

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Washington Luis Moreira Braga**

## **PROJETO DE PARÂMETROS ROBUSTOS PARA MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS *KANBAN*: UMA ABORDAGEM BASEADA EM EXPERIMENTOS SIMULADOS**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de *Doutor em Ciências em Engenharia de Produção*.

**Área de concentração:** Engenharia de Produção

**Orientador:** Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes

Itajubá

Abril de 2020

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Washington Luis Moreira Braga**

## **PROJETO DE PARÂMETROS ROBUSTOS PARA MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS KANBAN: UMA ABORDAGEM BASEADA EM EXPERIMENTOS SIMULADOS**

Tese aprovada por banca examinadora em 23 de abril de 2020,  
conferindo ao autor o título de *Doutor em Ciência em Engenharia de  
Produção*

### **Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Francisco Rodrigues Lima Junior (UTFPR)

Prof. Dr. Messias Borges Silva (EEL – USP)

Prof. Dr. Alexandre Ferreira de Pinho (UNIFEI)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches da Silva (UNIFEI)

Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes (Orientador)

Itajubá

Abril de 2020

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora de Aparecida, por estarem sempre presentes em minha vida, iluminando meu caminho e me ajudando a perseverar na fé e na busca da realização de meus sonhos.

À minha esposa Darly e às minhas filhas Ana Rita e Helena Luísa, que sempre me apoiaram neste desafio, se privando de minha companhia em inúmeros momentos de suas vidas.

Aos meus pais Luiz e Maria, que foram sempre a minha inspiração, com sua simplicidade, amor e acima de tudo apoio incondicional.

Ao professor José Henrique de Freitas Gomes, pela paciência e ensinamentos, com respeito às minhas limitações, sempre confiou na minha capacidade e no meu trabalho.

Aos demais professores da pós-graduação e pessoal de apoio da UNIFEI, com os quais eu tive a oportunidade de conviver durante esta longa jornada.

Aos inúmeros colegas que compartilhei meu tempo durante todo este período, em especial ao meu grande amigo Fabiano Luiz Naves, uma referência como pessoa em termos de amizade, profissionalismo, honestidade e fé.

A Flexsim Brasil, pelo apoio na fase inicial do trabalho.

A FATEC MOCOCA-Centro Paula Souza e a PUC Minas Campus Poços de Caldas, que sempre me apoiaram.

E de forma geral a todos aqueles que contribuíram para o meu desenvolvimento como pesquisador e ser humano.

## RESUMO

O controle de estoque impacta no fluxo do processo produtivo, no atendimento ao cliente e no custo. Para melhorar esta gestão, muitas empresas utilizam o conceito do *kanban*, que tem a finalidade de programar e controlar a produção visualmente. Todavia, poucos estudos da literatura fazem uso de um método sistemático para sua otimização, sendo também possível observar em ambientes industriais, o uso da fórmula tradicional da Toyota, considerando a demanda de forma nivelada. Logo, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor uma abordagem para otimização de sistemas *kanban* com o uso do Projeto de Parâmetros Robustos, por meio de experimentos simulados. Tal estratégia tem como princípio o cálculo do estoque de segurança para determinar o planejamento experimental, buscando atingir o nível de serviço desejado. Em seguida, ocorre a execução da simulação com os dados do planejamento experimental no modelo simulado, considerando a variação aleatória diária de demanda ao longo de 30 dias, sendo registrado ao final a quantidade de *kanban* não entregue e o número de *kanban* em estoque. A partir desses dados, modelos matemáticos que levam em consideração a média e a variância são construídos, de maneira que a otimização robusta para o dimensionamento do supermercado possa ser obtida por meio do Erro Quadrático Médio (EQM). Para comprovar a aplicabilidade do método proposto, o procedimento foi testado em dois diferentes casos da literatura. Para a modelagem das funções de otimização utilizou-se a Metodologia de Superfície de Resposta, sendo estas matematicamente programadas empregando o EQM. A abordagem ponderada (EQM<sub>P</sub>) também foi aplicada como uma técnica adicional para se atingir melhores resultados em relação à otimização robusta. Assim sendo, a abordagem proposta foi desenvolvida e aplicada satisfatoriamente nos dois casos da literatura, levando a resultados ótimos em relação aos objetivos da otimização robusta. Também foi possível fazer uma comparação entre a abordagem proposta e os resultados atingidos com o otimizador do software de simulação *Arena*<sup>®</sup>, o *OptQuest*<sup>®</sup>, demonstrando assim que o método proposto neste trabalho obteve melhores resultados no que diz respeito à robustez.

**Palavras-chave:** *Kanban*; Projeto de Experimentos; Projeto de Parâmetros Robustos; Experimentos Simulados; Otimização; Manufatura Enxuta.

## ABSTRACT

*Inventory control impacts the flow of the production process, customer service and cost. To improve this management, many companies use the concept of kanban, which has the purpose of programming and controlling production visually. However, few studies in the literature make use of a systematic method for its optimization, and it is also possible to observe in industrial environments, the use of Toyota's traditional formula, considering the demand levelly. Therefore, this work was developed with the objective of proposing an approach to optimize kanban systems using the Robust Parameters Design, through simulated experiments. This strategy is based on the calculation of the safety stock to determine the experimental planning, seeking to achieve the desired service level. Then, the simulation is executed with the experimental planning data in the simulated model, considering the daily random variation of demand over 30 days, with the quantity of kanban not delivered and the number of kanban in stock recorded at the end. From these data mathematical models that take into account the mean and variance are constructed, so that the robust optimization for the dimensioning of the supermarket can be obtained through the Mean Square Error (MSE). To prove the applicability of the proposed method, the procedure was tested in two different cases in the literature, Tubino (2007) and Hurrion (1997). For the modeling of the optimization functions, the Response Surface Methodology (RSM) was used, being mathematically programmed using the MSE. The weighted approach ( $MSE_P$ ) was also applied as an additional technique to achieve better results in relation to robust optimization. Therefore, the proposed approach was developed and applied satisfactorily in both cases in the literature, leading to optimal results in relation to the objectives of robust optimization. It was also possible to make a comparison between the proposed approach and the results achieved with the optimizer of the Arena<sup>®</sup> simulation software, OptQuest<sup>®</sup>, thus demonstrating that the method proposed in this work obtained better results with regard to robustness.*

