

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
NÍVEL MESTRADO

ISMAEL BECKER GOMES

OTIMIZAÇÃO ECONÔMICO-ESTATÍSTICA NO CONTROLE ESTATÍSTICO DE
PROCESSOS CONTÍNUOS POR BATELADAS

SÃO LEOPOLDO-RS
2021

Ismael Becker Gomes

OTIMIZAÇÃO ECONÔMICO-ESTATÍSTICA NO CONTROLE ESTATÍSTICO DE
PROCESSOS CONTÍNUOS POR BATELADAS

Dissertação apresentada como requisito
parcial à obtenção do título de Mestre pelo
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos —
UNISINOS

Orientador:
Prof. Dr. André Luís Korzenowski

São Leopoldo-RS
2021

C633o

Gomes, Ismael Becker

Otimização econômico-estatística no controle estatístico de processos contínuos por bateladas / Ismael Becker Gomes — 2021.

142 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Eng. de Produção e Sistemas, São Leopoldo-RS, 2021.

“Orientador: Prof. Dr. André Luís Korzenowski.”

1. Controle estatístico de processo. 2. Otimização econômico-estatística. 3. Processo contínuo por bateladas. 4. Algoritmo Genético. I. Título.

CDU 658.5

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)

(Silvana Dornelles Studzinski — CRB 10/2524)

ATA MEPS-D 03/2021

Aos dezesseis dias do mês de março do ano de 2021, às 14h, reuniu-se a Comissão Examinadora de Defesa de Dissertação composta pelos professores: Prof. Dr. André Luis Korzenowski (Orientador) da UNISINOS (*por webconferência*); Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha da UNISINOS (*por webconferência*); Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky da UCS (*por webconferência*); Prof.ª Dr.ª Fernanda Araujo Pimentel Peres do SENAI-RS (*por webconferência*) e a Prof.ª Dr.ª Carla Schwengber ten Caten da UFRGS (*por webconferência*), para analisar e avaliar a Dissertação intitulada **“Otimização econômico-estatística no controle estatístico de processos contínuos por bateladas”**, do aluno **Ismael Becker Gomes** (*por webconferência*), candidato ao título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas. Após a apresentação, arguição e defesa, a Banca atribuiu os seguintes **conceitos**:

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha – UNISINOS	Conceito: <u> Aprov. </u>
Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky – UCS	Conceito: <u> Aprov. </u>
Prof.ª Dr.ª Fernanda Araujo Pimentel Peres – SENAI-RS	Conceito: <u> Aprov. </u>
Prof.ª Dr.ª Carla Schwengber ten Caten– UFRGS	Conceito: <u> Aprov. </u>

A Dissertação obteve o **Conceito Final**: APROVADO

Ocorreu alteração do título? (X) Não () Sim. Qual? _____

As alterações sugeridas pela Banca Examinadora são as seguintes:

 Conforme comentários gerais da banca

O aluno deverá apresentar a versão final do trabalho com as modificações propostas pela Banca Examinadora da Dissertação, no prazo máximo de 30 dias, mediante supervisão do Orientador. O resultado da banca é de consenso entre os avaliadores. A Ata de Defesa é assinada pelos membros que participaram da sessão de forma presencial, esta atividade foi realizada integralmente em modo online para atender às recomendações da OMS e Ministério da Saúde com relação ao covid-19. A emissão do diploma está condicionada a entrega da Versão Final da Dissertação.

São Leopoldo, 16 de março de 2021.

Professor Orientador: Prof. Dr. André Luis Korzenowski

Assinatura:



Coordenador do PPG: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Assinatura:



Secretária: Tana Cassia Malacarne Martins

Assinatura:



AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Tirone, que desde o princípio desse objetivo do mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas esteve ao meu lado me apoiando e amparando em momentos de dificuldade e, independente das incertezas que surgiam sempre me incentivou a seguir em frente.

Ao meu pai, Darcival que sempre foi meu maior guia e exemplo de caráter. Desde o início deste projeto de vida, a minha formação como Engenheiro de Produção e a constante busca por conhecimento, tornou-se meu grande apoiador a buscar meus objetivos me ensinando a correr atrás de meus sonhos. Infelizmente, o destino não permitiu que o senhor estivesse aqui na conclusão de mais essa etapa da minha vida, mas tenho a mais absoluta certeza que esteja onde você estiver, você está me acompanhando por todos estes anos.

Ao meu amor, Caroline, mulher corajosa, guerreira, forte. Que assim que surgiu a possibilidade do ingresso na pós-graduação, foi incansável em fazer tudo o que estava ao seu alcance para me auxiliar nesta empreitada. Que, mesmo nos momentos mais complicados desses dois anos do mestrado, estava comigo me trazendo tranquilidade, conforto, amor e carinho. Certamente, esta conquista ao teu lado se torna mais especial e tenho certeza que, sem o teu auxílio esta etapa da minha trajetória não se concretizaria. Te amo!

Ao meu orientador, professor André, pelo incentivo, apoio, dedicação e suporte no desenvolvimento dessa pesquisa. Agradeço por ter me aceitado como seu orientando, pelos ensinamentos transmitidos nesse período e que por vezes, mesmo sem eu compreender, me direcionava na busca pelo conhecimento. Com certeza, quando eu chegar a docência lembrarei do teu exemplo para orientar a condução da minha trajetória profissional.

À Tana, secretária do PPGEPS, que desde o primeiro dia que apareci no PPGEPS e falei que seria o novo bolsista que ela teria que “aturar” pelos próximos dois anos, sempre me auxiliou com sua grande simpatia e profissionalismo. Sei que gastei minhas cotas de perguntas, mas só fazia isso pois tinha a certeza que podia contar com tua ajuda rápida e precisa.

À UNISINOS e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS por ter me proporcionado um espaço para discussão e aprofundamento de meus conhecimentos acerca da pesquisa e formação do Engenheiro de Produção.

À minha família e meus amigos, pelo incentivo e apoio ao longo destes anos que contribuíram para minha conquista acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88887.342081/2019-00.

RESUMO

Proposição/objetivos: Essa pesquisa tem como objetivo geral propor um modelo de otimização de custos e desempenho estatístico para o Controle Estatístico de Processo em uma operação de processamento contínuo por bateladas.

Design/metodologia/abordagem: A *Design Science Research* foi escolhida como método de pesquisa. Seguindo suas etapas, na Conscientização do Problema observou-se a necessidade apresentada e o ambiente em que o problema se encontrava inserido. Na etapa de Sugestão, foi realizada a identificação de estudos correlatos e análise dos modelos de custos identificados na literatura. Na etapa de Desenvolvimento, os resultados da busca da etapa anterior fundamentaram as decisões no desenvolvimento de um mapa conceitual e na construção do modelo. A heurística de otimização escolhida para o caso foi um Algoritmo Genético, que foi construído com o auxílio do *software* estatístico R. A validação do modelo ocorreu em duas etapas. Primeiramente, o funcionamento do algoritmo foi validado, quantitativamente, através do comparativo de resultados com outra pesquisa já publicada. Em seguida, de forma qualitativa, foram consultados especialistas na área do processamento contínuo por bateladas. Essa consulta teve por objetivo validar o modelo como um todo, observando se os *inputs* do modelo são condizentes com a realidade das indústrias e se os *outputs* estavam de acordo com a necessidade das empresas. A etapa da Avaliação também ocorreu em dois momentos, com o auxílio da simulação computacional. Primeiramente, foi realizada uma avaliação comparativa do desempenho econômico do modelo frente a processos tradicionais de otimização econômica. Em seguida, o desempenho estatístico da carta de controle oriunda da aplicação do modelo foi analisado verificando sua velocidade de detecção. Por fim, na fase da Conclusão, análises acerca dos resultados obtidos foram realizadas.

Resultados: Os resultados alcançados através da simulação computacional da implantação do modelo projetado apontaram para uma redução de 21,75% a 51,97% nos custos do controle estatístico do processo, quando comparada à utilização do modelo com o processo de otimização tradicional, em um horizonte de 20 bateladas simuladas. Já na avaliação do desempenho estatístico da carta de controle oriunda do modelo, notou-se uma constância no aumento da velocidade de detecção conforme a elevação do desvio do processo, independentemente de para qual desvio a carta de controle foi otimizada, o que reforça a robustez estatística da carta de controle.

Originalidade/contribuição: Essa pesquisa contribui na avaliação mais precisa de um tipo de processo comum em algumas indústrias, o processo contínuo por bateladas. Foi observado que esse processo possui características peculiares que o

tornam diferente, por exemplo, de um processo de fluxo contínuo. Isso fez com que emergisse a necessidade de uma abordagem mais específica para esse tipo de processo, relevando ganhos significativos.

Palavras-chave: Controle estatístico de processo. Otimização econômico-estatística. Processo contínuo por bateladas. Algoritmo Genético.

ABSTRACT

Purpose: This research has as general objective to propose a cost optimization and statistical performance model for Statistical Process Control in a continuous batch processing operation.

Design/methodology/approach: Design Science Research was chosen as the research method. Following its steps, in the Awareness of the Problem it was observed the need presented and the environment in which the problem was inserted. In the Suggestion stage, the identification of related studies and analysis of the cost models identified in the literature was carried out. In the Development stage, the results of the search in the previous stage were the basis for decisions in the development of a conceptual map and in the construction of the artifact. The optimization heuristic chosen for the case was a Genetic Algorithm, which was built with the aid of the statistical software R. The validation of the artifact occurred in two stages. First, the operation of the algorithm was validated, quantitatively, by comparing results with another research already published. Then, in a qualitative way, specialists in the field of continuous batch processing were consulted. This consultation aimed to validate the artifact as a whole, observing whether the inputs of the model are consistent with the reality of the industries and whether the outputs were in accordance with the needs of the companies. The Evaluation stage also occurred in two stages, with the aid of computer simulation. First, a comparative assessment of the economic performance of the artifact was carried out against traditional economic optimization processes. Then, the statistical performance of the control chart from the application of the artifact was analyzed by checking its detection speed. Finally, in the Conclusion phase, analyzes about the results obtained were performed.

Findings: The results achieved with the implantation of the artifact through the computer simulation pointed to a reduction of 21.75% to 51.97% in the costs of the statistical control of the process, when compared to the use of the artifact with the traditional optimization process, in a horizon of 20 simulated batches. In the evaluation of the statistical performance of the control chart from the artifact, a constant increase in the detection speed was observed as the process deviation increased, regardless of which deviation the control chart was optimized for, which reinforces the robustness control chart statistics.

Originality/value: This research contributes to the more precise evaluation of a type of process common in some industries, the continuous batch process. It was observed that this process has peculiar characteristics that make it different, for example, from a continuous flow process. This led to the need for a more specific approach to this type of process, highlighting significant gains.

Keywords: Statistical process control. Economic-Statistical optimization. Continuous batch process. Genetic Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Evolução da Qualidade	31
Figura 2:	Tipos de cartas de controle de Shewhart	35
Figura 3:	Exemplo da elipse que controla duas variáveis	37
Figura 4:	Exemplo de carta T^2 -DWL no modo de aplicação 1	40
Figura 5:	Exemplo de carta T^2 -DWL no modo de aplicação 2	42
Figura 6:	Exemplo de carta T^2 -DWL no modo de aplicação 3	44
Figura 7:	Ciclo da carta de controle	49
Figura 8:	Classificação de processos quanto ao volume e variedade	53
Figura 9:	Fluxo das etapas do método de trabalho	71
Figura 10:	Fluxo de execução da Revisão Sistemática da Literatura	73
Figura 11:	Mapa conceitual para proposição ou escolha de um modelo de custos	86
Figura 12:	<i>Framework</i> de orientação do artefato	89
Figura 13:	Modelo para otimização do CEP do processo contínuo por bateladas	90
Figura 14:	Modelo de formatação da compilação das saídas dos GAs	93
Figura 15:	Comparativo da evolução dos custos	98
Figura 16:	Simulações de corridas da carta de controle	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Dados obtidos para validação do algoritmo	94
Tabela 2:	Testes de validação da carta de controle	94
Tabela 3:	Parâmetros aplicados no GA para avaliação dos resultados	97
Tabela 4:	Comparativo dos custos por batelada	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1:	Estrutura simplificada de algoritmo genético	56
Quadro 2:	Síntese das etapas de aplicação da DSR	70
Quadro 3:	Apresentação do corpus de artigos	74
Quadro 4:	Principais características dos estudos correlatos	76
Quadro 5:	Modelos de custo identificados	78
Quadro 6:	Síntese das características dos modelos de custos identificados	84

LISTA DE SIGLAS

AATS	Tempo Médio Ajustado para a Carta Sinalizar
ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ACS	Algoritmo Cuckoo Search
ANF	Número Esperado de Alarmes Falsos
ANI	Número de Itens Inspeccionados
ANS	Número Esperado de Amostragens
ARL	Comprimento Médio da Corrida
ATC	Tempo Médio do Ciclo
CEP	Controle Estatístico de Processo
CUSUM	Carta de Controle de Soma Acumulada
DE	Design Econômico
DEA	Análise Envoltória de Dados
DEE	Design Econômico-Estatístico
DSR	Design Science Research
DWL	Linhas de aviso dupla
EUA	Estados Unidos da América
EWMA	Carta de Controle de Média Móvel Exponencialmente Ponderada
FP	Parâmetros Fixos
GA	Algoritmo Genético
ICP	Período Sob-Controle
MCUSUM	Carta de Controle Multivariada de Soma Acumulada
MEWMA	Carta de Controle Multivariada de Média Móvel Exponencialmente Ponderada
MOGA	Algoritmo Genético Multi-Objetivo
MSPC	Controle Estatístico do Processo Multivariado
MTBFA	Tempo Médio entre Alarmes Falsos
NSGA-II	Algoritmo Genético de Classificação Não-Dominado II

PIB	Produto Interno Bruto
PPGEPS	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
PRISMA	Itens Preferidos de Relatório para Revisões Sistemáticas e Meta-análises
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SMC	Simulação de Monte Carlo
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
VP	Parâmetros Variáveis
VSI	Intervalo de Amostragem Variável
VSICL	Intervalo de Amostragem e Limites de Controle Variáveis
VSS	Tamanho da Amostragem Variável
VSSC	Tamanho da Amostragem e Limites de Controle Variáveis
VSSI	Tamanho e Intervalo de Amostragem Variáveis

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{X}	Carta de controle das médias
R	Carta de controle da amplitude
I-MR	Carta de controle para valores individuais
s	Carta de controle do desvio padrão
p	Carta de controle da porção defeituosa
np	Carta de controle do número de defeituosos
c	Carta de controle do número de defeitos
u	Carta de controle do número de defeitos por unidade amostral
T^2	Carta de controle T^2 de Hotelling
α	Erro estatístico do Tipo I
β	Erro estatístico do Tipo II
σ	Desvio padrão
μ	Vetor médio do processo
μ_0	Vetor médio alvo do processo
μ_1	Vetor médio da amostragem
$\hat{\mu}_0$	Vetor médio alvo estimado
d	Distância de Mahalanobis entre o vetor médio da amostragem e o vetor médio alvo do processo
X_n	Vetor aleatório independente
\bar{X}_i	Média dos vetores aleatórios independentes
ρ	Número de características da qualidade monitoradas simultaneamente em uma carta de controle multivariada
Σ	Matriz de covariância
Σ_0	Matriz de covariância alvo
$\hat{\Sigma}_0$	Matriz de covariância alvo estimada
X_i^2	Medida da i -ésima amostragem da carta de controle multivariada T^2 de Hotelling
T_i^2	Estatística de Hotelling na i -ésima posição

n	Tamanho da amostra
n_{min}	Tamanho mínimo da amostra
n_{max}	Tamanho máximo da amostra
n_1	Tamanho da amostra menor
n_2	Tamanho da amostra maior
h	Intervalo entre coletas
\bar{h}	Vetor de intervalos de amostragem possíveis
h_{min}	Valor mínimo para o intervalo entre coletas
h_{max}	Valor máximo para o intervalo entre coletas
h_1	Intervalo entre coletas maior
h_2	Intervalo entre coletas menor
w	Linha de aviso para transição de parâmetros
w_n	Linha de aviso para transição do parâmetro de tamanho de amostra
w_h	Linha de aviso para transição do parâmetro de intervalo entre coletas
k	Limite superior de controle ou limite de ação da carta de controle
k_{max}	Valor máximo para o limite de ação da carta de controle
m	Número de amostras inicialmente coletadas
$F(x, \rho, \eta)$	Função de distribuição cumulativa qui-quadrado não centralizada com ρ graus de liberdade e parâmetro de não centralidade η
η	Parâmetro de não-centralidade
$\bar{\eta}$	Número esperado de amostras coletadas
\bar{n}	Tempo de análise da amostragem e interpretação na ocorrência de um alarme verdadeiro
λ	Parâmetro da distribuição exponencial
T_0	Tempo de busca de alarmes falsos
T_1	Tempo de identificação de uma causa assinalável
T_2	Tempo de resolução de uma causa assinalável
b'	Vetor de probabilidades iniciais dos estados transientes da Cadeia de Markov

I	Matriz identidade
Q	Matriz de transição sem os elementos associados ao estado absorvente
γ_1	Fator de determinação se o processo é paralisado ou não durante alarmes falsos
γ_2	Fator de determinação se o processo é paralisado ou não durante o reparo de uma causa assinalável
E	Tempo gasto para coleta e interpretação de uma unidade de amostra
$E(T)$	Tempo total do ciclo da carta de controle
C_{NC}	Custo esperado das não-conformidades
$C_{alarmes}$	Custo esperado com alarmes emitidos pela carta de controle
$C_{amostras}$	Custo esperado de amostragem por ciclo da carta de controle
C_0	Custo de produção de produtos não-conformes com processo sob-controle
C_1	Custo de produção de produtos não-conformes com processo fora de controle
a_1	Custo fixo do processo de amostragem e análise
a_2	Custo variável do processo de amostragem e análise
a'_3	Custo de investigação de alarmes falsos
a_3	Custo de busca e reparo de alarmes verdadeiros
$E(C)$	Custo total esperado por ciclo da carta de controle
$E(D)$	Custo esperado por hora
D	Vetor do design contendo as variáveis de decisão
ARL_0	Tempo médio da corrida até a carta de controle sinalizar um alarme falso
ARL_1	Tempo médio da corrida até a carta de controle sinalizar um alarme verdadeiro
ANF_0	Parâmetro indicativo do valor máximo aceitável do número esperado de alarmes falsos
$AATS_1$	Parâmetro indicativo do valor máximo aceitável do tempo médio ajustado para a carta sinalizar
\in	Simbologia de pertencimento
\mathbb{Z}^+	Conjunto dos números inteiros positivos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Apresentação do Tema e Problema de Pesquisa	19
1.2	Objetivos	22
1.3	Justificativa	23
1.4	Delimitações	26
1.5	Estrutura do Trabalho	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	Histórico da qualidade	29
2.2	Controle Estatístico do Processo	32
2.2.1	Cartas de Controle	33
2.2.2	Otimização econômico-estatística	45
2.3	Características de um processo contínuo por bateladas	51
2.4	Computação evolucionária - Algoritmos Genéticos	55
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	59
3.1	<i>Design Science Research</i>	60
3.2	Método de trabalho	61
3.2.1	Conscientização do problema	61
3.2.2	Sugestão	62
3.2.3	Desenvolvimento	65
3.2.4	Avaliação	67
3.2.5	Conclusão	69
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	72
4.1	Identificação de estudos correlatos	72
4.1.1	Mapa conceitual dos modelos de custos	86
4.2	Construção do artefato	88
4.2.1	Validação do algoritmo e do modelo	93
4.3	Avaliação dos resultados	96
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
5.1	Conclusões	104
5.2	Limitações da pesquisa e recomendações de pesquisas futuras	106
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A CÓDIGO COMPUTACIONAL EM LINGUAGEM R DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	119

APÊNDICE B	ROTEIRO AUXILIAR PARA VALIDAÇÃO DO ARTEFATO	132
APÊNDICE C	RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES DE USO DO MODELO PROPOSTO NA ETAPA DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA	135
ANEXO A	EQUAÇÕES DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO DA CADEIA DE MARKOV APLICADA À CARTA DE CONTROLE DWL NO MODO 1	138
ANEXO B	EQUAÇÕES DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO DA CADEIA DE MARKOV APLICADA À CARTA DE CONTROLE DWL NO MODO 2	140
ANEXO C	EQUAÇÕES DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO DA CADEIA DE MARKOV APLICADA À CARTA DE CONTROLE DWL NO MODO 3	142

1 INTRODUÇÃO

O conceito de carta de controle para o monitoramento estatístico de processo foi introduzido em 1924 por Walter Shewhart. Nesse período, as ferramentas propostas por Shewhart eram ideais para as demandas que se apresentavam pois, os processos tinham como foco os grandes volumes de produção e a baixa variabilidade (KORZENOWSKI et al., 2013). Com a evolução dos processos - automação e customização de itens produzidos - alternativas foram desenvolvidas para atender as demandas dos clientes que se tornaram cada vez mais exigentes, emergindo a necessidade de novos métodos de monitoramento da qualidade, adequados às características dos processos remodelados, bem como atendendo a demandas de competitividade por parte das empresas (BARTEZZAGHI, 1999; DEL CASTILLO et al., 1996; PORTER, 1997). É nesse âmbito que esse estudo se situa. O presente capítulo apresenta o tema de pesquisa contextualizado, sua problematização e consequentes objetivos, a justificativa da pesquisa e suas contribuições, as delimitações e a estrutura do trabalho.

1.1 Apresentação do Tema e Problema de Pesquisa

Na economia de mercado atual, diversas empresas competem na oferta de um mesmo produto para um mesmo grupo de clientes (WECKENMANN; AKKASOGLU; WERNER, 2015). Essa competição é abordada por Porter (1997) ao conceituar estratégias genéricas que as empresas podem adotar nesse cenário, como:

- Liderança em custo: estratégia na qual a empresa busca reduções de seus custos e eficiência em seu processo, podendo proporcionar ao seu cliente o preço mais acessível do mercado, mas sem perder sua margem de lucro;
- Diferenciação: estratégia em que as empresas desenvolvem uma característica relevante que faz com que seu produto seja diferenciado quando comparado ao de seus competidores; ou
- Enfoque: estratégia em que a empresa desenvolve um produto especializado, focando a necessidade de atendimento de um determinado segmento de mercado.

Independente da estratégia adotada, um dos requisitos inerente a todas as estratégias

para competir no mercado é a qualidade do produto ofertado (PORTER, 1997).

O tema qualidade não é recente no cotidiano do engenheiro de produção. Atualmente, a gestão da qualidade é observada, tanto no meio empresarial quanto no meio acadêmico, como um dos fatores cruciais para a competitividade. Essa relevância foi alcançada através de um longo processo de evolução dos conceitos e práticas (CARPINETTI, 2016). Em meados de 1910, com o desenvolvimento dos processos industriais, impulsionados pela primeira revolução industrial, observou-se a necessidade de implantar um sistema que controlasse algumas variáveis consideradas fundamentais para a qualidade dos produtos e, mais tarde, nos processos e na empresa como um todo (WECKENMANN; AKKASOGLU; WERNER, 2015; CARPINETTI, 2016).

Foi nesse período que Walter Shewhart introduziu conceitos de estatística no monitoramento de processos. Esse conceito ficou conhecido como o Controle Estatístico de Processo (CEP), que é operacionalizado através das cartas de controle, abrindo caminho para o fomento do controle e gestão da qualidade (ZAIRI, 2013). Anteriormente, a garantia da qualidade de produtos fabricados em indústrias consistia em um processo de inspeção/monitoramento do produto final com o objetivo de assegurar a ausência de defeitos (BEST; NEUHAUSER, 2006).

O CEP é uma técnica estatística aplicada à produção no processo de inspeção por amostragem, que visa a mensurar, tornar conhecida e controlar a variabilidade em processos, fomentando sua redução sistemática. O CEP também promove a redução de variações nas características dos produtos, contribuindo para a garantia da qualidade (LOUZADA et al., 2013; LOZADA, 2017; MALEKI; AMIRI; CASTAGLIOLA, 2017). As cartas de controle desenvolvidas na década de 1920 eram úteis para detectar grandes mudanças na média e na variância do processo. No entanto, alguns processos demandavam ferramentas que detectassem pequenas alterações, tendo sido então desenvolvidas cartas como a de Soma Acumulada (CUSUM) e de Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA) (SELVAMUTHU; DAS, 2018). Outro ponto identificado foi o fato dos processos serem caracterizados por mais de uma variável, as quais normalmente estão correlacionadas e se supõe que tenham aderência a uma distribuição normal multivariada (ARBABI; GHAHROODI, 2014). Surgiram então as cartas de controle multivariadas como, por exemplo, a carta T^2 de Hotteling, sendo uma evolução da carta de controle \bar{X} de Shewhart, e as cartas de controle MCUSUM e MEWMA, uma adaptação multivariada das cartas de Soma Acumulada e Média Móvel Exponencialmente

Ponderada, respectivamente (MONTGOMERY, 2013; KHOO et al., 2013).

Ao realizar um projeto de sistema de CEP, um dos pontos observados é o tipo de processo em que a carta de controle será inserida (MARTIN; MORRIS; KIPARISSIDES, 1999; GARCÍA-MUÑOZ et al., 2003). Os processos industriais podem ser classificados quanto ao tipo do fluxo de materiais e as saídas observadas. Eles podem ser processos de fluxo contínuo, em massa, bateladas, discretos, projetos ou *jobs*. Podem ocorrer variações nas quais se verifica a fusão de características das classes anteriormente apontadas, por exemplo, um processo pode adotar um comportamento de fluxo contínuo por bateladas. Cada uma dessas classes apresenta peculiaridades que interferem diretamente nos seus sistemas de planejamento e controle de produção, assim como no monitoramento da qualidade dos produtos (ANUPINDI et al., 2012; GONG, 2013).

Os processos industriais contínuos por bateladas são caracterizados por sua flexibilidade, duração finita das atividades e tempo de operação variável (MARTIN; MORRIS; KIPARISSIDES, 1999; GARCÍA-MUÑOZ et al., 2003). Esse processo normalmente é empregado em indústrias de alimentos, de bebidas, químicas e farmacêuticas, entre outras (KOURTI; NOMIKOS; MACGREGOR, 1995; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; FERRER; WESTERHUIS, 2011; RAMAKER et al., 2003). Sob a ótica do monitoramento da qualidade, uma dificuldade encontrada se remete ao fato de que as variáveis a serem monitoradas são altamente colineares e auto correlacionadas, sendo que, em processos desestruturados, também podem ocorrer falta de dados de monitoramento ou interrupções nas séries históricas (MACGREGOR et al., 1994). Essa complexidade inserida na estrutura de correlação pode, ainda, prejudicar uma classificação assertiva das bateladas em conformidade ou em desacordo com as especificações (YAN; KUANG; YAO, 2017). Contudo, tendo em vista a alta competitividade inserida nos diversos mercados, a minimização dos custos decorrentes do controle de qualidade e, essencialmente, da má qualidade, se torna mandatória (NOMIKOS; MACGREGOR, 1994; MARTIN; MORRIS; KIPARISSIDES, 1999).

Contribuindo com os sistemas de monitoramento, nas últimas décadas ocorreu uma disseminação de redes de sensores, sistemas de controle e verificação distribuídos pela fábrica. Da mesma forma, a modernização das tecnologias para análises de variáveis contribuiu para uma expressiva redução de dificuldades relacionadas com a coleta, armazenamento e obtenção de informações (WOODALL; MONTGOMERY, 2014; JIANG; YAN; HUANG, 2015). É fato que se ocorre uma redução de custos com a coleta

das informações para o monitoramento da qualidade, isto deve impactar nos parâmetros de operação do CEP. Com isso, um tópico que emergiu na gestão dos processos de monitoramento foi a proposição de designs de cartas de controle, que consiste em tomar decisões sobre os parâmetros de operação da carta de controle. Uma proposta de design de carta de controle deve abranger, essencialmente, os parâmetros de tamanho de amostragens, intervalos de amostragem e limites de controle (NAYERI et al., 2007).

Diversas abordagens foram sendo desenvolvidas ao longo do tempo, como métodos heurísticos, Design Estatístico, Design Econômico (DE) e Design Econômico-Estatístico (DEE) (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019; NAYERI et al., 2007). Atualmente, as abordagens mais utilizadas são o DE e o DEE. A primeira abordagem consiste em projetar os parâmetros da carta de controle visando a minimizar seus custos de amostragem, buscas de alarmes, reparos e geração de produtos não-conforme (ARBABI; GHAHROODI, 2014). Seu precursor foi Duncan (1956) na proposição de um modelo de custo para uma carta \bar{X} de Shewhart. Já a segunda abordagem se originou no trabalho de Saniga (1989) que, observando deficiências estatísticas do DE propôs a integração de restrições estatísticas ao modelo de custo com o objetivo de aumentar o poder estatístico da carta de controle, e ainda assim, minimizar seus custos.

Portanto, além de acertar na escolha da carta utilizada no monitoramento do processo, é também atribuição do gestor planejar o processo de controle e otimizar os parâmetros e custos envolvidos, fazendo com que a empresa tenha plena segurança no seu processo de controle, e ainda assim, obtenha economia e possíveis incrementos de receita nesse processo. Dessa forma, emerge a seguinte questão de pesquisa: **Como otimizar os custos e o desempenho estatístico do Controle Estatístico de Processo em uma operação de processamento contínuo por bateladas?**

1.2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é propor um modelo de otimização de custos e desempenho estatístico para o Controle Estatístico de Processo em uma operação de processamento contínuo por bateladas.

Para tanto, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Identificar, a partir da literatura, os principais modelos de custo para otimização

econômica e econômica-estatística de cartas de controle;

- Desenvolver um mapa conceitual que sintetize os constructos que integram o design econômico-estatístico de cartas de controle;
- Construir um artefato para otimização do ponto de vista econômico e estatístico para o monitoramento das características de qualidade de um processo contínuo por bateladas;
- Realizar um comparativo de aspectos econômicos e estatísticos do modelo proposto por meio de simulação computacional.

1.3 Justificativa

A motivação do presente estudo em pesquisar a otimização dos custos nas operações do CEP, também, advém de observações de demandas de empresas que possuem operações que utilizam o processo contínuo por bateladas, processo que é utilizado em diversos segmentos da indústria (KOURTI; NOMIKOS; MACGREGOR, 1995; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; FERRER; WESTERHUIS, 2011; RAMAKER et al., 2003). A relevância da otimização dos custos, não somente no CEP, mas também em todas as áreas das organizações, é conhecida no cotidiano de mercado, pois a competição é ampla e disseminada em todos segmentos. Pelo aumento da pressão dos competidores, hoje os gestores analisam o monitoramento e a melhoria da qualidade como um meio essencial para melhorar o desempenho das organizações (MEFTAH ABUSA; GIBSON, 2013; VOMMI; KASARAPU, 2014). A minimização dos custos, assim como a oferta de produtos livre de defeitos, contribui para o desenvolvimento da organização, independente da estratégia de mercado adotada (PORTER, 1997; WECKENMANN; AKKASOGLU; WERNER, 2015).

A principal contribuição do CEP para o processo é a detecção de falhas, a redução da variação e a entrega de um produto de qualidade ao cliente (LOUZADA et al., 2013; LOZADA, 2017; MALEKI; AMIRI; CASTAGLIOLA, 2017). Porém, sua contribuição pode ir além disso. Sem perder o foco da sua funcionalidade principal, o CEP pode apresentar eficiência otimizando custos e, na medida do possível, ampliando receitas. Os benefícios do CEP impactam diretamente na competitividade da empresa com

o mercado no qual ela se insere (MARTIN; MORRIS; KIPARISSIDES, 1999; NOMIKOS; MACGREGOR, 1994).

O CEP pode gerar uma forma de se obter bons níveis de produtividade, contribuindo assim para o sistema econômico das empresas (JONATHAN et al., 2014). A pesquisa sobre otimização de cartas de controle, além de ser um campo de pesquisa muito vasto, é um tema bastante abordado na literatura. No entanto, realizando uma busca por estudos na área de otimização econômica de cartas de controle multivariada adaptativas (etapa projetada na Seção 3.2.2 e desenvolvida na Seção 4.1), identificaram-se 30 artigos referentes a esse tema, um número relativamente baixo quando comparado ao todo pesquisado. Nesse segmento de pesquisa, notou-se uma ascensão nas publicações dessa área, sendo que das 30 publicações correlatas, 25 ocorreram nos últimos 10 anos. Por ser um tema complexo e de certo modo não restrito a processos específicos, as soluções propostas acabam por não atender de forma adequada situações mais específicas, como será apresentado na análise dos estudos correlatos, de modo que a contribuição do presente trabalho está em desenvolver um modelo que busque especificar uma solução para esse contexto.

Ao realizar a busca por estudos correlatos, evidenciou-se a pouca inovação de uma pesquisa para outra, assim como poucas abordagens descrevendo o processo produtivo ao qual foram aplicadas, o que não contribui com a aproximação do meio empresarial com o meio acadêmico. Quando pesquisado o caso do processo produtivo contínuo por bateladas, evidencia-se que há diversos estudos sobre o monitoramento estatístico no processo por bateladas, porém esses são direcionados à seleção de variáveis a serem monitoradas, não abordando tópicos como de parametrização e operacionalização do CEP. A melhoria das abordagens relacionadas ao CEP em processos contínuos por bateladas é pouco abordada na literatura recente. Aplicações direcionadas ao aprimoramento do monitoramento desse tipo de processo são restritas e escassas, demandando um maior aprofundamento acerca desse tópico (CHU; QIN; HAN, 2004; ZARZO; FERRER, 2004; YAN; KUANG; YAO, 2017; PERES; FOGLIATTO, 2018).

Quando se fala em processos produtivos, a literatura aborda amplamente os processos produtivos por lotes, ou bateladas, e o processo produtivo contínuo, porém de forma separada. Apesar disso, quando se observa a realidade do meio empresarial, torna-se usual observar processos em que há uma fusão de características de mais de um tipo de processo, como por exemplo o processo contínuo por bateladas. Esse processo possui

características híbridas dos dois processos componentes, o contínuo e o por bateladas. Nele, o fluxo produtivo mistura etapas por bateladas dentro de etapas contínuas, e vice-versa (DE PRADA et al., 2009).

O processo contínuo de bateladas se torna atrativo para o estudo do CEP pois, suas características exigem que a proposição de soluções fuja da solução trivial, devendo o pesquisador levar em consideração as complexidades inerentes à estrutura do processo (MARTIN; MORRIS; KIPARISSIDES, 1999; GARCÍA-MUÑOZ et al., 2003; MACGREGOR et al., 1994). O processamento contínuo por bateladas está presente em uma série de segmentos industriais, como a indústria química, farmacêutica, de alimentos e bebidas (KOURTI; NOMIKOS; MACGREGOR, 1995; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; FERRER; WESTERHUIS, 2011; RAMAKER et al., 2003). Esses segmentos representaram, no ano de 2018, cerca de 29,3% do Produto Interno Bruto (PIB) de toda indústria de transformação brasileira (CNI, 2021).

Analisando o processo contínuo por bateladas quanto ao seu monitoramento estatístico, pode-se assumir que seriam necessárias apenas algumas amostras ao final de uma batelada para representar as características do todo. Contudo, em uma linha de produção, como na indústria de alimentos ou na indústria química, a troca de produto da linha de produção e, possivelmente, uma não uniformidade na batelada se torna um desafio que pode comprometer o monitoramento desse processo, o que demanda um controle mais rigoroso (MARSH; TUCKER, 1991).

Outro ponto que reforça a necessidade de pesquisas na área é o fato de que muitas empresas deixam de aplicar ou aplicam erroneamente os conceitos do CEP, seja por desconhecimento de seus benefícios, seja por questões culturais da empresa. Não é incomum encontrar empresas que monitoram as características de qualidade de seus produtos com uma visão de atendimento de especificações e não visando a manter um controle de processo e usufruindo dos benefícios que o CEP gera (ANTONY; BALBONTIN; TANER, 2000). Consequentemente, o processo permanece sem quaisquer tipo de ação contra causas especiais e previsibilidade. Até mesmo, a implantação das ferramentas do CEP, por vezes é invertida quando empregada, conforme destacado na pesquisa de Korzenowski, Werner e Ten Caten (2014).

Com isso, observa-se que uma boa aplicação do CEP pode levar a melhorias econômicas, no entanto aspectos estatísticos do CEP também devem ser avaliados. Uma carta de controle pode sinalizar erroneamente a presença de uma alteração no processo, ge-

rando assim custos de busca da causa e custos pela possível interrupção do processo. Por outro lado, uma carta de controle com baixa sensibilidade pode deixar de sinalizar causas especiais, fazendo com que o processo produza produtos fora de controle e, possivelmente, fora de especificação também, gerando custos com descartes e retrabalhos (KORZENOWSKI et al., 2020).

Assim, reforça-se que um apropriado controle de processo pode levar a ganhos, não apenas pela minimização de custos de operação, mas também numa possível incrementação de receitas. Tendo o processo sob controle, torna-se viável uma operação próxima aos níveis de especificação podendo gerar ganhos à empresa, sempre no objetivo maior de manter uma organização competitiva frente ao mercado.

