if(min>aux(f))then
        min=aux(f)
      end if
    end do
    r=max-min
    if(r>lc) then
      nas(i)=j
      t=2
    end if
    j=j+1
  end do
  i=i+1
end do
soma=0
do i=1,10000
  soma=soma+nas(i)
end do
nma=soma/10000
print*,'NMA=',nma
c if(nma<=741 .and. nma>=739) then
c print*,'LSC=',lsc
c print*,'LIC=',lic

```

```
c    else
c    k=k+0.0001
c    goto 33
c    end if

c    print*, 'k=',k

end
```

APÊNDICE C – Código de R *Synthetic*

```

use msimsl
integer i,j,f,t,c1,c2,c
real n,x(10000),r,nma,max,min
real p,lc,soma,nas(100000),l,lambda
parameter (xm=1000,s0=1,n=5,l=7,p=0)

call umach(2,nout)
lambda=1
lc=4.43
s1=s0*lambda
33 i=1
do while(i<=10000)
  c1=0
  do j=1,200

    do f=1,n
      x(f)=RNNOF()*s1+xm
    end do

    max=x(1)
    min=x(1)

    do f=1,n
      if(max<x(f)) then
        max=x(f)
      else if(min>x(f)) then
        min=x(f)
      end if
    end do

    r=max-min

    if(r>lc) then
      c1=j
    end if

  end do

  j=1
  t=1

  do while (t==1)
    do f=1,n
      x(f)=RNNOF()*s1+xm
    end do

    max=x(1)
    min=x(1)
  
```

```

do f=1,n
    if(max<x(f)) then
        max=x(f)
    else if(min>x(f)) then
        min=x(f)
    end if
end do

r=max-min

if(r>lc) then
    c2=j+200
    c=c2-c1
    if(c<=1) then
        nas(i)=j
        t=2
    else
        c1=c2
    end if
end if
j=j+1
end do
i=i+1
end do
soma=0
do i=1,10000
    soma=soma+nas(i)
end do
nma=soma/10000
print*, 'NMA=',nma
if(nma<=741 .and. nma>=739) then
    print*, 'LC=',lc
else
    lc=lc+0.0001
    goto 33
end if

c    print*, 'W=',lc

end

```

APÊNDICE D – Código de $\bar{X}$ + R

```

use msimsl
integer i,j,f,t
real n,x,nma,y,s1,r,aux(1000),max,min,lambda
real p,lic,lsc,lc,soma,nas(10000),k,w
parameter (xm=1000,s0=1,n=4,p=1.5)

call umach(2,nout)
lambda=2
k=3.205
w=5.19
s1=s0*lambda
lc=w
33  lsc=xm+k*(s0/sqrt(n))
    lic=xm-k*(s0/sqrt(n))
    x=0
    i=1
do while(i<=10000)

    x=0
    j=1
    t=1
        do while(t==1)
            do f=1,n
                y=RNNOF()*s1+xm+s0*(p/sqrt(n))
                x=x+y
                aux(f)=y
c      print*, 'x=',x
            end do
            max=aux(1)
            min=aux(1)
            do f=1,n
                if(max<aux(f)) then
                    max=aux(f)
                else if(min>aux(f))then
                    min=aux(f)
                end if
            end do
            x=x/n
            r=max-min
c      print*, 'x=',x
c      print*, 'r=',r
            if(x>lsc .or. x<lic) then
                nas(i)=j
                t=2
            else if(r>lc) then
                nas(i)=j
                t=2
            end if
            x=0

```

```
        j=j+1
      end do
    i=i+1
  end do
  soma=0
  do i=1,10000
    soma=soma+nas(i)
  end do
  nma=soma/10000
  print*, 'NMA=', nma
c    if(nma<=741 .and. nma>=739) then
c    print*, 'LSC=', lsc
c    print*, 'LIC=', lic
c    else
c    k=k+0.0001
c    goto 33
c    end if

c    print*, 'k=', k

  end
```

APÊNDICE E – Código de $\bar{X}$ + R Synthetic

```

use msimsl

integer i,j,f,t,cr1,cr2,cr,cx1,cx2,cx
real n,x,y(10000),r,nma,min,max,s1,lambda
real p,lc,lsc,lic,soma,nas(10000),l,k
parameter (xm=1000,s0=1,n=5,l=7,p=2)

call umach(2,nout)
lambda=2
s1=s0*lambda
k=2.435
lc=4.43
33 lsc=xm+k*(s0/sqrt(n))
    lic=xm-k*(s0/sqrt(n))

i=1
do while(i<=10000)
  cx1=0
  cr1=0
    do j=1,200
      do f=1,n
        y(f)=RNNOF()*s0+xm
      end do
      x=0
      max=y(1)
      min=y(1)
      do f=1,n
        x=x+y(f)
        if(max<y(f)) then
          max=y(f)
        else if(min>y(f)) then
          min=y(f)
        end if
      end do
      x=x/n
      r=max-min

      if(x>lsc .or. x<lic) then
        cx1=j
      end if

      if(r>lc) then
        cr1=j
      end if
    end do

    j=1
    t=1

```

```

    x=0
do while(t==1)
    do f=1,n
        y(f)=RNNOF()*s1+xm+s0*(p/sqrt(n))
    end do

    max=y(1)
    min=y(1)
    x=0

    do f=1,n
        x=x+y(f)
        if(max<y(f)) then
            max=y(f)
        else if(min>y(f)) then
            min=y(f)
        end if
    end do
    x=x/n
    r=max-min