**Keywords:** *Kanban; Design of Experiments; Robust Project Design; Simulated Experiments; Optimization; Lean Manufacturing.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Decisões de capacidade.....	8
Figura 2.2 - Tipos de kanbans mencionados na literatura .....	17
Figura 2.3 - Relação entre ES, quantidade de pedido e ponto de reposição .....	23
Figura 2.4 - Artigos publicados com o tema <i>kanban optimization</i> .....	30
Figura 2.5 - Percentual por tipo de método utilizado nas publicações .....	30
Figura 2.6 - Aplicações do uso de otimização kanban .....	35
Figura 2.7 - Percentual por tipo de empresa (montadoras e fabricantes) .....	36
Figura 2.8 - Arranjo de misturas Simplex lattice.....	40
Figura 2.9 - Arranjo de misturas Simplex centroide.....	40
Figura 2.10 - Modelo conceitual do ciclo de vida do projeto de simulação .....	46
Figura 3.1 - Abordagem proposta para otimização de sistemas kanban.....	53
Figura 4. 1 - Descrição esquemática do objeto de estudo Caso Tubino .....	56
Figura 4. 2 - Fluxograma do modelo conceitual – Caso Tubino .....	58
Figura 4. 3 - Modelo computacional do objeto de estudo Caso Tubino.....	59
Figura 4. 4 - Comportamento aleatório e estacionário da demanda para o experimento 1 Caso Tubino.....	64
Figura 4. 5 - Valores teóricos ótimos sem peso x ótimos com peso.....	71
Figura 4. 6 – Amostras para confirmação dos valores otimizados .....	74
Figura 4. 7 - Valores modelados com peso x valores simulados (confirmação) .....	75
Figura 4. 8 - Descrição esquemática do objeto de estudo Caso Hurrion.....	82
Figura 4. 9 - Fluxograma do modelo conceitual Caso Hurrion .....	84
Figura 4. 10 - Modelo computacional do objeto de estudo Caso Hurrion.....	85
Figura 4. 11- Comportamento aleatório e estacionário da demanda para o experimento 1 Caso Hurrion.....	89
Figura 4. 12 - Valores teóricos ótimos sem peso x ótimos com peso.....	98
Figura 4. 13 - Comparação valor após e antes da otimização.....	99
Figura 4. 14 - Amostras para confirmação dos valores otimizados.....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Variáveis utilizadas nos modelos prévios para otimização de <i>kanban</i> .....	33
Tabela 2.2 - Tipo de algoritmo .....	33
Tabela 2.3 - Tipo de indicadores usados em modelos de otimização de <i>kanban</i> .....	34
Tabela 4. 1- Dimensionamento do número de teares .....	54
Tabela 4. 2 - Dados usados no cálculo de <i>kanban</i> .....	55
Tabela 4. 3 - Estoque de segurança .....	61
Tabela 4. 4 - Quantidade de <i>kanban</i> sem estoque de segurança (ES) .....	62
Tabela 4. 5- Quantidade de <i>kanban</i> com ES.....	62
Tabela 4. 6 - Níveis <i>kanbans</i> no Caso Tubino.....	62
Tabela 4. 7- Demandas aleatórias para o experimento 1 ( <i>kanbans</i> /dia) .....	63
Tabela 4. 8 - Matriz de experimentos .....	65
Tabela 4. 9 - Ajustes estatísticos da análise da média e variância.....	66
Tabela 4. 10 - Valores de EQM .....	67
Tabela 4. 11- Quantidade de <i>kanbans</i> .....	68
Tabela 4. 12 - Valores após otimização do EQM .....	68
Tabela 4. 13 - Matriz experimental para as combinações de pesos.....	70
Tabela 4. 14 - Quantidade otimizada de <i>kanbans</i> .....	71
Tabela 4. 15 - Número de experimentos.....	72
Tabela 4. 16 - Resultado de <i>kanbans</i> não entregues .....	73
Tabela 4. 17 - Resultados experimentos confirmados .....	73
Tabela 4. 18- Valores ótimos <i>OptQuest</i> <sup>®</sup> .....	77
Tabela 4. 19 - Comparação quantidade de <i>kanbans</i> Caso Tubino.....	77
Tabela 4. 20 - Comparação média variância otimizador x método proposto .....	77
Tabela 4. 21 - Dados de tempos de processamento .....	78
Tabela 4. 22- Valores de demanda .....	79
Tabela 4. 23 - Tempos de processamento.....	80
Tabela 4. 24 - Dados ajustados .....	81
Tabela 4. 25 - Valores de estoque de segurança .....	87
Tabela 4. 26 - Quantidade de <i>kanban</i> sem estoque de segurança (ES) .....	87
Tabela 4. 27- Quantidade de <i>kanban</i> com ES.....	87
Tabela 4. 28 - Níveis para os <i>kanbans</i> Caso Hurriion .....	88
Tabela 4. 29 - Demandas aleatórias para o experimento 1 ( <i>kanbans</i> /dia) .....	89
Tabela 4. 30 - Matriz de experimentos .....	90
Tabela 4. 31- Ajustes estatísticos.....	92
Tabela 4. 32 - Valores de EQM .....	93
Tabela 4. 33 - Quantidade de <i>kanbans</i> .....	94
Tabela 4. 34 - Valores após otimização do EQM .....	95
Tabela 4. 35 - Matriz experimental para as combinações de pesos.....	96
Tabela 4. 36 - Quantidade otimizada de <i>kanbans</i> .....	97
Tabela 4. 37 - Comparação antes x após otimização.....	99
Tabela 4. 38 - Resultado de <i>kanbans</i> não entregues .....	101
Tabela 4. 39 - Resultados experimentos confirmados .....	101
Tabela 4. 40 - Valores ótimos <i>OptQuest</i> <sup>®</sup> .....	103
Tabela 4. 41 - Comparação entre o método proposto e o <i>OptQuest</i> <sup>®</sup> .....	103
Tabela 4. 42 - Comparação de resultados da média e variância .....	103

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2. 1- Regras para o adequado funcionamento do <i>kanban</i> .....	15
Quadro 2. 2- Trabalhos com maior número de citações.....	31
Quadro 2. 3 - Estratégias de otimização robusta .....	42
Quadro 4. 1- Dados para o arranjo de misturas dos pesos.....	69
Quadro 4. 2- Informações utilizadas na programação do <i>OptQuest</i> <sup>®</sup> .....	76
Quadro 4. 3- Componentes requeridos .....	79
Quadro 4. 4 - Dados para o arranjo de misturas dos pesos.....	95
Quadro 4. 5- Informações utilizadas na programação do <i>OptQuest</i> <sup>®</sup> .....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DOE	Projeto de Experimentos
EQM	<i>Erro Quadrático Médio</i>
EQM <sub>P</sub>	<i>Erro Quadrático Médio Ponderado</i>
EQM <sub>C</sub>	<i>Erro Quadrático Médio Calculado</i>
IC	Intervalo de confiança
TPS	Sistema Toyota de Produção
JIT	<i>Just in time</i>
CCD	Arranjo Composto Central
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
TI	Tecnologia da Informação
MRP	Planejamento das Necessidades de Materiais
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
SMED	<i>Single Minute Exchange</i> – Troca Rápida de Ferramentas
TRF	Troca Rápida de Ferramentas
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> – Manutenção Produtiva Total
TP	Trabalho Padronizado
MFV	Mapeamento do Fluxo de Valor
FKS	Sistema <i>kanban</i> Flexível
HK	Sistema <i>kanban</i> Híbrido
EKCS	Sistema de Controle de <i>kanban</i> Estendido
AK	Sistema <i>kanban</i> Adaptado
SKE	Sistema <i>kanban</i> Eletrônico
TKS	Sistema <i>kanban</i> Tradicional
ES	Estoque de Segurança
CONWIP	Sistema Híbrido de Produção
RPD	Projeto de Parâmetros Robustos
MOGA	Algoritmo Genético Múltiplo Objetivo Integrado
GA	Algoritmo Genético
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
EQM <sub>G</sub>	<i>Erro Quadrático Médio Global</i>
EQMS	<i>Erros Quadráticos Experimentais</i>

EQM <sub>P</sub>	<i>Erro Quadrático Ponderado</i>
M151	Malha151
M191	Malha191
M1074	Malha1074
F <sub>s</sub>	<i>Fator de Serviço</i>
TE151	<i>Total de Entrega Malha 151</i>
TE191	<i>Total de Entrega Malha 191</i>
TE1074	<i>Total de Entrega Malha 1074</i>
TEA	<i>Total de Entrega Produto A</i>
TEB	<i>Total de Entrega Produto B</i>
TEC	<i>Total de Entrega Produto C</i>
TED	<i>Total de Entrega Produto D</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTO DA PESQUISA .....	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	3
1.3 DELIMITAÇÕES .....	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO.....	7
2.2 SISTEMA TOYOTA DE PRODUÇÃO .....	9
2.3 TÉCNICAS E FERRAMENTAS DO TPS .....	11
2.3.1 Troca rápida de ferramentas (SMED).....	12
2.3.2 Manutenção produtiva total (TPM) .....	12
2.3.3 Programa 5S (5s) .....	13
2.3.4 Kaizen .....	13
2.3.5 Trabalho Padronizado (TP).....	13
2.3.6 Mapeamento do fluxo de valor (MFV).....	14
2.3.7 <i>Kanban</i> .....	14
2.4 SISTEMAS <i>KANBAN</i> .....	15
2.4.1 Definições .....	15
2.4.2 Tipos de <i>kanban</i> e funções .....	16
2.4.3 Equações tradicionais para o cálculo de <i>kanbans</i> .....	20
2.4.4 Estoque de Segurança.....	22
2.5 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA SISTEMAS <i>KANBAN</i> .....	23
2.6 ANÁLISE DE PESQUISAS DA LITERATURA SOBRE SISTEMAS <i>KANBAN</i> .....	29
2.6.1 Variáveis utilizadas.....	32
2.6.2 Algoritmo .....	33
2.6.3 Indicadores dos métodos de otimização .....	34
2.6.4 Tipos de aplicações.....	34
2.6.5 Tipos de empresas .....	35
2.7 PROJETO DE EXPERIMENTOS (DOE).....	36
2.7.1 Metodologia de Superfície de resposta.....	37
2.7.2 Experimentos de misturas.....	38
2.8 PROJETO DE PARÂMETROS ROBUSTOS.....	41
2.8.1 Otimização pelo EQM .....	43
2.9 EXPERIMENTOS SIMULADOS .....	44
<b>3. MÉTODO DE PESQUISA E MODELO PROPOSTO .....</b>	<b>48</b>
<b>4. APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....</b>	<b>54</b>
<b>CASO 1 - TUBINO .....</b>	<b>54</b>
4.1 PASSO 1: MODELAGEM DO SISTEMA A SER SIMULADO .....	55
4.2 PASSO 2: PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS SIMULADOS .....	60
4.3 PASSO 3: EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS SIMULADOS .....	63
4.4 PASSO 4: REGISTRO DOS DADOS .....	64
4.5 PASSO 5 - MODELAGEM MATEMÁTICA DAS EQUAÇÕES DE MÉDIA, VARIÂNCIA E EQM .....	66
4.6 PASSO 6 - OTIMIZAÇÃO ROBUSTA PELO EQM.....	67
4.7 PASSO 7 – ANÁLISE DA ROBUSTEZ PARA OS RESULTADOS ÓTIMOS .....	69