1.4 Delimitações

A temática dessa pesquisa é a otimização econômico-estatística do CEP em um processamento contínuo por bateladas. As delimitações do estudo são:

- Proposição de soluções para o CEP de indústrias que tenham como característica de seu processo produtivo um processamento contínuo por bateladas, sendo que esse processo segue um fluxo de processo por bateladas, porém no momento em que se inicia uma batelada, o processo não pode ser interrompido, adotando assim características de um processo contínuo. Um conceito mais amplo, que avalie outros tipos de processo não se encontra nesse escopo;
- Apesar de partir de coletas de informações, como mapeamento de processos de empresas do segmento de alimentos, não foi autorizada a utilização de dados relativos ao processo, bem como a divulgação de informações. Sendo assim, foram utilizados apenas dados do monitoramento de características da qualidade para a compreensão do ambiente do processo contínuo por bateladas e como ponto de partida para a simulação dos dados;
- Os ganhos esperados na implantação do modelo proposto foram estimados por meio de simulações computacionais, tanto na redução de custos operacionais do CEP, quanto na avaliação do desempenho estatístico da carta de controle oriunda do modelo;

- Na etapa de avaliação estatística, foi considerado que o vetor médio do processo permanece constante se não for afetado por uma causa especial, sendo assim oscilações naturais do vetor médio das características da qualidade não foram consideradas;
- Quanto à implantação prática do modelo proposto, a pesquisa não abrangeu essa etapa, considerando que para a sua implantação se faz necessário o desenvolvimento de uma estratégia de implantação bem como autorização das empresas para esse fim;
- Não foi abordado nesse estudo a transformação cultural das organizações para a integração do modelo ao ambiente de trabalho nem mesmo as etapas necessárias de treinamento de seus colaboradores;
- A investigação se concentra na proposição de um modelo para otimizar os custos do CEP em uma operação de processamento contínuo por bateladas. As técnicas de seleção de variáveis e de diagnóstico de falhas apontadas pelo CEP não fazem parte do escopo dessa pesquisa.

Ao planejar a aplicação do modelo em diferentes empresas e/ou segmentos industriais, deve-se considerar a temática dessa pesquisa, mesmo que diversos conceitos abordados sejam replicáveis. Podem se fazer necessárias adaptações ao contexto da indústria que irá receber o modelo. A estrutura de apresentação da pesquisa é detalhada na próxima seção.

1.5 Estrutura do Trabalho

A dissertação se encontra estruturada em cinco capítulos organizados didaticamente, a fim de apresentar o planejamento do estudo, os conhecimentos já adquiridos, a execução e análises apresentadas. No Capítulo 1, constituído dessa introdução, é trazido o contexto que essa investigação se insere e o problema de pesquisa. Também são apresentadas a justificativa e relevância do trabalho, além dos objetivos, geral e específicos. O contexto trata da necessidade da execução de um controle de qualidade, observado pela ótica do CEP, bem como suas características inerentes e situações desejáveis, como por exemplo, a rápida detecção de pontos fora de controle sem perder o controle com

os custos gerados pelo processo como um todo. Com o intuito de atender as demandas contextualizadas, são apontados pergunta, objetivos e delimitações da pesquisa.

O Capítulo 2 traz uma síntese bibliográfica de conhecimentos prévios para o desenvolvimento do estudo. São apresentados conceitos de gestão da qualidade, cartas de controle e o modelo de custo do DEE de cartas de controle. O Capítulo também discorre sobre o processo produtivo contínuo por bateladas, alvo desse estudo, e sobre Algoritmo Genético (GA), ferramenta empregada na execução dessa pesquisa.

No Capítulo 3, são descritos os procedimentos metodológicos. Inicialmente, a pesquisa é classificada conforme a literatura da área, e após, o método de pesquisa utilizado é detalhado. Na sequência, no método de trabalho, são destacadas as etapas de condução da pesquisa de acordo com a *Design Science Research (DSR)*.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados da execução da pesquisa, bem como a análise dos resultados obtidos. Inicialmente, são apresentados os estudos correlatos a esse identificados. Na sequência, o mapa conceitual acerca dessa pesquisa é formulado. Com base nos achados da literatura e no mapa conceitual formulado, a seção seguinte apresenta o modelo proposto. Em seguida, o modelo desenvolvido passa por etapas de validação e avaliação. A análise dos resultados permeia cada uma das seções conforme os achados dessa pesquisa emergem.

Por fim, são apresentadas as considerações finais dessa pesquisa no Capítulo 5. Inicialmente, apresentam-se as conclusões obtidas com o desenvolvimento dessa pesquisa. Em seguida, são apresentadas as limitações encontradas na execução do estudo. Por fim, recomendações de pesquisas futuras são expostas visando à orientação de novos pesquisadores nessa área do conhecimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Como apontado no problema de pesquisa, esse estudo se caracteriza pelo desenvolvimento de um modelo de otimização para controle estatístico de um processo contínuo por bateladas, via cartas de controle. Inicialmente, é apresentado um histórico sobre a qualidade, em seguida são abordados os principais conceitos sobre cartas de controle e otimização econômica-estatística, os quais serão utilizados como paradigma nessa pesquisa. Em seguida, traz-se a caracterização do tipo de sistema produtivo analisado, bem como os principais tipos de indústrias que o adotam. Por fim, na última seção, é apresentado um embasamento sobre a computação evolucionária, em especial o GA, ferramenta que operacionaliza esse estudo.

2.1 Histórico da qualidade

A disseminação do conceito da qualidade no ambiente da manufatura acompanha as evoluções tecnológicas sofridas pela indústria, e também tem alguns fatos da história mundial como fortes propulsores. No período pré-revolução industrial, no qual a manufatura de artefatos era desenvolvida artesanalmente, a qualidade estava enraizada no atendimento da necessidade que o cliente expressava ao artesão (TOLEDO et al., 2013; WECKENMANN; AKKASOGLU; WERNER, 2015). Buscava-se atender com o produto fabricado a expectativa do cliente, porém não havia nenhum tipo de análise criteriosa ou até mesmo a aplicação de técnicas que controlassem e garantissem a qualidade do produto. Nessa época, a confiança no artesão e sua *expertise* na atividade eram as únicas garantias apresentadas para a obtenção do artefato desejado, com a qualidade esperada (TOLEDO et al., 2013).

Com o advento da primeira revolução industrial, e o caso emblemático da ampla expansão da *Ford Motor Company*, liderada pelos ideais de Henry Ford juntamente com os conceitos produzidos por Frederick Taylor, a qualidade foi definitivamente inserida no ambiente industrial. Esse período, conhecido como a Era da Inspeção, possuía como características do ambiente fabril a produção em série e a mão de obra não especializada. A qualidade se apresentava como um processo de inspeção do produto final, antes de sua expedição (HOYER; HOYER, 2001).

No entanto, o controle da qualidade carregava o ônus de alto custo e de não evitar a

geração de desperdícios. Com a expansão da indústria nos anos 1920 a 1940, ocorreu um aumento na competitividade, possibilitando a comparação entre produtos. Nesse período, com o intuito de melhorar o controle de qualidade dos processos, Walter Shewhart introduziu técnicas estatísticas no processo de aceitação de amostragem e controle, desenvolvendo o conceito do CEP. Esse fato tornou esse período da qualidade conhecido como a Era do Controle Estatístico da Qualidade (BEST; NEUHAUSER, 2006).

Com o final da Segunda Guerra Mundial e a reconstrução do Japão, a importância da qualidade tomou proporções maiores na indústria, sob uma ótica maior de prevenção da ocorrência de falhas, a Era da Garantia da Qualidade surgia. Nessa fase, a qualidade passou a ser entendida não apenas como um controle de ocorrências no processo, restrito ao chão de fábrica, mas como um tópico de gestão do negócio, necessitando um envolvimento maior na melhoria contínua. Quatro movimentos compuseram essa Era: a quantificação dos custos da qualidade, o controle total da qualidade, as técnicas de confiabilidade e o programa Zero Defeitos (TOLEDO et al., 2013; ZAIRI, 2013).

Com a crise do petróleo na década de 1970 e a disseminação de produtos orientais de alta qualidade, a resposta ocidental frente a esse cenário ficou conhecida como a Era da Gestão da Qualidade Total. Evidenciou-se uma forte valorização dos clientes e sua satisfação com o objetivo de preservar e ampliar a participação no mercado. A qualidade se encontrava disseminada por toda a indústria e chegaria ao setor de serviços, tornando-se assim um tema de nível estratégico para todas as organizações (WECKENMANN; AKKASOGLU; WERNER, 2015). O processo de controlar, planejar, gerir, garantir e melhorar a qualidade evoluiu juntamente com a indústria, o qual é sintetizado na Figura 1.

No processo de crescimento e difusão, diversas definições da qualidade foram formuladas ao longo do tempo. Juran (1974) definiu qualidade como adequação ao uso. Nessa definição, a visão é fundamentada no usuário, ou seja, a qualidade está no uso real do produto ou serviço. Com isso, dois significados diferentes emergem da definição: a presença de características desejáveis e a ausência de defeitos. Deming (1986) conceituou qualidade como satisfazer os clientes além das expectativas, sendo a chave nesse processo a variabilidade e que, produtividade e qualidade do produto aumentam à medida que a variabilidade de um processo é reduzida. Para Crosby (1979), a qualidade se dá através da conformidade do produto com seus requisitos. Uma vez que suas especificações tenham sido declaradas, o processo exibirá qualidade quando o produto

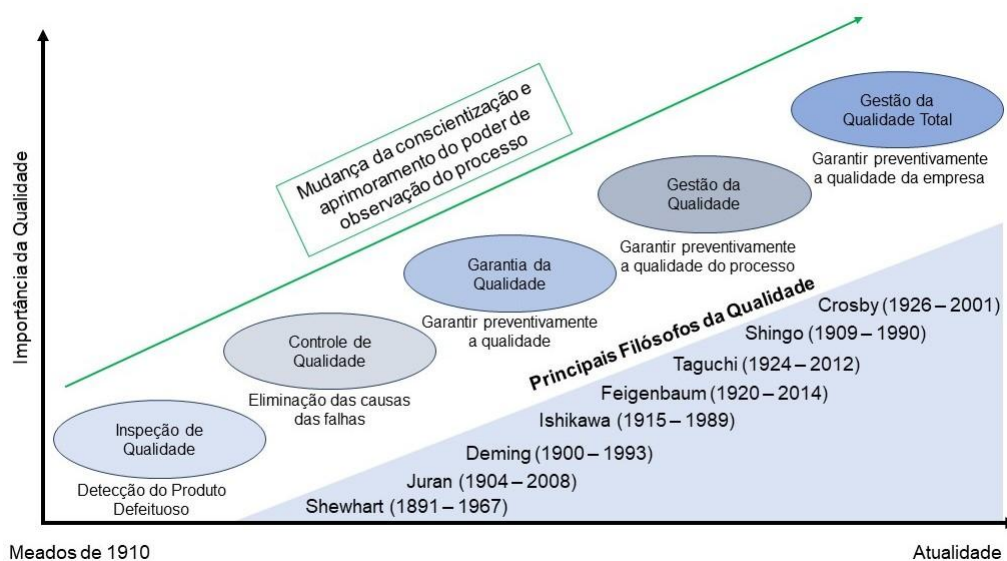


Figura 1: Evolução da Qualidade

Fonte: adaptado de Weckenmann, Akkasoglu e Werner (2015).

ou serviço atingir o estabelecido. Sua tese central é que a qualidade é gratuita à medida que os requisitos são cumpridos. Já Ishikawa (1985) afirma que qualidade é desenvolver, projetar, produzir e comercializar um produto que seja econômico, útil e sempre satisfatório para o consumidor.

Feigenbaum (1956) apresenta seu conceito de qualidade como uma definição do cliente. A qualidade não passa por determinações de marketing, engenharia ou administração e sim pela observação da experiência do cliente na utilização do produto ou serviço, medido de acordo com seus requisitos. Declarado ou não, consciente ou meramente percebido, tecnicamente operacional ou inteiramente subjetivo, e sempre representando um alvo em movimento em um mercado competitivo. Para Shewhart (1931), quando se fala em qualidade, torna-se importante analisar dois aspectos: analisar o produto objetivamente, ou seja, de acordo com suas especificações, e levar em consideração a experiência ou percepção do consumidor na utilização do produto ou serviço. A partir das principais definições apresentadas, concorda-se com Hoyer e Hoyer (2001) que a definição de Shewhart (1931) é a mais adequada e abrangente, pois leva em consideração aspectos objetivos e subjetivos da qualidade, o que é mais usualmente observado no dia-a-dia.

Diversas definições e conceitos foram apresentados ao longo dos anos, todos eles bem aceitos e complementando o entendimento sobre o tema. Ao acompanhar a evolução histórica da qualidade, observa-se que grande parte dos conceitos desenvolvidos ao longo do tempo não se sobrepõem, mas se complementam e aperfeiçoam os antecessores. Dessa forma, torna-se importante, mesmo estando em uma Era de visão estratégica da qualidade a nível organizacional, o constante aperfeiçoamento de ferramentas que suportam o sistema como um todo, por exemplo, o CEP.

2.2 Controle Estatístico do Processo

O CEP se trata de uma ferramenta da qualidade introduzida por Shewhart (1931), que tem por objetivo a detecção e prevenção de defeitos/falhas nos processos sob avaliação (MONTGOMERY, 2013). O CEP é uma técnica aplicada, normalmente, no monitoramento de processos de fabricação de produtos padronizados e repetitivos, que monitora um produto ou serviço simultaneamente ao seu processo de produção, a fim de identificar rapidamente saídas não-conformes (SEIF et al., 2011a). Esse processo faz com que a causa raiz da variação possa ser investigada previamente e corrigida, e o processo retome seu estado de estabilidade, evitando a geração de desperdícios (MONTGOMERY, 2013; SELVAMUTHU; DAS, 2018; BEST; NEUHAUSER, 2006). Naturalmente, todos os processos possuem variações que podem ser divididas em dois grupos de causas, conforme detalhado por Montgomery (2013):

- Causas de variações comuns: são variações consideradas aleatórias e inevitáveis. Quando um processo é afetado apenas por variações comuns, segue uma distribuição normal. Tais variações ocorrem dentro de certos limites e não apresentam uma causa sistemática que possa ser eliminada;
- Causas de variações especiais ou atribuíveis: são variações que ocorrem por motivos claramente identificáveis, sistemáticos e que podem ser eliminados. Normalmente, essas causas afetam parâmetros do processo, como média e desvio padrão, pois estão fora dos limites de controle. Entre as causas mais comuns se encontram erros de operação, desgastes de máquinas ou problemas relacionados à qualidade da matéria-prima.

Nesse contexto, destaca-se a importância do CEP. Os processos geralmente ope-

ram em um regime sob controle, entretanto nenhum processo é verdadeiramente estável para sempre, e eventualmente, causas atribuíveis podem ocorrer fazendo com que o processo mude para um estado fora de controle, tornando-o instável e imprevisível. Nesse estado, as saídas do processo podem resultar em produtos não-conformes (MONTGOMERY, 2013). Além disso, um processo instável apresenta sérias dificuldades no seu gerenciamento, fazendo com que a gestão desse processo fique desamparada de informações para a tomada de decisão no intuito de proporcionar melhorias no processo, assim como um ambiente estável torna muito mais simples a manutenção de melhorias já conquistadas (LOUZADA et al., 2013).

As cartas de controle são ferramentas empregadas na operacionalização do CEP, e devem ser minuciosamente investigadas, a fim de proporcionar as melhores condições de operação do CEP. Vale lembrar que, o objetivo final do CEP é a eliminação da variabilidade no processo. Contudo, pode não ser possível eliminar completamente a variabilidade, mas a carta de controle é uma ferramenta eficaz para minimizar ao máximo a variabilidade do processo observado (MONTGOMERY, 2013).

2.2.1 Cartas de Controle

Como forma de operacionalização do CEP, Walter Shewhart projetou as cartas de controle, as quais se tratam de gráficos em que são plotadas estatísticas de amostras aleatórias retiradas periodicamente de um processo. Em uma implantação típica, os gráficos são constituídos por uma escala numérica, identificando o número da amostra plotada, ou série temporal no eixo horizontal e no eixo vertical por uma escala correspondente à unidade de medida da grandeza observada pelo Controle Estatístico (SELVAMUTHU; DAS, 2018; MONTGOMERY, 2013).

Cada amostra é comparada com limites de controle para a tomada de decisão, se o processo se encontra sob controle ou fora de controle. Caso a estatística caia em uma região específica da carta, um sinal é emitido indicando que houve uma alteração no processo (CHEN, 2009; SEIF et al., 2011a). Como se trata de uma medida estatística, o monitoramento por cartas de controle está sujeito a ocorrência de dois erros estatísticos, o Erro do Tipo I (α) e o Erro do Tipo II (β). O primeiro erro corresponde aos alarmes falsos sinalizados pela carta, o falso positivo. Nesse caso, o processo monitorado se encontra sob controle e um ponto de amostragem é sinalizado como fora de controle

pela carta. Já o segundo erro se trata do caso inverso ao primeiro, em que o processo está fora de controle estatístico, porém a carta de controle não sinaliza essa situação, o falso negativo (FARAZ; SEIF, 2012; MONTGOMERY, 2013).

As cartas de controle possuem como objetivo primário a detecção rápida de variações por causas atribuíveis no processo. Elas servem como um filtro na separação de variações comuns e variações especiais, que devem ser investigadas para a sua eliminação quando há uma alta probabilidade do processo produzir produtos não-conformes (SEIF et al., 2011a). Para o desenvolvimento e implantação de uma carta de controle, normalmente, divide-se o processo em duas etapas: a Fase I e a Fase II. A Fase I compreende a etapa em que o processo é, inicialmente, observado e um conjunto de dados é coletado e analisado retrospectivamente. A análise tem por objetivo verificar se o processo se encontra sob controle, e a posterior determinação de limites de controle prévios (MONTGOMERY, 2013; WOODALL; MONTGOMERY, 2014).

Assim, pode-se verificar se nesse conjunto houve causas especiais, analisá-las e solucioná-las. Caso isso tenha ocorrido, o processo de coleta do conjunto de dados deve ser reiniciado. Esse ciclo deve ser executado até que se obtenha um conjunto de dados “limpos”, não sendo observadas causas especiais e avaliando a confiabilidade dos limites de controle propostos. Ao final da Fase I, os parâmetros da carta de controle devem estar determinados e avaliados para que isso possibilite o ingresso na Fase II e monitoramento das amostragens futuras (MONTGOMERY, 2013).

Já na Fase II, a carta de controle é aplicada no monitoramento do processo, realizando a plotagem da estatística da amostragem coletada comparando-a a partir dos parâmetros estabelecidos na Fase I. Essa fase é orientada por algumas etapas: a detecção, o isolamento e diagnóstico de falhas, e a intervenção no processo. Na detecção são identificados os comportamentos anormais, as causas especiais de variação. As variáveis que contribuem para a falha observada são isoladas e, procede-se com o diagnóstico para identificação da causa raiz. Ao final da Fase II, os devidos ajustes e reparos no processo produtivo são realizados visando à não reincidência da variação diagnosticada (PERES, 2018; YAN; YAO, 2015; MONTGOMERY, 2013; CHIANG; KOTANCHEK; KORDON, 2004).

Inicialmente, na década de 1920, Shewhart desenvolveu dois grupos de cartas de controle. As cartas de controle por variáveis, que se dividem em: \bar{X} , que é a carta das médias; R , que é a carta da amplitude; s , que é a carta do desvio-padrão; e $I - MR$,

que são as cartas para valores individuais. Também as cartas por atributos, dividindo-se em: p , a carta da porção defeituosa; np , a carta do número de defeituosos; c , a carta do número de defeitos por amostra; e u , a carta do número de defeitos por unidade amostral (SELVAMUTHU; DAS, 2018). Essa divisão é visualizada na Figura 2.

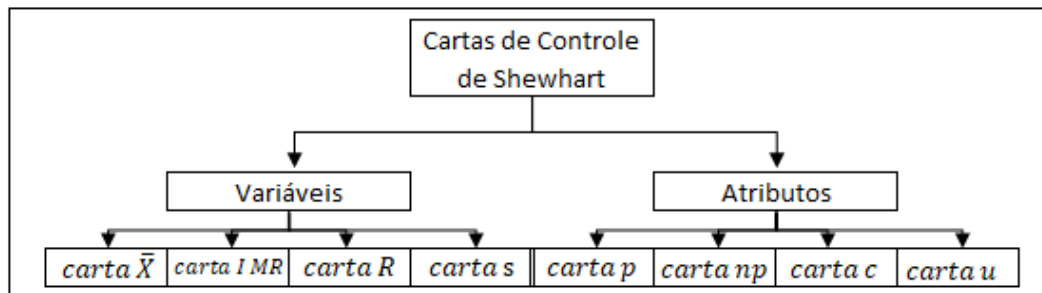


Figura 2: Tipos de cartas de controle de Shewhart
Fonte: adaptado de Selvamuthu e Das (2018).

As cartas ao longo do tempo se mostraram extremamente úteis na Fase I da implantação do CEP, em que o processo comumente se encontra fora de controle estatístico e as causas de variações especiais resultam em largas mudanças nos parâmetros monitorados. As cartas também foram de extrema utilidade em apresentar diagnósticos em processo fora de controle, fazendo com que, com as melhorias de processo implantadas, o processo convergisse a um estado sob controle estatístico (MONTGOMERY, 2013). Entretanto, com o avanço do CEP, as cartas de Shewhart apresentaram desvantagens. A principal desvantagem é que essas cartas utilizam as informações contidas apenas na última amostragem observada para sua tomada de decisão, ignorando informações oriundas de um sequenciamento de pontos. Essa característica faz com que as cartas de Shewhart sejam relativamente insensíveis a pequenas mudanças do processo (ZHANG; LIU; TAN, 2017; MONTGOMERY, 2013; SELVAMUTHU; DAS, 2018).

O CEP passou a exigir pesquisas mais profundas, intensificando o poder de detecção dessas ferramentas. Duas soluções foram propostas objetivando melhorar o desempenho na detecção de pequenas mudanças no processo. Page (1954) propôs a carta de controle de soma acumulada, a carta CUSUM. Já Roberts (1959) projetou a carta de média móvel exponencialmente ponderada, a carta EWMA. Ambas as cartas apresentaram resultados satisfatórios na Fase II atuando na detecção de pequenas mudanças,

fazendo com que o CEP alcançasse um novo nível de desempenho no monitoramento de variáveis (MONTGOMERY, 2013).

Com a evolução da manufatura e o ingresso de tecnologia levando a processos produtivos cada vez mais sofisticados, produtos mais complexos e diversificação nas demandas dos consumidores, tornou-se cada vez mais frequente a caracterização da qualidade dos produtos por mais de uma característica. Por vezes, as características são correlacionadas e não podem ser monitoradas pelas tradicionais cartas univariadas (TASIAS; NENES, 2019; GU; TANG, 2017). Esse novo problema no CEP demandou uma ferramenta que possuísse a capacidade de monitorar, de forma multivariada, diversas características, evitando a aplicação de várias cartas univariadas, o que além de ser uma tarefa redobrada não atingiria o desempenho esperado (ARBABI; GHAHROODI, 2014; BAHIRAEI; RAISSI, 2014). Dada essa necessidade, a primeira solução desenvolvida foi a carta T^2 por Hotelling (1947), sendo uma extensão da carta \bar{X} de Shewhart e é até hoje a carta multivariada mais utilizada nas indústrias (CHEN, 2009; TASIAS; NENES, 2019).

Em sua forma, a carta T^2 se assemelha com a carta \bar{X} com a ausência do limite inferior de controle, porque os pontos plotados no gráfico correspondem à distância quadrática da observação multivariada do alvo, sendo que, pontos equidistantes formam uma elipsoide rodeando o alvo (BAHIRAEI; RAISSI, 2014). Um exemplo de correlação entre duas variáveis é visualizado na Figura 3, em que Montgomery (2013) exemplifica a junção dos gráficos de duas variáveis correlacionadas formando o elipsoide em torno do alvo do processo.

O exemplo apresentado na Figura 3 mostra a presença de um ponto fora da elipse, que representa um ponto fora do limite de controle. Entretanto, ao observar os gráficos de cada uma das variáveis, ambos contém todos os seus pontos dentro dos limites de controle. Dessa forma, fica clara a contribuição que a carta T^2 apresenta no monitoramento de processos multivariados (MONTGOMERY, 2013). O uso de diversas cartas univariadas distorce o monitoramento simultâneo delas, pois a probabilidade de detecção não é mais a mesma e a taxa de probabilidade do Erro do Tipo I é elevada (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019).

A carta de Hotelling se trata de um procedimento que objetiva a detecção de mudanças através da medida de distanciamento de um vetor médio (μ) em relação a um alvo (μ_0) (CHEN, 2007a). Para entendimento da formulação estatística da carta T^2 , assume-

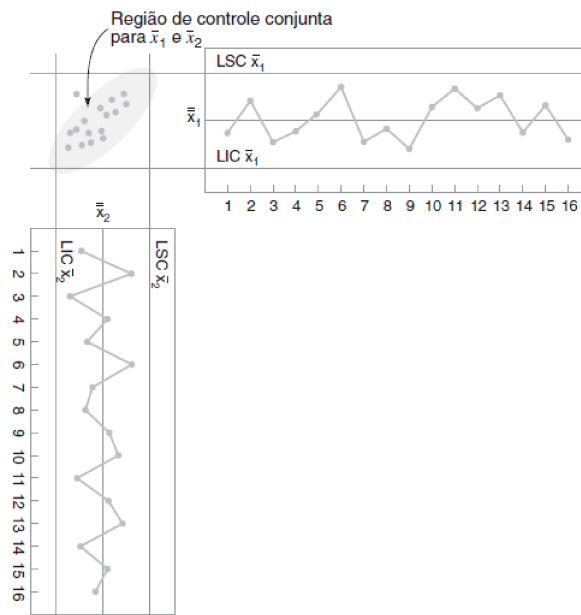


Figura 3: Exemplo da elipse que controla duas variáveis
 Fonte: Montgomery (2013).

se que $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, sejam vetores aleatórios independentes com ρ posições, em um processo que monitora ρ características de qualidade, observadas por amostragens periódicas ao longo do tempo (CHEN, 2009; MONTGOMERY; KLATT, 1972). A carta de controle T^2 assume que as variáveis são distribuídas conjuntamente e representadas por um vetor médio (μ) e uma matriz de covariância (Σ). A carta irá sinalizar uma mudança no vetor médio das variáveis assim que

$$X_i^2 = n(\bar{X}_i - \mu_0)' \Sigma_0^{-1} (\bar{X}_i - \mu_0) > k, \quad (2.1)$$

sendo que μ_0 e Σ_0 denotam o vetor médio e a matriz de covariância do processo sob controle, respectivamente, e k corresponde ao limite superior de controle ou limite de ação (BAHIRAEE; RAISSI, 2014). Caso μ_0 e Σ_0 sejam desconhecidos, então eles podem ser estimados pelo vetor médio e pela matriz de covariância de m vetores aleatórios iniciais, anteriores ao monitoramento simultâneo do processo. Assim, a estatística T^2 é definida por

$$T_i^2 = n(\bar{X}_i - \hat{\mu}_0)' \hat{\Sigma}_0^{-1} (\bar{X}_i - \hat{\mu}_0), \quad (2.2)$$

sendo a estatística aproximada para a carta de controle T^2 de Hotelling (CHEN, 2009), seguindo uma distribuição qui-quadrado com ρ graus de liberdade quando o processo está sob controle. Se o processo se encontra fora de controle, a carta T^2 segue uma distribuição qui-quadrado não centralizada com ρ graus de liberdade, e o parâmetro de não-centralidade é dado por $\eta = nd^2$ em que $d = (\mu_1 - \mu_0)' \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_0)$. A distribuição qui-quadrado não-central é uma mistura das distribuições de Poisson ponderada e qui-quadrado centralizado, sendo d a distância de Mahalanobis entre μ_1 (vetor médio da amostragem) e μ_0 (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019).

Quanto à operação, a carta T^2 possui a vantagem da simplicidade, porém, foram evidenciadas as mesmas falhas da carta de Shewhart - a dificuldade em detectar pequenas alterações no processo (CHEN, 2007a; MONTGOMERY, 2013). Assim, como ocorrido nas cartas univariadas, as cartas CUSUM e EWMA foram adaptadas para o cenário multivariado, surgindo então as cartas MCUSUM e MEWMA (MONTGOMERY, 2013).

Uma segunda alternativa para intensificar o poder de detecção das cartas foi a utilização de parâmetros adaptativos nas cartas de controle. Uma carta de controle pode ser considerada adaptativa se, ao menos um de seus parâmetros permita alteração, baseando-se no valor estatístico da amostragem atual (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019). Essa técnica foi desenvolvida por Reynolds et al. (1988), aplicando-a em uma carta \bar{X} , que após foi estendida para cartas multivariadas por Aparisi (1996). A carta T^2 tradicional opera com parâmetros de tamanho de amostra (n), intervalo entre coletas (h) e limite de ação (k) fixos. Dessa forma, de acordo com a última amostra observada, a carta pode adaptar seus parâmetros para a próxima amostragem a ser realizada, tornando-a mais eficiente na detecção de pequenas mudanças no processo (REYNOLDS et al., 1988).

Já nas cartas adaptativas, pode-se realizar o design de uma variedade maior de parâmetros, sendo que um mesmo parâmetro pode assumir valores diferentes, dependendo da situação. Por exemplo, pode-se ter dois parâmetros para n : n_1 e n_2 (CHEN; HSIEH, 2007). Assim, nesse caso, dependendo de regras pré-definidas, a amostragem irá adotar um dos dois parâmetros. De forma geral, há sete tipos de cartas adaptativas, sendo que, para todos os casos, considera-se como o índice (i) as possíveis variações do parâmetro indicado:

- a) VSS (*Variable Sampling Size*) - Na carta VSS o design abrange os parâmetros $n_{(i)}$, h , w (sendo w o limite para a transição entre as diferentes taxas de amostragem) e k (COSTA, 1994);
- b) VSI (*Variable Sampling Interval*) - Na carta VSI os parâmetros abordados em um design são n , $h_{(i)}$, w e k (CHEN, 2007a);
- c) VSSI (*Variable Sampling Size and Interval*) - Para a carta VSSI, uma combinação das duas anteriores, o design se dá nos parâmetros $n_{(i)}$, $h_{(i)}$, w e k (CHEN, 2009);
- d) VSICL (*Variable Sampling Interval and Control Limits*) - A carta VSICL possui os parâmetros de design n , $h_{(i)}$, $w_{(i)}$ e $k_{(i)}$ (TORABIAN; MOGHADAM; FARAZ, 2010);
- e) VSSC (*Variable Sampling Size and Control Limits*) - Nas cartas VSSC, os parâmetros que integram o seu design são $n_{(i)}$, h , $w_{(i)}$ e $k_{(i)}$ (ARBABI; GHAHROODI, 2014);
- f) VP (*Variable Parameters*) - Nas cartas VP, os parâmetros determinados pelo design quase iguais à carta VSSC, porém com a adição de variação ao parâmetro h , ou seja, variam $n_{(i)}$, $h_{(i)}$, $w_{(i)}$ e $k_{(i)}$ (CHEN, 2007b);
- g) DWL (*Double Warning Lines*) - A carta DWL possibilita o design dos parâmetros $n_{(i)}$, $h_{(i)}$, $w_{(i)}$ e k (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019).

Conforme os resultados da pesquisa comparativa desenvolvida por Faraz e Parsian (2006), a carta DWL apresentou os melhores resultados dentre diversos esquemas adaptativos analisados. Considerando esse dado, justifica-se a utilização da carta DWL nesse estudo para a proposição do modelo. A carta de controle T^2 com esquema adaptativo DWL distribui seus parâmetros, considerando n_1 e h_1 o par de parâmetros com menor tamanho de amostragem e maior intervalo entre amostragens, respectivamente. Os parâmetros n_2 e h_2 são considerados para uma amostragem mais rigorosa, com tamanhos de amostragens maiores e intervalo entre amostragens menores (CHEN, 2009). A linha de aviso w_h indica a troca do parâmetro de intervalo de amostragem de h_1 para h_2 . Já a linha de aviso w_n informa a necessidade da troca do parâmetro de n_1 para n_2 .

Ao final, a linha de ação k sinaliza a perda do controle estatístico do processo (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019). A carta de controle DWL possui três modos de aplicação possíveis que serão detalhados nos tópicos subsequentes (SALMASNIA; ABDZADEH; RAHIMI, 2020).

2.2.1.1 Carta DWL no modo de aplicação 1

O primeiro modo de aplicação da carta DWL traz como primeira linha de aviso w_h e como segunda linha de aviso w_n (FARAZ; SANIGA, 2011). As trocas de parâmetros nessa situação ocorrem conforme apresenta a Figura 4.

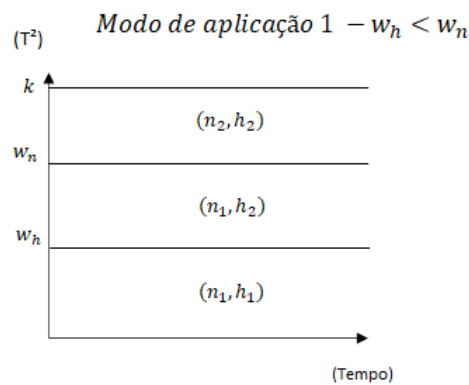


Figura 4: Exemplo de carta T^2 -DWL no modo de aplicação 1
Fonte: Salmasnia, Rahimi e Abdzadeh (2019).

A carta apresentada na Figura 4, se transformada em uma função, segue a seguinte notação:

$$(n(i), h(i)) = \begin{cases} (n_2, h_2), & \text{se } w_n < T_{i-1}^2 < k \\ (n_1, h_2), & \text{se } w_h < T_{i-1}^2 \leq w_n \\ (n_1, h_1), & \text{se } 0 \leq T_{i-1}^2 \leq w_h \end{cases} \quad (2.3)$$

Para o desenvolvimento da carta de controle, pode-se empregar a abordagem da Cadeia de Markov (CHEN, 2009). Para essa aplicação, a cadeia é composta por sete estados transientes (do estado 1 ao 7) e um estado absorvente (o estado 8) (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019). Durante o monitoramento, a cada amostragem o processo cairá em um dos estados, sendo as possibilidades detalhadas a seguir:

1. $0 \leq T_{i-1}^2 < w_h$ e o processo se encontra sob controle;
2. $w_h \leq T_{i-1}^2 < w_n$ e o processo se encontra sob controle;
3. $w_n \leq T_{i-1}^2 < k$ e o processo se encontra sob controle;
4. $T_{i-1}^2 \geq k$ e o processo se encontra sob controle (alarme falso);
5. $0 \leq T_{i-1}^2 < w_h$ e o processo se encontra fora de controle;
6. $w_h \leq T_{i-1}^2 < w_n$ e o processo se encontra fora de controle;
7. $w_n \leq T_{i-1}^2 < k$ e o processo se encontra fora de controle;
8. $T_{i-1}^2 \geq k$ e o processo se encontra fora de controle (alarme verdadeiro);

Dessa forma, a matriz de transição entre os estados possíveis é dada por:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} & p_{18} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} & p_{27} & p_{28} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} & p_{37} & p_{38} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} & p_{47} & p_{48} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{55} & p_{56} & p_{57} & p_{58} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{65} & p_{66} & p_{67} & p_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{75} & p_{76} & p_{77} & p_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

em que p_{ij} retrata a probabilidade de transição do estado i para o estado j (CHEN, 2009). Observa-se que, uma vez que o processo esteja fora de controle, sua tendência natural é transitar até o estado absorvente (estado 8), não sendo possível retorná-lo a um estado sob controle sem intervenção. As probabilidades de transição também podem ser expressas matematicamente como segue (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019):

$$p_{11} = pr(0 \leq T^2 < w_h) \times e^{-\lambda h_1} = F(w_h, \rho, \eta = 0) \times e^{-\lambda h_1} \quad (2.4)$$

Essa mesma equação, assim como as equações das demais probabilidades de transição se encontram detalhadas no Anexo A. Nessas equações, $F(x, \rho, \eta)$ denota a função de distribuição cumulativa de qui-quadrado não-central com ρ graus de liberdade e parâmetro de não-centralidade η (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019).

2.2.1.2 Carta DWL no modo de aplicação 2

O segundo modo de aplicação da carta DWL apresenta como primeira linha de aviso w_n e, conseqüentemente, w_h sendo a segunda linha de aviso. A Figura 5 exemplifica o formato desse modo de aplicação.

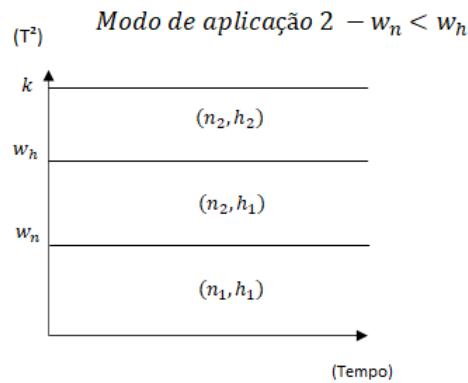


Figura 5: Exemplo de carta T^2 -DWL no modo de aplicação 2

Fonte: Salmasnia, Rahimi e Abdzadeh (2019).

Transformando o esquema apresentado na Figura 5 em um função, se obtém a notação:

$$(n(i), h(i)) = \begin{cases} (n_2, h_2), & \text{se } w_h < T_{i-1}^2 < k, \\ (n_2, h_1), & \text{se } w_n < T_{i-1}^2 \leq w_h, \\ (n_1, h_1), & \text{se } 0 \leq T_{i-1}^2 \leq w_n \end{cases} \quad (2.5)$$

Utilizando a abordagem da Cadeia de Markov, o modo de aplicação 2 possui 7 estados transientes e um estado absorvente, assim como apresentado no modo de aplicação 1 (CHEN, 2009; SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019). Durante o monitoramento, a cada amostragem o processo cairá em um dos estados, que são:

1. $0 \leq T_{i-1}^2 < w_n$ e o processo se encontra sob controle;
2. $w_n \leq T_{i-1}^2 < w_h$ e o processo se encontra sob controle;
3. $w_h \leq T_{i-1}^2 < k$ e o processo se encontra sob controle;

4. $T_{i-1}^2 \geq k$ e o processo se encontra sob controle (alarme falso);
5. $0 \leq T_{i-1}^2 < w_n$ e o processo se encontra fora de controle;
6. $w_n \leq T_{i-1}^2 < w_h$ e o processo se encontra fora de controle;
7. $w_h \leq T_{i-1}^2 < k$ e o processo se encontra fora de controle;
8. $T_{i-1}^2 \geq k$ e o processo se encontra fora de controle (alarme verdadeiro);

Dessa forma, a matriz de transição entre os estados possíveis é dada por:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} & p_{18} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} & p_{27} & p_{28} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} & p_{37} & p_{38} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} & p_{47} & p_{48} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{55} & p_{56} & p_{57} & p_{58} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{65} & p_{66} & p_{67} & p_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{75} & p_{76} & p_{77} & p_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

sendo que p_{ij} é a probabilidade de transição do estado i para o estado j , conforme já descrito anteriormente (CHEN, 2009). A forma de cálculo de cada uma das probabilidades é apresentada no Anexo B (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019).