    if(x>lsc .or. x<lic) then
        cx2=j+200
        cx=cx2-cx1
        if(cx<=1) then
            nas(i)=j
            t=2
        else
            cx1=cx2
        end if
    end if

    if(r>lc) then
        cr2=j+200
        cr=cr2-cr1
        if(cr<=1) then
            nas(i)=j
            t=2
        else
            cr1=cr2
        end if
    end if

    x=0
j=j+1
end do
i=i+1
end do
soma=0
do i=1,10000
    soma=soma+nas(i)

```

```
        end do
        nma=soma/10000
        print*, 'NMA=', nma
c      if(nma<=371 .and. nma>=369) then
c      print*, 'LSCx=', lsc
c      print*, 'LICx=', lic
c      print*, 'k=', k
c      print*, 'LCr=', lc
c      else
c      lc=lc+0.0001
c      k=k+0.0001
c      goto 33
c      end if

    end
```

APÊNDICE F – Código de Código de $\bar{X}$ + R Side-sensitive Synthetic
 use msimsl

```

integer i,j,f,t,cr1,cr2,cr,cs1,cs2,cs
integer      ci1,ci2,cinf
real n,x,y(10000),r,nma,min,max,s1,lambda
real p,lc,lsc,lic,soma,nas(10000),l,k
parameter (xm=1000,s0=1,n=4,l=5,p=0)

call umach(2,nout)
lambda=1
s1=s0*lambda
k=2.252
lc=4.158
33  lsc=xm+k*(s0/sqrt(n))
    lic=xm-l*(s0/sqrt(n))

i=1
do while(i<=10000)
  cs1=0
  ci1=0
  cr1=0
    do j=1,200
      do f=1,n
        y(f)=RNNOF()*s0+xm
      end do
      x=0
      max=y(1)
      min=y(1)
      do f=1,n
        x=x+y(f)
        if(max<y(f)) then
          max=y(f)
        elseif(min>y(f)) then
          min=y(f)
        end if
      end do
      x=x/n
      r=max-min
      if(x>lsc)then
        cs1=j
      end if
      if(x<lic)then
        ci1=j
      end if
      if(r>lc)then
        cr1=j
      end if
    end do
  !print*, 'i= ',i

```

```

j=1
t=1
x=0
do while (t==1)
    do f=1,n
        y(f)=RNNOF()*s1+xm+s0*(p/sqrt(n))
    end do

    max=y(1)
    min=y(1)
    x=0

    do f=1,n
        x=x+y(f)
        if(max<y(f)) then
            max=y(f)
        elseif(min>y(f)) then
            min=y(f)
        end if
    end do

r=max-min
x=x/n
    if(x>lsc) then
        cs2=j+200
        cs=cs2-cs1
        if(cs<=1) then
            nas(i)=j
            t=2
        else
            cs1=cs2
        end if
    end if
    if(x<lic) then
        ci2=j+200
        cinf=ci2-ci1
        if(cinf<=1) then
            nas(i)=j
            t=2
        else
            ci1=ci2
        end if
    end if
    if(r>lc) then
        cr2=j+200
        cr=cr2-cr1
        if(cr<=1) then
            nas(i)=j
            t=2
        else

```

```
                                cr1=cr2
                                end if
                        end if
                        x=0
                        j=j+1
                        !print*, 'i= ',i
                        i=i+1
                end do
        end do
        soma=0
        do i=1,10000
                soma=soma+nas(i)
        end do
        nma=soma/10000
        print*, 'NMA= ',nma

end
```

APÊNDICE G – $\bar{X}$ Side-sensitive Synthetic bivariado

```

use msimsl
integer i,j,f,t, k, ldr,ldrsig,irank
real x(4,2),nma,y,s1,lambda,nr, r(4,2), rsig(2,2)
real p1,p2,lic,lsc,soma,nas(10000),k1,cov(2,2),x1m,x2m

s0=1
p1=0
p2=0
k=2
cov(1,1)=1
cov(1,2)=0
cov(2,1)=0
cov(2,2)=1
ldrsig=2
ldr=4
nr=4
call umach(2,nout)
lambda=1
k1=3.023
s1=s0*lambda
33 lsc=k1*(s0/sqrt(nr))
lic=-k1*(s0/sqrt(nr))
x=0
i=1

do while(i<=10000)
x=0
j=1
t=1
do while(t==1)
f=1
y=1

call chfac(k,cov,2,0.00001,irank,rsig,ldrsig)
call rnmvn(4,k,rsig,ldrsig,r,ldr)

do while (f<=4)

do while (y<=2)

x(f,y)=r(f,y)
c print*,x(f,y)
y=y+1

end do

y=1
f=f+1

end do

```

```

x1m=(x(1,1)+x(2,1)+x(3,1)+x(4,1)+(4*(p1/sqrt(nr))))/4
x2m=(x(1,2)+x(2,2)+x(3,2)+x(4,2)+(4*(p2/sqrt(nr))))/4

        if(x1m>lsc .or. x1m<lic .or. x2m>lsc .or. x2m<lic) then
            nas(i)=j
            t=2
        end if
c      print*, x1m
c      print*, x2m

            x1m=0
            x2m=0
            j=j+1
        end do
        i=i+1
end do
        soma=0
        do i=1,10000
            soma=soma+nas(i)
        end do
        nma=soma/10000
        print*, 'NMA=', nma
c      if(nma<=741 .and. nma>=739) then
c      print*, 'LSC=', lsc
c      print*, 'LIC=', lic
c      else
c      k=k+0.0001
c      goto 33
c      end if

c      print*, 'k=', k

end

```