4.8	PASSO 8 - PONDERAÇÃO DA MÉDIA E VARIÂNCIA .....	69
4.9	PASSO 9 – VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA DOS DADOS SIMULADOS COM O MODELO.....	72
4.10	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM O OTIMIZADOR DO ARENA .....	75
<b>CASO 2 – HURRION.....</b>		<b>78</b>
4.11	PASSO 1: MODELAGEM DO SISTEMA SIMULADO.....	81
4.12	PASSO 2: PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS SIMULADOS .....	86
4.13	PASSO 3: EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS SIMULADOS .....	88
4.14	PASSO 4: REGISTRO DOS DADOS .....	89
4.15	PASSO 5 - MODELAGEM MATEMÁTICA DAS EQUAÇÕES DE MÉDIA, VARIÂNCIA E EQM .....	92
4.16	PASSO 6 - OTIMIZAÇÃO ROBUSTA PELO EQM.....	94
4.17	PASSO 7 – ANÁLISE DA ROBUSTEZ PARA OS RESULTADOS ÓTIMOS .....	95
4.18	PASSO 8 - PONDERAÇÃO DA MÉDIA E VARIÂNCIA .....	95
4.19	PASSO 9 – VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA DOS DADOS SIMULADOS COM O MODELO.....	99
4.20	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM O OTIMIZADOR DO SOFTWARE ARENA ... .....	101
4.21	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS DOIS CASOS DA LITERATURA .....	104
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>
5.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	106
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	107
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>108</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>122</b>
ANEXO A – PLANILHA PARA OTIMIZAÇÃO DAS RESPOSTAS NO PASSO 5 E 6 (CASO TUBINO) DO MÉTODO EXPERIMENTAL .....		122
ANEXO B – PLANILHA PARA OTIMIZAÇÃO DOS PESOS NO PASSO 8 (CASO TUBINO) DO MÉTODO EXPERIMENTAL.....		123
ANEXO C – PLANILHA PARA OTIMIZAÇÃO DAS RESPOSTAS NO PASSO 8 (CASO TUBINO) DO MÉTODO EXPERIMENTAL .....		124
ANEXO D – PLANILHA PARA OTIMIZAÇÃO DAS RESPOSTAS NO PASSO 5 E 6 (CASO HURRION) DO MÉTODO EXPERIMENTAL .....		125
ANEXO E– PLANILHA PARA OTIMIZAÇÃO DOS PESOS NO PASSO 8 (CASO HURRION) DO MÉTODO EXPERIMENTAL .....		126
ANEXO F – PLANILHA PARA OTIMIZAÇÃO DAS RESPOSTAS NO PASSO 8 (CASO HURRION) DO MÉTODO EXPERIMENTAL .....		127
APÊNDICE A – RECOMENDAÇÕES DE USO .....		128
<b>PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>		<b>131</b>
Artigos publicados em periódicos .....		131
Artigos publicados em anais de congressos nacionais .....		135

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto da pesquisa

O tema dimensionamento de lotes de produção tem sido uma constante preocupação para as empresas de manufatura e serviços (hotéis, restaurantes, supermercados, etc.), pois a definição da quantidade de itens a serem armazenados em estoque, a fim de garantir um bom nível de serviço, pode afetar diretamente nos custos da empresa. Tal situação tem levado as organizações a buscarem estratégias para atendimento à demanda dos clientes com a manutenção de níveis de estoques adequados. Nesse contexto, o sistema Toyota de produção (TPS), tem se mostrado uma ferramenta importante para alcançar tais objetivos. O TPS foi criado pela Toyota na década de 1950 e fez com que a empresa se tornasse referência em competitividade no mercado automobilístico, principalmente no que tange a um atendimento de acordo com a demanda (MONDEN, 2012). Entretanto, nem todos os seguimentos de negócio são susceptíveis a tal aplicação, uma vez que a caracterização do perfil de demanda tem impacto crucial, pois as irregularidades afetam o bom funcionamento do sistema (CHIARINI, BACCARAN e MASCHERPA, 2018).

O TPS tem como pilares fundamentais o *Jidoka*, também conhecido como Automação, definido como automação com um toque humano, proveniente dos conceitos desenvolvidos pela família Toyoda em sua empresa de teares, onde um operador cuidava simultaneamente de vários equipamentos (ÅHLSTRÖM, 2015). Estes equipamentos de tecelagem utilizavam sistemas a prova de erros (*Pokayoke*) para garantir o seu desligamento em caso de rompimento de fios ou falhas. O segundo pilar do TPS é o *Just in time* (JIT), que tem como primícia a disponibilização do material no momento exato de sua utilização, na quantidade solicitada, no menor custo (PÉREZ e TORRES, 2019).

Para que o sistema JIT funcione de forma puxada, a Toyota criou o conceito de *kanban* (cartão), que determina a quantidade de peças a serem produzidas para cada estágio de produção de forma a manter a produção alinhada e subordinada ao *takt time* (tempo disponível para a produção dividido pela demanda do cliente). O *kanban* tem um papel predominante na melhoria da programação e controle de produção, diminuindo os níveis de estoque, melhorando o nível de serviço e proporcionando ao operador uma maior responsabilidade na tomada de decisão nas suas atividades operacionais (PIPLANI e ANG, 2017). Seja pelo uso da fórmula tradicional criada pela Toyota, que considerava os estoques de segurança no dimensionamento dos supermercados, ou pela própria experiência prática, destaca-se a importância em dimensionar

adequadamente os níveis de estoques nos supermercados. Consequentemente, as quantidades de *kanbans* afetam diretamente o nível de serviço da empresa, o fluxo do processo produtivo, a utilização do espaço físico para armazenamento, custos com manutenção de estoque e flexibilização no atendimento à demanda. Outro ponto relevante é que o Brasil sendo um país continental, tem forte influência dos aspectos logísticos, principalmente no que diz respeito a problemas ligados ao abastecimento, sendo assim necessário para muitas empresas manterem estoque de segurança. Logo, considerando que os níveis de estoque afetam a capacidade financeira da organização, o seu adequado dimensionamento torna-se então estratégico (MELEGA, SILVIO e JANS, 2018). Desta forma, a abordagem com o uso dos conceitos de otimização traz uma maior consistência na tarefa de lidar com os estoques, garantindo níveis adequados de serviço e custos competitivos. Logo, este trabalho apresenta o seguinte problema de pesquisa:

Considerando que um sistema *kanban* deve controlar os níveis de estoque para a manufatura enxuta, ao mesmo tempo em que garante níveis de serviço confiáveis aos seus clientes e dadas as condições aleatórias nas demandas dos produtos, como obter um dimensionamento ótimo para as quantidades do *mix* de *kanbans*, de forma que estes estoques controlados sejam robustos em relação às oscilações de demanda para um máximo atendimento possível dos clientes?

A motivação pela questão anterior é explicada pelo fato da maioria dos trabalhos da literatura considerarem uma mínima ou nenhuma variabilidade no sistema de *kanbans* (demanda, tempos de processamento, etc.) e ao mesmo tempo não apresentarem uma proposta para dimensionamento da quantidade de *kanban* que garanta robustez na gestão do nível de estoque e de serviço (DAVIS e STUBIZ, 1987; AYTUG, DOGAN e BEZMEZ, 1996; LI, 2003; LAVOIE; GHARBI e KENEÉ, 2010; HOU e HU, 2011; AZOUZ e PIERREVAL, 2018). Portanto, esta pesquisa, diferentemente das publicações avaliadas no tópico 2.6 dessa tese, além de buscar expressamente uma solução robusta, a abordagem desenvolvida difere de outros estudos de otimização *kanban* de várias maneiras. Primeiro, é empregado um planejamento experimental a partir do cálculo de estoque de segurança, levando em consideração os diferentes níveis de serviço oferecidos, que permite simular experimentalmente o parâmetro quantidade de *kanbans* para demandas aleatórias. Em segundo lugar, a demanda foi definida como fator de ruído e as máquinas (recursos de produção), para a simulação, foram programadas com tempo de processamento estocástico, sendo possível simular os experimentos planejados por meio de um projeto robusto. Em terceiro lugar, foram aplicados experimentos simulados para observar o comportamento das variáveis ao longo do processo em dois sistemas produtivos de casos

identificados na literatura, focando na aplicação e no desenvolvimento da abordagem proposta por esta tese. Outro ponto relevante a ser destacado é a modelagem dos resultados da simulação pelo conceito do EQM, o que permitiu a otimização robusta para o dimensionamento do supermercado.

## 1.2 Objetivos do trabalho

Diante das considerações anteriores, este trabalho tem como principais objetivos:

- a) Desenvolver um procedimento baseado em técnicas de otimização robusta para um dimensionamento ótimo da quantidade de *kanban* nos supermercados, considerando a variação de demanda.
- b) Analisar a aplicação do método proposto no contexto de casos da literatura a partir de experimentos simulados.