2.2.1.3 Carta DWL no modo de aplicação 3

No terceiro modo de aplicação da carta DWL, as duas linhas de aviso para transição dos parâmetros são unificados e a carta se torna igual a uma carta VSSI (SALMASNIA; ABDZADEH; RAHIMI, 2020). O formato seguido pelo modo de aplicação 3 da carta DWL é apresentado na Figura 6.

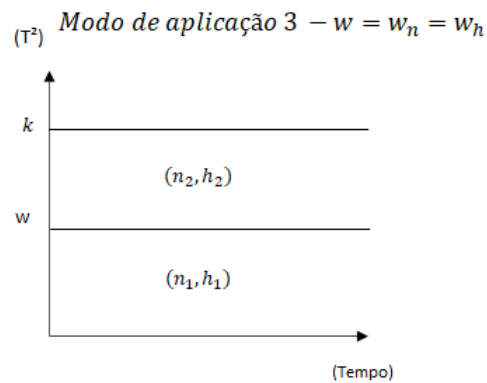


Figura 6: Exemplo de carta T^2 -DWL no modo de aplicação 3

Fonte: Salmasnia, Rahimi e Abdzadeh (2019)

A notação matemática que representa o modo de aplicação 3 da carta DWL é:

$$(n(i), h(i)) = \begin{cases} (n_2, h_2), & \text{se } w < T_{i-1}^2 < k \\ (n_1, h_1), & \text{se } 0 \leq T_{i-1}^2 \leq w \end{cases} \quad (2.6)$$

Baseando-se na abordagem da Cadeia de Markov, o modo de aplicação 3 da carta DWL possui 5 estados transientes e 1 estado absorvente, que são (CHEN, 2009):

1. $0 \leq T_{i-1}^2 < w$ e o processo se encontra sob controle;
2. $w \leq T_{i-1}^2 < k$ e o processo se encontra sob controle;
3. $T_{i-1}^2 \geq k$ e o processo se encontra sob controle (alarme falso);
4. $0 \leq T_{i-1}^2 < w$ e o processo se encontra fora de controle;
5. $w \leq T_{i-1}^2 < k$ e o processo se encontra fora de controle;
6. $T_{i-1}^2 \geq k$ e o processo se encontra fora de controle (alarme verdadeiro);

Dessa forma, a matriz de transição entre os estados possíveis é dada por:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ 0 & 0 & 0 & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

As expressões em forma de equações das probabilidades descritas na matriz se encontram no Anexo C (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019). Independente de qual modo de aplicação for adotado, a carta T^2 -DWL possibilita o design de parâmetros de tamanho de amostragem, intervalo de amostragem e os limites para a troca de parâmetros (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019). A tomada de decisão pode determinar o desempenho obtido por uma carta de controle. Há diversas formas de intervir na determinação dos parâmetros das cartas, como métodos heurísticos, design estatístico, DE e o DEE (NAYERI et al., 2007). Essa pesquisa faz o uso da otimização econômica-estatística, a qual é abordada na próxima seção.

2.2.2 Otimização econômico-estatística

Com a disseminação das cartas de controle nas práticas industriais, tornou-se relevante a pesquisa com vistas à obtenção do melhor desempenho dessa ferramenta. Uma das formas é o DEE, que consiste na junção de dois tipos de design, o econômico e o estatístico (ARBABI; GHASHROODI, 2014). O design estatístico objetiva determinar parâmetros da carta de controle para aumentar seu poder de detecção, minimizar a probabilidade de ocorrência dos erros do Tipo I (α) e Tipo II (β) ou até mesmo otimizar critérios relacionados como o Comprimento Médio da Corrida (ARL), número esperado de alarmes falsos (ANF) ou o tempo médio ajustado para a carta sinalizar (AATS) (NAYERI et al., 2007; FARAZ; SANIGA, 2011).

Por outro lado, o DE tem como objetivo minimizar os custos totais relacionados ao CEP, através de uma função de custos. Dentre os custos alocados no CEP, estão os custos de amostragem e análise, custos de busca de alarmes falsos, custos de busca e reparo para alarmes verdadeiros e custos de produção fora de controle (CHEN, 2009; ARBABI; GHASHROODI, 2014). No entanto, o DE comumente ignora propriedades estatísticas, o que gera altas taxas de probabilidade dos erros do Tipo I e do Tipo II,

justificando uma unificação dos dois critérios de otimização (SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH, 2019).

O DE teve seu primeiro estudo publicado por Duncan (1956), na proposição de uma função de custos para carta \bar{X} . Desde então, diversos trabalhos com aplicação desse e desenvolvimento de outras funções de custos foram publicados. Entretanto, não foram observadas condições estatísticas de operação. Saniga (1989) constatou a necessidade da abordagem integrada entre minimização de custos e maximização do poder estatístico das cartas de controle, sendo sua a primeira proposição de um DEE.

Quanto à proposição de modelos de DE, diversas pesquisas desenvolvem modelos diferentes com sistemáticas de abordagens diferentes. Alguns autores adotam que a produção permanece em operação durante a busca e o reparo de causas atribuíveis (LORENZEN; VANCE, 1986), enquanto outros presumem que a produção seja paralisada durante o reparo. Ainda há autores que tratam o modelo de custo com a premissa que a produção seja paralisada durante as duas etapas, buscas e reparo (COSTA; RAHIM, 2001). Nesse sentido, Lorenzen e Vance (1986), baseando-se na pesquisa seminal de Duncan (1956), propuseram um modelo de custos que generaliza todas essas premissas e possibilita a representação de diferentes cenários em um único modelo de custo. Dessa forma, por se tratar de um modelo generalizado, essa pesquisa utiliza a função de custos desenvolvida por Lorenzen e Vance (1986).

Inicialmente, para apresentar a função de custos empregada, torna-se necessário determinar o funcionamento da carta de controle analisada. Para isso, as seguintes premissas são assumidas (CHEN, 2009; FARAZ; SANIGA, 2011):

1. O processo de qualidade é controlado por uma carta T^2 - DWL que monitora ρ características de qualidade;
2. As ρ características seguem uma distribuição normal multivariada com vetor de média μ e matriz de covariância Σ ;
3. O processo inicia seu ciclo em um estado sob controle ($\mu = \mu_0$), no entanto após um determinado espaço temporal aleatório de operação sob controle, o processo será perturbado por uma única causa atribuível, o que proporcionará uma mudança no vetor médio do processo ($\mu = \mu_1$);

4. Causas atribuíveis afetam apenas o vetor de média, dessa forma a matriz de covariância permanece constante ao longo do tempo;
5. O processo permanece fora de controle após a mudança até que a causa atribuível seja solucionada (caso seja possível), ou seja, não é possível que o processo retome o estado sob controle sem intervenções;
6. O intervalo de chegada de uma perturbação no processo segue uma distribuição exponencial com uma média de $1/\lambda$ horas;

Cada ciclo da carta de controle percorre as etapas destacadas a seguir (FARAZ; SANIGA, 2011):

- A) Duração esperada do período sob controle, que seguindo uma distribuição exponencial é representado pela variável ICP (que significa período sob controle), acrescido ou não, do tempo de busca de alarmes falsos;
- B) Tempo necessário para que a carta de controle sinalize que o processo se encontra fora de controle após uma mudança no processo. Esse tempo médio é nomeado por Tempo Médio Ajustado para Sinalizar (AATS, do inglês *Average Adjusted Time to Signal*);
- C) Tempo de análise da amostragem e interpretação na ocorrência de um alarme verdadeiro \bar{n} ;
- D) Tempo de identificação (T_1) e resolução (T_2) na ocorrência de um alarme verdadeiro.

O AATS pode ser utilizado como medida de desempenho das cartas de controle. Sua formulação matemática é dada por Cinlar (1975), como sendo:

$$AATS = ATC - \frac{1}{\lambda} \quad (2.7)$$

enquanto o Tempo Médio do Ciclo (ATC, do inglês *Average Time of the Cycle*), ou tempo entre o início do ciclo e o primeiro sinal após a mudança do processo, é dado por:

$$ATC = b'(I - Q)^{-1}\bar{h}, \quad (2.8)$$

em que $b' = b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ seja o vetor de probabilidades iniciais dos estados transientes da Cadeia de Markov, sendo o somatório de todas as probabilidades igual a 1; I representa a matriz identidade de ordem igual ao número de estados transientes da cadeia de Markov; Q é a matriz de transição na qual os elementos associados ao estado absorvente são deletados; e \bar{h} é o vetor de intervalos de amostragem possíveis. O número esperado de alarmes falsos (ANF) é calculado, de acordo com o modo da carta utilizado:

$$ANF = \begin{cases} b'(I - Q)^{-1}(0, 0, 0, 1, 0, 0, 0)' & \text{para, } w_h < w_n \\ b'(I - Q)^{-1}(0, 0, 0, 1, 0, 0, 0)' & \text{para, } w_n < w_h \\ b'(I - Q)^{-1}(0, 0, 1, 0, 0)' & \text{para, } w_h = w_n \end{cases} \quad (2.9)$$

Já o número esperado de itens inspecionados (ANI) é calculado com a equação a seguir, levando em consideração o modo da carta utilizado:

$$ANI = \begin{cases} b'(I - Q)^{-1}(n_1, n_1, n_2, n_2, n_1, n_1, n_2)' & \text{para, } w_h < w_n \\ b'(I - Q)^{-1}(n_1, n_2, n_2, n_2, n_1, n_2, n_2)' & \text{para, } w_n < w_h \\ b'(I - Q)^{-1}(n_1, n_2, n_2, n_1, n_2)' & \text{para, } w_h = w_n \end{cases} \quad (2.10)$$

O número esperado de amostragens (ANS) é expresso, de acordo com o modo da carta utilizado, por:

$$ANS = \begin{cases} b'(I - Q)^{-1}(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)' & \text{para, } w_h < w_n \\ b'(I - Q)^{-1}(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)' & \text{para, } w_n < w_h \\ b'(I - Q)^{-1}(1, 1, 1, 1, 1)' & \text{para, } w_h = w_n \end{cases} \quad (2.11)$$

Já o período sob controle (ICP) é calculado como segue (FARAZ; SANIGA, 2011; LORENZEN; VANCE, 1986):

$$ICP = \frac{1}{\lambda} + (1 - \gamma_1)T_0ANF, \quad (2.12)$$

sendo, $\gamma_1 = 1$ se o processo não é paralisado durante alarmes falsos, $\gamma_1 = 0$ se o

processo for paralisado e T_0 representando o tempo de busca para alarmes falsos. Já o tempo de amostragem e interpretação do resultado de um alarme verdadeiro (etapa C no ciclo da carta de controle) é representado por uma constante E que simboliza o tempo gasto em uma amostra multiplicado pelo número de amostras coletadas \bar{n} , sendo obtido pela função matemática (FARAZ; SANIGA, 2011):

$$\bar{n} = \begin{cases} n_1(p_{18} + p_{28} + p_{58} + p_{68}) + n_2(p_{38} + p_{48} + p_{78}) & \text{para, } w_h < w_n \\ n_1(p_{18} + p_{58}) + n_2(p_{28} + p_{38} + p_{48} + p_{68} + p_{78}) & \text{para, } w_n < w_h \\ n_1(p_{16} + p_{46}) + n_2(p_{26} + p_{36} + p_{56}) & \text{para, } w_h = w_n \end{cases} \quad (2.13)$$

A Figura 7 apresenta o ciclo da carta de controle.

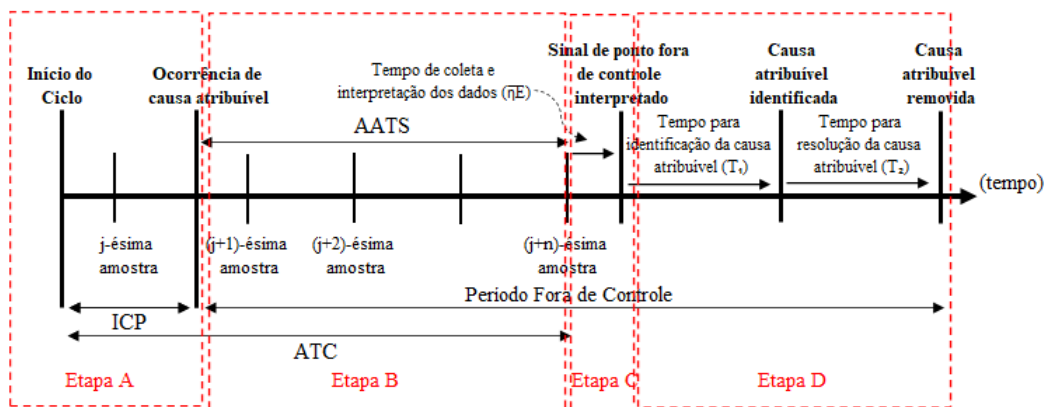


Figura 7: Ciclo da carta de controle
Fonte: adaptado de Faraz e Saniga (2011).

Assim, o tempo de ciclo total esperado é representado pela equação:

$$E(T) = ICP + AATS + \bar{n}E + T_1 + T_2 \quad (2.14)$$

Com as equações dos tempos de ciclo propostas, os custos envolvidos devem ser observados. O custo por ciclo é formado por produtos não-conformes produzidos tanto com o processo sob controle quanto fora de controle, por alarmes falsos, pela busca e reparo de alarmes verdadeiros e pelo custo de amostragem e inspeção (FARAZ; SANIGA, 2011). O custo esperado das não-conformidades por ciclo (C_{NC}) é calculado

por

$$C_{NC} = \frac{C_0}{\lambda} + C_1[AATS + \bar{\eta}E + \gamma_1T_1 + \gamma_2T_2], \quad (2.15)$$

em que C_0 e C_1 representam o custo de produção de produtos não-conformes sob controle e fora de controle, respectivamente, e γ_2 é um indicador que, se a produção continua durante o tempo de reparo equivale a 1 e se a produção é interrompida equivale a 0 (LORENZEN; VANCE, 1986).

Considerando que a'_3 seja o custo de investigação de alarmes falsos e a_3 o custo de busca e reparo de alarmes verdadeiros, o custo esperado com alarmes emitidos pela carta de controle ($C_{alarmes}$) é dado por:

$$C_{alarmes} = a'_3ANF + a_3 \quad (2.16)$$

Sendo a_1 e a_2 os custos fixos e variáveis, respectivamente, componentes da amostragem e análise, o custo esperado de amostragem por ciclo da carta de controle ($C_{amostras}$) é definido por:

$$C_{amostras} = (a_1ANS + a_2ANI) + \frac{(a_1 + a_2n_2)(\bar{\eta}E + \gamma_1T_1 + \gamma_2T_2)}{h_2} \quad (2.17)$$

Destaca-se que, quando a carta de controle excede o limite de ação k , os parâmetros de amostragem n_2 e h_2 devem ser utilizados, caso o processo prossiga durante a busca e reparo de causas atribuíveis (FARAZ; SANIGA, 2011). Então, o custo total esperado por ciclo da carta de controle é dado por:

$$E(C) = C_{NC} + C_{alarmes} + C_{amostras}, \quad (2.18)$$

enquanto que, ao dividir a Equação (2.18) pela Equação (2.14), obtém-se o custo esperado por hora:

$$E(D) = \frac{E(C)}{E(T)} \quad (2.19)$$

Assim, atendendo ao objetivo primordial do DEE, sendo D o vetor do design, que contém as variáveis de decisão $k, w_n, w_h, n_1, n_2, h_1$ e h_2 , a proposição de encontrar o vetor D minimizando o valor de $E(D)$ é realizada, obedecendo algumas restrições estatísticas, que são (FARAZ; SANIGA, 2011; SALMASNIA; RAHIMI; ABDZADEH,

2019):

$$\min E(D), \quad (2.20)$$

tal que:

$$k > 0, \quad (2.21)$$

$$0 < w_h < k, \quad (2.22)$$

$$0 < w_n < k, \quad (2.23)$$

$$1 \leq n_1 < n_2, \quad (2.24)$$

$$h_{min} \leq h_2 < h_1 \leq h_{max}, \quad (2.25)$$

$$n_1, n_2 \in \mathbb{Z}^+, \quad (2.26)$$

$$ANF \leq ANF_0, \quad (2.27)$$

$$AATS \leq AATS_1 \quad (2.28)$$

Nas restrições, os parâmetros h_{min} e h_{max} foram adicionados para evitar problemas operacionais, como por exemplo, restringir os intervalos de amostras aos turnos de trabalho (FARAZ; SANIGA, 2011). Já os indicadores ANF_0 e $AATS_1$ foram inseridos para que seja possível a atribuição de valores máximos de aceitação para os Erros do Tipo I e Tipo II, respectivamente, inserindo assim a parametrização necessária para o design estatístico (KATEBI; SEIF; FARAZ, 2017).

Como o esquema adaptativo possui três modos de aplicação, mas sendo apenas um deles o utilizado, a função objetivo da otimização econômica-estatística deverá selecionar qual dos modos de aplicação e seus respectivos parâmetros atendem melhor o objetivo estipulado, como demonstrado no esquema:

$$E(D) = \text{Min} \{ [E(D)_{modoDWL1}], [E(D)_{modoDWL2}], [E(D)_{modoDWL3}] \} \quad (2.29)$$

2.3 Características de um processo contínuo por bateladas

Um processo pode ser caracterizado como um arranjo de recursos e tarefas que visam a transformar entradas (matéria-prima, mão-de-obra, energia, etc.) em saídas de produtos e sub-produtos que atendam às necessidades de determinados clientes, sejam

eles internos ou externos. Há diversas formas de classificar os processos industriais, dentre elas se pode citar a classificação através de seu volume-variedade de produção. Comumente, as medidas de volume de produção e variedade de produtos estão correlacionadas, porém, inversamente proporcionais. Em casos em que os volumes de produção são altos, a variedade de produtos produzidos é limitada, e o contrário também é verdadeiro, em processos que ofertam uma ampla variedade de produtos, os volumes de produção tendem a ser reduzidos (ANUPINDI et al., 2012; PEINADO; GRAEML, 2007).

Processos que se caracterizam por altos volumes e baixa variedade possuem como características de sua produção: a alta repetitividade de atividades, a especialização da mão de obra em uma determinada função, o intensivo investimento de capital, baixo custo unitário e uma roteirização da produção bem definida, padronizada e regular. Por outro lado, processos industriais com baixos volumes e alta variedade de produtos implicam características opostas: processos com baixa repetitividade, menor sistematização do fluxo de trabalho, alto custo unitário, processos flexíveis e complexos (ANUPINDI et al., 2012). Em um equilíbrio dessas condições se encontram processos por lotes ou bateladas, que podem tender a um dos lados conforme características mais específicas de seu produto e mercado, por exemplo, o processo alvo dessa pesquisa. A Figura 8 apresenta uma sistematização da classificação de processos pelo quesito volume-variedade.

O processo de lotes, ou como nomeado nessa pesquisa, processo por bateladas, caracteriza-se por ser um sistema de produção no qual são produzidas quantidades delimitadas de um determinado produto, que é dimensionado visando ao atendimento de uma demanda de mercado. Assim que concluída uma batelada, a linha de produção fica disponível para a produção de uma nova batelada, que pode ser do mesmo produto ou de algum outro produto (GONG, 2013). O processo por bateladas se trata de um sistema de produção amplamente utilizado na indústria, especialmente em indústrias do ramo alimentício, de bebidas, químicas, farmacêuticas, têxteis, de cerâmicas, eletrodomésticos, entre outras (GONG, 2013; KOURTI; NOMIKOS; MACGREGOR, 1995; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; FERRER; WESTERHUIS, 2011; RAMAKER et al., 2003).

As principais características do processamento por bateladas são: a flexibilidade de produzir diferentes produtos com características diferentes em uma mesma linha de produção, a duração finita e variável das bateladas, o maquinário normalmente segue um

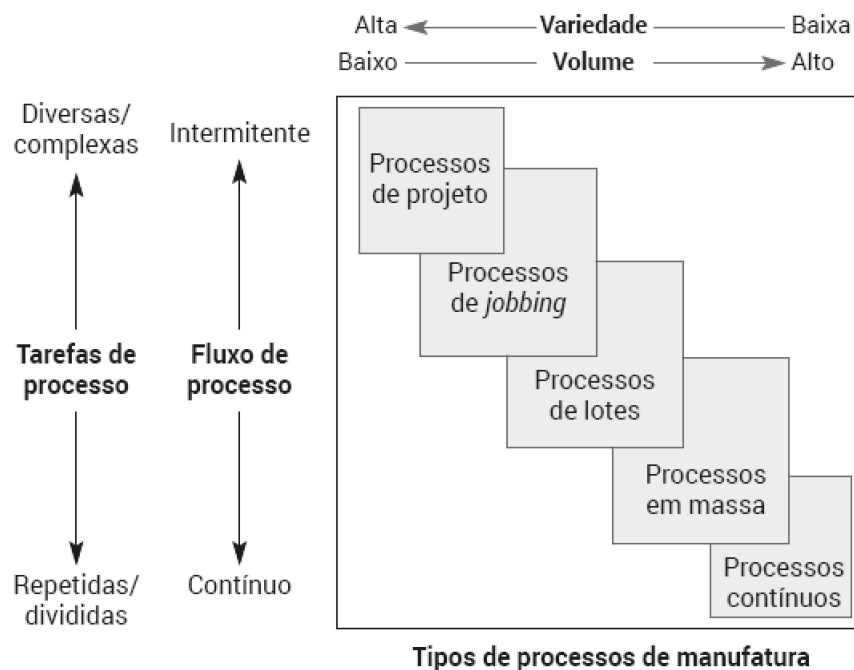


Figura 8: Classificação de processos quanto ao volume e variedade
Fonte: Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)

agrupamento por máquinas do mesmo tipo e que entre cada batelada produzida é comum a necessidade de ajustes (*setups*) de maquinários e ferramentais (MARTIN; MORRIS; KIPARISSIDES, 1999; GARCÍA-MUÑOZ et al., 2003; KOURTI; NOMIKOS; MACGREGOR, 1995).

Assim como outros tipos de processos industriais, o processamento por bateladas enfrenta desafios particulares em seu planejamento, e propriamente no seu monitoramento de qualidade. De modo geral, pode ocorrer a falta de equilíbrio nas capacidades produtivas entre os setores, o que deve ser equalizado pelo planejamento da produção. Outro ponto em que o planejamento deve atuar é em relação a mão de obra, que normalmente está em utilização plena e regular, não possibilitando a geração de picos de produção. O plano de produção deve ser constantemente revisado e atualizado, visando também à integração eficiente de novas bateladas ao fluxo produtivo. Quanto à estrutura das indústrias por bateladas, o processo exige grandes áreas de estocagem de produtos em processo e produtos acabados (GONG, 2013; MAIMON; KHMELNITSKY; KOGAN, 1998; ANUPINDI et al., 2012).

Já os processos contínuos são processos caracterizados, essencialmente, por um fluxo produtivo contínuo, ou seja, tanto a entrada de matéria-prima, quanto a saída de produtos acabados ocorrem de forma constante e ininterrupta. Apresentam produções com maiores volumes e, normalmente, menor variedade de produtos. Trata-se de um tipo de processo utilizado por empresas que produzem um determinado produto por longos períodos sem grandes modificações. O processo produtivo apresenta ritmo de produção acelerado, altos investimentos tecnológicos inflexíveis, operações executadas sem interrupção, fluxos altamente previsíveis, usualmente operam em longos períodos de tempo e, por vezes, os produtos são inseparáveis, característico do fluxo contínuo. Como exemplos de empresas que operam sob o regime de processamento contínuo se pode citar centrais de tratamento de água, refinarias petroquímicas, usinas de eletricidade, siderúrgicas, algumas indústrias de celulose, indústrias de cimento, alimentos, entre outros (ANUPINDI et al., 2012; GONG, 2013).

No entanto, devido à integração de tecnologias nos processos e evolução de demandas, processos com características híbridas surgem, como por exemplo o processo contínuo por bateladas. Esse modelo de processo pode adotar diferentes formatos como, possuir uma seção de produção contínua que alimente seções de produção por bateladas em paralelo, ou ainda, um processo por bateladas que no momento em que uma batelada é iniciada o processo assume características de produção contínua até o fim da batelada (DE PRADA et al., 2009).

Os processos contínuos por bateladas possuem características similares em alguns aspectos ao processo por bateladas e ao processo contínuo, variando essas características pela maior ou menor proximidade de cada um dos tipos. Em geral, podem ser caracterizados por sua flexibilidade, duração finita das atividades e tempo de operação variável (MARTIN; MORRIS; KIPARISSIDES, 1999; GARCÍA-MUÑOZ et al., 2003). Sua aplicação comumente ocorre em indústrias de alimentos, de bebidas, químicas e farmacêuticas, entre outras (KOURTI; NOMIKOS; MACGREGOR, 1995; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; FERRER; WESTERHUIS, 2011; RAMAKER et al., 2003).

Os desafios do controle e monitoramento se dão por dificuldades encontradas, principalmente, no controle do processo por bateladas, pois, frequentemente, a duração dos diferentes estágios não é constante de batelada para batelada, podendo afetar o controle da qualidade do produto. Aliado a isso, muitas vezes, o controle de qualidade é deixado como uma etapa de aprovação ou reprovação da batelada ao final do processo,

podendo limitar o monitoramento a uma conferência de etapas ou passos de produção, sem controles intermediários (ZARZO; FERRER, 2004; KOURTI; NOMIKOS; MACGREGOR, 1995).

Outra dificuldade encontrada se remete ao fato de que as variáveis monitoradas são altamente colineares e auto-correlacionadas podendo dificultar no monitoramento e classificação das bateladas (MACGREGOR et al., 1994; YAN; KUANG; YAO, 2017). Uma alternativa pode ser a utilização de dados históricos de outras bateladas ou informações prévias da matéria-prima, caso haja essa disponibilidade no processo avaliado (KOURTI; NOMIKOS; MACGREGOR, 1995).

2.4 Computação evolucionária - Algoritmos Genéticos

Algoritmos evolutivos se firmaram como métodos ideais na proposição de soluções para problemas de otimização multiobjetivo complexos, nos quais métodos exatos, como a programação linear, não são capazes de atingir soluções ótimas (TALBI, 2009). São algoritmos que imitam processos de evolução natural como, a seleção natural, sobrevivência dos seres mais aptos, reprodução, para a busca de soluções de problemas. Os algoritmos evolutivos podem ser divididos em diferentes tipos, tais como: GAs, programação evolucionária, evolução diferencial, inteligência de enxames, entre outros (LIEPINS; HILLIARD, 1989; TALBI, 2009).

GAs são algoritmos que aplicam os conceitos da evolução natural. Desenvolvido por Holland (1975), um GA se baseia no conceito de sobrevivência dos seres mais aptos e na reprodução dos indivíduos gerando novas soluções a cada geração, com o propósito de encontrar uma solução ótima (MITCHELL, 1996). A premissa central de um GA é o conceito de que ao combinar diferentes fragmentos de informações importantes para determinado problema, novas soluções mais aprimoradas podem ser encontradas. A partir de uma população de soluções, em vez de uma única solução, o algoritmo genético é capaz de encontrar o ótimo global para problemas de otimização restritos e irrestritos, com uma ou múltiplas funções objetivo (ZAIN; HARON; SHARIF, 2010; MICHALEWICZ, 1996).

Embora possam existir inúmeras variações, o funcionamento básico de um GA ocorre através de três macro operações: formação de uma população de soluções, avaliação da aptidão individual e, operações de recombinação e mutação (GOLDBERG,

1989). Inicialmente, gera-se de forma aleatória uma população de soluções candidatas, chamadas de indivíduos ou cromossomos, dentro do espaço de busca. Uma função de avaliação, usualmente nomeada como função *fitness*, é utilizada para mensurar a aptidão de cada indivíduo da população. Ao final de todas as etapas evolutivas, o indivíduo mais apto representa a melhor solução para o problema pesquisado (DI SERAFINO et al., 2010).

Diversas variações do algoritmo genético proposto por Holland (1975) podem ser encontradas na literatura, dentre elas as mais conhecidas são: o MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) e o NSGA (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) (MALHOTRA; SINGH; SINGH, 2011). Contudo, todas as variações se baseiam no GA simplificado, cujo algoritmo básico é descrito no Quadro 1.

Quadro 1: Estrutura simplificada de algoritmo genético

Passo I	[Início]	Gerar uma população aleatória de indivíduos (candidatos a solução)
Passo II	[Fitness]	Avaliar a adequação de cada indivíduo da população a uma função
Passo III	[Nova População]	Criar uma nova população seguindo os passos: a) [Seleção] - Selecionar indivíduos como "pais" da população b) [Crossover] - Cruzar os "pais" para formar novos descendentes c) [Mutação] - Mutar genes da nova descendência d) [Aceitação] - Inserir os novos descendentes na população
Passo IV	[Substituição]	Utilizar nova população gerada para uma nova geração
Passo V	[Teste]	Parar se algum critério de parada for satisfeito a) Em caso de parada, retornar a melhor solução na população atual
Passo VI	[Loop]	Retornar ao passo II

Fonte: adaptado de Mitchell (1996) e Paula (2019)

O processo de evolução no algoritmo genético se dá através de um conjunto de operadores estocásticos. Em sua forma simplificada, o GA utiliza três operadores, que são seleção, recombinação (ou crossover) e mutação. Os três simulam o fenômeno natural correspondente, e são aplicados iterativamente com o objetivo de evoluir os indivíduos em direção a uma população mais apta (GOLDBERG, 1989).

O operador de seleção estabelece um nível mínimo de desempenho da função objetivo a cada geração e é responsável por filtrar indivíduos para a etapa de crossover, os chamados indivíduos "pais". Quanto mais apto for o indivíduo, maior será a probabilidade de que ele seja selecionado (REEVES, 2010). O crossover é a operação que combina os genes dos "pais" selecionados para a criação de novos indivíduos, os "filhos". Espera-se que indivíduos dessa geração herdem características positivas de seus

“pais” (GOLDBERG, 1989; REEVES, 2010). O operador de mutação realiza pequenas alterações aleatórias nos genes dos indivíduos visando à diversificar a população e recuperar alguma característica genética boa que possa ter se perdido nas etapas de seleção e recombinação (REEVES, 2010).

Os três operadores, e outras etapas do GA, são controlados por diferentes parâmetros, sendo que uma configuração assertiva pode influenciar diretamente na eficiência do algoritmo. Essa configuração traz a necessidade da escolha adequada dentre diversas opções de funções e métodos empregados (grupo de parâmetros qualitativos) e, taxas e probabilidades a serem aplicadas (grupo de parâmetros quantitativos) (COSTA et al., 2007). Além do desafio de estabelecer os valores para os parâmetros do GA, o fato de não haver um consenso na literatura sobre valores ótimos é outra dificuldade encontrada (PAULA, 2019). Dentre os parâmetros mais comuns, são destacados os seguintes:

- Tamanho da população: trata-se de um parâmetro que especifica quantos indivíduos formarão uma geração, sendo um fator determinante na qualidade da solução, bem como na eficiência do algoritmo (MAARANEN; MIETTINEN; PENTTINEN, 2007);
- Função de seleção: é um parâmetro responsável pela escolha dos possíveis “pais” para a etapa de crossover. A função de seleção determina como ocorrerá a seleção, apontando os indivíduos possivelmente mais aptos com o objetivo de que seus “filhos” sejam mais aptos ainda. Existem diversas funções de seleção, como: seleção por classificação, seleção uniforme estocástica, seleção por torneio, o método da roleta, entre outros (REEVES, 2010);
- Função de crossover: o parâmetro do tipo de crossover determina como ocorrerá a troca de informação genética. Os tipos de crossover mais comuns são o de um ponto, de dois pontos e o cruzamento difuso (*scattered*) (PAULA, 2019);
- Taxa de crossover: parâmetro que regula o percentual da população de “pais” que passarão pela operação de crossover (PAULA, 2019);
- Função de mutação: esse parâmetro visa a garantir a ampliação da busca no espaço de soluções; as principais funções de mutação são a mutação uniforme, a Gaussiana e a *adaptive feasible* (REEVES, 2010);

- Taxa de mutação: se refere ao percentual da população que irá passar pela operação de mutação (PAULA, 2019);
- Número de gerações: trata-se de um parâmetro utilizado como um critério de parada do algoritmo, ou seja, o algoritmo encerrará sua busca quando atingir um número determinado de gerações (REEVES, 2010).

A configuração de um GA inclui o ajuste de vários desses parâmetros que possuem influência significativa na eficiência do algoritmo. Configurações ideais para as taxas de mutação e de crossover podem melhorar significativamente o desempenho do algoritmo. Apesar de ser um bom algoritmo de busca, os GAs mais básicos podem apresentar falhas por diversas razões, inclusive por escolhas inadequadas de funções e probabilidades (LIEPINS; HILLIARD, 1989).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa é um procedimento formal e sistemático de desenvolvimento e execução de um método científico, e tem como objetivo primordial desvendar respostas sobre fenômenos observados, mediante a utilização de procedimentos científicos (GIL, 2018). O método de pesquisa, por definição, trata-se de um conjunto de técnicas e procedimentos utilizados para a realização de coletas e análise de dados em uma pesquisa científica. O método fornece as etapas a serem cumpridas para atingir os objetivos propostos, ou seja, são as “ferramentas” empregadas no desenvolvimento do estudo visando a responder questões propostas (STRAUSS; CORBIN, 2007). Conforme Gil (2018), as pesquisas como um todo se dirigem a diversos objetos e possuem inúmeros objetivos distintos. Assim, torna-se uma tarefa natural a tentativa de classificação das mesmas.

Quanto a sua natureza, essa pesquisa se classifica como aplicada. Nesse tipo de pesquisa, os pesquisadores trabalham com problemas buscando entender sua natureza para que seu ambiente seja controlado. Envolve verdades e interesses locais, propondo gerar conhecimentos para aplicação prática no intuito de solucionar um problema específico (PATTON, 2015).

Ao analisar os objetivos, ou propósitos, essa pesquisa se classifica como prescritiva. A pesquisa prescritiva é considerada uma classificação alternativa às tradicionais, em que as pesquisas são orientadas à solução de problemas, visando à prescrição de soluções a problemas aplicados, especialmente nas áreas de engenharia, gestão, entre outras. Tem como propósito a geração de artefatos que acrescentem mudanças no ambiente observado pelo pesquisador, buscando a resolução de problemas, e um melhor desempenho desse sistema (DRESCH; LACERDA; JUNIOR, 2015).

Quanto à abordagem, essa pesquisa é classificada como quantitativa, considerando que seus dados podem ser quantificáveis, expressos através de números. Esse tipo de pesquisa tem como característica a ausência da subjetividade, em que opiniões e informações são traduzidas em números (KAUARK; MANHÃES; MEDEIROS, 2010).

No âmbito local, de acordo com as áreas de atuação da Engenharia de Produção designadas pela Associação Brasileira de Engenharia de Produção, ABEPRO (2021), essa dissertação foi conduzida sob a área de conhecimento da Engenharia de Produção, classificado na subárea de engenharia da qualidade - planejamento e controle da qualidade, bem como na sub-área de pesquisa operacional - modelagem, simulação e

otimização. Quanto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), a pesquisa se concentra na área de gerência de produção com a linha de pesquisa de modelagem de sistemas empresariais.

Para fins de orientação do desenvolvimento do estudo, o método de pesquisa adotado foi a DSR. Um método que fundamenta e operacionaliza pesquisas que objetivam a proposição de artefatos ou uma prescrição, orientado à resolução de problemas. Ou seja, uma vez o problema entendido, ocorre a construção e avaliação de artefatos fazendo com que esses alterem a realidade observada, solucionando os problemas observados ou melhorando o desempenho do sistema (DRESCH; LACERDA; JUNIOR, 2015; KUECHLER; VAISHNAVI, 2011). As próximas seções desse capítulo detalham o método de pesquisa adotado e os passos para a condução do estudo.

3.1 *Design Science Research*

Dentro da ciência há uma divisão entre a ciência natural, ou ciência tradicional, e a *design science*. A ciência natural tem por objetivo explicar como e por que os fenômenos ocorrem. Por outro lado, a *design science* se preocupa em desenvolver artefatos para suprir objetivos na resolução de problemas, ou seja, é a ciência do artificial (MARCH; SMITH, 1995). Ocupa-se do projeto de melhorias para sistemas desenvolvidos através da ação humana. Assim, o conhecimento é gerado com o propósito de ser posto em ação focando primordialmente na solução de problemas. A *design science* tem como meta a proposição de soluções alternativas para um mesmo problema com regras tecnológicas fundamentadas, sendo que, as diversas soluções obtidas devem ser testadas pelo pesquisador (DRESCH; LACERDA; JUNIOR, 2015).

A DSR possibilita o desenvolvimento de pesquisas em diversas áreas, dentre elas a engenharia, havendo relatos de identificação de aplicações dessa classificação desde os anos de 1960. Esse método objetiva a pesquisa, o estudo e a investigação do artificial, sendo observado tanto sob a ótica acadêmica quanto a ótica organizacional (BAYAZIT, 2004; KUECHLER; VAISHNAVI, 2011). A DSR se trata de um método orientado pela construção do conhecimento que quando aplicado viabiliza a redução da lacuna entre a teoria e a prática, e através de seus resultados pode até mesmo aprimorar teorias (BAYAZIT, 2004; VAN AKEN, 2004; KUECHLER; VAISHNAVI, 2011; HEVNER;

CHATTERJEE, 2010).