Para atingir tais proposições, a ideia central do presente trabalho é o uso do projeto de parâmetros robustos para modelagem e otimização de sistemas *kanban* por meio de experimentos simulados. Nesta abordagem, define-se o planejamento experimental para o ambiente industrial simulado a partir de equações de cálculo do estoque de segurança, levando em consideração diferentes níveis de serviço oferecidos. Em seguida, para o arranjo experimental estabelecido, realizam-se os experimentos, com réplicas, considerando um intervalo de tempo de simulação no qual as demandas dos produtos são aleatorizadas dia após dia. Tendo-se registrado a demanda não entregue de cada produto, ao final de cada intervalo de tempo e para cada réplica experimental, modelos matemáticos que levam em consideração média e variância são desenvolvidos, de maneira que a otimização robusta para o dimensionamento do supermercado possa ser obtida por meio do conceito do Erro Quadrático Médio (EQM). Vale destacar que, tanto a estratégia experimental para os experimentos simulados quanto à modelagem matemática para o dimensionamento das quantidades de *kanban* nos supermercados, foram desenvolvidas a partir dos princípios do projeto de parâmetros robustos, os quais se inserem no contexto da Metodologia de Superfície de Resposta. Ainda, para situações em que as condições de robustez (média no alvo com mínima variabilidade) não estejam satisfatórias para o cenário otimizado, uma alternativa baseada na otimização do EQM ponderado é também proposta, no sentido de que o supermercado

dimensionado seja minimamente afetado pelas aleatoriedades inerentes às demandas dos produtos. Para o desenvolvimento dos modelos computacionais, necessário para a simulação a eventos discretos dos casos da literatura analisados, este trabalho utilizou os recursos do software *Arena*<sup>®</sup>. É relevante justificar que o contexto para aplicação do método proposto, teve como premissa buscar na literatura casos que considerassem múltiplos produtos, informações relacionadas as máquinas, supermercados *kanban* e principalmente perfil de demanda, o que foi alcançado somente nas publicações de Hurrion (1997) e Tubino (2007).

As principais contribuições esperadas do método proposto dizem respeito a criação de um procedimento estruturado e diferenciado em relação às técnicas encontradas na literatura para dimensionamento de sistemas *kanban* com tempos de demanda e processamento aleatórios, uma vez que a maioria dos trabalhos da literatura consideram a demanda nivelada, tempos de processamento determinístico e critérios de otimização que não são robustos. Logo, a abordagem proposta nesta tese pretende servir de apoio à tomada de decisões gerenciais no planejamento e controle de produção, com a finalidade de garantir um elevado nível de atendimento ao cliente com um menor custo de estoque.

### 1.3 Delimitações

Embora o principal objetivo desta pesquisa seja propor um procedimento para otimização das quantidades de *kanban* nos supermercados, buscando sua aplicação nos mais distintos cenários industriais, observa-se que os resultados apresentados neste trabalho se encontram delimitados por alguns elementos inerentes ao estudo. Logo, as delimitações podem ser classificadas de acordo com os seguintes aspectos:

- **quanto ao tipo de ambiente empresarial:** a proposta concentrou-se em ambientes industriais. Logo, é necessário avaliar sua aplicação em relação a operações de serviços, *healthcare*, etc;
- **quanto aos arranjos experimentais:** foi utilizado o Arranjo Composto Central (CCD) para a composição dos experimentos de superfície de resposta e também o arranjo de misturas aplicado para a ponderação, o que faz com que os modelos matemáticos desenvolvidos fiquem restritos aos comportamentos desses arranjos;
- **quanto às técnicas de programação matemática:** é possível notar que a literatura aborda algumas técnicas de programação matemática. Entretanto, esta pesquisa

considerou o EQM (Erro Quadrático Médio) para a otimização, como forma de combinar a média e a variância na busca da redução da variabilidade.

- **quanto aos algoritmos de otimização: o algoritmo usado para realizar a** otimização do presente estudo foi o GRG (Gradiente Reduzido Generalizado), uma vez que se encontra disponível no pacote de suplementos do *Microsoft Excel*, o que contribui para melhor usabilidade.
- **quanto ao tipo de *kanban* utilizado:** o tipo de *kanban* utilizado para os objetos de estudos foi o sistema *kanban* tradicional (TKS) criado pela Toyota, uma vez que é o mais comumente utilizado nas publicações consultadas e também no cenário de empresas.
- **quanto à aplicação em ambientes simulados:** a aplicação da abordagem proposta na tese é desenvolvida em ambientes simulados obtidos da literatura, e não em casos reais.

## 1.4 Estrutura do trabalho

O primeiro capítulo foi redigido com o objetivo de contextualizar, introduzir e justificar o problema de pesquisa. Deste modo, foi caracterizado no contexto de processos de produção, no que diz respeito a controle de produção realizado pela ferramenta *kanban*, uma problemática que envolve a otimização de supermercados. Logo após, no que tange às fases envolvidas no procedimento de otimização, houve uma preocupação do autor em quais aspectos a pesquisa poderia contribuir. Para cumprir com os pressupostos anteriores mencionados, o presente estudo foi elaborado em cinco capítulos, estando os demais organizados conforme descrito a seguir:

- a) O Capítulo 2 retrata a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da pesquisa, onde são tratados os seguintes temas: planejamento de produção, com ênfase nas decisões de planejamento de capacidade e dimensionamento de recursos a curto, médio e longo prazo; Sistema Toyota de Produção, com seus pilares, passos para a implantação, e as principais ferramentas (SMED, TPM, Programa 5S, *Kaizen*, Trabalho padronizado, Mapeamento do fluxo de valor e *kanban*); em seguida o conceito de *kanban* é definido, as equações mais comuns abordadas na literatura sobre seu dimensionamento são exibidas, também é realizada uma revisão de literatura no que tange a algumas informações de grande relevância, tais como: métodos de otimização para sistemas *kanban*, trabalhos que trazem

proposta de otimização de *kanban*, autores com maior número de citações que tratam o tema, variáveis utilizadas, algoritmos, indicadores, tipos de aplicações e empresas, com o intuito de entender melhor as principais informações empregadas no contexto de otimização de *kanban*. Do mesmo modo, o tema projeto de experimentos é descrito assim como as estratégias experimentais de superfície de resposta, experimentos de misturas e projeto de parâmetros robustos com ênfase na otimização pelo erro quadrático médio (EQM), juntamente com experimentos simulados.

- b) O Capítulo 3 apresenta o método de pesquisa, definindo os principais atributos das técnicas usadas neste trabalho (simulação e experimentos). Desenvolve a proposta de tese, onde é feita a definição da abordagem proposta para otimização de sistemas *kanban*, permitindo desenvolver um método robusto que considere a demanda como variável de ruído. Para que esta abordagem funcione adequadamente são sugeridos nove passos, ordenados de forma a se atingir o adequado dimensionamento das quantidades de *kanban* nos supermercados.
- c) O Capítulo 4 descreve a aplicação do método proposto, assim como apresenta os dois casos da literatura utilizados como objetos de estudo com suas principais informações. É realizada a aplicação da proposta de tese nos quais são explicadas as fases estudadas: desenvolvimento do modelo (conceitual e computacional) de simulação; detalhamento do planejamento experimental e execução dos experimentos simulados; a modelagem pelo EQM e a otimização dos dados; a estratégia de ponderação da média e variância; os experimentos de confirmação e a comparação dos resultados da otimização robusta com aqueles alcançados com o otimizador do software *Arena*<sup>®</sup>, para os casos analisados nos objetos de estudo observados em Tubino (2007) e Hurrion (1997).
- d) O Capítulo 5 encerra o trabalho, descrevendo as conclusões da pesquisa em relação à proposta de tese, relatando as principais vantagens, dificuldades e contribuições.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Planejamento de produção

O planejamento de produção tem como função principal conectar capacidade de fornecimento à demanda. Decisões relacionadas à gestão da capacidade produtiva são uma das principais preocupações dos gestores de operações (COSTA *et al.*, 2014). No início do planejamento de produção trabalha-se com uma visão de longo prazo, tendo como referência o processo estratégico, onde se define a visão da organização, que direciona as ações a serem estabelecidas no rumo de serem atingidos os objetivos e metas. Uma das preocupações dos gestores em uma empresa é o planejamento agregado de produção, que proporciona uma visão de 3 a 18 meses no volume de produção, permitindo quantificar matérias-primas e outros recursos necessários e também quando serão utilizados (MIRZAPOUR, 2013). O planejamento agregado da produção se baseia em alguns parâmetros, tais como: custo, demanda, preço e capacidade produtiva. Neste horizonte de tempo, encontra-se então o plano estratégico de produção, baseado em uma previsão de vendas de longo prazo, que permite estabelecer uma previsão de capacidade de produção. Nesta etapa é conhecida apenas a previsão do volume dos itens a serem produzidos, sem necessariamente serem diferenciados por família (ENTEZAMINIA, HEIDARI e RAHMANI, 2016; KIM e CHUNG, 2017).

Após uma visão de longo prazo para o planejamento, tem-se a etapa de médio prazo, onde é gerado o plano mestre ou tático de produção, o qual permite obter uma previsão de compras de matéria-prima devido aos pedidos em carteira já distinguidos por família, e a partir daí começa o planejamento da capacidade produtiva. É importante mencionar que nesta fase do planejamento as decisões são tomadas com foco em dados obtidos de previsão, logo caso sejam gerados de forma equivocada podem levar a organização a um dimensionamento inadequado de recursos e futura perda de competitividade. No horizonte de curto prazo, o foco principal é a programação da produção, onde são definidas as datas de início e término para cada ordem de fabricação e o sequenciamento das mesmas na linha de produção, de acordo com os pedidos de vendas e critérios utilizados para priorizar os itens a serem fabricados (KIM e CHUNG, 2017). Depois de determinar o volume a produzir, considerando o horizonte de tempo, a empresa em geral determina as ações que devem ser tomadas para investimento na capacidade produtiva, tendo como referência o início do planejamento de “n” períodos (*Figura 2.1*).



Figura 2.1- Decisões de capacidade  
Adaptado de Gong, Yang e Wang (2014)

No contexto do planejamento de produção, o fluxo de informações entre os departamentos da empresa é essencial para o seu sucesso, pois uma vez que as informações não sejam conhecidas de forma clara por todos os responsáveis, podem ocorrer distorções em relação às decisões que cada integrante deste processo toma no seu universo de atuação, o que impacta negativamente e compromete o pedido firmado com o cliente final. Atualmente, são raras as organizações que conseguem melhorar sua produtividade sem um apoio da TI (CHENG *et al.*, 2018).

No planejamento de produção, no tocante das necessidades de materiais, empresas bem estruturadas utilizam o software *Material Requirements Planning* ou Planejamento das Necessidades de Materiais (MRP), com o objetivo principal de planejar as ordens de compra e produção, com foco nos prazos, na redução de estoques e melhor aproveitamento dos recursos de mão de obra e equipamento. O MRP é um conjunto de ferramentas de softwares que tem como objetivo principal determinar os itens a serem comprados em um determinado horizonte de tempo, leva em consideração o *lead time* de ressuprimento e as datas de utilização, de acordo com as ordens de produção e o prazo que o produto deve estar disponível para o cliente final (LOULY e DOLGUI, 2013). Qualquer sistema MRP deve ser capaz de concluir três funções principais, sendo elas: cálculo de demanda de peças, cálculo de estoque e cálculo de necessidades de compra, tendo como referência a estrutura do produto e a data de conclusão programada (KE *et al.*, 2020).

O MRP é um sistema de gerenciamento de informação utilizado nas indústrias para determinar o período adequado de compra e entrega dos materiais. Leva em consideração a demanda interna de utilização dos itens e o *lead time* de fornecimento das matérias-primas, também contribui na definição do tamanho do lote de matéria-prima a comprar, com foco na diminuição do custo de estoque e excelência no atendimento ao cliente (GRUBBSTROM e TANG, 2012). Trabalha com a lógica de programação baseada em previsão e não necessariamente com pedidos confirmados pelo cliente, o que pode ocasionar dificuldades em relação a gestão dos recursos e desperdícios.

## 2.2 Sistema Toyota de Produção

O Sistema Toyota de Produção (TPS - *Toyota Production System*) surgiu na década de 50 como uma forma da indústria automobilística japonesa se tornar competitiva frente ao mercado internacional, uma vez que a economia do país estava fragilizada e o consumidor com pouco poder de consumo. Kiichiro Toyoda, presidente da Toyota Motor Company no período, reconhecia que as montadoras americanas eram em média dez vezes mais produtivas que as empresas japonesas e juntamente com Shigeo Shingo (idealizador das ferramentas e técnicas fundamentais relacionadas à qualidade e às trocas rápidas de ferramentas), e Taiichi Ohno (criador do conceito *kanban*), foram responsáveis pela criação de uma nova abordagem para a produção, chamada Sistema Toyota de Produção (ABDULMALEK e RAJGOPAL, 2007). O TPS difundiu-se após a crise do petróleo, durante a década de 70, onde devido às condições desfavoráveis da economia, a Toyota mostrou rápida recuperação e ainda apresentou boas margens de lucratividade, o que despertou a atenção de várias empresas. Na década seguinte, um estudo conduzido pelo MIT deu origem ao livro “A Máquina que Mudou o Mundo” lançado em 1990, que difundiu algumas práticas de produção enxuta desenvolvidas pela Toyota (WOMACK *et al.*,1990). O objetivo do livro era explorar as principais diferenças entre a produção em massa praticada por diversas empresas, entre elas a Ford, e a produção enxuta característica da Toyota.

O TPS tem como princípios fundamentais a eliminação do desperdício, definido como toda e qualquer atividade que não agrega valor do ponto de vista do cliente, mas que consome recursos e, portanto, implica em custos; e a garantia da qualidade. Com a aplicação do princípio da eliminação de desperdício no “chão de fábrica”, deu-se origem ao conceito da Manufatura Enxuta (*Lean Manufacturing*), cuja finalidade era obter um sistema produtivo que minimizasse a utilização de recursos e intensificasse as atividades que agregavam valor. A junção destes dois princípios permitiu à organização operar com baixo custo e alto padrão de qualidade. Para que esse modelo de gestão obtenha êxito é importante que exista o comprometimento e envolvimento da liderança e principalmente dos funcionários (DIBIA e DHAKAL, 2014). O conceito trata a importância de se eliminar os desperdícios não somente dentro da organização, mas também em toda a cadeia produtiva. O seu sucesso incitou inúmeras empresas a buscarem entender e colocar em prática tais ferramentas em suas organizações (STAATS, BRUNNER e UPTON, 2011). Conforme Womack, Jones e Roos (1990), uma empresa genuinamente enxuta possui duas características essenciais: elas transferem o máximo de responsabilidade e tarefas para os funcionários que realmente agregam valor ao produto, do ponto de vista dos clientes, e

possuem um eficiente sistema para detectar os defeitos e correlacioná-los com sua derradeira causa-raiz. Afirmaram ainda que a implantação da Manufatura Enxuta é apropriada e gera resultados positivos não só para a indústria de automóvel, mas também para muitos outros setores, incluindo serviços. De acordo com Liker (2006), a filosofia da Toyota pode ser resumida através da melhoria contínua (*kaizen*) e o respeito pelas pessoas. Também menciona que mais importante do que as melhorias reais oriundas das contribuições dos funcionários, o verdadeiro valor da melhoria contínua está na criação de um ambiente de aprendizado contínuo, que não só aceita, mas na verdade abraça a mudança.

O TPS tem como pilares principais o *Just in Time* (JIT) e o *Jidoka* - autonomia. O primeiro diz respeito a produzir a quantidade solicitada pelo cliente, no momento esperado por ele, livre de desperdícios. Já o segundo pilar, autonomia, tem origem nos teares japoneses, onde um único operador acompanhava o funcionamento de várias máquinas, o que permitia redução de custos com mão de obra. Isto era possível devido à existência de dispositivos de detecção de quebras instalados nos equipamentos, que atuavam quando um fio se rompia (OHNO, 1995). Segundo Monden (1983), os passos para a implantação do TPS são:

- Obter o comprometimento da alta administração;
- definir uma equipe de projeto responsável por treinar os outros colaboradores e também organizar as práticas do JIT;
- preparar uma agenda de implantação com definição de metas a serem alcançadas;
- iniciar um projeto piloto;
- melhorar a condição do processo atual escolhido para um patamar mais alto, onde seja possível a produção de uma peça por vez por meio de um fluxo contínuo ("*one piece flow*").

Durante a implantação do conceito enxuto, também é necessário conhecer o *lead time* de produção, a velocidade de entrega, o *takt time* de produção e o nível de inventário necessário para o seu adequado funcionamento (AOMAR, 2011).

Gong, Yang e Wang (2014) afirmaram que em termos de planejamento de produção, o conceito enxuto se contrapõe a lógica do sistema de produção em massa, entretanto ambos podem trabalhar juntos para melhorar a eficácia do planejamento e programação da produção. Nesse caso, o MRP (planejamento das necessidades de materiais), software muito utilizado na lógica de produção em massa, é usado para gerar as necessidades de materiais de acordo com a demanda e disparar as ordens de compra, já as ordens de produção são emitidas no conceito do

JIT.

Outro ponto importante na comparação do TPS com os outros sistemas produtivos, é a atenção dada ao fluxo de informações na cadeia de suprimentos, onde os fornecedores também precisam fornecer no conceito JIT (PANIZZOLO, 1998). Uma especial atenção também deve ser dada ao trabalhador, pois ele é uma parte fundamental para o adequado funcionamento do sistema, uma vez que o mesmo executa inúmeras tarefas (DANESE, MANFÈ e ROMANO, 2017).

O TPS também pode ser definido como um sistema de produção criado para atingir altos níveis de qualidade, baixo custo, com *lead time* mais curto para uma maior variedade de produtos livres de desperdícios (KEHR e PROCTOR, 2016). Na lógica de funcionamento do TPS, os funcionários precisam se comprometer com os resultados, adquirindo assim um maior senso de urgência na execução de suas atividades (BHAMU e SANGWAN, 2014; MIRDAD e ESONU, 2015; RAJU, 2016). O TPS é amplamente utilizado na indústria, todavia existem aplicações de sucesso em outros campos tais como serviços e cuidados de saúde (MÁCSAY e BÁNYAI, 2017). Como conceito de gestão, o TPS é composto por várias técnicas e ferramentas, importantes durante a sua implantação.