Como resultados, a *design science* oferece prescrições e desenvolve artefatos que incorporem as prescrições. Tais artefatos são perecíveis, portanto, os resultados das pesquisas também se tornam perecíveis, ou seja, conforme as necessidades se alteram, as prescrições geradas para o atendimento da necessidade inicial passam a ser obsoletas, demandando que também passem por modificações para continuarem a atender seu propósito (MARCH; SMITH, 1995). Como classificação dos artefatos, March e Smith (1995); Manson (2006); Dresch, Lacerda e Junior (2015) e Van Aken (2004) detalham cinco opções possíveis: os constructos, os modelos, os métodos, as instanciações e as *design propositions*. Ao ser aplicada nessa pesquisa, a DSR orienta a pesquisa científica que tem por finalidade a geração de um artefato da classe dos modelos.

Para a obtenção de tais artefatos, a *design science* possui duas atividades básicas: construir e avaliar. Construção é o processo de desenvolvimento de determinado artefato sujeito a um propósito específico. A avaliação é a etapa que julga o desempenho desse artefato (MARCH; SMITH, 1995). Porém, para realizar a condução do método de pesquisa, o seu desenvolvimento está estruturado em cinco estágios, a Conscientização do Problema, a Sugestão, o Desenvolvimento, a Avaliação e a Conclusão (KUECHLER; VAISHNAVI, 2011; MANSON, 2006), que serão melhor detalhadas na sequência.

3.2 Método de trabalho

O método de trabalho corresponde à seção em que são apresentados os passos de condução dessa pesquisa. Considerando a utilização do método DSR, as etapas e entregas (*outputs*), são apresentados na sequência. Essa pesquisa se estruturou baseada no modelo proposto por Manson (2006).

3.2.1 Conscientização do problema

A Conscientização do Problema configura-se no estágio do levantamento da origem do problema, podendo emergir de diversas fontes, como a necessidade de uma empresa ou até mesmo de leituras que geraram descobertas de campo pelo pesquisador. Como *output* desse estágio se tem a proposição da nova investigação (KUECHLER; VAISHNAVI, 2011).

Assim, nessa pesquisa, primeiramente, necessitou-se entender o problema proposto. Observada a necessidade inerente a todas as indústrias de buscar a competitividade no seu segmento de mercado, essa pesquisa visa a proporcionar um poder competitivo superior em um dos processos comuns em várias indústrias, o CEP. A relação de como essa etapa pode contribuir para a melhora competitiva da organização, primeiramente, vincula-se em sua essência, ao fornecimento de produtos livres de falhas e também atuando na notificação preventiva de um processo que pode estar fora de controle. Essa atuação do CEP traz benefícios tanto na qualidade do produto quanto na minimização de descarte de produtos não-conformes.

Uma segunda forma de auxílio na competitividade é através da ótica da otimização dos parâmetros de operação da carta de controle, tanto com vistas a um desempenho estatístico, quanto a um desempenho econômico superior. O desempenho estatístico se dá através de uma racionalização dos parâmetros da carta visando a reduzir as probabilidades de ocorrência de erros, tanto do tipo I quanto do tipo II. Já o desempenho econômico se dá através da racionalização dos parâmetros com o objetivo de reduzir os custos inerentes ao processo do CEP e, se possível, incrementando receitas do processo.

Dessa forma, a Engenharia de Produção pode contribuir na busca de tais soluções para as empresas. Para isso, a primeira etapa se tratou da ambientação da área pesquisada e da real necessidade das organizações. A reflexão, com base na literatura científica, levou ao questionamento que orientou essa pesquisa: como essa otimização econômica-estatística pode ser realizada em um ambiente de processo de indústrias que atuam sob o regime contínuo por bateladas em sua produção?

3.2.2 Sugestão

O estágio da Sugestão consiste na etapa em que o pesquisador realizará suas tentativas de proposição de *design*. Nesse estágio, torna-se necessário o emprego de criatividade pelo pesquisador. Pode-se originar alternativas diferentes entre pesquisadores que realizem proposições para um mesmo problema, devido ao fato de que o emprego de diferentes teorias para explicação do fenômeno observado é válido (KUECHLER; VAISHNAVI, 2011; MANSON, 2006).

Nessa pesquisa, a etapa de Sugestão buscou um formato mais estruturado. Assim, essa fase se desdobrou na busca na literatura de embasamento apresentado por outros

pesquisadores para formular sua solução ao tema proposto. A busca por estudos correlatos apresentou ao pesquisador abordagens utilizadas por outros pesquisadores em problemas semelhantes, ampliando o campo de ideias na perspectiva de integração de diferentes conceitos empregados e apontando lacunas deixadas em determinada área do conhecimento.

Dessa forma, realizou-se uma revisão sistemática da literatura com embasamento na estrutura do método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*, em tradução literal, Itens de Relatório Preferidos para Revisões Sistemáticas e Metanálises (PRISMA), proposto por Moher et al. (2009). Foram utilizadas as etapas pertinentes à necessidade apresentada nesse estágio da pesquisa. Os principais conceitos abordados nessa revisão foram:

- Cartas de controle T^2 adaptativa;
- Otimização econômica-estatística de cartas de controle.

Para a execução, utilizou-se como parâmetros de busca a combinação de termos nos títulos, resumos e palavras-chave: (“*multivariate control chart**” OR “*multivariate statistical process control*” OR “*MSPC*”) AND (“*economic design*” OR “*economic optimization*” OR “*cost function*” OR “*economic-statistical design*” OR “*statistical design*”). A utilização do asterisco no primeiro termo da busca, habilita uma função nos mecanismos de busca das bases de dados que, a palavra assinalada possa conter uma continuidade. No exemplo utilizado, *chart**, significa que palavras como *charts*, *charting*, ou qualquer outra continuação serão abrangidas pela busca.

Cabe destacar que, apesar desse estudo ser delimitado ao processo produtivo contínuo por bateladas, termos de pesquisa referentes ao processo produtivo não foram incluídos nos parâmetros de busca. Isso se deve, primeiramente, ao fato de que, quando ocorreu a inclusão do termo “*continuous batch*”, a busca não retornou nenhum artigo. Já com a inclusão do termo “*batch process*”, os artigos obtidos não contemplavam a etapa da operacionalização do CEP como esta pesquisa faz, sendo que os resultados mais comuns obtidos com essa combinação de termos se referia à etapa de seleção de variáveis, etapa que não é contemplada nesse estudo. Uma segunda razão para a não inclusão de termos de pesquisa relacionados ao processo produtivo, se deve ao desejo do aproveitamento de pesquisas de diferentes processos produtivos para o apoio ao desenvolvimento da solução proposta nessa pesquisa.

As bases de dados acessadas foram: *Scopus*, *IEEE*, *Sage Journals*, *Science Direct*, *Emerald* e *Web of Science*. As bases *Scopus* e *Web of Science*, normalmente, são as bases indexadoras que abrangem majoritariamente as publicações da área de engenharia, porém as demais bases citadas também foram pesquisadas visando a evitar que algum artigo deixasse de ser coletado por qualquer tipo de falha nos mecanismos de buscas das bases. Os filtros aplicados no corpus de artigos foram:

1. Remoção de artigos duplicados, visto que as buscas ocorreram em diversas bases de dados e há sobreposição de abrangência entre elas;
2. Remoção de artigos editoriais, apresentações de *call for papers* e artigos em idioma diferente do inglês;
3. Leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, sendo que, para manutenção no corpus de artigos esses deveriam conter a combinação dos termos: (*economic design OR economic-statistical OR quality cost OR cost model*) AND (*control chart OR statistical process control*);
4. Leitura completa dos artigos, sendo que, para manutenção no corpus de artigos, deveriam abordar tópicos relacionados às duas áreas dessa pesquisa, que são: cartas de controle T^2 adaptativa e otimização econômica. Vale ressaltar que nessa etapa de filtragem não foi exigida a presença de ambas otimizações, econômica e estatística. Mesmo que os artigos apresentassem apenas a otimização econômica e não possuíssem a otimização estatística foram também considerados, pelo fato que podem apresentar contribuições ao embasamento da proposição do artefato.

Após a filtragem, o extrato final de artigos foi lido por completo e analisado. Também se realizou um processo de inserção de outros resultados na revisão sistemática da literatura, chamado de *backward and forward snowball*, em tradução literal, bola de neve para trás e para frente. Esse processo consistiu em, primeiramente, observar as referências utilizadas por cada artigo do corpus final do método PRISMA e verificar se alguma das referências se encaixava nos mesmos filtros propostos anteriormente. Após isso, com o auxílio da base de pesquisa *Google Scholar*, verificaram-se os artigos científicos que citaram cada um dos artigos do corpus final do método PRISMA, analisando-os da mesma forma sob a ótica dos filtros propostos anteriormente. Cabe

aqui um adendo ao filtro de seleção de artigos acadêmicos, sendo que nessa etapa foram avaliados apenas artigos acadêmicos publicados em periódicos, excluindo assim teses e dissertações, bem como artigos não publicados, porém disponíveis na Internet.

Outras fontes bibliográficas também foram utilizadas como forma de complemento aos assuntos não abarcados na revisão sistemática da literatura, como por exemplo o contexto fabril em que a pesquisa está inserida, os processos industriais contínuos por bateladas. A fundamentação obtida nesse processo como um todo serviu de base para a construção do *design* do modelo proposto, objetivando propor um modelo para otimização dos custos e desempenho estatístico do CEP em uma operação de processamento contínuo por bateladas.

3.2.3 Desenvolvimento

O Desenvolvimento é o estágio em que o pesquisador projeta seu artefato. Não há necessidade de trazer novidades em relação ao estado da arte, a inovação pode se dar pela construção do artefato (MARCH; SMITH, 1995; MANSON, 2006). O *output* do estágio do Desenvolvimento é a geração de um ou mais artefatos (MANSON, 2006; HEVNER; CHATTERJEE, 2010).

Para essa pesquisa, na etapa do Desenvolvimento, apoiando-se na identificação dos estudos correlatos, um mapa conceitual foi desenvolvido com a finalidade de sintetizar os constructos envolvidos na área do conhecimento. A análise do mapa conceitual suportou a proposição de um *framework* de orientação e, posteriormente, a construção do modelo. A etapa do Desenvolvimento pode ser desmembrada em sub-etapas, que são:

1. proposições do autor da pesquisa;
2. desenvolvimento de um mapa conceitual sobre modelos de custos para otimização econômica-estatística do CEP;
3. construção do modelo proposto;
4. validação do modelo proposto;
5. avaliação do processo e seus resultados (próxima etapa do método de trabalho).

As proposições iniciais se deram nas escolhas do pesquisador já apresentadas no referencial teórico dessa pesquisa. A decisão sobre o tipo de carta de controle utilizada, optou-se pelo emprego da carta de controle T^2 de Hotelling, pois conforme Chen (2007a) e Montgomery (2013), quando comparada com os demais tipos de cartas multivariadas, a carta T^2 apresenta uma maior simplicidade em seu entendimento por parte da operação. Na decisão sobre qual modelo de custo a ser empregado, o modelo proposto por Lorenzen e Vance (1986) foi escolhido pelo fato de que esse é o modelo mais abrangente entre os que se encontram disponíveis na literatura e leva em consideração diversas premissas comumente limitadas em outros modelos de custo. A opção pela utilização do DEE advém das considerações apontadas por Saniga (1989), do fato que o design puramente econômico possui deficiências com relação às taxas de erros estatísticos do tipo I e II, prejudicando o desempenho operacional da carta de controle. A escolha do esquema adaptativo DWL observa as considerações apresentadas no estudo de Faraz e Parsian (2006), no qual o esquema DWL apresentou melhor desempenho.

Já a proposição do mapa conceitual se deu através da esquematização dos constructos envolvidos na área do conhecimento. A organização dos constructos foi capaz de estabelecer quais as relações existentes entre eles para o suporte da proposição. Como consequência da análise do mapa conceitual e, considerando o contexto do processo no qual essa pesquisa se encontra inserida, foi desenvolvido um *framework* de orientação para a etapa da construção do modelo.

O processo de construção do modelo utilizou como modelo de custo base o apresentado na Seção 2.2.2 e se dividiu em duas etapas. A primeira foi a construção de um algoritmo de otimização do DEE. Já a segunda etapa consolidou a construção do modelo como um todo, integrando o algoritmo desenvolvido. Na primeira etapa, com o auxílio do *software* estatístico R, o modelo de custo foi otimizado por um algoritmo genético visando à determinação de seus parâmetros de entrada para que a saída do modelo de custo fosse minimizada, respeitando restrições pré-estabelecidas. A escolha pelo algoritmo genético parte de uma avaliação do problema de otimização proposto. Nesse caso, tem-se um problema de decisão com variáveis contínuas e discretas, sendo que a solução se encontra em um espaço não-convexo (TORABIAN; MOGHADAM; FARAZ, 2010). Para esses casos, Goldberg (1989) recomenda a utilização de metaheurísticas. Dentre as metaheurísticas disponíveis, o algoritmo genético ganha destaque pela vasta utilização nesse segmento de problema, conforme apresenta a Seção de identificação dos estudos

correlatos.

Após a construção do algoritmo responsável pela busca das soluções ótimas, o modelo como um todo foi desenvolvido na segunda etapa. Assim, foram integradas características oriundas do processo produtivo contínuo por bateladas e estabelecido a forma de funcionamento do modelo. Sua formatação se inspirou no ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*), visto a necessidade de funcionamento cíclico. Isso se deve ao fato que a matéria-prima de uma batelada pode conter características diferentes da anterior, o que não assegura um funcionamento linear do monitoramento do processo. Assim, o processo de monitoramento deve ser replanejado a cada nova batelada e contar com uma etapa de avaliação para possíveis correções após a execução da batelada.

A etapa seguinte, a validação do modelo proposto, foi realizada também em duas etapas. A primeira delas validou quantitativamente o algoritmo desenvolvido. Essa validação ocorreu através do comparativo de resultados com o estudo de Faraz e Saniga (2011). Dessa forma, os mesmos resultados alcançados pelos autores deveriam ser replicados pelo algoritmo desenvolvido. Já a segunda etapa da validação, agora do modelo como um todo, se deu através de consultas a especialistas na área do processamento contínuo por bateladas. A validação deles teve por objetivo julgar se os dados inseridos no modelo condiziam com a realidade do processo produtivo. Coube a eles observar se os *inputs* do modelo eram condizentes com os dados disponíveis no processo produtivo. E, também, observar se os *outputs* do modelo seriam úteis e atenderiam as necessidades do processo na obtenção de vantagens competitivas. Cabe destacar que, apesar de que na fundamentação do método proposto por Kuechler e Vaishnavi (2011) a etapa de validação do modelo seja parte integrante do estágio da Conclusão, para essa pesquisa foi julgado mais coerente a aplicação da etapa de validação durante o estágio do Desenvolvimento.

3.2.4 Avaliação

No estágio da Avaliação, o artefato passa por um processo de avaliação baseada em critérios explicitados na proposta inicial. Raramente as propostas iniciais são validadas, por esse motivo, todos os desvios observados são carregados na correção ou proposição de um novo artefato (MANSON, 2006).

Na Avaliação, é possível gerar as medições relacionadas ao desempenho obtido pe-

los artefatos, bem como compará-los com as métricas definidas nos estágios iniciais. Deve-se ter atenção quanto aos critérios de avaliação, devendo ser explicitados, especialmente nos casos de critérios qualitativos, para evitar dúvidas quanto à imparcialidade da decisão. O resultado desse estágio deve ser o artefato que apresentou melhor funcionamento de acordo com a demanda inicial, dependendo ou não de ajustes necessários (MANSON, 2006; HEVNER; CHATTERJEE, 2010).

Na avaliação do modelo construído nessa pesquisa, foi realizada através de simulação computacional. Essa avaliação teve por objetivo o aprimoramento do modelo desenvolvido, observando o seu nível de atendimento da pergunta de pesquisa, assim como possíveis melhorias em sua construção e ganhos obtidos quando comparado ao modelo tradicional de DEE, que consiste em otimizar os parâmetros para um desvio escolhido e aplicá-los constantemente, sem uma revisão periódica desses. Nessa etapa, como as empresas consultadas não disponibilizaram a divulgação de dados de custos do processo, para a simulação foram utilizados os dados originários da operação de fundição da empresa General Motors, dados esses presentes na pesquisa de Lorenzen e Vance (1986) e replicados por Faraz e Saniga (2011). Para a etapa de avaliação, foram observados os critérios:

1. evolução dos custos acumulados por ciclos da carta de controle;
2. tempo médio entre alarmes falsos;
3. comprimento médio da corrida da carta de controle.

Inicialmente, foi realizado um processo de ajuste dos parâmetros do GA para um balanceamento entre a obtenção dos melhores resultados possíveis e o tempo computacional gasto com cada execução do algoritmo. Após isso, foi realizado um comparativo entre o processo de otimização convencional e a utilização do modelo. No processo de otimização convencional, os dados são coletados uma vez, os parâmetros ótimos são calculados com base em um desvio pré-determinado e o monitoramento é iniciado com esse conjunto de parâmetros. Para esse comparativo, foram simulados os custos de um total de 20 bateladas. No processo tradicional, foram simuladas otimizações com base em um desvio de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0. Assim, as bateladas subsequentes utilizaram os mesmos parâmetros otimizados. Já com a utilização do modelo, os custos foram

otimizados a cada novo início de batelada. Para a determinação do desvio de cada batelada simulada, foi utilizado um valor randômico entre 0 e 3, considerando uma faixa desde sem desvio do alvo até um limite de 3 desvios-padrão.

Após isso, foram realizadas avaliações do desempenho estatístico da carta de controle. Nessa etapa, para fins de simulação do comportamento de processo produtivo, foram utilizados dados históricos de uma empresa que utiliza o processamento contínuo por bateladas. Esses dados não foram apresentados nessa dissertação por motivo de sigilo dos dados, pois são considerados dados estratégicos da empresa. O emprego de tais dados serviu apenas para o estabelecimento do comportamento do monitoramento do processo produtivo quando o mesmo não se encontra sob efeito de qualquer tipo de desvio. As demais informações utilizadas, como a geração de dados desviados do alvo do processo, originaram-se da própria simulação computacional.

Primeiramente, os parâmetros ótimos de operação da carta de controle foram obtidos, com base um processo com desvios de 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0. Cada um dos desvios originou uma análise. Foram realizadas 100 simulações de processo sem desvio do alvo e calculadas as médias da quantia de amostragens e do tempo para a carta emitir um alarme falso. Em seguida, foram repetidas mais 100 simulações com desvio do processo de 0,1 desvios-padrão. Essa análise foi replicada para desvios de 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0. Para todos os casos, a etapa de cálculo das médias também foi repetida. Essas análises visaram a avaliar o comportamento da carta de controle na detecção de pequenos, médios e grandes desvios do processo. Com esses dados, tornou-se possível a construção de gráficos que apresentam a oscilação do poder de detecção das cartas de controle otimizadas de acordo com o desvio monitorado.

3.2.5 Conclusão

No último estágio da DSR - a Conclusão, é comum que ainda existam desvios da proposta inicial, porém mantenham o propósito da solução do problema. Nesse estágio, os resultados devem ser validados e escritos de forma que possam ser divulgados e que possibilite sua generalização visando a contemplar uma determinada classe de problemas (KUECHLER; VAISHNAVI, 2011).

Nessa pesquisa, na etapa de Conclusão, os resultados da pesquisa e as análises a respeito do modelo proposto foram realizadas, trazendo as contribuições para o meio

acadêmico e organizacional. Nessa etapa, foram observados os desvios do planejamento inicial, bem como aprendizados gerados pelo processo de desenvolvimento da pesquisa. Foram abordadas as oportunidades que surgiram no decorrer da pesquisa, que devido à delimitação do tema proposto não puderam ser abordadas aqui.

A etapa de implantação não foi realizada, pois após a avaliação e obtenção do modelo aprimorado, esses foram apresentados em sua versão final, não cabendo aqui sua implantação prática. Nessa pesquisa, realizou-se a proposição do modelo econômica-estatisticamente otimizado do CEP para processos produtivos contínuos por bateladas. Para sua implantação, as empresas devem desenvolver a melhor estratégia corporativa, bem como a implantação da cultura organizacional mais apropriada para cada situação. Dessa forma, contextos de estratégia de implantação e cultura organizacional não fazem parte do escopo dessa pesquisa.

Por fim, como síntese estrutural da implementação do método da DSR, Manson (2006) propôs um *framework* que apresenta os estágios e os *outputs* de cada etapa. Dessa forma, com o objetivo de sintetizar o método de trabalho descrito, a Figura 9 exhibe o *framework* apresentado por Manson (2006) modificado com a inserção do sequenciamento das etapas percorridas na execução dessa pesquisa e, trazendo também, informações auxiliares no desenvolvimento de cada uma das etapas.

Ainda como complemento, para explicitar de forma sucinta os estágios da DSR e seus correspondentes *outputs*, o Quadro 2 foi construído.

Quadro 2: Síntese das etapas de aplicação da DSR

Etapas do Processo	Outputs	Objetivos
Conscientização do Problema	Projetar um modelo para monitorar as características de qualidade do produto com vistas à otimização econômica-estatística	Geral
Sugestão	Análise da literatura disponível identificando os modelos já existentes e estudos correlatos para embasamento do pesquisador na construção do design	1
Desenvolvimento	Construção do mapa conceitual e do modelo	2 e 3
Avaliação	Otimização dos parâmetros do CEP visando a melhor relação custo de operação e poder de detecção	4
Conclusão	Apresentação do modelo proposto para operação do CEP	Geral

Fonte: elaborado pelo autor da pesquisa (2021).

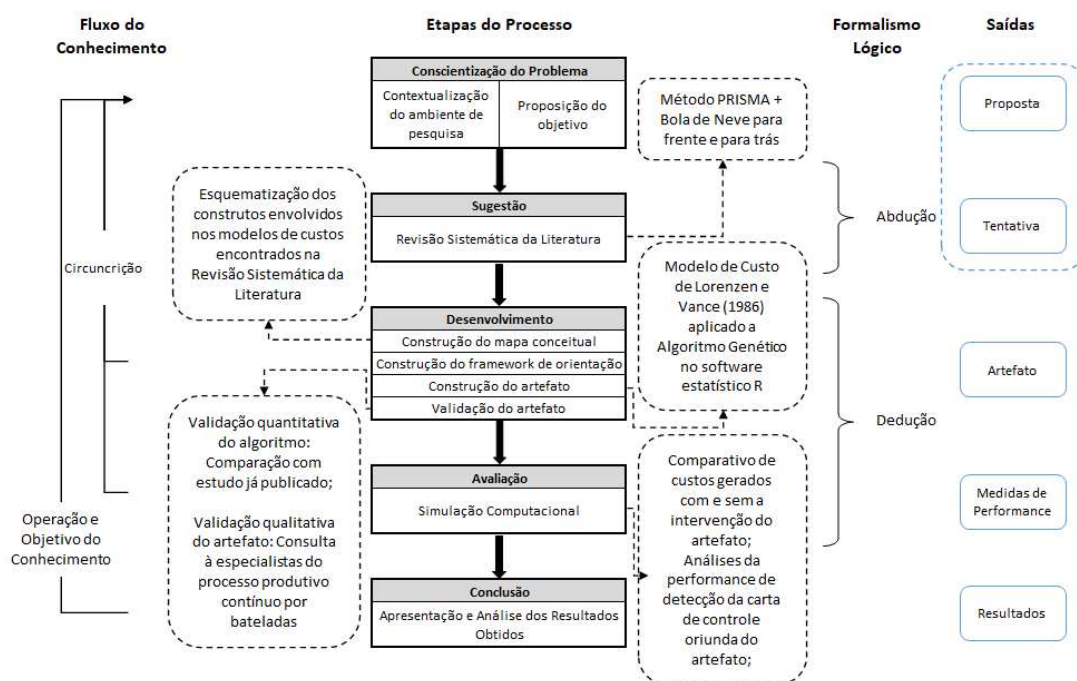


Figura 9: Fluxo das etapas do método de trabalho
 Fonte: adaptado de Manson (2006)

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A observância de aspectos econômicos em todos os ambientes da indústria se torna essencial, dado um cenário de competitividade ampla. Por outro lado, um esforço de racionalização econômica não pode afetar o objetivo primordial de nenhum sistema, processo ou dispositivo. Essa observação é válida também para o CEP, no qual sua função essencial é a de reduzir a variabilidade e tornar previsíveis as saídas do processo produtivo. Contudo, também está cercado de aspectos econômicos ligados diretamente à sua operação e aos resultados de sua intervenção num sistema maior.

Com isso, o emprego de um CEP econômica e estatisticamente otimizado possibilita extrair uma performance aprimorada de sua operação, bem como uma eficiência econômica, tanto de sua operação, quanto nos reflexos de seu resultado. Nesse Capítulo se dá a apresentação dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia detalhada no Capítulo 3. Orientando-se pelas etapas propostas pelo método de pesquisa da DSR, as etapas percorridas no estudo são: conscientização do problema, sugestão, desenvolvimento, avaliação e conclusão.

As etapas de Conscientização do Problema e Sugestão foram cumpridas com a problematização apresentada no Capítulo 1 e análise de estudos correlatos na Seção 4.1, respectivamente. Nesse Capítulo, as seções subsequentes apresentarão a execução das etapas posteriores do método de pesquisa, o Desenvolvimento, a Avaliação e a Conclusão.

4.1 Identificação de estudos correlatos

A identificação de estudos correlatos é parte essencial para o desenvolvimento de uma pesquisa. Uma forma de realizar essa etapa é através da elaboração de uma revisão sistemática da literatura. A partir dela, torna-se possível mapear os achados registrados na literatura da área e embasar a proposição de soluções por parte do pesquisador no problema estudado. Conforme o sequenciamento metodológico e apresentação dos resultados de revisões sistemáticas de literatura, proposto por Moher et al. (2009) através do método PRISMA, inicialmente, são apresentados os quantitativos buscados, assim como os resultados após a aplicação dos critérios de elegibilidade. Com a aplicação das etapas propostas na Seção 3.2.2, o desenvolvimento da busca e seleção do corpus de

artigos seguiu a sequência apresentada na Figura 10.

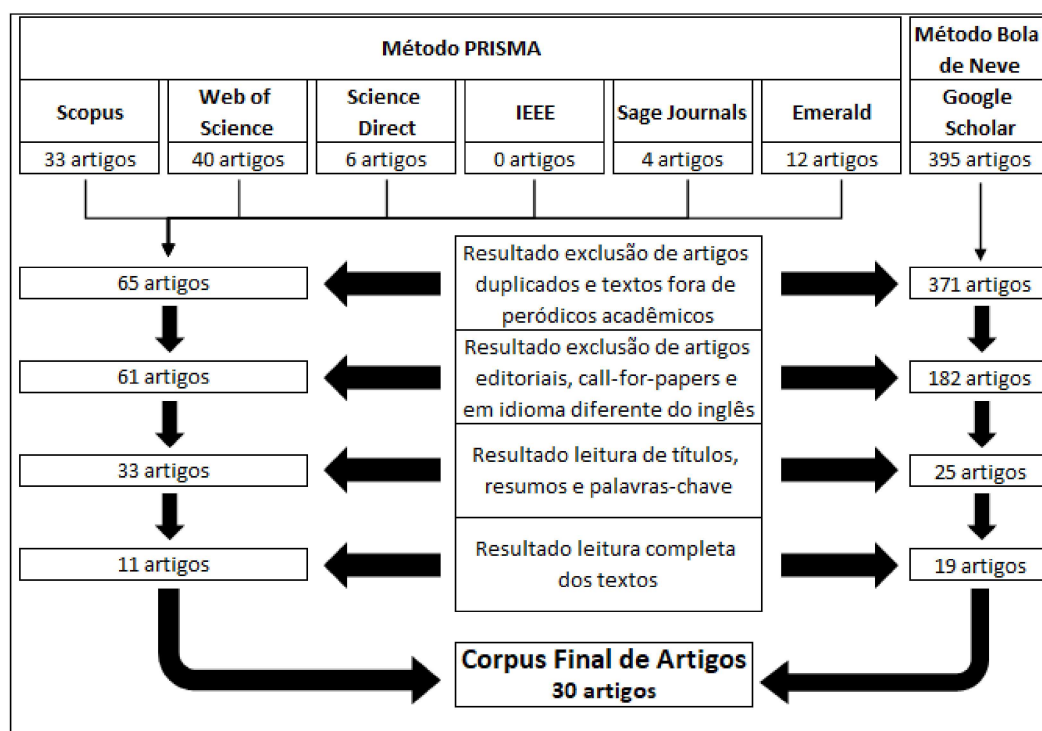


Figura 10: Fluxo de execução da Revisão Sistemática da Literatura
Fonte: elaborado pelo autor (2021)

A busca nas bases de dados ocorreu no dia 03 de agosto de 2020. No total, foram identificados 490 registros de artigos e, após a execução dos filtros se obteve o extrato final de 30 artigos. Assim, procedeu-se com a análise completa e catalogação do corpus de pesquisas que integram o grupo de estudos correlatos. Foram observados dados da origem dos artigos, como ano de publicação e país de origem dos pesquisadores, assim como dados referentes à pesquisa desenvolvida pelos autores de cada artigo, como modelo de custo utilizado, tipo de design proposto e esquema adaptativo utilizado. Inicialmente, o Quadro 3 apresenta os artigos que compõem o corpus final de artigos selecionados.

Analisando os dados do Quadro 3 se observou que o domínio da pesquisa na área é de pesquisadores do Irã, com casos específicos de pesquisadores de Taiwan, Estados Unidos da América (EUA), China, Bélgica, Grécia e Brasil. Quanto à publicação das pesquisas ao longo dos anos, há uma distribuição das publicações nos últimos quinze

Quadro 3: Apresentação do corpus de artigos

Autores	Ano de publicação	País de origem	Local de publicação
Arbabi e Ghahroodi (2014)	2014	Irã	Journal of the Iranian Statistical Society
Bahiraee e Raissi (2014)	2014	Irã	Journal of Industrial Engineering International
Chalaki e Bazdar (2019)	2019	Irã	International Journal of Industrial Engineering
Chen (2007b)	2007	Taiwan	Journal of the Operational Research Society
Chen (2007a)	2007	Taiwan	Expert Systems with Applications
Chen (2009)	2009	Taiwan	Quality and Quantity
Chou, Chen e Chen (2006)	2006	Taiwan	Expert Systems with Applications
Faraz e Seif (2012)	2012	Bélgica e Irã	International Journal of Applied Operational Research
Faraz et al. (2014)	2014	Bélgica, EUA e Brasil	Journal of Statistical Computation and Simulation
Faraz et al. (2012a)	2012	Irã	Quality and Quantity
Faraz et al. (2012b)	2012	Irã	Quality and Quantity
Faraz, Kazemzadeh e Saniga (2010)	2010	Irã e EUA	Journal of Statistical Computation and Simulation
Faraz e Saniga (2011)	2011	Irã e EUA	Quality and Reliability Engineering International
Gu e Tang (2017)	2017	China	Annual International Conference on Management, Economics and Social Development
Katebi, Seif e Faraz (2017)	2017	Irã e Bélgica	Communications in Statistics - Theory and Methods
Li et al. (2011)	2011	Taiwan	IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management
Naderi, Moghadam e Seif (2018)	2018	Irã	Journal of Statistical Computation and Simulation
Nayeri et al. (2007)	2007	Irã	International Conference on Computers and Industrial Engineering
Salmasnia, Abdzadeh e Rahimi (2020)	2020	Irã	Journal of Statistical Computation and Simulation
Salmasnia, Rahimi e Abdzadeh (2019)	2019	Irã	Neural Computing and Applications
Seif (2019)	2019	Irã	Communications in Statistics: Simulation and Computation
Seif et al. (2011b)	2011	Irã, Bélgica e EUA	Journal of Applied Statistics
Seif, Faraz e Sadeghifar (2015)	2015	Irã e Bélgica	Journal of Statistical Computation and Simulation
Seif et al. (2011a)	2011	Irã e Bélgica	Arabian Journal for Science and Engineering
Seif e Sadeghifar (2015)	2015	Irã	Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics
Tasias e Nenes (2019)	2019	Grécia	Quality Technology & Quantitative Management
Torabian e Nazari Aliabadi (2015)	2015	Irã	International Journal of Applied Operational Research
Torabian, Moghadam e Faraz (2010)	2010	Irã	Arabian Journal for Science and Engineering
Zhang, Liu e Tan (2015)	2015	China	IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management
Zhang, Liu e Tan (2017)	2017	China	Communications in Statistics - Theory and Methods

Fonte: elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

anos. Segmentando esse período em frações menores de cinco anos, tem-se uma distribuição de 7 publicações no período de 2006 a 2010. Essa parcela representa 23,33% do total de publicações. Já no intervalo entre os anos 2011 e 2015, ocorreram 14 publicações, representando 46,67% das publicações. Por fim, as 9 publicações restantes foram realizadas no período de 2016 a 2020. Essa última parcela representa 30% das publicações.

Essas informações indicam que o interesse dos pesquisadores por esse tema de pesquisa vem se desenvolvendo no período compreendido, apesar da ascendência das publicações no período 2011-2015. O fato do número de publicações ter diminuído na fração 2016-2020 em comparação ao período anterior pode se atribuir ao constante surgimento de tópicos emergentes na pesquisa acadêmica. Isso faz com que, mesmo tópicos que careçam de mais pesquisas para se consolidarem acabem decrescendo no volume de publicações. Outro ponto a observar é que as publicações estão voltadas para periódicos sobre pesquisa estatística e pesquisa operacional. Quanto às características das pesquisas, o Quadro 4 traz as informações mais relevantes sobre cada proposição de DE ou DEE encontrada.

Analisando os dados que caracterizam as pesquisas, percebe-se um equilíbrio entre as proposições de DE (13) e de DEE (18), com ligeira vantagem para o que abrange ambos os aspectos. Vale destacar que a soma dos dados resulta em 31, divergindo do total de 30 artigos contemplados nessa revisão de literatura. Isso se dá porque a pesquisa de Katebi, Seif e Faraz (2017) fez uma comparação entre os dois tipos de design, conseqüentemente, o mesmo foi contabilizado nas duas categorias. A maior utilização do DEE reforça a necessidade apontada por Saniga (1989) para a combinação dos dois tipos de design, para suprir a carência do DE quando avaliada a incidência de Erros Tipo I e II.

Ainda, sobre as proposições de DE e DEE, cabe a análise de que, na literatura buscada, alguns estudos caracterizados como DEE realizam apenas a otimização de custos, sendo que a parcela do Design Estatístico é tratada como restrição da otimização. Na visão do pesquisador, para ser considerado um DEE o otimizador deveria buscar os valores ótimos tanto no aspecto econômico quanto no aspecto estatístico. Contudo, para fins de padronização da literatura acerca do tópico, essa pesquisa utiliza a mesma definição dos demais estudos já publicados, considerando como DEE mesmo os otimizadores que incluem os aspectos estatísticos como restrições.

Quando os esquemas adaptativos são analisados, há maior utilização do esquema VSI, com 10 aplicações. Isso pode ser devido à maior simplicidade de operação, mesmo com pesquisas como a de Faraz e Parsian (2006) apontando que o esquema adaptativo DWL (que tem 5 aplicações) possui uma vantagem de desempenho sobre o esquema VSI. Os outros esquemas adaptativos foram utilizados em 3 estudos cada um.

Observando as escolhas do Mecanismo de Falhas do Processo dos estudos, a dis-

Quadro 4: Principais características dos estudos correlatos

Artigo	Design Proposto	Esquema Adaptativo	Mecanismo de Falha do Processo	Função Objetivo ¹	Método de Otimização ²
Arbabi e Ghahroodi (2014)	DE	VSSC	Exponencial	Custo	GA
Bahiraee e Raissi (2014)	DE	VSSC	Exponencial	Custo	GA
Chalaki e Bazdar (2019)	DE	VSI	Exponencial	Custo	GA
Chen (2007b)	DE	VP	Exponencial	Custo	GA
Chen (2007a)	DE	VSI	Exponencial	Custo	GA
Chen (2009)	DE	VSSI	Exponencial	Custo	GA
Chou, Chen e Chen (2006)	DE	VSI	Exponencial	Custo	GA
Faraz e Seif (2012)	DEE	VSI	Exponencial	Custo	GA
Faraz et al. (2014)	DEE	VP	Exponencial	Custo e β	MOGA
Faraz et al. (2012a)	DE	DWL	Exponencial	Custo	GA
Faraz et al. (2012b)	DE	DWL	Exponencial	Custo	GA
Faraz, Kazemzadeh e Saniga (2010)	DEE	VSS	Exponencial	Custo	GA
Faraz e Saniga (2011)	DEE	DWL	Exponencial	Custo	GA
Gu e Tang (2017)	DE	VSSI	Exponencial	Custo	GA
Katebi, Seif e Faraz (2017)	DE e DEE	VSSI	Exponencial	Custo	GA
Li et al. (2011)	DE	VSI	Gamma	Custo	GA
Naderi, Moghadam e Seif (2018)	DEE	VSI	Weibull	Custo	GA
Nayeri et al. (2007)	DEE	VSI	Gamma	Custo	Não especificado
Salmasnia, Abdzadeh e Rahimi (2020)	DEE	DWL	Exponencial	Custo, α e β	GA
Salmasnia, Rahimi e Abdzadeh (2019)	DEE	DWL	Exponencial	Custo, α e β	NSGA-II + DEA
Seif (2019)	DEE	VSS	Exponencial	Custo	GA
Seif et al. (2011b)	DEE	VSSC	Exponencial	Custo	GA
Seif, Faraz e Sadeghifar (2015)	DEE	VSI	Exponencial	Custo e β	NSGA-II
Seif et al. (2011a)	DEE	VSSC	Exponencial	Custo	GA
Seif e Sadeghifar (2015)	DEE	VSI	Exponencial	Custo e β	NSGA-II
Tasias e Nenes (2019)	DEE	VP	Exponencial	Custo	Não especificado
Torabian e Nazari Aliabadi (2015)	DEE	VSI	Exponencial	Custo	GA
Torabian, Moghadam e Faraz (2010)	DEE	VSICL	Exponencial	Custo	GA
Zhang, Liu e Tan (2015)	DEE	VSICL	Exponencial	Custo	SMC
Zhang, Liu e Tan (2017)	DE	VSICL	Exponencial	Custo	ACS

Legenda: 1) Função Objetivo - α : corresponde ao Erro Estatístico do Tipo I; β : corresponde ao Erro Estatístico do Tipo II; 2) Métodos de Otimização e Seleção - GA: Algoritmo Genético; MOGA: Algoritmo Genético Multi-Objetivo; NSGA-II: Algoritmo Genético de Classificação Não-Dominado; DEA - Análise Envoltória de Dados; SMC: Simulação de Monte Carlo; ACS: Algoritmo Cuckoo Search.