### **2.3 Técnicas e ferramentas do TPS**

As ferramentas do TPS surgiram como resultado de soluções práticas encontradas pelas empresas em situações concretas e específicas, com o objetivo de eliminar desperdícios, contribuindo de maneira significativa para a melhoria de uma empresa (DAL FORNO *et al.*, 2014). A escolha da ferramenta a ser aplicada em uma organização parte de uma cultura enxuta criada com o objetivo de produzir sem desperdícios. Sendo assim, a ferramenta utilizada está relacionada aos objetivos e metas específicos definidos pela empresa (DRESCH, LIMA e COLLATTI, 2018). Após sua implantação é possível observar melhorias em termos de utilização de recursos, qualidade e confiabilidade dos produtos, melhoria no nível de serviço ao cliente, redução de custos, melhoria no desempenho dos funcionários, por meio de incentivos financeiros quando as metas definidas são alcançadas (ISMAIL *et al.*, 2019). Quando uma ferramenta não é implantada adequadamente, pode trazer resultados piores em comparação com aqueles já apresentados no cenário anterior a sua aplicação (BRAGLIA *et al.*, 2018). Logo, a implementação das ferramentas bem-sucedidas não é uma questão de qual ferramenta utilizar, mas sim uma combinação de técnicas com adaptações a cada tipo de cultura (CHIARINI e

BRUNETTI, 2019). Embora as práticas enxutas sejam fáceis de implementar, poucas empresas conseguem consolidar sua aplicação, ou seja, mostram resultados iniciais e falham na manutenção a longo prazo (POKSINSKA, SWARTLING e DROTZ, 2013). Portanto, as ferramentas são apenas uma parte do processo de transformação. Esforços para mudar práticas, comportamento e mentalidade dos líderes são essenciais. Entre as técnicas utilizadas para implementação de sistemas enxutos estão:

### **2.3.1 Troca rápida de ferramentas (SMED)**

*Single Minute Exchange of Die* (SMED) ou Troca rápida de ferramenta (TRF). Permite à organização obter maior flexibilidade na produção de lotes, uma vez que seu objetivo principal é reduzir os tempos de *setup* para um dígito, ou seja, menos que 10 minutos (MICHELS, 2007). O foco é identificar as atividades que não agregam valor na realização do *setup* por meio de uma análise criteriosa no funcionamento do processo (SHINGO, 1985). O SMED permite separar a operação de *setup* em atividades internas (quando a máquina é desligada) e externas (durante a operação do equipamento), tais como: preparação do equipamento, ajuste, verificação de matéria-prima, troca de ferramentas, calibrações, medições, testes, etc (PRASZKIEWICZ, 2018; LOZANO *et al.*, 2019; SINGH, SINGH e SINGH, 2018; BIDARRA *et al.*, 2018).

### **2.3.2 Manutenção produtiva total (TPM)**

*Total Productive Maintenance* ou Manutenção Produtiva Total (TPM), é uma filosofia japonesa criada com o objetivo de aumentar a eficiência do equipamento e a disponibilidade, eliminação de quebras, redução do tempo de parada programada e não programada, melhoria da utilização e rendimento do equipamento, qualidade dos produtos e segurança dos trabalhadores, no menor custo possível (NAKAJIMA, 1988). Promove a manutenção autônoma na detecção de possíveis falhas e pequenos ajustes como forma de mudança da cultura da organização, já que envolve todos os colaboradores desde o chão de fábrica até a diretoria, usando para isso o conhecimento de operadores, engenheiros, e equipe de suporte técnico para garantir a completa disponibilidade do equipamento para a produção (BATAINEH *et al.*, 2017; SAHOO, 2018; REZA *et al.*, 2018; AHMAD *et al.*, 2018; HAILU, MENGSTU e HAILU, 2018; AHUJA e KHAMBA, 2008; ). A TPM pode ser estruturada em 8 pilares, sendo eles: Manutenção Autônoma; Manutenção Planejada; Melhorias Específicas; Educação e Treinamento; Manutenção da Qualidade; Controle Inicial; TPM Administrativo; Segurança,

Saúde e Meio Ambiente (IRELAND e DAILE, 2001).

### **2.3.3 Programa 5S (5s)**

De acordo com Moriones, Rintado e Cerio (2010), é um programa voltado para a implementação de mudanças no ambiente de trabalho, incluindo eliminação de desperdícios, limpeza e arrumação. O uso da gestão visual é a base para funcionamento de seus pilares: *Seiri* (utilização), *Seiton* (ordenação), *Seiso* (limpeza), *Seiketsu* (padronização e higiene), *Shitsuke* (disciplina). Quando implementado em uma organização, o programa 5s cria uma cultura organizacional de melhoria contínua, desenvolve o comprometimento das pessoas na busca da redução de desperdícios e padroniza o trabalho, tornando possível assim a melhoria da qualidade dos produtos e serviços, aumento da produtividade e redução de custos (GAPP, FISHER e KOBAYASHI, 2008; RANDHAWA e AHUJA, 2017; WITT, SANDOE e DUNLAP, 2018; ASHRAF, RASHID e RASHID, 2017; AGRAHAR, DANGLE e CHANDRATRE, 2015). É relevante mencionar que o 5s também contribui na diminuição dos riscos de acidentes no local de trabalho, incentiva o trabalho em equipe, aumenta o comprometimento e consecutivamente melhora o ambiente de trabalho.

### **2.3.4 Kaizen**

*Kaizen* pode ser considerado como uma filosofia de gestão da melhoria contínua dos processos produtivos, baseada em princípios e criação de cultura destinados a tornar possível alcançar: o trabalho em equipe, eliminação de desperdícios, educação e treinamento, maior comprometimento dos colaboradores da empresa, maior consistência nos resultados e principalmente padronização (IMAI, 2012; MACDHERSON *et al.*, 2015; MACPHERSON *et al.*, 2015; HABIDIN, HASHIM, FUZI e SALLEH, 2017; CARNERUD, JACA e BÄCKSTRÖM, 2018; CHUNG, 2018; FIDALGO, ESCUDERO e SOMONTE, 2019). Para o seu adequado funcionamento é necessário documentar e analisar em equipe as práticas atuais que envolvem uma necessidade emergente de melhoria, para que em seguida sejam propostas ações, as quais devem ser rapidamente implementadas.

### **2.3.5 Trabalho Padronizado (TP)**

O trabalho padronizado é um instrumento utilizado para estabelecer padrões que reduzam os desperdícios (processamento, retrabalho, transporte) durante a produção,

proporciona um nível de detalhamento que padroniza cada uma das atividades realizadas, sendo que os trabalhadores são treinados para entender a importância do TP e conhecer as circunstâncias que ele deve ser criado ou melhorado, acarretando assim aprendizado individual e organizacional (MARTIN e BELL, 2011; MONDEN, 2012; PATCHONG, 2013; LANTZ, HANSEN e ANTONI, 2015; MARTIN, BELL e MARTIN, 2017). Este conceito traz inúmeros benefícios, tais como: se tornar um ponto de referência para a busca da melhoria contínua, controle de processo, redução de variabilidade, aumento de flexibilidade e melhoria da qualidade, maior estabilidade do processo e previsão de anomalias.

### **2.3.6 Mapeamento do fluxo de valor (MFV)**

O MFV é uma abordagem que permite avaliar o fluxo dos processos e identificar desperdícios, por meio de: identificação do *lead time* atual e os respectivos tempos de processamento e transporte, buscando conhecer aqueles que agregam ou não valor ao processo; balanceamento de linha em relação ao *takt time* e fluxo de produção puxada, eliminando assim o *WIP* (*working in process*) e reduzindo o *lead time*. Com o uso de uma simbologia específica, possibilita entender o fluxo de materiais e de informações em um sistema/cadeia produtiva, o que auxilia a enxergar o que precisa ser melhorado, para atender às necessidades de clientes internos e externos (ROOTHER e SHOOK, 1999; NASH e POLING, 2008; LOCHER, 2008). É composto de 4 etapas principais: seleção de uma família de produtos, desenho do mapa do estado atual, desenho do mapa do estado futuro e desenvolvimento de um plano de trabalho que leve a atingir o estado futuro (DADASHNEJADR e VALMOHAMMADI, 2017; PURBA, MUKHLISIN e AISYAH, 2018; STADNICKA e LITWIN, 2018; VILLAMIZAR *et al.*, 2018; SETH, SETH e DHARIVAL, 2017; KING e KING, 2015).

### **2.3.7 Kanban**

Sistema de sinalização do ponto de reposição de itens, desenvolvido para garantir a estabilidade e controle dos níveis de estoque da produção e do fornecimento de componentes, no momento e quantidade necessária, conceito primordial ao funcionamento do JIT (*Just in time*) (HASLETT e OSBORNE, 2000; HENDERSON, 2007). Proporciona um inventário mais adequado às necessidades dos clientes, reduzindo assim o tempo de entrega do produto e sendo mais enxuto na utilização dos recursos (máquina, mão de obra, matéria-prima, etc.), o que pode resultar em uma redução de custo à organização de 30 a 40%, com benefícios adicionais à qualidade, giro de ativo e maior flexibilidade em atendimento à demanda dos clientes

(HAMMARBERG e SUNDÉN, 2014; SUNDAR, BALAJI e SATHEESHKUMAR, 2014; JASTI e KODAL, 2014; AL-BAIK e MILLER, 2014; PIPLANIE e ANE, 2017).