Fonte: elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

tribuição de probabilidade exponencial é amplamente utilizada (27 aplicações), contra apenas dois estudos utilizando a distribuição Gamma e um utilizando a distribuição Weibull. A decisão de qual distribuição de falhas será utilizada pode refletir características do processo no qual a otimização foi implantada. Porém, nenhum dos artigos caracteriza o tipo de processo em que o seu estudo foi realizado, havendo poucos casos que utilizam uma distribuição de falhas diferente da exponencial.

Outra escolha comum é na função objetivo. Em artigos onde o DE é proposto, espera-se que a função objetivo seja minimizar custos. Porém, observa-se que, mesmo

em artigos em que o DEE foi a alternativa escolhida, a minimização de custos foi a função objetivo mais escolhida, com poucas exceções em que foram adicionadas funções para minimizar os erros estatísticos. Para os casos de DEE em que a opção adotada foi apenas minimizar custos, os erros estatísticos são inseridos na forma de restrições, com predefinição de taxas máximas de erro aceitável.

Avaliando os métodos utilizados na otimização, o uso de Algoritmo Genético é dominante, com poucas exceções nos artigos analisados. Isso pode ser porque o problema de otimização construído para DE é geralmente um problema complexo que envolve variáveis de decisão contínuas e discretas em um espaço de solução não-convexo Torabian, Moghadam e Faraz (2010). Portanto, deve-se optar pelo uso de metaheurísticas, caso em que o Algoritmo Genético é uma das técnicas mais difundidas.

Por fim, analisando o corpus final de artigos dessa revisão sistemática da literatura, observa-se a ausência de significativas inovações no desenvolvimento dos estudos. Percebem-se apenas alterações incrementais diferenciando as pesquisas, sendo que há pesquisas extremamente semelhantes quando observadas as características principais do estudo conduzido.

Outro ponto observado é que, de modo geral, os estudos não apresentam o cenário ou tipo de processo ao qual se está atuando. Dos 30 artigos analisados na RSL, apenas 8 deles detalham que utilizaram como fonte de informação uma base de dados oriunda da operação de fundição da General Motors. Contudo, mesmo trazendo esta informação, o desenvolvimento das pesquisas prosseguiu da mesma forma que as demais que não apresentaram o seu processo produtivo. Ou seja, nenhum tipo de característica do processo produtivo foi inserido no modelo de otimização. Essa é uma informação que poderia contribuir para a aproximação da pesquisa com o ambiente da prática na indústria, o que pode propiciar uma maior atratividade da utilização de pesquisas acadêmicas no meio empresarial, ampliando ainda mais a relevância do estudo desenvolvido.

A parte essencial da proposta de DE ou DEE de uma carta de controle é o modelo de custo empregado. Nos 30 artigos analisados, identificou-se a utilização de onze modelos diferentes, sem considerar modificações e/ou extensões. Contudo, analisando-os em sua essência, percebeu-se que esses onze modelos de custos se originaram a partir de oito modelos. O Quadro 5 apresenta os modelos de custos identificados no corpus do artigo.

Os modelos de custo mais utilizados foram o modelo de Costa e Rahim (2001), com onze aplicações, e o modelo de Lorenzen e Vance (1986) com oito aplicações. Anali-

Quadro 5: Modelos de custo identificados

Artigo	Modelo de Custo Utilizado
Arbabi e Ghahreedi (2014)	Costa e Rahim (2001)
Bahiraee e Raissi (2014)	Extensão de Duncan (1956)
Chalaki e Bazdar (2019)	Extensão de Costa e Rahim (2001)
Chen (2007b)	Costa e Rahim (2001)*
Chen (2007a)	Costa e Rahim (2001)*
Chen (2009)	Extensão de Costa e Rahim (2001)
Chou, Chen e Chen (2006)	Modificação de Montgomery e Klatt (1972)
Faraz e Seif (2012)	Modificação de Lorenzen e Vance (1986)
Faraz et al. (2014)	Lorenzen e Vance (1986)
Faraz et al. (2012a)	Costa e Rahim (2001)
Faraz et al. (2012b)	Costa e Rahim (2001)
Faraz, Kazemzadeh e Saniga (2010)	Lorenzen e Vance (1986)
Faraz e Saniga (2011)	Lorenzen e Vance (1986)
Gu e Tang (2017)	De Magalhães e Costa (2005)
Katebi, Seif e Faraz (2017)	Costa e Rahim (2001)
Li et al. (2011)	Rahim e Banerjee (1993)
Naderi, Moghadam e Seif (2018)	Extensão de Chen e Yang (2002)
Nayeri et al. (2007)	Rahim e Banerjee (1993)
Salmasnia, Abdzadeh e Rahimi (2020)	Modelo Próprio
Salmasnia, Rahimi e Abdzadeh (2019)	Lorenzen e Vance (1986)
Seif (2019)	Lorenzen e Vance (1986)
Seif et al. (2011b)	Lorenzen e Vance (1986)
Seif, Faraz e Sadeghifar (2015)	Bai e Lee (1998)
Seif et al. (2011a)	Costa e Rahim (2001)
Seif e Sadeghifar (2015)	Costa e Rahim (2001)
Tasias e Nenes (2019)	Extensão de Nenes (2011)*
Torabian e Nazari Aliabadi (2015)	Lorenzen e Vance (1986)
Torabian, Moghadam e Faraz (2010)	Costa e Rahim (2001)
Zhang, Liu e Tan (2015)	Nenes (2013)*
Zhang, Liu e Tan (2017)	Nenes (2013)

Legenda: Artigos assinalados com * não indicaram claramente no texto qual modelo de custo foi empregado, no entanto, as características apresentadas indicam o uso desse modelo de custo.

Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

sando as características dos oito modelos essenciais identificados a partir do Quadro 5, é possível elencar algumas considerações sobre cada um deles.

O modelo de custo desenvolvido por Duncan (1956) é considerado o primeiro modelo para a proposição de DE para cartas de controle. Esse modelo foi inicialmente apresentado em uma carta de controle \bar{X} de Shewhart com parâmetros fixos (FP). O mecanismo de falha do processo adotado nesse modelo seguiu uma distribuição de probabilidade exponencial. Como premissas do modelo, é possível identificar a ocorrência de apenas uma causa atribuível e a manutenção do funcionamento do processo durante as buscas por causas assinaláveis. Ao observar a equação que define o modelo, a função de perda a ser minimizada consiste na diferença de ganhos com o processo sob controle e ganhos com o processo fora de controle, acrescido do custo de alarmes falsos, custos de reparo de alarmes verdadeiros e custos de amostragem. Os elementos referentes aos

tempos de ciclo da carta de controle são inseridos nos fatores da equação.

O modelo de custo apresentado por Montgomery e Klatt (1972) é uma extensão para a carta de controle T^2 de Hotelling do modelo original de Knappenberger e Grandage (1969), que por sua vez foi desenvolvido para uma carta de controle \bar{X} de Shewhart. Dessa forma, as características dos modelos são as mesmas. Ambos os estudos utilizaram suas cartas de controle com parâmetros fixos (FP) e o mecanismo de falha do processo seguindo uma distribuição exponencial. Quanto às premissas, os dois estudos assumem a ocorrência de apenas uma causa assinalável por ciclo da carta de controle. Contudo, não deixam clara a manutenção ou interrupção do processo durante as buscas por alarmes verdadeiros. Analisando a função perda a ser minimizada, essa considera os custos de amostragem por unidade produzida, os custos de detecção e remoção de causas assinaláveis e o custo de produção de defeitos. Os fatores do modelo sempre se referem a um custo por unidade produzida, não apresentando, portanto, uma equação de tempo de ciclo da carta de controle.

O modelo de custo apresentado por Bai e Lee (1998) foi desenvolvido para uma carta de controle \bar{X} de Shewhart utilizando um esquema adaptativo VSI. Sua construção foi inspirada no modelo de custo apresentado por Chiu (1975) para uma carta de controle np . Ambos os modelos assumem que o mecanismo de falha do processo segue uma distribuição exponencial, com a ocorrência de apenas uma causa assinalável por ciclo da carta de controle e, no momento da busca por uma causa assinalável, o processo é interrompido. Outra semelhança entre os estudos é o uso da mesma equação do tempo de ciclo da carta de controle. Ambos consideram a soma do tempo de operação sob controle, o tempo de operação fora de controle, o tempo de busca de alarmes falsos e o tempo de busca e reparo de um alarme verdadeiro.

Todavia, ao analisar a equação de perda, existem diferenças nas abordagens. O modelo de custo de Bai e Lee (1998) considera a soma dos custos de alarmes falsos, o custo de detecção e reparo de alarmes verdadeiros, o custo de produção no estado fora de controle e o custo de amostragem. Para esse modelo, a função objetivo é minimizar a razão entre o custo total e o tempo de ciclo total da carta de controle. No modelo de custo de Chiu (1975), a equação de custo consiste na soma dos ganhos do processo no estado sob controle e fora de controle. Dessa soma, são subtraídos os custos da operação sob controle, os custos de busca e reparo de uma causa assinalável e o custo de amostragem. Assim, esse modelo tem como função objetivo minimizar a diferença

entre os ganhos com o processo sob controle e a divisão do custo total do ciclo pelo tempo total do ciclo da carta de controle.

Por sua vez, o modelo de custo de Lorenzen e Vance (1986) é considerado um dos primeiros modelos de custos generalizados, ou seja, algumas premissas que devem ser assumidas no desenvolvimento de um DE estão contempladas na função perda proposta, partindo do usuário a decisão de como premissas devem ser assumidas. Esse modelo generalizado foi inicialmente desenvolvido para as cartas de controle \bar{X} , p e u , com um mecanismo de falha do processo seguindo uma distribuição exponencial. Quanto às premissas, o modelo assume apenas que pode haver somente uma causa assinalável. Por outro lado, o modelo deixa em aberto para a decisão do usuário se o processo será interrompido ou não durante a busca por alarmes e se o processo será interrompido ou não durante o reparo de alarmes verdadeiros.

Além disso, a função de perda consiste em minimizar a divisão do custo total do ciclo pelo tempo total do ciclo. Na equação do custo total do ciclo, há a soma dos custos das não-conformidades geradas com o processo em controle, o custo das não-conformidades geradas com o processo fora de controle, os custos de alarmes falsos, custos de amostragem e os custos de busca e reparo de alarmes verdadeiros. A equação do tempo total do ciclo da carta de controle considera o tempo operacional sob controle mais o tempo operacional fora de controle, o tempo de busca de alarmes falsos, o tempo de amostragem e plotagem da carta e a detecção e reparo de um alarme verdadeiro.

Vale ressaltar que o DE proposto por Gu e Tang (2017) menciona a utilização do modelo de custos proposto por De Magalhães e Costa (2005). Porém, a pesquisa de De Magalhães e Costa (2005) apenas realiza a aplicação do modelo de custo de Lorenzen e Vance (1986), não configurando propriamente um novo modelo de custo.

O modelo de custo citado como de autoria de Rahim e Banerjee (1993) é uma extensão e generalização do modelo de custo de Banerjee e Rahim (1988). Ambos os modelos foram desenvolvidos em cartas de controle \bar{X} de Shewhart. Um diferencial do modelo desenvolvido pelos autores em 1993 é a utilização de um mecanismo de falha do processo seguindo as distribuições de probabilidade Gamma e Weibull, também conhecidas como distribuições não-Markovianas, e não apenas a distribuição de probabilidade Weibull, utilizada no estudo de 1988. Como premissas, o modelo de custo assume a possibilidade de ocorrência de apenas uma causa assinalável, bem como assume que o processo seja interrompido durante a busca de alarmes verdadeiros. Seguindo con-

forme outros modelos já apresentados, a função perda desse modelo de custo consiste em minimizar a divisão do custo total do ciclo pelo tempo total do ciclo da carta de controle. A equação de tempo também reúne elementos comuns às demais já apresentadas, consistindo na soma do tempo de operação sob controle, o tempo de busca de alarmes falsos e o tempo de busca e reparo de alarmes verdadeiros.

O diferencial desse modelo é a equação do custo total do ciclo da carta de controle. Pelo mecanismo de falha do processo seguir uma distribuição de probabilidade não-Markoviana, considera-se que o fim do ciclo da carta de controle ocorre após o reparo de uma causa assinalável ou no momento em que a produção atinge uma determinada quantidade de produtos. Nesse caso, o processo é submetido a um reparo ao final de cada ciclo. Assim, a equação de custo seguida por esse modelo traz a soma do custo da operação sob controle, o custo da operação fora de controle, o custo de alarmes falsos, o custo de amostragem e o custo de reparo (sendo esse o reparo no final da produção de determinada quantidade ou por busca de causa assinalável), deduzido do valor residual do equipamento substituído no reparo de final de ciclo.

Por sua vez, o modelo de custo desenvolvido por Chen e Yang (2002) também foi inspirado no modelo de Banerjee e Rahim (1988), com o diferencial que o modelo aceita a ocorrência de n causas assinaláveis, ao invés de apenas um como no modelo original. Outra mudança é o fato do modelo de Chen e Yang (2002) não considerar a dedução do valor residual do equipamento ao final do ciclo da carta de controle. As demais premissas e equações seguem o modelo de inspiração de Banerjee e Rahim (1988).

O modelo de custo apresentado por Costa e Rahim (2001) foi originalmente desenvolvido para uma carta de controle \bar{X} de Shewhart com esquema adaptativo VP e mecanismo de falha do processo seguindo distribuição de probabilidade exponencial. As premissas do funcionamento do modelo são a ocorrência de apenas uma causa assinalável e o desligamento do processo durante a busca por um alarme verdadeiro. Ao observar as equações que definem o modelo, a função perda consiste em minimizar a diferença entre o lucro obtido por hora do processo sob controle, e a divisão do lucro total do ciclo pelo tempo de ciclo da carta de controle. Na equação do lucro total do ciclo, existe a soma dos lucros do processo sob controle e fora de controle menos os custos de amostragem, alarmes falsos e busca e reparo de causas assinaláveis. A equação do tempo de ciclo considera o período sob controle acrescido do tempo de busca de alarmes falsos e o tempo de busca e reparo de alarmes verdadeiros.

O modelo de custo citado como de autoria de Nenes (2013), é uma replicação do modelo originalmente desenvolvido pelo mesmo autor em (NENES, 2011), enquanto que a pesquisa de Tacias e Nenes (2019) apresenta uma extensão desse modelo de custo com causas assinaláveis alterando o vetor médio do processo e também a matriz de covariância. Esse modelo de custo, (NENES, 2011), foi originalmente desenvolvido para cartas de controle \bar{X} , CUSUM e EWMA com esquemas adaptativos VP e com um mecanismo de falha do processo seguindo uma distribuição exponencial. Como premissas para a operação, o modelo de custo assume que podem haver duas causas assinaláveis por ciclo ($+\sigma$ ou $-\sigma$). No que diz respeito à manutenção ou não do funcionamento do processo durante as buscas por causas assinaláveis, o modelo cobre ambas as situações, cabendo ao usuário do modelo a decisão.

Como função de perda a ser minimizada, o custo total do ciclo da carta de controle é dividido pelo tempo total do ciclo. A equação de custo considera a soma dos custos fixos de amostragem, custos variáveis de amostragem (multiplicados pela probabilidade de tamanhos de amostra), custos de operação fora de controle, custos de alarmes falsos e custos de busca e reparo de alarmes verdadeiros. Na equação para o tempo total de ciclo da carta de controle, o modelo de Nenes (2011) considera a soma dos tempos dos intervalos de amostragem (multiplicados pelas probabilidades dos estados transientes da cadeia de Markov), do tempo de busca de alarmes falsos e o tempo de busca e reparo de alarmes verdadeiros.

O modelo de custo desenvolvido em Salmasnia, Abdzadeh e Rahimi (2020) não indicou suas referências ou inspirações e suas características não foram associadas a nenhum dos modelos previamente caracterizados, por isso foi considerado como de autoria própria. Esse modelo foi utilizado com a aplicação em uma carta de controle T^2 de Hotelling com esquema adaptativo DWL, seguindo um mecanismo de falha do processo sob distribuição de probabilidade exponencial. O modelo, diferentemente dos demais, integra conceitos de Monitoramento Estatístico de Processos e Manutenção Preventiva/Corretiva. O modelo assume como premissas de funcionamento a possibilidade de ocorrência de múltiplas causas atribuíveis e a interrupção do processo durante as buscas das causas assinaláveis e os reparos/manutenções realizados.

Observando a função perda do modelo, ela consiste em minimizar o custo total do ciclo, além de funções objetivo para maximizar o Tempo Médio Entre Alarmes Falsos (MTBFA) e minimizar o Tempo Médio Ajustado para Sinalizar (AATS). A equação de

custo inclui a soma dos custos de amostragem, manutenção (preventiva ou corretiva), operação fora de controle e alarmes falsos. Vale ressaltar que o modelo não utiliza uma equação para calcular o tempo total do ciclo da carta de controle, minimizando o custo total por ciclo do carta de controle, ao contrário do custo por unidade de tempo como outros modelos já mencionados.

Ao final da análise dos modelos de custo dessa revisão, é possível destacar algumas características comuns entre vários modelos. Existem diversas semelhanças nas equações do tempo de ciclo de cada modelo. Elementos como tempo de operação sob controle, tempo de operação fora de controle, tempo de busca de alarmes falsos e tempo de busca e reparo de alarmes verdadeiros são fatores comuns a vários modelos apresentados. Nas equações do custo total do ciclo, também existem elementos comuns, como custos de amostragem, custos de busca de alarmes falsos e custos de reparo de alarmes verdadeiros. Porém, na equação do custo total, também existem diferenças entre os modelos analisados, sendo que alguns modelos contabilizam os ganhos da operação, outros contabilizam as perdas da operação fora de controle, entre outras diferenças.

Dessa forma, cabe ao usuário selecionar o modelo mais adequado ao cenário em que se pretende propor o DE ou DEE. Vale destacar também que existem outros modelos de custo para a proposição do DE, que não foram analisados nessa revisão, uma vez que essa revisão sistemática se limitou a analisar apenas as proposições de DE nas cartas de controle T^2 de Hotelling com algum tipo de esquema adaptativo. A aplicação da carta com os parâmetros fixos foi desconsiderada, devido à baixa eficiência na detecção de médias e pequenas variações no vetor médio do processo. Essa limitação imposta nessa análise de estudos correlatos visou focalizar a busca por soluções se sejam adequadas ao ambiente estabelecido e que atendam o propósito dessa dissertação. Visando a sintetizar os principais elementos identificados nos modelos de custo essenciais analisados anteriormente, o Quadro 6 é apresentado.

Com base no Quadro 6, é possível identificar as principais características de cada um. A síntese dessas informações permitiu a construção de um mapa conceitual acerca do tópico, que é apresentado na próxima subseção.

Quadro 6: Síntese das características dos modelos de custos identificados

Origem do Modelo de Custo	Carta de controle original	Mecanismo de Falha do Processo	Identificação de Causas Especiais	Funcionamento do processo durante as buscas
Duncan (1956)	\bar{X}	Exponencial	Somente uma causa especial	Sim
Knappenberger e Grandage (1969)	\bar{X}	Exponencial	Somente uma causa especial	Não deixa claro
Chiu (1975)	np	Exponencial	Somente uma causa especial	Não
Lorenzen e Vance (1986)	\bar{X}, p e u	Exponencial	Somente uma causa especial	Opcional
Banerjee e Rahim (1988)	\bar{X}	Weibull	Somente uma causa especial	Não
Costa e Rahim (2001)	\bar{X} com esquema adaptativo VP	Exponencial	Somente uma causa especial	Não
Nenes (2011)	\bar{X} , CUSUM e EWMA com esquema adaptativo VP	Exponencial	Duas causas especiais: $+\sigma$ ou $-\sigma$	Opcional
Salmasnia, Abdzadeh e Rahimi (2020)	T^2 com esquema adaptativo DWL	Exponencial	Múltiplas causas especiais	Não

Continua na próxima página...

Continuação da página anterior...

Origem do Modelo de Custo	Função de Otimização	Equação de Custos	Equação de Tempo
Duncan (1956)	Ganhos do processo sob controle - Ganhos do processo fora de controle + Custo de Alarmes Falsos + Custo de Amostragens + Custo de Reparo de Alarmes	A própria função de otimização	N/A
Knappenberger e Grandage (1969)	Custo de produção de defeitos + Custo de Amostragem por unidade produzida + Custo de detecção e remoção de causas especiais	A própria função de otimização	N/A
Chiu (1975)	Ganhos do processo sob controle - Equação de Custos / Equação de Tempo	Ganhos do processo sob controle + Ganhos do processo fora de controle - Custo de operação sob controle - Custo de Amostragem - Custo de Busca e reparo de causas especiais	Tempo de operação sob controle + Tempo de operação fora de controle + Tempo de Buscas de Alarmes + Tempo de Reparo de causa especial
Lorenzen e Vance (1986)	Equação de Custos / Equação de Tempo	Custo das não-conformidades geradas com o processo sob controle e fora de controle + Custo de alarmes falsos + Custo de amostragem + Custo de Buscas e Reparo de causas especiais	Tempo de operação sob controle + Tempo de operação fora de controle + Tempo de buscas de Alarmes + Tempo de amostragem e plotagem + Tempo de reparo de causa especial
Banerjee e Rahim (1988)	Equação de Custos / Equação de Tempo	Custo de operação sob controle e fora de controle + Custo de alarmes falsos + Custo de amostragem + Custo de reparo - Valor residual do equipamento substituído	Tempo de operação sob controle + tempo de busca de alarmes + Tempo de reparo de causas especiais
Costa e Rahim (2001)	Lucro por hora do processo sob controle - Equação de Custos / Equação de Tempo	Lucros do processo sob controle e fora de controle - Custo de amostragem - Custo de alarmes falsos - Custo de busca e reparo de causa especial	Tempo de operação sob controle + tempo de busca de alarmes + Tempo de reparo de causas especiais
Nenes (2011)	Equação de Custos / Equação de Tempo	Custos fixos de amostragem + Custo variável de amostragem \times probabilidade dos tamanhos amostrais + custo de operação fora de controle + custo de alarmes falsos + custo de busca e reparo de causas especiais	Tempos dos intervalos entre coletas \times probabilidades dos estados transientes da cadeia de Markov + Tempo de busca de alarmes + tempo de reparo de causas especiais
Salmasnia, Abdzadeh e Rahimi (2020)	Custo de operação fora de controle + Custo de amostragem + Custo de manutenção (preventiva ou corretiva) + Custo de alarmes falsos	A própria função de otimização	N/A

Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

4.1.1 Mapa conceitual dos modelos de custos

Com o embasamento construído acerca dos modelos de custos empregados nas proposições de DE e DEE, pode-se sintetizar suas principais características em um mapa conceitual. A Figura 11 apresenta o mapa conceitual elaborado.

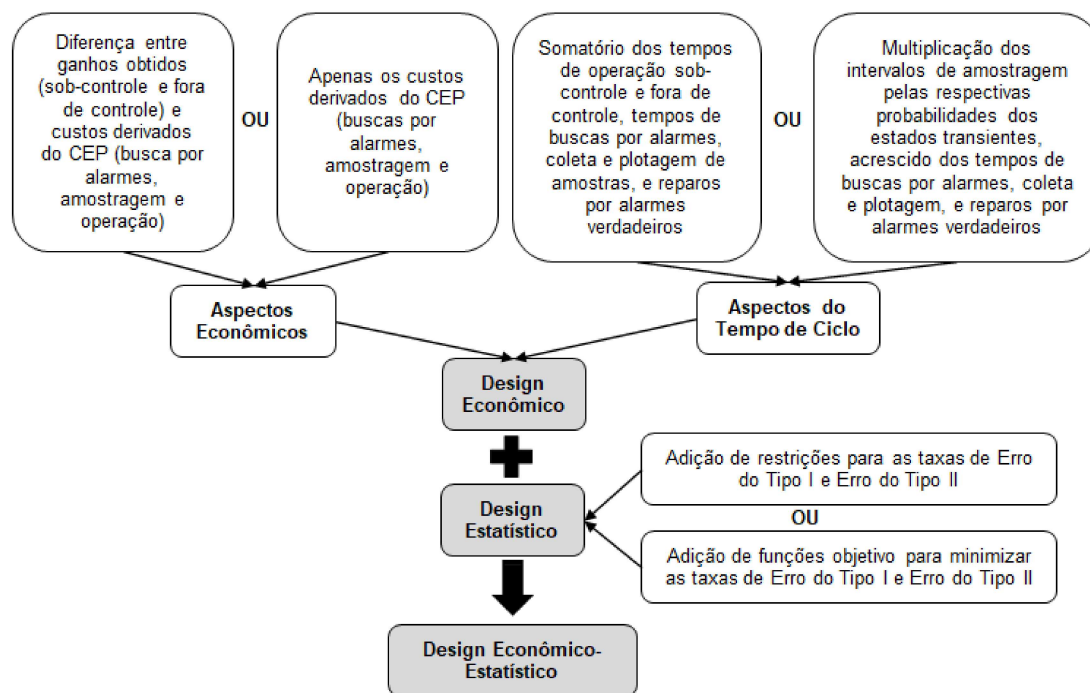


Figura 11: Mapa conceitual para proposição ou escolha de um modelo de custos

Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

A Figura 11 apresenta os principais tópicos a serem observados na escolha ou desenvolvimento de um modelo de custos para proposição de DE ou DEE. A análise de estudos correlatos elaborada anteriormente permitiu o reconhecimento de padrões entre os modelos de custos identificados. No lado esquerdo do mapa, encontram-se os aspectos econômicos a serem observados. Dentre os modelos de custos identificados, os aspectos econômicos mais observados são o levantamento geral dos custos que envolvem a operacionalização do CEP. Elementos como os custos de amostragem, buscas por alarmes e reparos se encontram em praticamente todos os modelos de custo, o que torna essencial o seu levantamento em um estudo de proposição de DE ou DEE. Outros

fatores como os ganhos obtidos com o processo sob-controle e fora de controle também são percebidos nos modelos, porém em menor frequência.

Já no lado direito do mapa, pode-se observar os aspectos do tempo de ciclo da carta de controle. Dentre os aspectos mais comumente encontrados em modelos de custos está o somatório de todos os tempos que transcorrem durante um ciclo da carta de controle. Nesse âmbito, encontram-se informações como o tempo de operação com o processo sob controle e o tempo de operação com o processo fora de controle. Grande parte dos modelos de custo identificados também considerava os tempos de buscas por alarmes, análise e plotagem das amostragens e o tempo de reparo de uma causa assinalável. Esses últimos são frequentemente associados a premissas que o pesquisador deve optar no início de um estudo de proposição de DE ou DEE, como determinar se o processo é interrompido ou não durante buscas por alarmes.

Há também alguns modelos de custo que analisam o tempo de ciclo da carta de controle através dos intervalos entre coletas amostrais, multiplicados pela probabilidade de operação nos estados transientes da Cadeia de Markov. Entretanto, a utilização do conceito da Cadeia de Markov se apresentou restrita a processos que adotam como mecanismo de falha do processo uma distribuição de probabilidade Markoviana, como a exponencial, por exemplo (COSTA; RAHIM, 2001). Processos que utilizam distribuições de probabilidade não-Markovianas, como a distribuição Gamma e Weibull, não foram identificados na literatura aplicando o conceito da Cadeia de Markov. Há, ainda, alguns modelos pontuais que não realizam o cálculo do tempo de ciclo da carta de controle. Nesses casos, o custo final em uma proposição de DE ou DEE não se dá em custo por tempo, e sim em custo por ciclo. Contudo, essa abordagem pode distorcer um monitoramento para processos de melhoria contínua, pois a oscilação do tempo do ciclo da carta de controle pode afetar indicadores de desempenho.

Com a junção dos aspectos econômicos e os aspectos do tempo de ciclo da carta de controle, ao centro, tem-se a proposição do DE, com o objetivo de minimizar os custos decorrentes da operação e dos reflexos do CEP. Todavia, conforme apontado por Saniga (1989), a proposição de uma otimização puramente econômica pode afetar níveis de desempenho estatístico das cartas de controle.

Dessa forma, em um segundo passo, na parte inferior do mapa conceitual, ocorre a inserção do Design Estatístico. A incorporação desse pode ocorrer de duas formas. A primeira pode ocorrer com a utilização de restrições para as taxas de Erro do Tipo I e

Erro do Tipo II acopladas à função objetivo de minimização dos custos. Normalmente, os erros estatísticos são representados por indicadores, como o ANF e o AATS. Nesse cenário, a taxa máxima aceitável dos erros deve ser informada previamente para que a solução se adéque às restrições.

Uma segunda forma de utilizar o Design Estatístico incorporado ao DE é através da utilização de funções objetivo, para um ou para os dois erros estatísticos. Nesse formato, o problema de otimização passa a ser multiobjetivo, sendo uma função objetivo para a minimização de custos, acrescido de uma ou duas outras funções objetivo contemplando os erros estatísticos. Com esse modo de aplicação do design estatístico, os valores referentes aos erros estatísticos não são pré-determinados, o modelo de otimização irá otimizá-los em paralelo ao custo do CEP.

Com isso, na parte inferior do mapa conceitual se tem a união do DE com o design estatístico, formando a proposição de um DEE. A junção desses dois conceitos de otimização do CEP atende, primeiramente, à função essencial do CEP, o monitoramento do processo visando à redução sistemática de sua variabilidade. E também atende a requisitos de competitividade das organizações, os custos despendidos no processo produtivo.

4.2 Construção do artefato

O processo produtivo alvo do modelo da pesquisa é o processo contínuo por bateladas, configurado como um processo por bateladas, mas que ao dar início a uma batelada não pode ser interrompido, adotando características de um processo contínuo. Assim, consolidando os dados obtidos acerca do problema de pesquisa, o contexto do processo produtivo e a base conceitual fornecida pela literatura, deve-se projetar o artefato que atenda os objetivos propostos. O *software* escolhido para operacionalizar a construção do modelo foi o *software* estatístico R. Para organização da construção do modelo, inicialmente, foi construído o *framework* de orientação, que é apresentado na Figura 12.

O *framework* da Figura 12 reúne as principais informações acerca dos grupos que podem influenciar na construção do artefato. As informações são agrupadas em informações oriundas da carta de controle, do modelo de custo, do processo produtivo e da heurística de otimização. Também são apresentadas relações de características que impactam em outras de diferentes grupos.

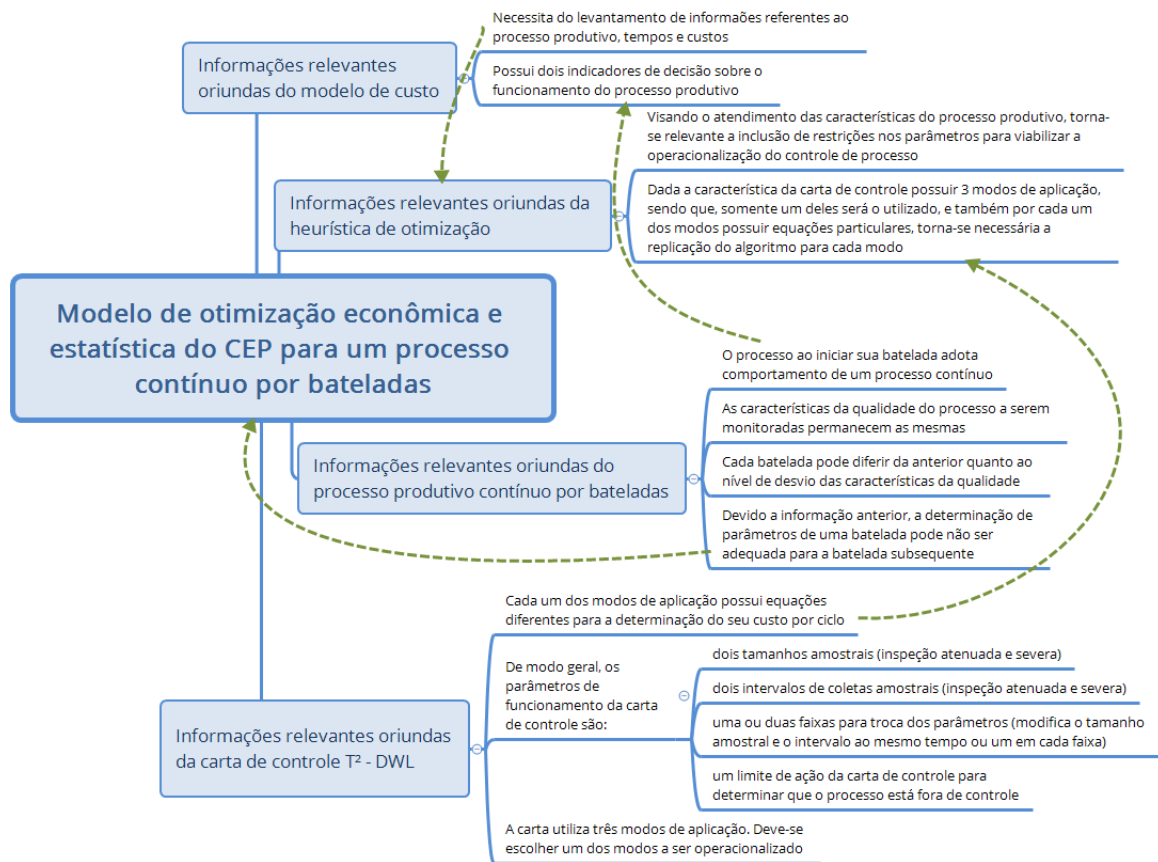


Figura 12: *Framework* de orientação do artefato
 Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

Assim, levando em consideração as informações contidas no *framework* de orientação, no levantamento bibliográfico realizado nessa pesquisa e as observações acerca do processo produtivo, tem-se a proposição de resultado final dessa pesquisa. A Figura 13 apresenta o modelo de otimização de custos e desempenho estatístico para o CEP em uma operação de processamento contínuo por bateladas.

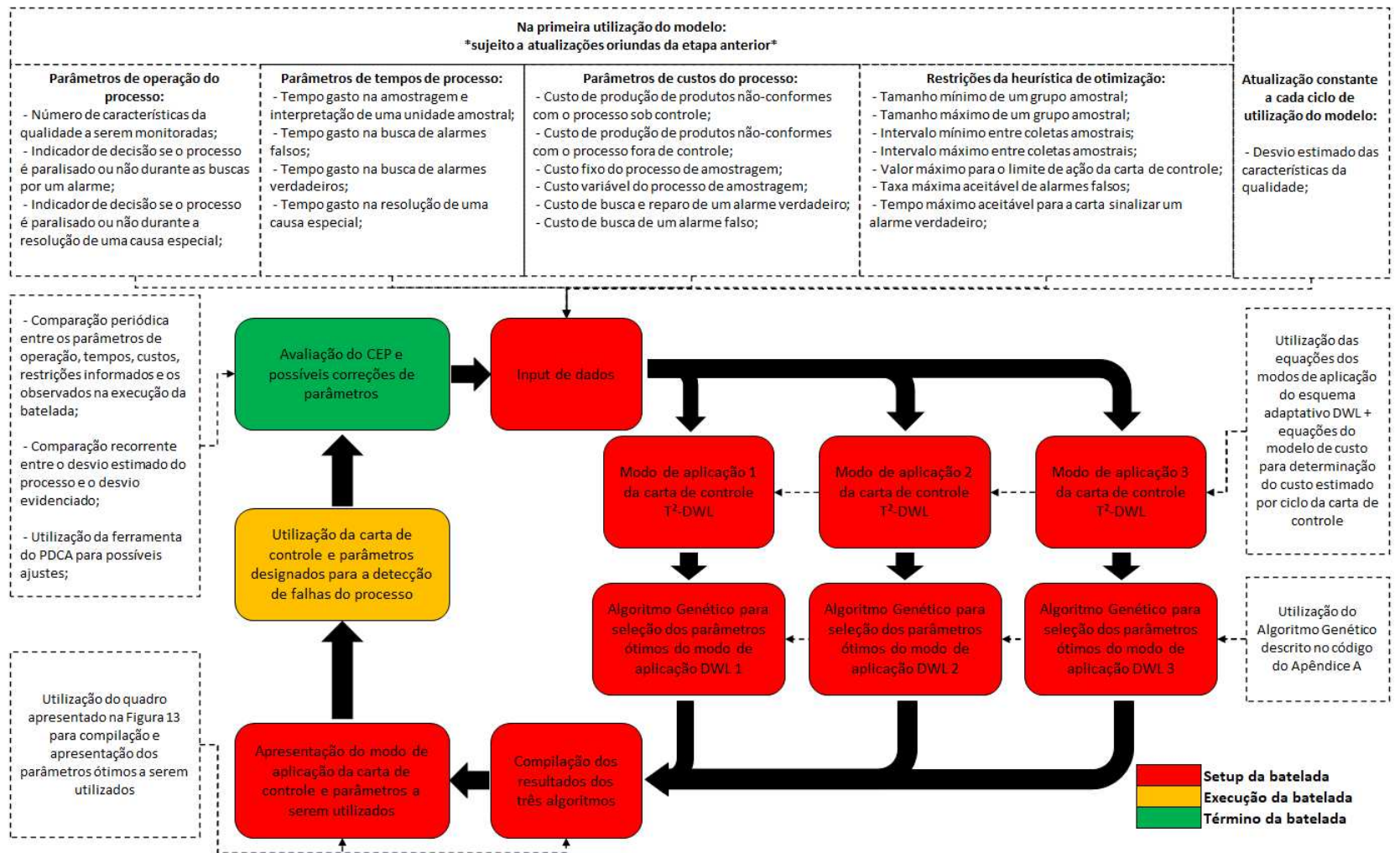


Figura 13: Modelo para otimização do CEP do processo contínuo por bateladas
Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

Na primeira etapa do modelo proposto, tem-se a inserção dos dados do processo produtivo. Conforme citado anteriormente, para a proposição do DEE o modelo de custo utilizado foi o modelo proposto por Lorenzen e Vance (1986). Para isso, os dados de entrada do modelo podem ser divididos em quatro categorias: os parâmetros de custos, os parâmetros de tempos, os parâmetros do processo e as restrições da heurística de otimização. Na primeira categoria, constam dados como o custo de produção de produtos não-conformes com o processo sob controle (C_0), o custo de produção de produtos não-conformes com o processo fora de controle (C_1), o custo fixo do processo de amostragem (a_1), o custo variável do processo de amostragem (a_2), o custo de busca e reparo de alarmes verdadeiros (a_3) e o custo de busca de alarmes falsos (a'_3).

Já na segunda categoria, os parâmetros de tempo, encontram-se dados como o tempo gasto na amostragem e interpretação de uma unidade do produto (E), o tempo de buscas no caso de alarmes falsos (T_0), o tempo de identificação de alarmes verdadeiros (T_1), o tempo de reparo de uma causa assinalável identificada (T_2). Na terceira categoria, observam-se os parâmetros de operação do processo. Neles, encontram-se a quantidade de características correlacionadas que serão monitoradas (ρ), o indicador de decisão se o processo será ou não paralisado durante as buscas por alarmes falsos (γ_1) e o indicador de decisão se o processo será ou não paralisado durante o reparo de uma causa assinalável detectada (γ_2). Já a quarta categoria traz as restrições da heurística de otimização, que serão detalhadas na etapa de descrição do otimizador. Há ainda, o parâmetro do desvio estimado do processo (d), sendo que esse deve ser atualizado ao início de cada nova batelada.

Em seguida, com todos os dados do problema inseridos, tem-se a divisão nos três modos de aplicação da carta de controle DWL. Cada um dos modos segue suas equações específicas, que foram fundamentadas anteriormente na Seção 2.2.2. Cada um dos modos de aplicação, possui como dados de entrada, além dos parâmetros de custos, tempos e do processo, os parâmetros de operacionalização da carta de controle, que serão otimizados visando o menor custo/hora da carta de controle.

A otimização de tais parâmetros da carta de controle (vetor D que contém os parâmetros: $n_1, n_2, h_1, h_2, w_h, w_n$ e k) se dá na terceira etapa do modelo, através da utilização de GAs para cada um dos modos de aplicação da carta de controle. o GA utiliza como operadores para o seu funcionamento:

- Função de seleção - classificação;
- Função de crossover - um ponto;
- Função de mutação - uniforme.

De forma simplificada, o otimizador utilizado é apresentado nas equações 4.1 até 4.9. Já o código aplicado nos três algoritmos genéticos e o compilador dos resultados podem ser vistos no Apêndice A.

$$\min E(D), \quad (4.1)$$

sujeito às restrições:

$$0 < k \leq k_{max}, \quad (4.2)$$

$$0 < w_h < k, \quad (4.3)$$

$$0 < w_n < k, \quad (4.4)$$

$$n_{min} \leq n_1 < n_2 \leq n_{max}, \quad (4.5)$$

$$h_{min} \leq h_2 < h_1 \leq h_{max}, \quad (4.6)$$

$$n_1, n_2 \in \mathbb{Z}^+, \quad (4.7)$$

$$ANF \leq ANF_0, \quad (4.8)$$

$$AATS \leq AATS_1 \quad (4.9)$$

Após a execução dos três GAs, obtém-se os valores de custos otimizados, assim como os parâmetros ótimos para cada um dos modos de aplicação da carta de controle T^2 -DWL. A reunião desses dados apresenta as três possíveis soluções da carta de controle T^2 -DWL. A formatação da saída dos dados dessa etapa é uma tabela conforme o modelo exemplificado na Figura 14.

Para a determinação de qual modo de aplicação da carta de controle será utilizado se emprega o critério do menor custo/hora ($E(D)$). Em seguida, tem-se a execução do processo produtivo e, conseqüentemente, a execução do monitoramento estatístico. Após a conclusão da produção da batelada de produtos, a atuação da carta de controle deve passar por uma avaliação, sendo que devem ser observados detalhes como a aproximação

	Modo de Aplicação 1	Modo de Aplicação 2	Modo de Aplicação 3
n_1			
n_2			
h_1			
h_2			
w_h			
w_n			
k			
ANF			
$AATS$			
$E(D)$			

Figura 14: Modelo de formatação da compilação das saídas dos GAs
 Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

dos custos e medidas de desempenho previamente calculadas. Essa etapa permite que os parâmetros de custos e os parâmetros do processo produtivo possam ser reavaliados para que se aproximem ao máximo da realidade do processo, intensificando a precisão do DEE.

Por fim, como o processo produtivo alvo desse estudo é o processo contínuo por bateladas, cabe destacar que uma batelada pode possuir características diferentes das demais. Dessa forma, para um desempenho superior, diferentemente das demais proposições de DEE, nesse estudo a proposta é que a cada início de batelada os parâmetros sejam recalculados para um melhor acerto e, conseqüentemente, uma otimização de custos aprimorada. Após a construção do modelo, esse necessita ser validado para comprovar sua efetividade, para que assim seja possível dar seguimento à etapa de avaliação. A validação do algoritmo e do modelo será transcorrida na próxima subseção.

4.2.1 Validação do algoritmo e do modelo

A etapa de validação do algoritmo e do modelo se deu em dois passos. Inicialmente, foi realizada a validação do algoritmo de forma quantitativa. A forma de validação escolhida foi através da comparação de resultados com artigo científico publicado em periódico. Foram utilizados os dados da pesquisa de Faraz e Saniga (2011) que foi publicada no *Quality and Reliability Engineering International*. A pesquisa utiliza, assim como essa, uma carta de controle T^2 com esquema adaptativo DWL e também utiliza o

modelo de custo de Lorenzen e Vance (1986) para a proposição de um DEE. Os dados extraídos da pesquisa de Faraz e Saniga (2011) podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Dados obtidos para validação do algoritmo

Parâmetros do Processo		Parâmetros de Custos		Parâmetros do GA	
E	0,0833	C_0	114,24	Tamanho da População	100
T_0	0,0833	C_1	949,2	Taxa de Elitismo	0,05
T_1	0,0833	a_1	5	Taxa de Crossover	0,05
T_2	0,75	a_2	4,22	Taxa de Mutação	0,9
γ_1	1	a_3	977,4	Número de Gerações	250*
γ_2	0	a'_3	977,4		
ρ	3				
h_{min}	0,01				
h_{max}	8				
ANF_0	0,5				
$AA\tau S_1$	10				

Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021) com base nos dados de Faraz e Saniga (2011)

Os dados da Tabela 1 foram utilizados tanto para operacionalizar os modos de aplicação da carta de controle quanto os GAs para a otimização. Primeiramente, a construção dos três modos de aplicação da carta de controle T^2 -DWL foram validados. Para isso, os dados da Tabela 2, também extraídos da pesquisa de Faraz e Saniga (2011), foram aplicados nos três modos de aplicação a fim de verificar se os valores de ANF e $E(D)$ condiziam com os achados dos pesquisadores.

Tabela 2: Testes de validação da carta de controle

d	k	w_n	w_h	n_1	n_2	h_1	h_2	ANF	$E(D)$
0,25	6,87	0,33	0,33	1	39	3,41	2,82	0,5	484,89
0,5	8,62	0,67	0,67	1	20	1,79	1,28	0,5	359,8
0,75	9,31	0,74	0,74	1	12	1,15	0,97	0,5	309,04
1	10,2	0,15	3,38	1	7	1,07	0,23	0,44	280,75
1,25	11,07	0,52	3,68	1	5	0,86	0,16	0,35	260,28
1,5	12,23	0,65	0,65	1	5	0,74	0,65	0,2	246,94
1,75	12,86	0,79	0,79	1	4	0,66	0,59	0,16	237,34
2	13,18	1,03	4,76	1	3	0,63	0,13	0,16	229,27
2,25	14,07	1,03	5,48	1	3	0,61	0,16	0,1	225,24
2,5	14,99	0,36	0,36	1	3	0,74	0,54	0,07	219,4
2,75	14,54	1,6	5,36	1	2	0,53	0,11	0,1	215,06
3	15,28	1,6	5,93	1	2	0,52	0,13	0,07	213,08

Fonte: Faraz e Saniga (2011)

Avaliados todos as doze variações do processo (d variando de 0,25 até 3) foram encontrados os mesmos valores do estudo de Faraz e Saniga (2011), o que valida a construção dos modos de aplicação da carta de controle. Em um segundo momento, foi

validado a construção dos GAs que otimizam cada modo de aplicação da carta de controle. Para isso, os dados da Tabela 2 foram utilizados nas doze variações do parâmetro d . Cabe destacar que o estudo de referência não aponta o número de gerações utilizado nos GAs e essa pesquisa adotou o número de 250 gerações. Da mesma forma, as doze variações do processo foram submetidas ao funcionamento dos GAs e sempre foram evidenciados valores ligeiramente melhores que o estudo de Faraz e Saniga (2011). Isso pode ser justificado pela utilização de um valor diferente para o número de gerações do GA, ou até mesmo a escolha do *software* que operacionaliza o GA. Dessa forma, com os testes realizados tanto nos modos de aplicação, quanto nos GAs, pode-se considerar ambos como validados.

Já a validação do modelo como um todo se deu de forma qualitativa. Observando a característica de aplicação do modelo em processos contínuos por bateladas, a validação do modelo foi realizada através da consulta de especialistas do processo produtivo. Foram consultados três especialistas do processo. Cada um deles tinha mais de dez anos de experiência no processo produtivo contínuo por bateladas e vinham de diferentes segmentos da indústria, como: fabricação de chocolates, rações para animais e processamento de leite. Os especialistas foram entrevistados individualmente pelo pesquisador e por seu orientador, evitando assim tendências de coletividade nas respostas desses. Com o objetivo de auxiliar na condução da validação, foi utilizado um roteiro de apresentação da pesquisa, que se encontra no Apêndice B.

Inicialmente, foi solicitado a cada um deles que explicasse o funcionamento do processo produtivo em que atuam. Essa etapa foi utilizada para confirmar a correspondência do processo produtivo com o foco dessa pesquisa e também para obter percepções de diferentes segmentos da indústria. Em seguida, o pesquisador apresentou o processo produtivo ao qual essa pesquisa está direcionada, o modelo desenvolvido, assim como seus dados de entrada demandados e suas saídas esperadas. Possíveis dúvidas por parte dos especialistas foram esclarecidas nesse momento e, por fim, os questionamentos realizados foram quanto a viabilidade de aplicação do modelo no processo produtivo e sua utilidade na obtenção de vantagens competitivas, tanto em melhorias no monitoramento do processo, redução dos custos do CEP, como em possibilidades de ampliação de receitas com um processo mais estável.

Nas respostas dos especialistas, foram observados pontos como a dificuldade de obtenção dos dados de custos e restrições com relação a equipamentos ou mão de obra.

Com relação aos dados de saída do modelo, também foi apontado que seria mais atrativo se o modelo apresentasse os ganhos financeiros que a empresa obteria com a implantação desse. Contudo, a viabilidade de execução desse adicional do modelo não foi efetuada, pois isso poderia prejudicar a generalização do modelo. Nesse caso, a adição de uma etapa de cálculo de ganhos que o processo pode obter com a implantação do modelo ficou alocada como um ponto a ser observado em pesquisas futuras para a implantação prática do modelo. Assim, em suma, todos os três especialistas apontaram a viabilidade de utilização do modelo e destacaram a contribuição que esse poderia trazer ao seu processo produtivo. Dessa forma, considera-se que o modelo projetado para o processo contínuo por bateladas foi validado pelos especialistas, permitindo assim que o estudo avançasse para a próxima etapa, a avaliação dos resultados.

4.3 Avaliação dos resultados

A etapa de avaliação dos resultados se deu em dois momentos. O primeiro ocorreu na utilização da simulação computacional para a montagem de cenários do processo produtivo e posterior execução do GA para obtenção dos parâmetros ótimos e, conseqüentemente, o custo otimizado. Já o segundo momento, tratou-se da avaliação do poder estatístico da carta de controle, também através da simulação computacional.

Antes de executar a primeira etapa da avaliação, e com o algoritmo validado, os parâmetros do GA foram ajustados para a obtenção de melhores resultados ou, pelo menos, dos mesmos resultados com um tempo de processamento computacional inferior. Utilizando os parâmetros do estudo de Faraz e Saniga (2011), foram sendo modificados os parâmetros do GA para identificar a combinação que poderia oferecer melhores resultados do que os já encontrados, ou mesmo um menor tempo computacional para obtenção dos mesmos resultados. Assim, o conjunto de parâmetros do algoritmo escolhidos para serem utilizados nesse estudo são apresentados na Tabela 3.

Ainda, como demais restrições do modelo de otimização aplicado na etapa de avaliação, foi incluída uma faixa limite dos tamanhos amostrais a serem coletados. Essa faixa visa a manter a conformidade com a capacidade do processo produtivo que esse modelo venha a ser implantado. Dessa forma, foram utilizados como tamanho mínimo da amostra (n_{min}) 1 unidade e como tamanho máximo da amostra (n_{max}) 40 unidades. Já o intervalo entre coletas foi delimitado a uma faixa entre 0,01 horas (h_{min}) e 8 horas

Tabela 3: Parâmetros aplicados no GA para avaliação dos resultados

Parâmetros do GA	
Tamanho da População	100
Número de Gerações	150
Taxa de Elitismo	0,1
Taxa de Crossover	0,7
Taxa de Mutação	0,3

Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

(h_{max}). Esta faixa foi determinada dado os horários de turnos comumente adotados na indústria. Também foi determinada uma faixa em que as linhas de aviso w_h e w_n , assim como o limite de ação da carta de controle k devem ficar. Essa faixa ficou estipulada entre 0 e 40. Dessa forma, como dados a serem utilizados nesse momento da avaliação econômica, determinou-se que seriam utilizados os parâmetros do GA testados e apresentados na Tabela 3, os parâmetros do processo e de custos apresentados na Tabela 4, além das restrições já apresentadas.

Para a avaliação do funcionamento do modelo, o procedimento adotado foi realizar um comparativo. De um lado, um processo fictício, em que os parâmetros de operação do CEP seriam otimizados com um desvio determinado (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0). Em seguida, colocado em funcionamento com os parâmetros constantes nas bateladas do processo produtivo. Do outro lado, um processo fictício utilizando o modelo projetado, em que os parâmetros de operação do CEP são recalculados de acordo com as características da batelada seguinte. Para a determinação do desvio das características da qualidade da batelada (d) foi utilizado um número aleatório entre 0 (processo sem desvios do alvo) e 3 (considerando o limite de 3 desvios-padrões para o processo). A Tabela 4 apresenta os quantitativos de 20 bateladas simuladas.

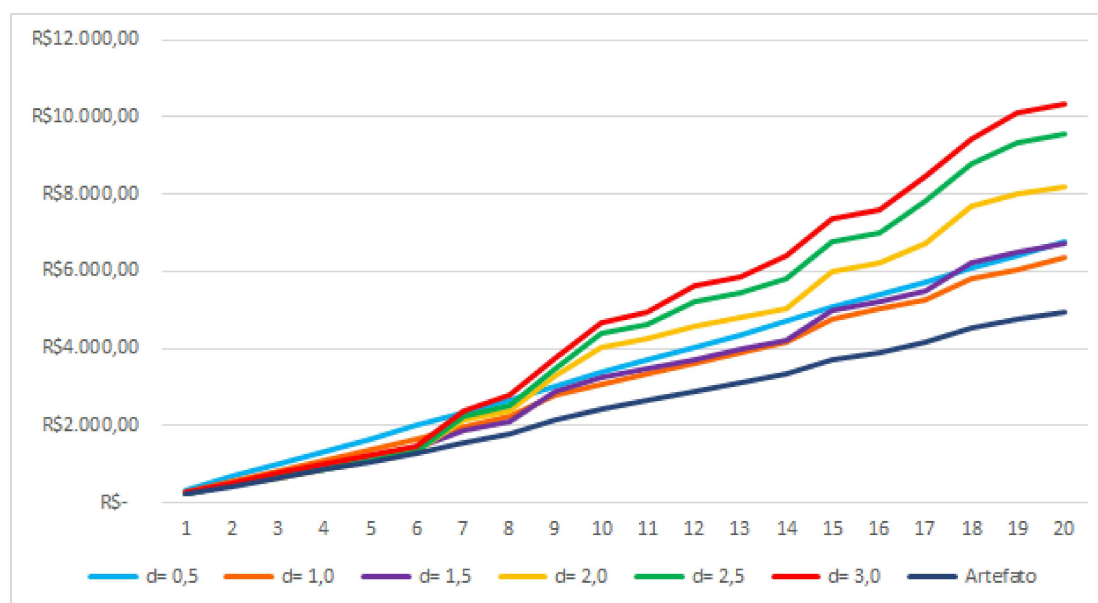
Os resultados obtidos em cada uma das simulações de utilização do artefato podem ser encontrados no Apêndice C. Cabe destacar que, nas vinte simulações realizadas predomina a utilização do modo de aplicação 3 da carta de controle DWL com 15 aplicações. Já o modo de aplicação 1 apresentou 4 aplicações e somente uma aplicação do modo de aplicação 2. A Figura 15 ilustra o comparativo da evolução dos custos acumulados do processo ao longo dessas 20 bateladas.

Analisando os dados da Tabela 4 e em conjunto com a evolução ilustrada na Figura 15, pode-se perceber que a utilização cíclica do modelo propicia uma estabilidade nos custos de operação do CEP por cada batelada. Nota-se que, na utilização do modelo,

Tabela 4: Comparativo dos custos por batelada

d da batelada	Processo de Otimização: Custo por batelada / Acumulado							modelo
	d= 0,5	d= 1,0	d= 1,5	d= 2,0	d= 2,5	d= 3,0		
1	2,033746	R\$ 333,81	R\$ 275,71	R\$ 235,06	R\$ 219,63	R\$ 233,35	R\$ 289,48	R\$ 219,35
2	2,570623	R\$ 334,47	R\$ 277,30	R\$ 240,64	R\$ 218,94	R\$ 212,17	R\$ 222,08	R\$ 209,59
3	2,078714	R\$ 333,86	R\$ 276,01	R\$ 235,65	R\$ 219,02	R\$ 228,62	R\$ 276,77	R\$ 218,68
4	2,823702	R\$ 334,79	R\$ 277,39	R\$ 241,79	R\$ 220,15	R\$ 212,82	R\$ 220,45	R\$ 205,92
5	2,810515	R\$ 334,77	R\$ 277,39	R\$ 241,75	R\$ 220,09	R\$ 212,74	R\$ 220,38	R\$ 206,83
6	2,271953	R\$ 334,09	R\$ 276,84	R\$ 238,05	R\$ 218,05	R\$ 216,92	R\$ 241,20	R\$ 214,31
7	0,868749	R\$ 332,19	R\$ 289,20	R\$ 438,77	R\$ 823,19	R\$ 933,89	R\$ 930,72	R\$ 283,46
8	1,827877	R\$ 333,59	R\$ 273,63	R\$ 232,80	R\$ 226,16	R\$ 274,42	R\$ 377,79	R\$ 224,90
9	0,487628	R\$ 362,87	R\$ 578,45	R\$ 775,69	R\$ 950,13	R\$ 962,82	R\$ 959,68	R\$ 364,34
10	0,967529	R\$ 332,60	R\$ 271,76	R\$ 369,51	R\$ 734,32	R\$ 910,00	R\$ 911,75	R\$ 272,68
11	2,101393	R\$ 333,88	R\$ 276,14	R\$ 235,95	R\$ 218,78	R\$ 226,59	R\$ 271,09	R\$ 216,82
12	1,396794	R\$ 333,22	R\$ 264,65	R\$ 243,73	R\$ 315,03	R\$ 588,88	R\$ 702,21	R\$ 240,91
13	2,225816	R\$ 334,03	R\$ 276,69	R\$ 237,52	R\$ 218,10	R\$ 218,77	R\$ 247,37	R\$ 217,02
14	1,608837	R\$ 333,38	R\$ 269,73	R\$ 233,52	R\$ 248,51	R\$ 386,02	R\$ 530,72	R\$ 231,28
15	0,485568	R\$ 363,54	R\$ 580,99	R\$ 777,15	R\$ 950,31	R\$ 962,86	R\$ 959,74	R\$ 364,33
16	2,287125	R\$ 334,11	R\$ 276,88	R\$ 238,22	R\$ 218,05	R\$ 216,40	R\$ 239,42	R\$ 214,64
17	1,158124	R\$ 333,03	R\$ 261,67	R\$ 285,62	R\$ 513,30	R\$ 816,08	R\$ 848,23	R\$ 254,59
18	0,539534	R\$ 349,39	R\$ 515,61	R\$ 736,21	R\$ 944,57	R\$ 961,57	R\$ 958,04	R\$ 348,15
19	1,406644	R\$ 333,22	R\$ 264,88	R\$ 242,88	R\$ 310,14	R\$ 578,18	R\$ 694,70	R\$ 240,92
20	2,479656	R\$ 334,35	R\$ 277,22	R\$ 240,01	R\$ 218,54	R\$ 212,69	R\$ 225,09	R\$ 211,18
TOTAL		R\$ 6.749,18	R\$ 6.338,15	R\$ 6.720,53	R\$ 8.204,99	R\$ 9.565,78	R\$ 10.326,92	R\$ 4.959,90

Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

**Figura 15:** Comparativo da evolução dos custos
Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

bateladas que possuem um desvio (d) menor tendem a ter os custos mais elevados, enquanto que bateladas com um desvio maior tendem a ter custos em patamares reduzidos. Isso pode ser relacionado com a facilidade de detecção de grandes desvios do processo. Contudo, a evolução acumulada dos custos de operação do CEP na utilização do modelo proposto segue um crescimento quase que linear.

Por outro lado, quando analisado o processo tradicional de otimização, se percebe que não há uma constância no acumulado de custos. Cada uma das otimizações fornece custos melhores quando o desvio aleatório da batelada se aproxima do desvio ao qual a otimização dos parâmetros foi realizada. Conseqüentemente, os custos se elevam a medida que o desvio aleatório da batelada fica distante do parâmetro de desvio utilizado na otimização.

Percebe-se que a utilização do modelo reduziu os custos acumulados nas vinte bateladas simuladas em pelo menos 21,75%, quando comparado com as simulações do processo otimizado para um desvio de 1,0. Essa redução de custos se acentua ao seu ápice quando a utilização do modelo é comparada com as simulações do processo otimizado para um desvio de 3,0. Nesse cenário, a redução de custos chega a 51,97%. O valor percentual da razão de economia do artefato quando comparado com as simulações dos demais processos é obtido pela divisão do acumulado de custos do artefato pelo acumulado de custos do processo escolhido para o comparativo.

Assim, esses dados reforçam os benefícios apresentados pela utilização do modelo projetado. Cabe destacar que os percentuais de redução de custos estão atrelados aos valores aleatórios de desvio de cada batelada. A utilização de outros valores pode conduzir a taxas de redução de custos diferentes. Contudo, analisando batelada por batelada, percebe-se que a utilização do modelo leva a vantagens econômicas em todos os casos, o que reforça os ganhos encontrados.

Já a segunda etapa da avaliação do modelo foi composta pela avaliação do poder de detecção da carta de controle. Para isso, a simulação computacional foi empregada para simular o monitoramento estatístico do processo e, propriamente, o funcionamento da carta de controle projetada. Essa avaliação teve por objetivo mensurar o poder de detecção da carta de controle para alarmes falsos e, pequenos, médios e grandes desvios do processo.

Para essa etapa, como ponto de partida do monitoramento estatístico do processo foi utilizado um conjunto de medições sob controle de 3 características da qualidade de

uma empresa do setor de laticínios, que utiliza o processo contínuo por bateladas. Esses dados não encontram-se disponíveis no corpo da dissertação por motivos de sigilo dos dados. As características escolhidas foram umidade, densidade e gordura do leite. Cabe destacar que, para esta avaliação os dados da base oriunda do estudo de Montgomery e Klatt (1972) e Faraz e Saniga (2011) foram utilizados apenas no funcionamento do modelo de otimização para a determinação dos parâmetros ótimos. Propriamente, na etapa de simulação do funcionamento da carta de controle esses não são levados em consideração.

Assim, o funcionamento da carta de controle foi avaliado quatro vezes. Em cada análise, a carta de controle teve seus parâmetros otimizados para um desvio do processo, de 1,0 até 3,0. Dentro de cada análise, inicialmente, não foram aplicados desvios nos dados simulados ($\delta = 0,0$). Essa simulação mostrou o tempo médio da corrida até a carta de controle sinalizar um alarme falso (ARL_0). Em seguida, foram aplicados desvios nos dados simulados ($\delta = 0,1$ a $3,0$). Essas simulações mostraram o tempo médio da corrida até a carta sinalizar um alarme verdadeiro (ARL_1).

A Figura 16 apresenta as quatro simulações realizadas, bem como os valores encontrados. Foram observadas duas variáveis: tempo da corrida (em horas) e amostragens realizadas durante a corrida.

Ao analisar os gráficos da Figura 16, pode-se perceber que em todos os casos quanto maior o delta aplicado às variáveis do processo, mais rapidamente a carta de controle detecta a presença de uma causa especial. Ressalta-se que, independentemente de qual desvio o processo foi otimizado, o poder de detecção da carta de controle permanece similar. Dado que, o processo produtivo que originou os dados possui tempos de duração das bateladas de mais de 6 horas.

Isso traz uma maior segurança no momento da otimização de parâmetros, pois caso alguma batelada possua características de grande distinção durante a sua execução, a carta de controle será capaz ainda assim de detectá-los rapidamente. Cabe destacar que, caso no momento da implantação prática do modelo o gestor decida priorizar o desempenho estatístico da carta de controle em detrimento dos custos operacionais, o algoritmo que operacionaliza o modelo prevê a utilização de restrições (ANF_0 e $AATS_1$) que podem ser ajustadas conforme decisão do gestor.

Por fim, seguindo as etapas de avaliação do modelo apresentadas por Hevner e Chatterjee (2010), Manson (2006) e Dresch, Lacerda e Junior (2015), alguns pontos foram

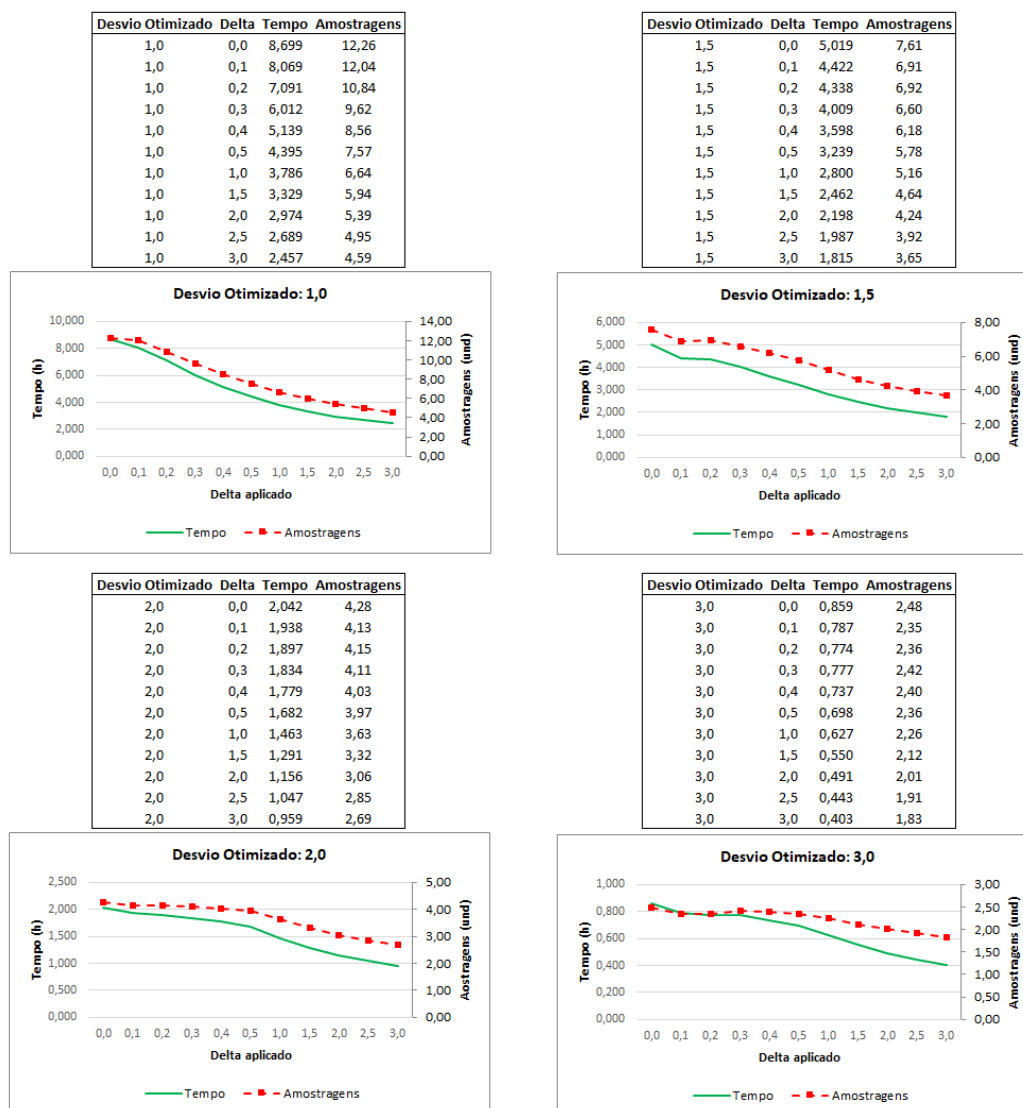


Figura 16: Simulações de corridas da carta de controle
 Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa (2021)

observados:

- **Design como um artefato:** O artefato produzido deve ser viável e seguir um dos formatos estabelecidos de saídas da DSR. No caso dessa pesquisa, o artefato foi construído e, em seguida validado tanto quantitativamente por meio da comparação com estudo já publicado, quanto qualitativamente por meio de consulta à

especialistas do processo produtivo quanto a sua viabilidade. Já em sua classificação, o artefato gerado se encaixa na classe dos modelos;

- **Relevância do problema:** Conforme apontado por Peres (2018) e evidenciado na identificação de estudos correlatos realizada, a área do controle de qualidade em processos por bateladas carece de pesquisas e as pesquisas já existentes na proposição de DE ou DEE não contemplam as especificidades desse tipo de processo produtivo. Dessa forma, esse estudo advém para preencher a lacuna na parte da operacionalização do CEP em processos contínuos por bateladas;
- **Avaliação do design:** O artefato gerado por essa pesquisa passou por etapas avaliativas que atestaram sua eficiência, especialmente em dois aspectos, a otimização dos custos do processo e o desempenho estatístico. Ambos os aspectos revelaram ganhos significativos para o processo produtivo;
- **Contribuições da pesquisa:** A pesquisa oferece um modelo direcionado para um tipo de processo industrial levando em consideração suas particularidades. Os estudos correlatos identificados pouco direcionavam suas pesquisas a um tipo de processo, o que pode inviabilizar ou prejudicar sua aplicação em um processo produtivo específico. Avaliando os diferenciais dessa pesquisa em comparação com o estudo publicado por Faraz e Saniga (2011), pode-se destacar que o modelo projetado nessa dissertação ofereceu resultados superiores ao do estudo citado. Pode-se atribuir como o diferencial dessa pesquisa, o fato de que o modelo permanece em contante funcionamento após a implantação, sendo sua característica cíclica a variável que aproxima os parâmetros estimados na entrada da realidade praticada na operação do CEP das empresas. Essa maior aproximação da prática fabril conduz a uma seleção de parâmetros de operação do CEP mais condizentes, e conseqüentemente, uma melhor previsão dos custos da operação do CEP. A etapa de avaliação econômica realizada nessa dissertação ofereceu um horizonte avaliativo de 20 bateladas simuladas, contudo quando implementado em um processo produtivo, o modelo apresenta potencial para a geração de ganhos superiores dado um tempo de funcionamento maior;
- **Rigor da pesquisa:** A pesquisa seguiu as etapas do método da DSR. A avaliação se deu de forma quantitativa, por meio de comparações dos resultados obtidos;

- **Design como um processo de busca:** As ferramentas utilizadas no processo de busca da solução do problema de pesquisa foram todas determinadas conforme recomendações da literatura, sendo as mais apropriadas para a situação em questão;
- **Comunicação da pesquisa:** A pesquisa possui como meios de divulgação essa dissertação de mestrado, que se desdobra em artigos científicos a serem publicados. Outro ponto observado quanto à comunicação da pesquisa se dá através de contribuições para pesquisas futuras.

Assim, considera-se essa pesquisa relevante visto que objetivou debater questões práticas e recorrentes no ambiente organizacional. Para isso, a utilização de procedimentos científicos foi empregada, contribuindo na aproximação entre o ambiente acadêmico e o organizacional. Como entregas dessa pesquisa, para o ambiente organizacional se tem um modelo que pode solucionar problemas no CEP e gerar vantagens competitivas para indústrias que utilizam o processo contínuo por bateladas. Já para o meio acadêmico, a entrega dessa pesquisa pode ser configurada como um avanço na teoria acerca dos tópicos abordados. O procedimento de pesquisa seguiu as etapas gerais propostas pelo método da DSR, o que também amplia o debate acerca de métodos emergentes para construção de conhecimento na engenharia. Apesar de que oportunidades de melhorias tenham sido identificadas, a pesquisa foi conduzida com rigor metodológico e seus achados estão sendo comunicados, inicialmente, através dessa dissertação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo se apresentam as conclusões da dissertação, as limitações da pesquisa e as recomendações para pesquisas futuras.

5.1 Conclusões

A constante busca pelo diferencial competitivo leva as organizações a experimentar novos métodos, técnicas e tecnologias. Contudo, mesmo em tarefas corriqueiras que já se encontram inseridas na estrutura de trabalho das empresas, é possível obter vantagens competitivas. O CEP contribui, em sua essência, na garantia de produtos de qualidade. Porém, pode-se analisar o CEP como um ponto de alavancagem do processo também. A partir de sua aplicação sistemática, pode-se reduzir a variabilidade dos produtos e ainda seus custos envolvidos podem ser otimizados. Em um segundo momento, com um processo estável e enxuto do ponto de vista econômico, pode-se analisar também o aumento de ganhos. No caso das indústrias alimentícias, que comumente utilizam o processo contínuo por bateladas, a possibilidade de reduzir margens de segurança de limitantes da legislação sobre o produto pode se tornar um meio de geração de receitas atrativo.

Essa pesquisa se deteve na busca da otimização econômica e estatística em um processo contínuo por bateladas. As características desse processo permitiram a concepção de um modelo que, além de otimizar os custos do CEP, apresenta poder estatístico de detecção considerável permitindo também manter a busca pela redução sistemática da variabilidade do processo.

Ao analisar a literatura acerca da área de estudo, tornou-se possível a proposição de um modelo que suprisse a necessidade identificada. Esse modelo demandou de etapas prévias para o seu desenvolvimento, como a identificação de estudos correlatos, o suporte teórico na criação de um mapa conceitual e a construção de um *framework* que orientasse o seu desenvolvimento, sustentando-se em todo o embasamento teórico construído. Essas etapas também são considerados entregáveis dessa pesquisa, na medida em que avançam, sintetizam e esclarecem a teoria sobre a área de conhecimento pesquisada.

Com o modelo desenvolvido, etapas posteriores foram necessárias para atestar sua

viabilidade, eficiência e robustez. A escolha da heurística do GA se mostrou uma alternativa eficaz por sua rápida convergência na busca de uma solução ótima. A viabilidade do modelo se atestou através da consulta a especialistas, que apesar de levantarem como um desafio a reunião das informações necessárias para o funcionamento do modelo, verificaram a sua viabilidade no *input* de informações e também na utilidade do seu *output*. O desafio apontado pelos especialistas não pode ser abordado nessa pesquisa por estar fora do escopo, contudo foi conduzido para a seção de recomendações de pesquisas futuras.

Já a eficiência e robustez do modelo projetado foram atestadas na etapa de avaliação do modelo. A eficiência econômica gerada pela implantação do modelo, de acordo com as simulações realizadas em um horizonte de vinte bateladas, ficou na faixa de 21,75% a 51,97% de redução de custos, quando comparado com o processo tradicional de otimização. Já a robustez do modelo foi atestada pela análise do poder de detecção da carta de controle. Nas quatro simulações realizadas, verificou-se que a velocidade de detecção da carta de controle é apropriada e que, mesmo em processos otimizados para um determinado desvio e o delta do processo se afastando do projetado, a carta de controle mantém um poder de detecção similar, o que oferece segurança ao monitoramento estatístico do processo.

Também, pode-se destacar como diferencial dessa pesquisa, a adoção da característica cíclica do modelo de otimização. Isso faz com que ele permaneça em contante funcionamento após a implantação, oferecendo assim, parâmetros de operação do CEP mais próximos dos ideais. Pois, conforme o modelo se insere na cultura de funcionamento da operação fabril, os parâmetros de entrada tendem a ser mais condizentes com a realidade do processo produtivo. Assim, a inclusão desta característica no modelo faz como que se tenha uma melhor previsibilidade dos custos gerados pelo CEP, tornando o modelo uma ferramenta de melhoria contínua na busca pela redução de custos.

Contudo, mesmo seguindo rigorosamente os procedimentos metodológicos estabelecidos, é comum surgirem novas informações ou detalhes durante o estudo. Algumas vezes, essas novas informações não podem ser abarcadas dentro dessa mesma pesquisa por ultrapassarem a delimitação proposta pelo estudo. Outras vezes, essas novas informações são avaliadas/identificadas ao final da pesquisa. Dessa forma, as próximas seções detalham as limitações identificadas na pesquisa, bem como as oportunidades para pesquisas futuras.

5.2 Limitações da pesquisa e recomendações de pesquisas futuras

Na busca por estudos correlatos, foram identificadas limitações e recomendações de pesquisas futuras. Como limitação da pesquisa, pode-se apontar que a delimitação estabelecida para identificar apenas proposições de DE ou DEE em cartas de controle T^2 com esquema adaptativo pode ter excluído oportunidades oriundas da aplicação em outros tipos de carta de controle. Dessa forma, recomenda-se a realização de um mapeamento de todos os estudos de DE, DEE e posterior identificação de todos os modelos de custos existentes na literatura. Uma entrega esperada por esse mapeamento seria a verificação da possibilidade de propor um modelo de custo generalizado, que integrasse as particularidades de todos os outros modelos já desenvolvidos, as premissas dos processos produtivos e que pudesse ser operacionalizado através de qualquer modelo de carta de controle.

Ainda na identificação de estudos correlatos, observou-se a inexistência de estudos que utilizem o conceito da cadeia de Markov com outros tipos de distribuição de probabilidade, além da exponencial. Dessa forma, recomenda-se a verificação da possibilidade de aplicação da cadeia de Markov combinada com distribuições de probabilidade como a Weibull e a Gamma, por exemplo.

Outra limitação observada durante a pesquisa é a utilização de dados simulados na avaliação do modelo. A utilização de dados reais de um processo produtivo, por conterem oscilações, inconstâncias e, por vezes, a ocorrência de dados espúrios, pode expor fragilidades do modelo que não puderam ser observadas nesse momento. Assim, recomenda-se a execução de um estudo que realize a implantação desse modelo, observe seu funcionamento e adequação ao processo produtivo e, sobretudo, acompanhe os desdobramentos acerca das mudanças culturais necessárias dentro da organização.

Conforme apontado na seção de conclusões desse estudo, a etapa de levantamento de dados de entrada pode se tornar um entrave na aplicação do modelo gerado por essa pesquisa. Assim, recomenda-se a execução de um estudo que construa um método para coleta de informações pertinentes a proposição de um DE ou DEE.

Outro ponto observado é que, dado o fato das indústrias alimentícias balizarem as características de seus produtos de acordo com limitantes da legislação vigente, e que, por vezes, o aumento dessa margem de segurança pode significar uma redução de ganhos, a análise de capacidade desses processos também pode ser afetada. Assim,

recomenda-se um estudo que identifique as peculiaridades do processo produtivo das indústrias alimentícias e como isso impacta nas análises de capacidade do processo.

Por fim, destaca-se que, avaliando o contexto em que a indústria se encontra atualmente, com a emergência da Indústria 4.0, integração de novas tecnologias ao processo produtivo e, conseqüentemente ao monitoramento do processo, torna-se relevante um estudo para entender como se dará a integração do CEP no contexto da Indústria 4.0. Também cabe analisar a possibilidade e a forma de como se dará a integração do DE ou DEE a esses novos processos.

Da mesma forma que a indústria em geral se desenvolve, os seus sistemas de suporte, como o CEP, também necessitam evoluir. Contudo, analisando o perfil industrial que se tem, percebe-se que nem todas as indústrias chegarão à Era da Indústria 4.0 no mesmo momento. Muitas indústrias ainda permanecerão fora dessa onda tecnológica por muito tempo. Com isso, cabe aos pesquisadores também, oferecerem suporte a essas indústrias, seja melhorando as ferramentas e técnicas já consolidadas ou oferecendo meios práticos para a obtenção de vantagens competitivas, mesmo sem a necessidade de adoção de novas tecnologias.

REFERÊNCIAS

- ABEPRO. **Associação Brasileira de Engenharia de Produção - a profissão**. Acessado em: 05-02-2021, portal.abepro.org.br/a-profissao/.
- ANTONY, J.; BALBONTIN, A.; TANER, T. Key ingredients for the effective implementation of statistical process control. **Work study**, v. 49, n. 6, p. 242–247, 2000.
- ANUPINDI, R.; CHOPRA, S.; DESHMUKH, S. D.; VAN MIEGHEM, J. A.; ZEMEL, E. **Managing business process flows: principles of operations management**. 3. ed. New Jersey Pearson Education, 2012.
- APARISI, F. Hotelling's T2 control chart with adaptive sample sizes. **International Journal of Production Research**, v. 34, n. 10, p. 2853–2862, 1996.
- ARBABI, M.; GHAHROODI, Z. R. Economic Design of T2- V SSC Chart Using Genetic Algorithms. **Journal of Iranian Statistical Society**, v. 13, n. 2, p. 225–247, 2014.
- BAHIRAEE, E.; RAISSI, S. Economic design of Hotelling's T 2 control chart on the presence of fixed sampling rate and exponentially assignable causes. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 10, n. 4, p. 229–238, 2014.
- BAI, D. S.; LEE, K. An economic design of variable sampling interval X control charts. **International journal of production economics**, v. 54, n. 1, p. 57–64, 1998.
- BANERJEE, P. K.; RAHIM, M. A. Economic Design of x-Control Charts under Weibull Shock Models. **Technometrics**, v. 30, n. 4, p. 407, nov 1988.
- BARTEZZAGHI, E. The evolution of production models: is a new paradigm emerging? **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 2, p. 229–250, 1999.
- BAYAZIT, N. Investigating design: a review of forty years of design research. **Design issues**, v. 20, n. 1, p. 16–29, 2004.
- BEST, M.; NEUHAUSER, D. Walter A Shewhart, 1924, and the Hawthorne factory. **BMJ Quality & Safety**, v. 15, n. 2, p. 142–143, 2006.
- CARPINETTI, L. C. R. **Gestão da Qualidade: conceitos e técnicas**. 3. ed. São Paulo Atlas, 2016.

CHALAKI, K.; BAZDAR, A. Robust Economic Design of T2 Control Chart in Variable Sampling Interval Schemes. **International Journal of Industrial Engineering**, v. 26, n. 3, 2019.

CHEN, Y. Economic design of an adaptive T 2 control chart. **Journal of the Operational Research Society**, v. 58, n. 3, p. 337–345, 2007.

CHEN, Y.-K. Economic design of variable sampling interval T2 control charts—a hybrid Markov Chain approach with genetic algorithms. **Expert Systems with Applications**, v. 33, n. 3, p. 683–689, 2007.

CHEN, Y.-K. Economic design of T 2 control charts with the VSSI sampling scheme. **Quality & Quantity**, v. 43, n. 1, p. 109–122, 2009.

CHEN, Y.-K.; HSIEH, K.-L. Hotelling's T2 charts with variable sample size and control limit. **European Journal of Operational Research**, v. 182, n. 3, p. 1251–1262, 2007.

CHEN, Y.-S.; YANG, Y.-M. Economic design of x-control charts with Weibull in-control times when there are multiple assignable causes. **International Journal of Production Economics**, v. 77, n. 1, p. 17–23, 2002.

CHIANG, L. H.; KOTANCHEK, M. E.; KORDON, A. K. Fault diagnosis based on Fisher discriminant analysis and support vector machines. **Computers & chemical engineering**, v. 28, n. 8, p. 1389–1401, 2004.

CHIU, W. K. Economic Design of Attribute Control Charts. **Technometrics**, v. 17, n. 1, p. 81–87, feb 1975.

CHOU, C.-Y.; CHEN, C.-H.; CHEN, C.-H. Economic design of variable sampling intervals T2 control charts using genetic algorithms. **Expert Systems with Applications**, v. 30, n. 2, p. 233–242, 2006.

CHU, Y.-H.; QIN, S. J.; HAN, C. Fault detection and operation mode identification based on pattern classification with variable selection. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 43, n. 7, p. 1701–1710, 2004.

CINLAR, E. **Introduction to stochastic processes**. New Jersey:Patience Hall, 1975.

CNI. **Confederação Nacional da Indústria - Perfil da Indústria Brasileira - Produção**. Acessado em: 28-01-2021, <https://industriabrasileira.portaldaindustria.com.br/grafico/transformacao/producao//industria-transformacao>.

COSTA, A. F. X charts with variable sample size. **Journal of Quality Technology**, v. 26, n. 3, p. 155–163, 1994.

COSTA, A. F.; RAHIM, M. Economic design of X charts with variable parameters: the markov chain approach. **Journal of Applied Statistics**, v. 28, n. 7, p. 875–885, 2001.

COSTA, C. B.; RIVERA, E. A.; REZENDE, M. C. A. F.; MACIEL, M. R. W.; MACIEL FILHO, R. Prior detection of genetic algorithm significant parameters: coupling factorial design technique to genetic algorithm. **Chemical engineering science**, v. 62, n. 17, p. 4780–4801, 2007.

CROSBY, P. B. **Quality is free: the art of making quality certain**. New YorkMcGraw-Hill, 1979.

DE MAGALHÃES, M. S.; COSTA, A. F. Economic-Statistical Control Chart Design: a sensitivity study. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 2, n. 1, p. 25–38, 2005.

DE PRADA, C.; GROSSMANN, I.; SARABIA, D.; CRISTEA, S. A strategy for predictive control of a mixed continuous batch process. **Journal of Process Control**, v. 19, n. 1, p. 123–137, 2009.

DEL CASTILLO, E.; GRAYSON, J. M.; MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. A review of statistical process control techniques for short run manufacturing systems. **Communications in Statistics–Theory and Methods**, v. 25, n. 11, p. 2723–2737, 1996.

DEMING, W. E. **Out of the Crisis**. CambridgeMIT Center for Advanced Engineering Study, 1986.

DI SERAFINO, D.; GOMEZ, S.; MILANO, L.; RICCIO, F.; TORALDO, G. A genetic algorithm for a global optimization problem arising in the detection of gravitational waves. **Journal of Global Optimization**, v. 48, n. 1, p. 41–55, 2010.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; JUNIOR, J. A. V. A. **Design science research : a method for science and technology advancement**. ChamSpringer International, 2015.

DUNCAN, A. J. The economic design of X charts used to maintain current control of a process. **Journal of the American Statistical Association**, v. 51, n. 274, p. 228–242, 1956.

FARAZ, A.; HEUCHENNE, C.; SANIGA, E.; COSTA, A. F. Double-objective economic statistical design of the VP T 2 control chart: wald's identity approach. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 84, n. 10, p. 2123–2137, 2014.

FARAZ, A.; KAZEMZADEH, R.; MOGHADAM, M.; PARSIAN, A. On the advantages of economically designed variable sample sizes and sampling intervals T 2 control chart: double warning lines scheme. **Quality & Quantity**, v. 46, n. 4, p. 1323–1336, 2012.

FARAZ, A.; KAZEMZADEH, R.; PARSIAN, A.; MOGHADAM, M. On the advantages of economically designed the Hotelling's T2 control chart with variable sample sizes and sampling intervals. **Quality & Quantity**, v. 46, n. 1, p. 39–53, 2012.

FARAZ, A.; KAZEMZADEH, R.; SANIGA, E. Economic and economic statistical design of T 2 control chart with two adaptive sample sizes. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 80, n. 12, p. 1299–1316, 2010.

FARAZ, A.; PARSIAN, A. Hotelling's T 2 control chart with double warning lines. **Statistical papers**, v. 47, n. 4, p. 569–593, 2006.

FARAZ, A.; SANIGA, E. Economic statistical design of a T2 control chart with double warning lines. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 27, n. 2, p. 125–139, 2011.

FARAZ, A.; SEIF, A. A meta model to optimally design the VSI T2 control chart. **International Journal of Applied Operational Research**, v. 1, n. 3, p. 53–69, 2012.

FEIGENBAUM, A. V. Total quality-control. **Harvard business review**, v. 34, n. 6, p. 93–101, 1956.

GARCÍA-MUÑOZ, S.; KOURTI, T.; MACGREGOR, J. F.; MATEOS, A. G.; MURPHY, G. Troubleshooting of an industrial batch process using multivariate methods. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 42, n. 15, p. 3592–3601, 2003.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São PauloAtlas, 2018. 2^a reimpr.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. ReadingAddison-Wesley Publishing Company, 1989.

GONG, Y. **Global operations strategy : fundamentals and practice**. New YorkSpringer, 2013.

GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, J. M.; FERRER, A.; WESTERHUIS, J. A. Real-time synchronization of batch trajectories for on-line multivariate statistical process control using Dynamic Time Warping. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 105, n. 2, p. 195–206, 2011.

GU, L.-J.; TANG, Q.-G. Economic Design of the Special VSSI T2 Chart with Genetic Algorithms Based on Markov Chain. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT, ECONOMICS AND SOCIAL DEVELOPMENT (ICMESD 17), 3., 2017, Paris. **Anais...** Atlantis Press, 2017. v. 21, p. 94–99.

HEVNER, A.; CHATTERJEE, S. **Design research in information systems: theory and practice**. New YorkSpringer, 2010.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. 1975. Tese University of Michigan, Ann Arbor, 1975.

HOTTELING, H. Multivariate quality control, illustrated by the air testing of sample bombsights. In: EISENHART, C.; HASTAY, M. W.; WALLIS, W. A. (Ed.). **Selected Techniques of Statistical Analysis**. new YorkMc-Graw Hill, 1947. p. 111–184.

HOYER, R. W.; HOYER, B. B. Y. What is quality? Learn how each of eight well-known gurus answer this question. **Quality Progress**, v. 34, n. 7, p. 52–62, 07 2001.

ISHIKAWA, K. **What is total quality control? The Japanese way**. New JerseyPrentice Hall, 1985.

JIANG, Q.; YAN, X.; HUANG, B. Performance-driven distributed PCA process monitoring based on fault-relevant variable selection and Bayesian inference. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 1, p. 377–386, 2015.

JONATHAN, G.; AMIR, E.; AVRAHAM, L.; DROR, N. The Advantages of SPC Models in Quality Control Processes. **Modern Management Science & Engineering**, v. 2, n. 1, p. 58–67, 2014.

JURAN, J. M. **Quality Control Handbook**. LondonMcGraw-Hill, 1974.

KATEBI, M.; SEIF, A.; FARAZ, A. Economic and economic-statistical designs of the T2 control charts with SVSSI sampling scheme. **Communications in Statistics-Theory and Methods**, v. 46, n. 20, p. 10149–10165, 2017.

KAUARK, F. d. S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa: um guia prático**. ItabunaVia Litterarum, 2010.

KHOO, M. B.; WU, Z.; CASTAGLIOLA, P.; LEE, H. A multivariate synthetic double sampling T2 control chart. **Computers & industrial engineering**, v. 64, n. 1, p. 179–189, 2013.

KNAPPENBERGER, H. A.; GRANDAGE, A. H. E. Minimum Cost Quality Control Tests. **A I I E Transactions**, v. 1, n. 1, p. 24–32, mar 1969.

KORZENOWSKI, A. L.; ANZANELLO, M. J.; PORTUGAL, M. S.; TEN CATEN, C. Predictive models with endogenous variables for quality control in customized scenarios affected by multiple setups. **Computers & Industrial Engineering**, v. 65, n. 4, p. 729–736, 2013.

KORZENOWSKI, A. L.; SIMÕES, W. L.; GOECKS, L. S.; GERHARD, M.; FOGAÇA, P.; NORONHA, R. S. Economic Sustainability of the \bar{X} Implementation In Uncapable Processes. **International Journal for Quality Research**, v. 14, n. 3, p. 757–770, 2020.

KORZENOWSKI, A. L.; WERNER, L.; TEN CATEN, C. S. A prática da implantação de cartas de controle em empresas do setor automobilístico. **Revista Ingeniería Industrial**, v. 13, n. 2, p. 75–91, 2014.

KOURTI, T.; NOMIKOS, P.; MACGREGOR, J. F. Analysis, monitoring and fault diagnosis of batch processes using multiblock and multiway PLS. **Journal of process control**, v. 5, n. 4, p. 277–284, 1995.

KUECHLER, B.; VAISHNAVI, V. Promoting relevance in IS research: an informing system for design science research. **Informing science: The international journal of an emerging transdiscipline**, v. 14, n. 1, p. 125–138, 2011.

LI, F.; WANG, P.; YEH, L.; HONG, S. Economic process control for multivariate quality characteristics with Hotelling's T² charts under Gamma shock model. In: ATLANTIS PRESS, 2011. **Anais...** IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2011. p. 1510–1513.

LIEPINS, G. E.; HILLIARD, M. Genetic algorithms: foundations and applications. **Annals of operations research**, v. 21, n. 1, p. 31–57, 1989.

LORENZEN, T. J.; VANCE, L. C. The economic design of control charts: a unified approach. **Technometrics**, v. 28, n. 1, p. 3–10, 1986.

LOUZADA, F.; DINIZ, C.; FERREIRA, P.; FERREIRA, E. **Controle estatístico de processos: uma abordagem pratica para cursos de engenharia e administracao**. Rio de Janeiro LTC, 2013.

LOZADA, G. **Controle estatístico de processo**. Porto Alegre Sagah, 2017.

MAARANEN, H.; MIETTINEN, K.; PENTTINEN, A. On initial populations of a genetic algorithm for continuous optimization problems. **Journal of Global Optimization**, v. 37, n. 3, p. 405, 2007.

- MACGREGOR, J. F.; JAECKLE, C.; KIPARISSIDES, C.; KOUTOUDI, M. Process monitoring and diagnosis by multiblock PLS methods. **AIChE Journal**, v. 40, n. 5, p. 826–838, 1994.
- MAIMON, O.; KHMELNITSKY, E.; KOGAN, K. **Optimal Flow Control in Manufacturing Systems** : production planning and scheduling. BostonSpringer, 1998.
- MALEKI, M. R.; AMIRI, A.; CASTAGLIOLA, P. Measurement errors in statistical process monitoring: a literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 103, p. 316–329, 2017.
- MALHOTRA, R.; SINGH, N.; SINGH, Y. Genetic algorithms: concepts, design for optimization of process controllers. **Computer and Information Science**, v. 4, n. 2, p. 39–54, 2011.
- MANSON, N. J. Is operations research really research? **Orion**, v. 22, n. 2, p. 155–180, 2006.
- MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision support systems**, v. 15, n. 4, p. 251–266, 1995.
- MARSH, C. E.; TUCKER, T. W. Application of SPC techniques to batch units. **ISA Transactions**, v. 30, n. 1, p. 39–47, 1991.
- MARTIN, E.; MORRIS, A.; KIPARISSIDES, C. Manufacturing performance enhancement through multivariate statistical process control. **Annual Reviews in Control**, v. 23, p. 35–44, 1999.
- MEFTAH ABUSA, F.; GIBSON, P. Experiences of TQM elements on organisational performance and future opportunities for a developing country. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 30, n. 9, p. 920–941, 2013.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**. 3. ed. New YorkSpringer, 1996.
- MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. CambridgeMIT press, 1996.
- MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the prisma statement. **Annals of internal medicine**, v. 151, n. 4, p. 264–269, 2009.
- MONTGOMERY, D. **Introduction to statistical quality control**. 7. ed. Hoboken, NJWiley, 2013.

MONTGOMERY, D. C.; KLATT, P. J. Economic design of T 2 control charts to maintain current control of a process. **Management Science**, v. 19, n. 1, p. 76–89, 1972.

NADERI, M.; MOGHADAM, M. B.; SEIF, A. Economic statistical design of the T 2 control chart under the Weibull shock model with multiple assignable causes. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 88, n. 1, p. 1–27, 2018.

NAYERI, M. A.; NOOROSSANA, R.; HAGHIGHI, M.; PEYNABAR, K. Economic statistical design of T2 control charts for systems with gamma ($\lambda, 2$) in-control times. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS AND INDUSTRIAL ENGINEERING, 37., 2007, Alexandria. **Anais...** 2007. p. 1852–1859.

NENES, G. A new approach for the economic design of fully adaptive control charts. **International Journal of Production Economics**, v. 131, n. 2, p. 631–642, jun 2011.

NENES, G. Optimisation of fully adaptive Bayesian charts for infinite-horizon processes. **International journal of systems science**, v. 44, n. 2, p. 289–305, 2013.

NOMIKOS, P.; MACGREGOR, J. F. Monitoring batch processes using multiway principal component analysis. **AIChE Journal**, v. 40, n. 8, p. 1361–1375, 1994.

PAGE, E. S. Continuous inspection schemes. **Biometrika**, v. 41, n. 1/2, p. 100–115, 1954.

PATTON, M. **Qualitative research & evaluation methods: integrating theory and practice**. Thousand Oaks SAGE Publications, 2015.

PAULA, T. I. d. **Método da Interseção Normal à Fronteira baseado em Análise Fatorial para otimização de problemas multivariados utilizando-se Algoritmo Genético**. 2019. 150 p. Tese Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

PEINADO, J.; GRAEML, A. R. **Administração da produção: operações industriais e serviços**. Curitiba UnicenP, 2007. 705 p.

PERES, F. A. P. **Seleção de variáveis aplicada ao controle estatístico multivariado de processos em bateladas**. 2018. 77 p. Tese Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2018.

PERES, F. A. P.; FOGLIATTO, F. S. Variable selection methods in multivariate statistical process control: a systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 115, p. 603–619, 2018.

PORTER, M. E. Competitive Strategy. **Measuring Business Excellence**, v. 1, n. 2, p. 12–17, feb 1997.

RAHIM, M.; BANERJEE, P. A generalized model for the economic design of xcontrol charts for production systems with increasing failure rate and early replacement. **Naval Research Logistics (NRL)**, v. 40, n. 6, p. 787–809, 1993.

RAMAKER, H.-J.; SPRANG, E. N. van; WESTERHUIS, J. A.; SMILDE, A. K. Dynamic time warping of spectroscopic BATCH data. **Analytica Chimica Acta**, v. 498, n. 1-2, p. 133–153, 2003.

REEVES, C. R. Genetic Algorithms. In: GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. (Ed.). **Handbook of Metaheuristics**. 2. ed. New YorkSpringer, 2010. v. 146, p. 109–140.

REYNOLDS, M. R.; AMIN, R. W.; ARNOLD, J. C.; NACHLAS, J. A. Charts with variable sampling intervals. **Technometrics**, v. 30, n. 2, p. 181–192, 1988.

ROBERTS, S. Control chart tests based on geometric moving averages. **Technometrics**, v. 1, n. 3, p. 239–250, 1959.

SALMASNIA, A.; ABDZADEH, B.; RAHIMI, A. Joint optimisation of double warning T 2-Hotelling chart and maintenance policy with multiple assignable causes. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 90, n. 3, p. 465–488, 2020.

SALMASNIA, A.; RAHIMI, A.; ABDZADEH, B. An integration of NSGA-II and DEA for economic–statistical design of T 2-Hotelling control chart with double warning lines. **Neural Computing and Applications**, v. 31, n. 2, p. 1173–1194, 2019.

SANIGA, E. M. Economic statistical control-chart designs with an application to and R charts. **Technometrics**, v. 31, n. 3, p. 313–320, 1989.

SEIF, A. A new Markov chain approach for the economic statistical design of the VSS T 2 control chart. **Communications in Statistics-Simulation and Computation**, v. 48, n. 1, p. 200–218, 2019.

SEIF, A.; FARAZ, A.; HEUCHENNE, C.; SANIGA, E.; MOGHADAM, M. A modified economic-statistical design of the T2 control chart with variable sample sizes and control limits. **Journal of Applied Statistics**, v. 38, n. 11, p. 2459–2469, 2011.

SEIF, A.; FARAZ, A.; SADEGHIFAR, M. Evaluation of the economic statistical design of the multivariate T 2 control chart with multiple variable sampling intervals scheme: nsga-ii approach. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 85, n. 12, p. 2442–2455, 2015.

SEIF, A.; MOGHADAM, M. B.; FARAZ, A.; HEUCHENNE, C. Statistical merits and economic evaluation of T2 control charts with the VSSC scheme. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 36, n. 7, p. 1461–1470, 2011.

SEIF, A.; SADEGHIFAR, M. Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) approach to the multi-objective economic statistical design of variable sampling interval T2 control charts. **Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics**, v. 44, n. 1, p. 203–214, 2015.

SELVAMUTHU, D.; DAS, D. **Introduction to statistical methods, design of experiments and statistical quality control**. SingaporeSpringer, 2018.

SHEWHART, W. A. **Economic control of quality of manufactured product**. MilwaukeeASQ Quality Press, 1931.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 8. ed. São PauloEditora Atlas, 2018.

STRAUSS, A.; CORBIN, J. **Basics of qualitative research: techniques and procedures for developing grounded theory**. Thousand OaksSage Publications, 2007.

TALBI, E.-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. New JerseyJohn Wiley & Sons, 2009.

TASIAS, K. A.; NENES, G. Monitoring location and scale of multivariate processes subject to a multiplicity of assignable causes. **Quality Technology & Quantitative Management**, p. 1–17, 2019.

TOLEDO, J. C. d.; BORRÁS, M. A.; MERGULHÃO, R. C.; MENDES, G. H. d. S. **Qualidade: gestão e métodos**. 1. ed. Rio de JaneiroLTC, 2013.

TORABIAN, M.; MOGHADAM, M.; FARAZ, A. Economically designed Hotelling's T2 control chart using VSICL scheme. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 35, n. 2, p. 251, 2010.

TORABIAN, M.; NAZARI ALIABADI, F. Bias and Unbias Comparison between Economic Statistical Design T2-VSI and T2-FRS Control Charts. **International Journal of Applied Operational Research-An Open Access Journal**, v. 5, n. 2, p. 79–93, 2015.

VAN AKEN, J. E. Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field-tested and grounded technological rules. **Journal of management studies**, v. 41, n. 2, p. 219–246, 2004.

- VOMMI, V.; KASARAPU, R. V. Economic design of \bar{x} control charts considering process shift distributions. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 10, n. 4, p. 163–171, 2014.
- WECKENMANN, A.; AKKASOGLU, G.; WERNER, T. Quality management – history and trends. **The TQM Journal**, v. 27, n. 3, p. 281–293, apr 2015.
- WOODALL, W. H.; MONTGOMERY, D. C. Some current directions in the theory and application of statistical process monitoring. **Journal of Quality Technology**, v. 46, n. 1, p. 78–94, 2014.
- YAN, Z.; KUANG, T.-H.; YAO, Y. Multivariate fault isolation of batch processes via variable selection in partial least squares discriminant analysis. **ISA transactions**, v. 70, p. 389–399, 2017.
- YAN, Z.; YAO, Y. Variable selection method for fault isolation using least absolute shrinkage and selection operator (LASSO). **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 146, p. 136–146, 2015.
- ZAIN, A. M.; HARON, H.; SHARIF, S. Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 6, p. 4650–4659, 2010.
- ZAIRI, M. The TQM legacy–Gurus’ contributions and theoretical impact. **The TQM Journal**, v. 25, n. 6, p. 659–676, 2013.
- ZARZO, M.; FERRER, A. Batch process diagnosis: pls with variable selection versus block-wise pcr. **Chemometrics and intelligent laboratory systems**, v. 73, n. 1, p. 15–27, 2004.
- ZHANG, X.; LIU, J.; TAN, C. Multivariate Bayesian VSI control chart. In: 37TH , 2015. **Anais...** IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2015. p. 34–37.
- ZHANG, X.; LIU, J.; TAN, C. Economic design based on a multivariate Bayesian VSI chart with a dual control limit. **Communications in Statistics-Theory and Methods**, v. 46, n. 14, p. 6808–6822, 2017.

APÊNDICE A CÓDIGO COMPUTACIONAL EM LINGUAGEM R DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

```
1 ### Modelo de otimizacao economica-estatistica de carta de controle
   T2 com esquema adaptativo DWL ###
2 ## Inicio GA DWL Modo 1 ##
3
4 popSize ← 100
5 if(popSize%%2 == 1){
6   popSize ← popSize+1}
7 Elit ← 0,1
8 Elit_imp ← round(Elit*popSize)
9 if(Elit_imp%%2 == 1){
10  Elit_imp ← Elit_imp + 1}
11 CrossoverP ← 0,3
12 MutRate ← 0,6
13 genNumber ← 150
14 ni ← 1
15 nf ← 40
16 hi ← 0,01
17 hf ← 8
18 wi ← 0
19 kf ← 40
20 ANF0 ← 0,5
21 AATS1 ← 10
22 sizeS ← 10
23 pop ← matrix(data=0, nrow = popSize, ncol = sizeS)
24
25 ## geracao populacao inicial ##
26 i = 1
27 while(i < popSize+1){
28   pop[i,1] ← round(runif(1,ni,nf)) ## n1
29   pop[i,2] ← round(runif(1,pop[i,1],nf)) ## n2
30   pop[i,3] ← round(runif(1,hi,hf), digits = 3) ## h1
31   pop[i,4] ← round(runif(1,hi,pop[i,3]), digits = 3) ## h2
32   pop[i,6] ← runif(1,0,kf) ## wn
33   pop[i,5] ← runif(1,0,pop[i,6]) ## wh
```



```

34 pop[i,7] ← runif(1,pop[i,6],kf) ## k
35 foo ← fit_func DWL1(pop[i,1:7]) ## fit function da pop inicial
36 pop[i,8] ← foo$ANF
37 pop[i,9] ← foo$AATS
38 pop[i,10] ← foo$ED
39 if(pop[i,8]<ANF0 & pop[i,8]>0 & pop[i,9]<AATS1 & pop[i,10]>0){
40   i = i + 1}
41 }
42
43 pop ← pop[order(pop[,10], decreasing = FALSE),]
44 BestHist ← data.frame(best=min(pop[,10]), average=mean(pop[,10]))
45
46 ## repeticao das demais geracoes ##
47 for(i in 2:genNumber){
48   child ← matrix(data=0, nrow = popSize, ncol = sizeS)
49   j = Elit_imp
50   child[1:(Elit_imp),1:(sizeS)] ← pop[1:(Elit_imp),1:(sizeS)]
51
52   while(j < popSize-1){
53     teste ← 0 # Testa o filho ser uma solucao valida apos o
54       crossover
55     valido ← 0 # Testa o filho ser uma solucao valida apos a mutacao
56     while( valido != 1){
57       # sorteia pais para a proxima geracao
58       parents ← matrix (data = 0, ncol = sizeS, nrow = 2)
59       if(runif(1) < CrossoverP){ # avalia a probabilidade de utilizar
60         o crossover
61         parents ← pop[c(1,2),] ##pega os dois primeiros para pais
62       }else{ # sorteia dois sujeitos aleatorios em sequencia na pop
63         ordenada
64         parentes ← sample(1:popSize-1, size = 1)
65         while(parentes == 0){ ### teste para conter erro em que
66           parentes estava recebendo 0
67           parentes ← sample(1:popSize-1, size = 1)}
68         parents ← pop[c(parentes,parentes+1), (1:sizeS)]}
69
70     # n1 < n2, h1 > h2, wh < wn < k
71     child[c(j+1,j+2), (1:sizeS)] ← parents
72     xn ← round(runif(1, 0.51, 2.49)) ### determinar se troca 1 ou

```

```

    2 posicoes do n ###
69 child[j+1,(1:xn)] ← parents[2,(1:xn)]
70 child[j+2,(1:xn)] ← parents[1,(1:xn)]
71
72 xh← round(runif(1, 2.51, 4.49)) ### determinar se troca 1 ou 2
    posicoes do h ###
73 child[j+1,(3:xh)] ← parents[2,(3:xh)]
74 child[j+2,(3:xh)] ← parents[1,(3:xh)]
75
76 xwk← round(runif(1, 4.51, 7.49)) ### determinar se troca 1, 2
    ou 3 posicoes do w e k ###
77 child[j+1,(5:xwk)] ← parents[2,(5:xwk)]
78 child[j+2,(5:xwk)] ← parents[1,(5:xwk)]
79
80 if(sum(child[,1]>child[,2])+sum(child[,3]<child[,4])+sum(child
    [,5]>child[,6])+sum(child[,6]>child[,7]) == 0){
81     teste ← 1}
82
83 ### Fim da funcao de Crossover ###
84 if(teste ==1 & runif(1) < MutRate){
85     mut ← sort(sample(1:7,sample(1:7,1,prob = (7:1)/sum(7:1))))
86     for(y in mut){
87         if(y == 1){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
            runif(1,ni,child[z,2]))}
88         if(y == 2){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
            runif(1,child[z,1],nf))}
89         if(y == 3){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
            runif(1,child[z,4],hf),digits = 3)}
90         if(y == 4){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
            runif(1,hi,child[z,3]),digits = 3)}
91         if(y == 5){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← runif
            (1,0,child[z,6])}
92         if(y == 6){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← runif
            (1,child[z,5],child[z,7])}
93         if(y == 7){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← runif
            (1,child[z,6],kf)}
94     }
95 }
96 # Validar child #

```

```

97     if(sum(child[,1]>child[,2])+sum(child[,3]<child[,4])+sum(child
98         [,5]>child[,6])+sum(child[,6]>child[,7]) == 0){
99         valido ← 1
100        j ← j+2}
101    }
102    }
103    ### Fim da funcao de Mutacao ###
104    for(l in 1:popSize){
105        foo ← fit_func DWL1(as.matrix(child[l,(1:7)])) ## fit function
106        dos novos individuos
107        child[l,8] ← foo$ANF
108        child[l,9] ← foo$AATS
109        child[l,10] ← foo$ED
110        if(child[l,8]>ANF0 || child[l,9]>AATS1){
111            child[l,10] ← child[l,10] + 2000 ## taxacao por exceder limite
112            do ANF ou do AATS}
113    }
114    pop ← child
115    pop ← pop[order(pop[,10], decreasing = FALSE),]
116    BestHist ← rbind(BestHist, data.frame(best=min(pop[,10]), average=
117        mean(pop[,10])))
118 }
119
120 ### Fim da funcao de Novas Geracoes ###
121 output_AG1 ← data.frame(pop[l,],row.names = c("n1","n2","h1","h2","
122     wh","wn","k","ANF","AATS","ED"))
123 colnames(output_AG1) ← "Carta 1"
124
125 ## Final GA DWL Modo 1 ##
126 ## Inicio GA DWL Modo 2 ##
127
128 popSize ← 100
129 if(popSize%%2 == 1){
130     popSize ← popSize+1}
131 Elit ← 0,1
132 Elit_imp ← round(Elit*popSize)
133 if(Elit_imp%%2 == 1){
134     Elit_imp ← Elit_imp + 1}
135 CrossoverP ← 0,3

```

```

131 MutRate ← 0,6
132 genNumber ← 150
133 ni ← 1
134 nf ← 40
135 hi ← 0,01
136 hf ← 8
137 wi ← 0
138 kf ← 40
139 ANF0 ← 0,5
140 AATS1 ← 10
141 sizeS ← 10
142 pop ← matrix(data=0, nrow = popSize, ncol = sizeS)
143
144 ## geracao da populacao inicial ##
145 i = 1
146 while(i < popSize+1){
147   pop[i,1] ← round(runif(1,ni,nf)) ## n1
148   pop[i,2] ← round(runif(1,pop[i,1],nf)) ## n2
149   pop[i,3] ← round(runif(1,hi,hf), digits = 3) ## h1
150   pop[i,4] ← round(runif(1,hi,pop[i,3]), digits = 3) ## h2
151   pop[i,5] ← runif(1,0,kf) ## wh
152   pop[i,6] ← runif(1,0,pop[i,5]) ## wn
153   pop[i,7] ← runif(1,pop[i,5],kf) ## k
154   foo ← fit_func DWL2(pop[i,1:7]) ## fit function da pop inicial
155   pop[i,8] ← foo$ANF
156   pop[i,9] ← foo$AATS
157   pop[i,10] ← foo$ED
158   if(pop[i,8]<ANF0 & pop[i,8]>0 & pop[i,9]<AATS1 & pop[i,10]>0){
159     i = i + 1}
160 }
161
162 pop ← pop[order(pop[,10], decreasing = FALSE),]
163 BestHist ← data.frame(best=min(pop[,10]), average=mean(pop[,10]))
164
165 ## repeticao das demais geracoes ##
166 for(i in 2:genNumber){
167   child ← matrix(data=0, nrow = popSize, ncol = sizeS)
168   j = Elit_imp
169   child[1:(Elit_imp),1:(sizeS)] ← pop[1:(Elit_imp),1:(sizeS)]

```

```

170
171 while(j < popSize-1){
172     teste ← 0 # Testa o filho ser uma solucao valida apos o
        crossover
173     valido ← 0 # Testa o filho ser uma solucao valida apos a mutacao
174     while( valido != 1){
175         # sorteia pais para a proxima geracao
176         parents ← matrix (data = 0, ncol = sizeS, nrow = 2)
177         if(runif(1) < CrossoverP){ # avalia a probabilidade de utilizar
            o crossover
178             parents ← pop[c(1,2),] ##pega os dois primeiros para pais
179         }else{ # sorteia dois sujeitos aleatorios em sequencia na pop
            ordenada
180             parentes ← sample(1:popSize-1, size = 1)
181             while(parentes == 0){ ### teste para conter erro em que
                parentes estava recebendo 0
182                 parentes ← sample(1:popSize-1, size = 1)}
183             parents ← pop[c(parentes,parentes+1), (1:sizeS)]}
184
185         # n1 < n2, h1 > h2, wn < wh < k
186         child[c(j+1,j+2), (1:sizeS)] ← parents
187         xn ← round(runif(1, 0.51, 2.49)) ### determinar se troca 1 ou
            2 posicoes do n ###
188         child[j+1, (1:xn)] ← parents[2, (1:xn)]
189         child[j+2, (1:xn)] ← parents[1, (1:xn)]
190
191         xh← round(runif(1, 2.51, 4.49)) ### determinar se troca 1 ou 2
            posicoes do h ###
192         child[j+1, (3:xh)] ← parents[2, (3:xh)]
193         child[j+2, (3:xh)] ← parents[1, (3:xh)]
194
195         xwk← round(runif(1, 4.51, 7.49)) ### determinar se troca 1, 2
            ou 3 posicoes do w e k ###
196         child[j+1, (5:xwk)] ← parents[2, (5:xwk)]
197         child[j+2, (5:xwk)] ← parents[1, (5:xwk)]
198
199         if(sum(child[,1]>child[,2])+sum(child[,3]<child[,4])+sum(child
            [,6]>child[,5])+sum(child[,5]>child[,7]) == 0){
200             teste ← 1}

```

```

201
202     ### Fim da funcao de Crossover ###
203     if(teste ==1 & runif(1) < MutRate){
204         mut ← sort(sample(1:7,sample(1:7,1,prob = (7:1)/sum(7:1))))
205         for(y in mut){
206             if(y == 1){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
207                 runif(1,ni,child[z,2]))}
208             if(y == 2){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
209                 runif(1,child[z,1],nf))}
210             if(y == 3){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
211                 runif(1,child[z,4],hf),digits = 3)}
212             if(y == 4){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
213                 runif(1,hi,child[z,3]),digits = 3)}
214             if(y == 5){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← runif
215                 (1,child[z,6],child[z,7])}
216             if(y == 6){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← runif
217                 (1,0,child[z,5])}
218             if(y == 7){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← runif
219                 (1,child[z,5],kf)}
220         }
221     }
222     # Validar child
223     if(sum(child[,1]>child[,2])+sum(child[,3]<child[,4])+sum(child
224         [,6]>child[,5])+sum(child[,5]>child[,7]) == 0){
225         valido ← 1
226         j ← j+2}
227     }
228 }
229
230     ### Fim da funcao de Mutacao ###
231     for(l in 1:popSize){
232         foo ← fit_func DWL2(as.matrix(child[l,(1:7)]))
233         child[l,8] ← foo$ANF
234         child[l,9] ← foo$AATS
235         child[l,10] ← foo$ED
236         if(child[l,8] > ANF0 || child[l,9] > AATS1){
237             child[l,10] ← child[l,10] + 2000 ## taxacao por exceder limite
238                 do ANF ou do AATS
239         }
240     }

```

```

231
232 pop ← child
233 pop ← pop[order(pop[,10], decreasing = FALSE),]
234 BestHist ← rbind(BestHist, data.frame(best=min(pop[,10]), average=
      mean(pop[,10])))
235 }
236
237 ### Fim da funcao de Novas Geracoes ###
238
239 output_AG2 ← data.frame(pop[1,],row.names = c("n1", "n2", "h1", "h2", "
      wh", "wn", "k", "ANF", "AATS", "ED"))
240 colnames(output_AG2) ← "Carta 2"
241
242 ## Final GA DWL Modo 2 ##
243 ## Inicio GA DWL Modo 3 ##
244
245 popSize ← 100
246 if(popSize%%2 == 1){
247   popSize ← popSize+1}
248 Elit ← 0,1
249 Elit_imp ← round(Elit*popSize)
250 if(Elit_imp%%2 == 1){
251   Elit_imp ← Elit_imp + 1}
252 CrossoverP ← 0,3
253 MutRate ← 0,6
254 genNumber ← 150
255 ni ← 1
256 nf ← 40
257 hi ← 0,01
258 hf ← 8
259 wi ← 0
260 kf ← 40
261 ANF0 ← 0,5
262 AATS1 ← 10
263 sizeS ← 9
264 pop ← matrix(data=0, nrow = popSize, ncol = sizeS)
265
266 ## geracao da populacao inicial ##
267 i = 1

```

```

268 while(i < popSize+1){
269   pop[i,1] ← round(runif(1,ni,nf)) ## n1
270   pop[i,2] ← round(runif(1,pop[i,1],nf)) ## n2
271   pop[i,3] ← round(runif(1,hi,hf), digits = 3) ## h1
272   pop[i,4] ← round(runif(1,hi,pop[i,3]), digits = 3) ## h2
273   pop[i,5] ← runif(1,0,kf) ## w
274   pop[i,6] ← runif(1,pop[i,5],kf) ## k
275   foo ← fit_func DWL3(pop[i,1:6]) ## fit function da pop inicial
276   pop[i,7] ← foo$ANF
277   pop[i,8] ← foo$AATS
278   pop[i,9] ← foo$ED
279   if(pop[i,7]<ANF0 & pop[i,7]>0 & pop[i,8]<AATS1 & pop[i,9]>0){
280     i = i + 1}
281 }
282
283 pop ← pop[order(pop[,9], decreasing = FALSE),]
284 BestHist ← data.frame(best=min(pop[,9]), average=mean(pop[,9]))
285
286 ## repeticao das demais geracoes ##
287 for(i in 2:genNumber){
288   child ← matrix(data=0, nrow = popSize, ncol = sizeS)
289   j = Elit_imp
290   child[1:(Elit_imp),1:(sizeS)] ← pop[1:(Elit_imp),1:(sizeS)]
291
292   while(j < popSize-1){
293     teste ← 0 # Testa o filho ser uma solucao valida apos o
      crossover
294     valido ← 0 # Testa o filho ser uma solucao valida apos a mutacao
295     while( valido != 1){
296       # sorteia pais para a proxima geracao
297       parents ← matrix (data = 0, ncol = sizeS, nrow = 2)
298       if(runif(1) < CrossoverP){ # avalia a probabilidade de utilizar
        o crossover
299         parents ← pop[c(1,2),] ##pega os dois primeiros para pais
300       }else{ # sorteia dois sujeitos aleatorios em sequencia na pop
        ordenada
301         parentes ← sample(1:popSize-1, size = 1)
302         while(parentes == 0){ ### teste para conter erro em que
          parentes estava recebendo 0

```



```

303     parentes ← sample(1:popSize-1, size = 1)}
304     parents ← pop[c(parentes,parentes+1),(1:sizeS)]
305 }
306
307 # n1 < n2, h1 > h2, w < k
308 child[c(j+1,j+2),(1:sizeS)] ← parents
309 xn ← round(runif(1, 0.51, 2.49)) ### determinar se troca 1 ou
    2 posicoes do n ###
310 child[j+1,(1:xn)] ← parents[2,(1:xn)]
311 child[j+2,(1:xn)] ← parents[1,(1:xn)]
312
313 xh← round(runif(1, 2.51, 4.49)) ### determinar se troca 1 ou 2
    posicoes do h ###
314 child[j+1,(3:xh)] ← parents[2,(3:xh)]
315 child[j+2,(3:xh)] ← parents[1,(3:xh)]
316
317 xwk← round(runif(1, 4.51, 6.49)) ### determinar se troca 1 ou
    2 posicoes do w e k ###
318 child[j+1,(5:xwk)] ← parents[2,(5:xwk)]
319 child[j+2,(5:xwk)] ← parents[1,(5:xwk)]
320
321 if(sum(child[,1]>child[,2])+sum(child[,3]<child[,4])+sum(child
    [,5]>child[,6]) == 0){
322     teste ← 1}
323
324 ### Fim da funcao de Crossover ###
325 if(teste ==1 & runif(1) < MutRate){
326     mut ← sort(sample(1:6,sample(1:6,1,prob = (6:1)/sum(6:1))))
327     for(y in mut){
328         if(y == 1){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
            runif(1,ni,child[z,2]))}
329         if(y == 2){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
            runif(1,child[z,1],nf))}
330         if(y == 3){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
            runif(1,child[z,4],hf),digits = 3)}
331         if(y == 4){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← round(
            runif(1,hi,child[z,3]),digits = 3)}
332         if(y == 5){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← runif
            (1,0,child[z,6])}

```

```

333         if(y == 6){z ← sample(c(j+1,j+2),1); child[z,y] ← runif
           (1,child[z,5],kf)}
334     }
335 }
336 # Validar child
337 if(sum(child[,1]>child[,2])+sum(child[,3]<child[,4])+sum(child
           [,5]>child[,6])== 0){
338     valido ← 1
339     j ← j+2}
340 }
341 }
342 ### Fim da funcao de Mutacao ###
343 for(l in 1:popSize){
344     foo ← fit_func DWL3(as.matrix(child[l,(1:6)]))
345     child[l,7] ← foo$ANF
346     child[l,8] ← foo$AATS
347     child[l,9] ← foo$ED
348     if(child[l,7]>ANF0 || child[l,8]>AATS1){
349         child[l,9] ← child[l,9] + 2000 ## taxacao por exceder limite
           do ANF ou do AATS
350     }
351 }
352
353 pop ← child
354 pop ← pop[order(pop[,9], decreasing = FALSE),]
355 BestHist ← rbind(BestHist, data.frame(best=min(pop[,9]), average=
           mean(pop[,9])))
356 }
357
358 ### Fim da funcao de Novas Geracoes ###
359
360 output_AG3 ← data.frame(pop[1,],row.names = c("n1","n2","h1","h2","
           wh","k","ANF","AATS","ED"))
361 colnames(output_AG3)← "Carta 3"
362
363 ## Final GA DWL Modo 3 ##
364 ## Inicio compilador de resultados ##
365
366 output_AG3[c(7,8,9,10),1] ← output_AG3[c(6,7,8,9),1]

```

```

367 output_AG3[6,1] ← output_AG3[5,1]
368 BestBest ← data.frame(cbind(output_AG1,output_AG2,output_AG3), row.
      names = c("n1", "n2", "h1", "h2", "wh", "wn", "k", "ANF", "AATS", "ED"))
369 colnames(BestBest) ← c("Carta 1", "Carta 2", "Carta3")
370 print(BestBest)
371 cat("\n", "Parametros a serem utilizados no CEP:", "\n")
372 if(min(BestBest[10,]) == BestBest[10,1]){
373   cat("Utilizar o esquema adaptativo DWL 1, com primeira troca de
      parametros do intervalo de coletas - h1 para h2 - e segunda
      troca de parametros do tamanhos das amostras coletadas - n1
      para n2.\n")
374   cat("Tamanho da amostragem menor - n1: ", BestBest[1,1], "\n")
375   cat("Tamanho da amostragem maior - n2: ", BestBest[2,1], "\n")
376   cat("Intervalo de coletas amostrais maior - h1: ", BestBest[3,1], "\n
      ")
377   cat("Intervalo de coletas amostrais menor - h2: ", BestBest[4,1], "\n
      ")
378   cat("Faixa da troca de parametros de intervalos de coletas
      amostrais - wh: ", BestBest[5,1], "\n")
379   cat("Faixa da troca de parametros de tamanhos amostrais - wn: ",
      BestBest[6,1], "\n")
380   cat("Faixa do limite de acao - k: ", BestBest[7,1], "\n")
381   cat("Custo por hora estimado: R$ ", BestBest[10,1], "\n")
382   cat("Numero esperado de alarmes falsos por ciclo da carta de
      controle: ", BestBest[8,1], "\n")
383   cat("Tempo medio para a carta de controle sinalizar um ponto fora
      de controle: ", BestBest[9,1], "\n")
384   }
385 if(min(BestBest[10,]) == BestBest[10,2]){
386   cat("Utilizar o esquema adaptativo DWL 2, com primeira troca de
      parametros do tamanhos das amostras coletadas - n1 para n2 - e
      segunda troca de parametros do intervalo de coletas - h1 para
      h2. \n")
387   cat("Tamanho da amostragem menor - n1: ", BestBest[1,2], "\n")
388   cat("Tamanho da amostragem maior - n2: ", BestBest[2,2], "\n")
389   cat("Intervalo de coletas amostrais maior - h1: ", BestBest[3,2], "\n
      ")
390   cat("Intervalo de coletas amostrais menor - h2: ", BestBest[4,2], "\n
      ")

```

```
391 |   cat("Faixa da troca de parametros de intervalos de coletas
      |     amostrais - wh: ",BestBest[5,2],"\n")
392 |   cat("Faixa da troca de parametros de tamanhos amostrais - wn: ",
      |     BestBest[6,2],"\n")
393 |   cat("Faixa do limite de acao - k: ",BestBest[7,2],"\n")
394 |   cat("Custo por hora estimado: R$ ",BestBest[10,2],"\n")
395 |   cat("Numero esperado de alarmes falsos por ciclo da carta de
      |     controle: ",BestBest[8,2],"\n")
396 |   cat("Tempo medio para a carta de controle sinalizar um ponto fora
      |     de controle: ",BestBest[9,2],"\n")
397 | }
398 | if(min(BestBest[10,]) == BestBest[10,3]){
399 |   cat("Utilizar o esquema adaptativo DWL 3, com troca de parametros
      |     do intervalo de coletas - h1 para h2 - e troca de parametros do
      |     tamanhos das amostras coletadas - n1 para n2 - ao mesmo tempo
      |     .\n")
400 |   cat("Tamanho da amostragem menor - n1: ",BestBest[1,3],"\n")
401 |   cat("Tamanho da amostragem maior - n2: ",BestBest[2,3],"\n")
402 |   cat("Intervalo de coletas amostrais maior - h1: ",BestBest[3,3],"\
      |     n")
403 |   cat("Intervalo de coletas amostrais menor - h2: ",BestBest[4,3],"\
      |     n")
404 |   cat("Faixa da troca de parametros de intervalos de coletas
      |     amostrais - wh: ",BestBest[5,3],"\n")
405 |   cat("Faixa da troca de parametros de tamanhos amostrais - wn: ",
      |     BestBest[6,3],"\n")
406 |   cat("Faixa do limite de acao - k: ",BestBest[7,3],"\n")
407 |   cat("Custo por hora estimado: R$ ",BestBest[10,3],"\n")
408 |   cat("Numero esperado de alarmes falsos por ciclo da carta de
      |     controle: ",BestBest[8,3],"\n")
409 |   cat("Tempo medio para a carta de controle sinalizar um ponto fora
      |     de controle: ",BestBest[9,3],"\n")
410 | }
```

APÊNDICE B ROTEIRO AUXILIAR PARA VALIDAÇÃO DO ARTEFATO

Roteiro de validação do artefato

- Apresentação do processo produtivo

O processo produtivo no qual o artefato se encontra inserido é o processo contínuo por bateladas. O processo possui como característica a produção por meio de bateladas, contudo quando iniciada uma batelada de produtos este não pode ser interrompido e dado continuidade em um momento futuro, por, normalmente, se tratarem de produtos perecíveis. O processo contínuo por bateladas é comumente encontrado em indústrias de alimentos, bebidas, farmacêuticas, entre outras.

- O artefato

O artefato projetado consiste em uma carta de controle multivariada, adaptativa e autoiniciada para o monitoramento de p características da qualidade correlacionadas. Por este artefato ser aplicado a um processo contínuo por bateladas, em que uma batelada pode ter características diferente da anterior, a utilização do artefato é cíclica, ou seja, os parâmetros de operação da carta de controle são recalculados antes do início de cada nova batelada. A Figura 1 apresenta o funcionamento cíclico do artefato proposto.

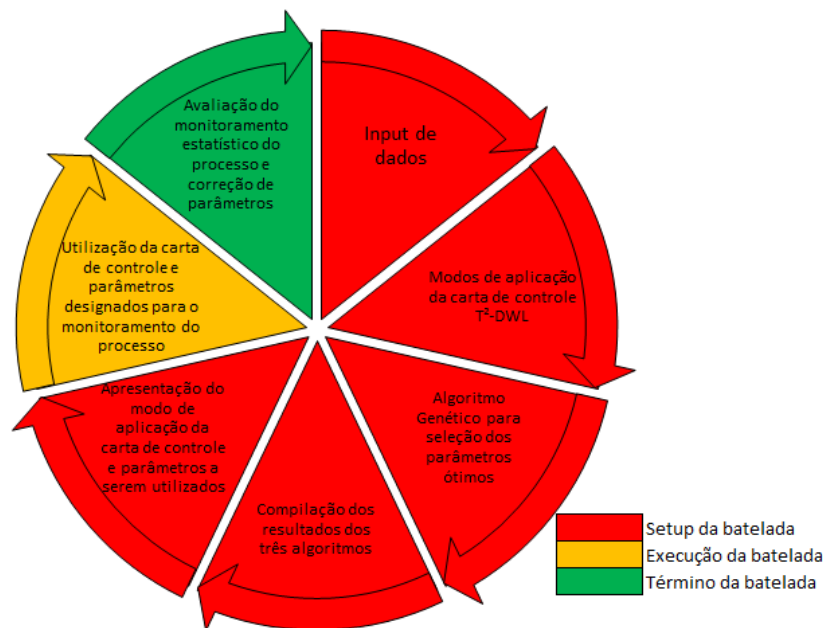


Figura 1 - Artefato para CEP em processos contínuos por bateladas

Para seleção dos parâmetros de operação será utilizado o conceito do Design Econômico-Estatístico que visa minimizar os custos do controle estatístico do processo sem prejudicar o desempenho estatístico da carta de controle.

- Dados de entrada

Como dados de entrada na heurística de otimização pode-se elencar os seguintes:

- Dados do processo produtivo:

Sua contribuição para esta pesquisa será essencial.
Desde já agradecemos sua participação!

- Quantidade de características correlacionadas a serem monitoradas;
- Tempo gasto na amostragem e interpretação de uma unidade amostral;
- Tempo gasto na busca de alarmes falsos;
- Tempo gasto na busca de alarmes verdadeiros;
- Tempo gasto na resolução de uma causa especial;
- Indicador de decisão se o processo é paralisado ou não durante as buscas por um alarme falso;
- Indicador de decisão se o processo é paralisado ou não durante a resolução de uma causa especial;
- Dados de custos do processo:
 - Custo de produção de produtos não-conformes com o processo sob controle;
 - Custo de produção de produtos não-conformes com o processo fora de controle;
 - Custo fixo do processo de amostragem;
 - Custo variável do processo de amostragem;
 - Custo de busca e reparo de um alarme verdadeiro;
 - Custo de busca de um alarme falso.
- Restrições da heurística de otimização:
 - Tamanho mínimo de um grupo amostral;
 - Tamanho máximo de um grupo amostral;
 - Intervalo mínimo entre coletas amostrais;
 - Intervalo máximo entre coletas amostrais;
 - Valor máximo para o limite de ação da carta de controle;
 - Taxa máxima aceitável de alarmes falsos;
 - Tempo máximo aceitável para a carta sinalizar um alarme verdadeiro.

- Dados de saída

Como dados de saída do modelo temos os parâmetros de operação da carta de controle:

- Tamanhos amostrais;
 - Intervalos entre coletas amostrais;
 - Faixa para a troca de parâmetros;
 - Limite de ação da carta de controle;
 - Taxa esperada de alarmes falsos;
 - Tempo esperado para a carta sinalizar um alarme verdadeiro;
 - Custo médio por hora de operação da carta de controle.
- O artefato, sua estrutura de funcionamento, dados de entrada e dados de saída condizem com a realidade do processo produtivo contínuo por bateladas? É viável o levantamento dos dados necessários?
- A aplicação deste artefato pode ser útil ao processo gerando vantagens competitivas como a melhoria no controle de qualidade do processo, a redução de custos e um possível incremento de receitas?

**APÊNDICE C RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES DE USO DO MO-
DELO PROPOSTO NA ETAPA DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA**

d = 2,033746	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	2	1	2
n_2	4	4	4
h_1	1,012	0,973	0,816
h_2	0,079	0,117	0,066
w_h	3,8472	6,3144	4,8261
w_n	5,4584	0,0106	4,8261
k	20,5310	20,7050	19,8092
ANF	0,0036	0,0028	0,0056
AATS	0,8032	0,7220	0,6876
$E(D)$	R\$ 220,34	R\$ 225,12	R\$ 219,35

d = 2,570623	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	1	1	2
n_2	2	2	2
h_1	0,72	0,884	0,73
h_2	0,036	0,051	0,076
w_h	3,9971	4,9078	5,3593
w_n	4,2194	0,0289	5,3593
k	18,6733	17,7243	16,3116
ANF	0,0120	0,0139	0,0313
AATS	0,6354	0,6076	0,5249
$E(D)$	R\$ 209,59	R\$ 209,81	R\$ 209,94

d = 2,078714	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	2	1	2
n_2	4	4	4
h_1	0,929	1,093	0,828
h_2	0,061	0,077	0,064
w_h	4,2827	6,0825	5,1416
w_n	6,0855	0,0423	5,1416
k	21,7004	22,4342	20,5507
ANF	0,0021	0,0011	0,0038
AATS	0,7429	0,7449	0,6982
$E(D)$	R\$ 219,12	R\$ 224,31	R\$ 218,68

d = 2,823702	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	1	2	1
n_2	2	3	2
h_1	0,778	0,852	0,736
h_2	0,04	0,04	0,062
w_h	4,1415	6,5389	4,3909
w_n	5,0854	6,5325	4,3909
k	19,5948	32,1492	17,8377
ANF	0,0070	0,0000	0,0165
AATS	0,5946	0,6073	0,5829
$E(D)$	R\$ 206,10	R\$ 213,35	R\$ 205,92

d = 2,810515	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	1	1	2
n_2	2	2	3
h_1	0,721	0,815	0,861
h_2	0,026	0,046	0,05
w_h	4,6111	5,6485	6,5325
w_n	5,5860	0,5790	6,5325
k	19,8442	20,1127	28,0762
ANF	0,0064	0,0046	0,0001
AATS	0,5739	0,5515	0,5809
$E(D)$	R\$ 206,83	R\$ 207,87	R\$ 208,83

d = 2,271953	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	2	1	2
n_2	3	3	3
h_1	0,787	0,934	0,769
h_2	0,072	0,07	0,051
w_h	4,8598	5,4591	5,7934
w_n	5,7196	0,1575	5,7934
k	19,2006	19,7421	20,4229
ANF	0,0077	0,0048	0,0041
AATS	0,6292	0,6361	0,6631
$E(D)$	R\$ 215,09	R\$ 216,96	R\$ 214,31

d = 0,868749	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	4	1	6
n_2	10	10	9
h_1	1,213	1,778	1,442
h_2	0,159	0,141	0,125
w_h	2,6577	2,8173	2,7253
w_n	2,9724	0,1324	2,7253
k	12,7910	13,9517	12,3022
ANF	0,1406	0,0565	0,1520
AATS	1,3263	1,6857	1,5975
$E(D)$	R\$ 285,59	R\$ 290,35	R\$ 283,46

d = 1,827877	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	2	1	3
n_2	5	5	4
h_1	1,04	1,135	0,899
h_2	0,063	0,106	0,12
w_h	3,5712	6,0819	4,6625
w_n	5,3735	0,0066	4,6625
k	22,3589	21,4412	16,2868
ANF	0,0015	0,0017	0,0272
AATS	0,8885	0,8105	0,7405
$E(D)$	R\$ 226,70	R\$ 232,71	R\$ 224,90

d = 0,487628	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	8	1	11
n_2	19	15	19
h_1	1,855	1,741	2,212
h_2	0,451	0,277	0,521
w_h	2,1983	2,7101	1,9508
w_n	2,3087	0,0175	1,9508
k	9,2182	9,4632	9,2815
ANF	0,4975	0,4428	0,4279
AATS	3,0739	3,0777	3,1181
$E(D)$	R\$ 367,07	R\$ 367,41	R\$ 364,34

d = 0,967529	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	4	1	5
n_2	8	7	8
h_1	1,373	1,512	1,592
h_2	0,133	0,147	0,176
w_h	2,7907	2,9907	2,7061
w_n	2,9894	0,0598	2,7061
k	12,6845	11,4377	11,9472
ANF	0,1302	0,2020	0,1604
AATS	1,6251	1,4404	1,5987
$E(D)$	R\$ 273,98	R\$ 274,50	R\$ 272,68

d = 2,101393	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	2	2	2
n_2	4	4	3
h_1	0,909	0,859	0,933
h_2	0,07	0,06	0,075
w_h	4,4102	5,1106	4,2004
w_n	5,6843	4,1366	4,2004
k	22,1356	24,8516	15,7603
ANF	0,0017	0,0005	0,0356
AATS	0,7431	0,7364	0,7009
$E(D)$	R\$ 218,81	R\$ 224,40	R\$ 216,82

d = 1,396794	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	3	1	3
n_2	6	5	5
h_1	0,986	1,218	0,966
h_2	0,088	0,104	0,092
w_h	3,6869	3,9380	3,6935
w_n	4,3799	0,0437	3,6935
k	16,2809	14,6878	13,6387
ANF	0,0282	0,0469	0,0992
AATS	0,9801	0,9995	0,9472
$E(D)$	R\$ 241,32	R\$ 242,58	R\$ 240,91

d = 2,225816	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	1	1	2
n_2	4	4	4
h_1	1,307	1,049	0,988
h_2	0,956	0,078	0,062
w_h	0,0031	6,7607	5,1775
w_n	0,1087	0,0529	5,1775
k	13,8766	25,4718	23,5774
ANF	0,0629	0,0003	0,0007
AATS	0,6778	0,7141	0,7530
$E(D)$	R\$ 221,45	R\$ 223,12	R\$ 217,02

d = 1,608837	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	2	1	3
n_2	4	4	5
h_1	0,889	1,168	1,11
h_2	0,059	0,111	0,089
w_h	3,3690	3,8947	3,9842
w_n	3,5785	0,1095	3,9842
k	15,6621	14,5079	16,8519
ANF	0,0445	0,0533	0,0184
AATS	0,8816	0,8920	0,9156
$E(D)$	R\$ 231,51	R\$ 233,05	R\$ 231,28

d = 0,485568	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	1	1	11
n_2	22	16	19
h_1	1,754	1,764	2,01
h_2	1,34	0,275	0,53
w_h	0,8146	2,5784	2,2170
w_n	0,8149	0,0621	2,2170
k	8,6497	9,7574	8,9348
ANF	0,4739	0,3952	0,4989
AATS	3,1127	2,9473	3,0344
$E(D)$	R\$ 364,67	R\$ 369,17	R\$ 364,33

d = 2,287125	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	2	1	1
n_2	3	3	4
h_1	0,884	0,918	1,052
h_2	0,048	0,072	0,94
w_h	4,6146	5,7413	0,3045
w_n	5,6824	0,0212	0,3045
k	20,5043	20,0824	14,2406
ANF	0,0038	0,0041	0,0537
AATS	0,6515	0,6327	0,6747
$E(D)$	R\$ 214,64	R\$ 216,74	R\$ 220,65

d = 1,158124	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	1	1	4
n_2	8	7	7
h_1	2,158	1,444	1,226
h_2	1,139	0,133	0,102
w_h	0,0006	3,6950	3,4260
w_n	0,0226	0,0125	3,4260
k	10,8201	14,3547	14,0480
ANF	0,2174	0,0479	0,0681
AATS	1,2849	1,1969	1,2353
$E(D)$	R\$ 263,81	R\$ 259,15	R\$ 254,59

d = 0,539534	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	5	2	1
n_2	17	15	19
h_1	1,751	2,139	1,852
h_2	0,584	0,35	1,495
w_h	1,7131	2,3301	0,1829
w_n	1,8229	0,0033	0,1829
k	9,3991	9,3232	8,4165
ANF	0,4850	0,4225	0,4893
AATS	2,7881	2,5765	2,7203
$E(D)$	R\$ 350,96	R\$ 350,74	R\$ 348,15

d = 1,406644	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	3	1	3
n_2	6	6	6
h_1	1,093	1,189	0,968
h_2	0,082	0,105	0,096
w_h	3,4260	4,5720	3,8217
w_n	4,0987	0,0654	3,8217
k	16,7208	17,8610	18,2164
ANF	0,0217	0,0100	0,0112
AATS	1,0037	0,9961	1,0713
$E(D)$	R\$ 240,92	R\$ 246,14	R\$ 241,54

d = 2,479656	DWL 1	DWL 2	DWL 3
n_1	2	1	2
n_2	3	2	3
h_1	0,858	0,783	0,819
h_2	0,056	0,069	0,062
w_h	5,2845	4,9907	5,6967
w_n	6,7039	0,0244	5,6967
k	21,8390	16,5998	20,7680
ANF	0,0020	0,0270	0,0033
AATS	0,6050	0,5933	0,5839
$E(D)$	R\$ 212,57	R\$ 211,18	R\$ 211,29

ANEXO A EQUAÇÕES DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO DA CADEIA DE MARKOV APLICADA À CARTA DE CONTROLE DWL NO MODO 1

$$p_{11} = pr(0 \leq T^2 < w_h) \times e^{-\lambda h_1} = F(w_h, \rho, \eta = 0) \times e^{-\lambda h_1} \quad (\text{A.1})$$

$$p_{12} = pr(w_h \leq T^2 < w_n) \times e^{-\lambda h_1} = [F(w_n, \rho, \eta = 0) - F(w_h, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (\text{A.2})$$

$$p_{13} = pr(w_n \leq T^2 < k) \times e^{-\lambda h_1} = [F(k, \rho, \eta = 0) - F(w_n, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (\text{A.3})$$

$$p_{14} = pr(T^2 \geq k) \times e^{-\lambda h_1} = [1 - F(k, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (\text{A.4})$$

$$p_{15} = pr(0 \leq T^2 < w_h) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{A.5})$$

$$p_{16} = pr(w_h \leq T^2 < w_n) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{A.6})$$

$$p_{17} = pr(w_n \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [F(k, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{A.7})$$

$$p_{18} = pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{A.8})$$

$$p_{21} = p_{31} = p_{41} = pr(0 \leq T^2 < w_h) \times e^{-\lambda h_2} = F(w_h, \rho, \eta = 0) \times e^{-\lambda h_2} \quad (\text{A.9})$$

$$p_{22} = p_{32} = p_{42} = pr(w_h \leq T^2 < w_n) \times e^{-\lambda h_2} = [F(w_n, \rho, \eta = 0) - F(w_h, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (\text{A.10})$$

$$p_{23} = p_{33} = p_{43} = pr(w_n \leq T^2 < k) \times e^{-\lambda h_2} = [F(k, \rho, \eta = 0) - F(w_n, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (\text{A.11})$$

$$p_{24} = p_{34} = p_{44} = pr(T^2 \geq k) \times e^{-\lambda h_2} = [1 - F(k, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (\text{A.12})$$

$$p_{25} = pr(0 \leq T^2 < w_h) \times e^{-\lambda h_2} = F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{A.13})$$

$$p_{26} = pr(w_h \leq T^2 < w_n) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{A.14})$$

$$p_{27} = pr(w_n \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [F(k, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{A.15})$$

$$p_{28} = pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{A.16})$$

$$p_{35} = p_{45} = pr(0 \leq T^2 < w_h) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{A.17})$$

$$p_{36} = p_{46} = pr(w_h \leq T^2 < w_n) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{A.18})$$

$$p_{37} = p_{47} = pr(w_n \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [F(k, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{A.19})$$

$$p_{38} = p_{48} = pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{A.20})$$

$$p_{55} = p_{65} = pr(0 \leq T^2 < w_h) = F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2) \quad (\text{A.21})$$

$$p_{56} = p_{66} = pr(w_h \leq T^2 < w_n) = [F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2)] \quad (\text{A.22})$$

$$p_{57} = p_{67} = pr(w_n \leq T^2 < k) = [F(k, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2)] \quad (\text{A.23})$$

$$p_{58} = p_{68} = pr(T^2 \geq k) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_1 d^2)] \quad (\text{A.24})$$

$$p_{75} = pr(0 \leq T^2 < w_h) = F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2) \quad (\text{A.25})$$

$$p_{76} = pr(w_h \leq T^2 < w_n) = [F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2)] \quad (\text{A.26})$$

$$p_{77} = pr(w_n \leq T^2 < k) = [F(k, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2)] \quad (\text{A.27})$$

$$p_{78} = pr(T^2 \geq k) = 1 - F(k, \rho, \eta = n_2 d^2) \quad (\text{A.28})$$

ANEXO B EQUAÇÕES DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO DA CADEIA DE MARKOV APLICADA À CARTA DE CONTROLE DWL NO MODO 2

$$p_{11} = p_{21} = pr(0 \leq T^2 < w_n) \times e^{-\lambda h_1} = F(w_n, \rho, \eta = 0) \times e^{-\lambda h_1} \quad (\text{B.1})$$

$$p_{12} = p_{22} = pr(w_n \leq T^2 < w_h) \times e^{-\lambda h_1} = [F(w_h, \rho, \eta = 0) - F(w_n, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (\text{B.2})$$

$$p_{13} = p_{23} = pr(w_h \leq T^2 < k) \times e^{-\lambda h_1} = [F(k, \rho, \eta = 0) - F(w_h, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (\text{B.3})$$

$$p_{14} = p_{24} = pr(T^2 \geq k) \times e^{-\lambda h_1} = [1 - F(k, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (\text{B.4})$$

$$p_{15} = pr(0 \leq T^2 < w_n) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{B.5})$$

$$p_{16} = pr(w_n \leq T^2 < w_h) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{B.6})$$

$$p_{17} = pr(w_h \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [F(k, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{B.7})$$

$$p_{18} = pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{B.8})$$

$$p_{25} = pr(0 \leq T^2 < w_n) \times e^{-\lambda h_1} = F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{B.9})$$

$$p_{26} = pr(w_n \leq T^2 < w_h) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{B.10})$$

$$p_{27} = pr(w_h \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [F(k, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{B.11})$$

$$p_{28} = pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (\text{B.12})$$

$$p_{31} = p_{41} = pr(0 \leq T^2 < w_n) \times e^{-\lambda h_2} = F(w_n, \rho, \eta = 0) \times e^{-\lambda h_2} \quad (\text{B.13})$$

$$p_{32} = p_{42} = pr(w_n \leq T^2 < w_h) \times e^{-\lambda h_2} = [F(w_h, \rho, \eta = 0) - F(w_n, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (\text{B.14})$$

$$p_{33} = p_{43} = pr(w_h \leq T^2 < k) \times e^{-\lambda h_2} = [F(k, \rho, \eta = 0) - F(w_h, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (\text{B.15})$$

$$p_{34} = p_{44} = pr(T^2 \geq k) \times e^{-\lambda h_2} = [1 - F(k, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (\text{B.16})$$

$$p_{35} = p_{45} = pr(0 \leq T^2 < w_n) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{B.17})$$

$$p_{36} = p_{46} = pr(w_n \leq T^2 < w_h) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{B.18})$$

$$p_{37} = p_{47} = pr(w_h \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [F(k, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{B.19})$$

$$p_{38} = p_{48} = pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (\text{B.20})$$

$$p_{55} = pr(0 \leq T^2 < w_n) = F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2) \quad (\text{B.21})$$

$$p_{56} = pr(w_n \leq T^2 < w_h) = [F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_1 d^2)] \quad (\text{B.22})$$

$$p_{57} = pr(w_h \leq T^2 < k) = [F(k, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_1 d^2)] \quad (\text{B.23})$$

$$p_{58} = pr(T^2 \geq k) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_1 d^2)] \quad (\text{B.24})$$

$$p_{65} = p_{75} = pr(0 \leq T^2 < w_n) = F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2) \quad (\text{B.25})$$

$$p_{66} = p_{76} = pr(w_n \leq T^2 < w_h) = [F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_n, \rho, \eta = n_2 d^2)] \quad (\text{B.26})$$

$$p_{67} = p_{77} = pr(w_h \leq T^2 < k) = [F(k, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w_h, \rho, \eta = n_2 d^2)] \quad (\text{B.27})$$

$$p_{68} = p_{78} = pr(T^2 \geq k) = 1 - F(k, \rho, \eta = n_2 d^2) \quad (\text{B.28})$$

ANEXO C EQUAÇÕES DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO DA CADEIA DE MARKOV APLICADA À CARTA DE CONTROLE DWL NO MODO 3

$$p_{11} = pr(0 \leq T^2 < w) \times e^{-\lambda h_1} = F(w, \rho, \eta = 0) \times e^{-\lambda h_1} \quad (C.1)$$

$$p_{12} = pr(w \leq T^2 < k) \times e^{-\lambda h_1} = [F(k, \rho, \eta = 0) - F(w, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (C.2)$$

$$p_{13} = pr(T^2 \geq k) \times e^{-\lambda h_1} = [1 - F(k, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (C.3)$$

$$p_{14} = pr(0 \leq T^2 < w) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = F(w, \rho, \eta = n_1 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (C.4)$$

$$p_{15} = pr(w \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [F(k, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (C.5)$$

$$p_{16} = pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (C.6)$$

$$p_{21} = p_{31} = pr(0 \leq T^2 < w) \times e^{-\lambda h_2} = F(w, \rho, \eta = 0) \times e^{-\lambda h_2} \quad (C.7)$$

$$p_{22} = p_{32} = pr(w \leq T^2 < k) \times e^{-\lambda h_2} = [F(k, \rho, \eta = 0) - F(w, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (C.8)$$

$$p_{23} = p_{33} = pr(T^2 \geq k) \times e^{-\lambda h_2} = [1 - F(k, \rho, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (C.9)$$

$$p_{24} = p_{34} = pr(0 \leq T^2 < w) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = F(w, \rho, \eta = n_2 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (C.10)$$

$$p_{25} = p_{35} = pr(w \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [F(k, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (C.11)$$

$$p_{26} = p_{36} = pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (C.12)$$

$$p_{44} = pr(0 \leq T^2 < w) = F(w, \rho, \eta = n_1 d^2) \quad (C.13)$$

$$p_{45} = pr(w \leq T^2 < k) = [F(k, \rho, \eta = n_1 d^2) - F(w, \rho, \eta = n_1 d^2)] \quad (C.14)$$

$$p_{46} = pr(T^2 \geq k) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_1 d^2)] \quad (C.15)$$

$$p_{54} = pr(0 \leq T^2 < w) = F(w, \rho, \eta = n_2 d^2) \quad (C.16)$$

$$p_{55} = pr(w \leq T^2 < k) = [F(k, \rho, \eta = n_2 d^2) - F(w, \rho, \eta = n_2 d^2)] \quad (C.17)$$

$$p_{56} = pr(T^2 \geq k) = [1 - F(k, \rho, \eta = n_2 d^2)] \quad (C.18)$$