Este trabalho irá tratar com maiores detalhes a discussão do *kanban*, porque é o foco desta tese. Logo, uma visão mais detalhada das ferramentas anteriores pode ser encontrada nas referências mencionadas.

## 2.4 Sistemas *kanban*

### 2.4.1 Definições

A maneira tradicional de definir *kanban* é como cartão, pois sua lógica de funcionamento utiliza-se deste recurso para iniciar a reposição de itens em um determinado local físico de produção. Geralmente trata em seu conteúdo as informações relacionadas a: quantidade de produção, se for *kanban* de produção, ou de retirada, se for *kanban* de retirada, ou de transporte se for *kanban* de transporte; descrição do processo anterior e processo posterior à estação de trabalho; tempo de produção; método de trabalho; destino; equipamento de transferência, entre outras. Enfatiza-se que o *kanban* de produção tem a finalidade de autorizar o centro fornecedor a produzir de acordo com a quantidade solicitada pelo centro consumidor, todavia o *kanban* de transporte ou movimentação funciona como uma requisição de material informando o tipo e a quantidade que o centro consumidor deve retirar do centro produtor. Já o *kanban* de retirada tem a mesma função do *kanban* de transporte, entretanto ocorre entre o consumidor final (cliente externo) e o armazém de produto acabado. O tamanho do *container* é equivalente à capacidade do *kanban* e o número de cartões representa a quantidade de material em estoque (HOU e HU, 2011). Para o seu adequado funcionamento, algumas regras são definidas (*Quadro 2.1*).

Quadro 2. 1- Regras para o adequado funcionamento do *kanban*

Funções do <i>kanban</i>	Regras para utilização
Fornecer informação sobre retirar ou transportar	O processo subsequente retira o número de itens indicados pelo <i>kanban</i> no processo precedente
Fornecer informação sobre a produção	O processo inicial produz itens na quantidade e sequência indicadas pelo <i>kanban</i>
Impedir a superprodução e o transporte excessivo	Nenhum item é produzido ou transportado sem um <i>kanban</i>
Servir como uma ordem de fabricação fixada às mercadorias	Fixar um <i>kanban</i> às mercadorias
Impedir produtos defeituosos pela identificação do processo que os produz	Produtos defeituosos não são enviados para o processo seguinte. O resultado é mercadorias 100% livres de defeitos
Revelar problemas existentes e manter o controle de estoques	Reduzir a quantidade de <i>kanbans</i> aumenta sua sensibilidade aos problemas

Fonte: adaptado de Ohno (1995)

Para o adequado funcionamento do conceito *kanban*, é preciso nivelar as demandas, padronizar as ordens de produção, reduzir os tempos de *setup*, balancear o processo produtivo na intenção de garantir o fluxo contínuo, trabalhar a automação e simultaneamente assegurar a cultura da melhoria contínua na execução das atividades (MONDEN, 1983). Ao se dimensionar a quantidade de cartões *kanban* deve-se ponderar a demanda do centro consumidor, para que seja possível delimitar assim a quantidade de itens a serem depositados nos *containers*, evitando o excesso de estoque nos supermercados. É importante salientar que na definição dos supermercados *kanban*, alguns fatores podem influenciar diretamente, tais como: estabilidade dos processos, fornecedores, equipamentos, etc. Quanto maior a confiabilidade dos mesmos, menor será a probabilidade de falhas e consecutivamente mais enxuto os supermercados.

A literatura tem descrito ao longo dos anos que o *kanban* não se comporta bem, quando submetido a um *mix* variável de produtos e demanda instável, resultando assim em altos níveis de estoque e aumento de custo, redução na produtividade e níveis insatisfatórios de serviço (LEONARDO *et al.*, 2017).

#### **2.4.2 Tipos de kanban e funções**

O sistema original para os cartões *kanban* pode ser classificado em dois tipos, *kanban* de transporte ou movimentação (acompanham o produto até o destino), e *kanban* de produção (dispara a produção). Monden (2012) citou outros tipos de *kanbans*: *kanban* de sinal, *kanban* de ordem de serviço e *kanban* eletrônico. Lage Junior e Godinho Filho (2010) descreveram as diferentes adaptações propostas na literatura até o ano de sua publicação (**Figura 2.2**), sendo que algumas delas seguem a lógica de funcionamento do sistema original e outras não.

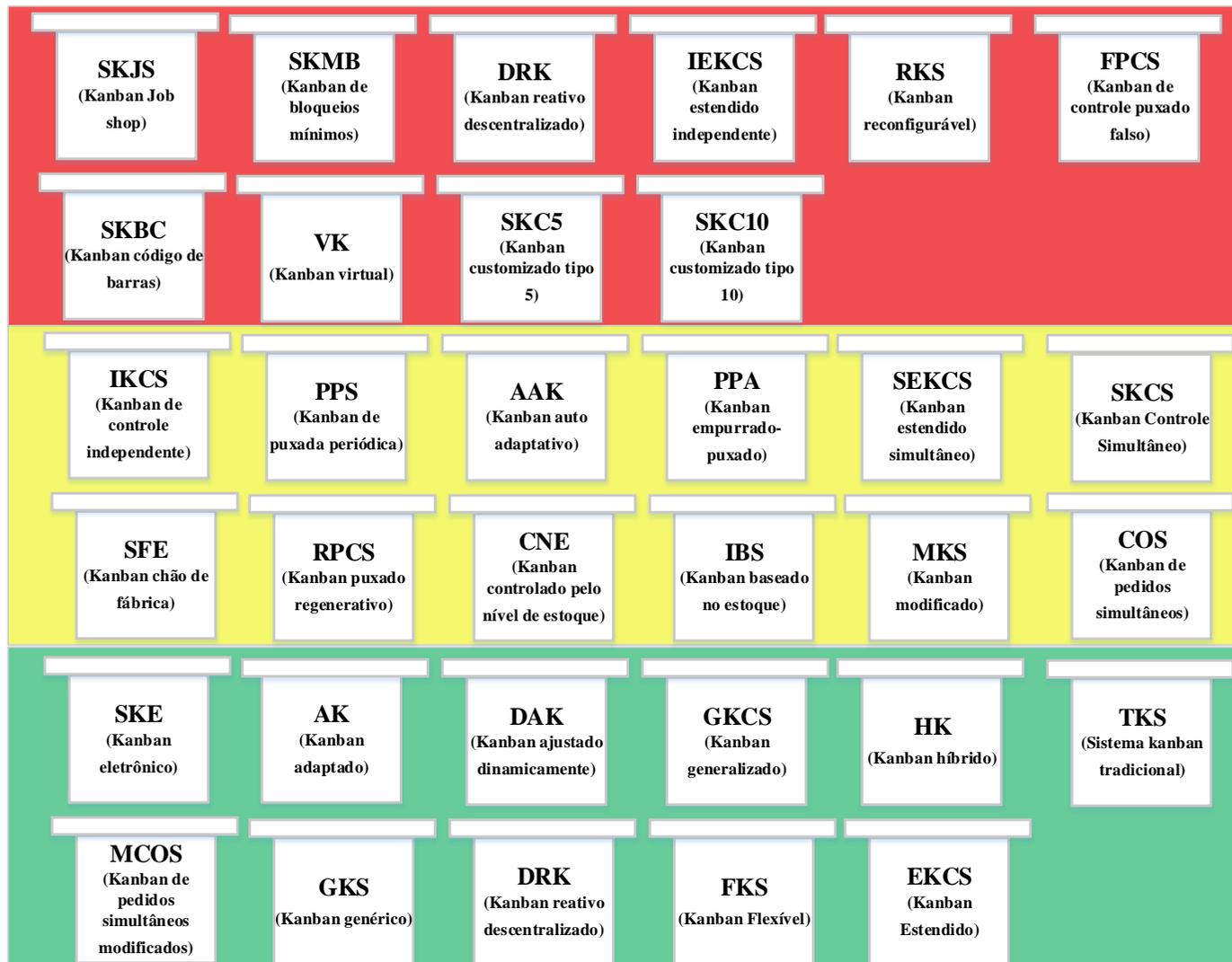


Figura 2.2 - Tipos de *kanbans* mencionados na literatura  
 Fonte: elaborado pelo autor (2020)

O critério utilizado para localizar os tipos de *kanban* entre as diferentes cores na **Figura 2.2** foi: os tipos mais comuns na literatura na cor verde, os menos comuns na amarela e os mais incomuns em vermelho. Entre os tipos de *kanbans* descritos, é dada uma especial atenção aqueles mais comuns:

- **Sistema *kanban* tradicional (*traditional kanban system* – TKS):** O TKS foi o sistema tradicional elaborado pela Toyota, com o propósito de puxar o fluxo de produção, de acordo com a demanda. É uma ferramenta simples e eficaz, frequentemente usada para regular o número de cartões liberados entre as etapas do processo produtivo. Permite controlar o fluxo de materiais no que diz respeito a quantidade necessária para produzir em tempo hábil, níveis de estoque, componentes de suprimento e matéria-prima, evitando assim a superprodução (TALIBI, EL HAOUZI e THOMAZ, 2017; MOUAKAY, BENABBOU e BERRADO, 2018; GOODARZI e ZEGORDI, 2018).
- **Sistema de *kanban* flexível (*flexible kanban system* – FKS):** sistema criado para lidar com incertezas de demanda e variabilidade de tempos de processamento, apresentando-se como uma alternativa aos sistemas *Just in Time* tradicionais, sendo capaz de reduzir o *lead time* do pedido, minimizar atrasos e reduzir o inventário (FANG e FEI, 2014). A ideia é aumentar o fluxo de produção, com uma maior quantidade de *kanbans* e utilizar *kanbans* extras para melhorar o desempenho do sistema (GUPTA, TURKI e PERRY, 1999). Os grandes desafios desse tipo de conceito, influenciado por diferentes cenários operacionais, são: determinar a quantidade base de *kanbans*, a quantidade de *kanbans* extras e o momento da liberação para a produção. Os maiores benefícios proporcionados por esta abordagem são alcançados quando o volume de produção é alto e os tempos de processamento individuais são baixos (GUNERI, KUZU e GUMUS, 2009).
- **Sistema de *kanban* híbrido (*hibrid kanban* – HK):** sistema de controle de *kanbans* aplicado em ambientes de novos produtos, onde o comportamento da demanda é variável, com o objetivo de reduzir assim o tempo para adaptação a demanda (KLUG, 2016). Permite que o sistema seja dividido em dois controles: sistema puxado e sistema empurrado, podendo ser utilizado no planejamento de operações para determinar e ajustar a quantidade de *kanbans*. A abordagem puxada trabalha como os métodos clássicos do conceito, ou seja, puxa o fluxo do centro fornecedor para o centro consumidor, toda vez que existe demanda, já a empurrada atua para fornecer informações relacionadas à demanda real variável do

cliente (SRIKANTH, RAJU e MURTY, 2017). A quantidade de cartões que circula no sistema é ajustada, de acordo com o comportamento das vendas, melhorando assim o nível de serviço. As vantagens do HK sobre os outros sistemas é que ele tem um melhor resultado para uma demanda menos estável (EBNER, YOUNG e GERAGHTY, 2019).

- **Sistema de controle de *kanban* estendido (*extended kanban control system* - EKCS):** mais comumente utilizado na coordenação de sistemas de fabricação em multiestágios, onde a quantidade de *kanbans* e o estoque de peças acabadas são parâmetros fundamentais no seu dimensionamento (DALLERY e LIBEROPOULOS, 1999). Permite trabalhar com níveis de estoques baixos em um contexto de demanda média, sabendo que a quantidade de *kanbans* é calculada de modo a atingir um nível de serviço de 99% (MAGLARAS, 2015). Por ser um sistema mais flexível, se adapta melhor às mudanças de cenários. No ECKS, o papel dos *kanbans* é autorizar a transferência de peças acabadas à jusante, tendo que sua aplicação aponta as seguintes vantagens: simplicidade, diminuição de estoque em processo nos supermercados e imediata transferência da demanda para todas as células produtivas (CHAOUYYA, LIBEROPOULOS e DALLERY, 2000). Logo, a quantidade de *kanbans* é usada para limitar o estoque em processo / supermercados e garantir o nível de serviço ao cliente.
- **Sistema *kanban* adaptado (*adapted kanban system* - AK):** O AK tem a finalidade de ajustar dinamicamente a quantidade de cartões *kanban* em um sistema de manufatura. Neste sistema existem cartões extras, que não estão em uso inicialmente, mas podem ser liberados para normalizar o fluxo do processo produtivo em situações de flutuação de demanda (XANHOPOULOS, LOANNIDIS e KOULOURIOTIS, 2018). Por esta razão existe a necessidade de controle adequado para saber o momento que os cartões extras devem ser inseridos ou retirados. O AK também ajusta automaticamente a quantidade de cartões em operação, dependendo dos pedidos em andamento, demandas e níveis de *backlog*. Apresenta uma melhor aplicabilidade em situações onde o tempo de processamento tem comportamento exponencial e a demanda segue um processo de Poisson (TARDIF e MAASEIDVAG, 2001).
- **Sistema *kanban* eletrônico (*system kanban electronic* – SKE):** O SKE colabora no monitoramento de peças e controle do estoque nos armazéns. Pode ser acessado de qualquer lugar, desde que haja uma conexão com a internet. A sua lógica básica de funcionamento

inicia quando um determinado lote é retirado do supermercado *kanban*, então o código de barras no *container* é digitalizado ou escaneado e o *status kanban* muda de “cheio” para “vazio”. Então um novo sinal de *kanban* eletrônico é gerado no sistema e enviado automaticamente para os fornecedores. Este envio pode acontecer via e-mail ou por meio de um site seguro. A partir do momento do recebimento do sinal, o fornecedor deve preparar o envio dos materiais dentro do prazo estipulado (RAZAFUAD, RIDDWAN e SANTOSA, 2018). Um dos pontos mais importantes do SKE é determinar o nível de estoque de cada produto, assim como o momento de retirada de cada *kanban*. Seu uso apresenta algumas vantagens comparado ao *kanban* tradicional, tais como: melhor visibilidade e rastreabilidade do que acontece em todo o sistema, possibilidade de trabalhar com o controle de um maior número de itens, eliminação do manuseio físico de cartões, o que resulta em menor tempo gasto para sua operação, eliminação do risco de perda dos mesmos, o que poderia ocasionar problemas imediatos na produção e simplicidade do ponto de vista operacional (HOUTI, ABBADI e ABOUABDELLAH, 2017). O SKE é geralmente sincronizado com o ERP (Sistema Integrado de Gestão Empresarial), facilitando assim o acesso ao histórico de informações para tomada de decisão. A tecnologia proveniente do SKE, com o uso de cartões com códigos de barras, RFID (identificação por rádio frequência), torna possível reduzir a quantidade de erros no gerenciamento de cartões.

As descrições sobre os demais tipos de *kanbans*, conforme ilustrados na **Figura 2.2**, podem ser verificadas na publicação de Lage Junior e Godinho Filho (2010).

### 2.4.3 Equações tradicionais para o cálculo de *kanbans*

Em geral, é possível observar que existem diferentes formas de dimensionar deterministicamente os cartões *kanban*. Algumas empresas utilizam uma fórmula oriunda da Toyota, conforme descrito na Eq. (1) para obter a quantidade, outras a própria experiência (empírica) de seus processos de produção e do mercado onde atuam (WANG e WANG, 1991). Todavia, as equações mais utilizadas descritas na literatura clássica são as Eqs. (1) a (3).

$$k = \frac{D(Tw + Tp)(1 + \alpha)}{c} \quad (1)$$

Sendo:  $k$  – quantidade de *kanban*

$D$  – Demanda por unidade de tempo

$T_w$  – *Lead time* de ressurgimento

$T_p$  – Tempo de processamento

$c$  – Capacidade do *container*

$\alpha$  – Coeficiente de segurança

Perez (2010) utilizou uma abordagem baseada em custos, conforme Eq. (2), para obtenção de *kanbans* a partir de sua interpretação como quantidade econômica de ordem de produção, onde são considerados os seguintes dados:

$$n = \sqrt{\frac{2CD}{h}} \quad (2)$$

Sendo:  $n$  – Quantidade de *kanban*

$D$  – Quantidade demandada

$h$  – Custo de cada unidade em estoque

$C$  – Custo por unidade requisitada

Shingo (1989) descreveu o dimensionamento da quantidade de cartões *kanban* de acordo com a Eq. (3):

$$k = \frac{D \cdot LT + ES}{c} \quad (3)$$

Sendo:  $k$  – Quantidade de *kanbans*

$D$  – Demanda diária

$LT$  – *Lead time* de reposição

$ES$  – *Estoque de segurança*

$c$  – Capacidade do *container*

No presente trabalho objeto de estudo, será considerada apenas a Eq. (3).

Em todas as equações anteriormente descritas é possível observar a influência da

demanda no dimensionamento da quantidade de *kanban*. Apesar de apenas a Eq. (2) tratar o custo de cada unidade de estoque, as demais fórmulas se preocupam não somente em garantir um nível adequado de estoque com valor enxuto, mas também em um melhor nível de serviço ao cliente.

#### 2.4.4 Estoque de Segurança

Nas Eq. (1) e (3), são mencionadas as variáveis  $\alpha$  e  $ES$ , que dizem respeito ao nível do estoque de segurança (ES). O ES é definido como a quantidade de inventário adicional para permitir à organização lidar com a variação da demanda, fornecimento e restrições de capacidade. Ao determinar o nível do ES, é necessário levar em consideração o comportamento da demanda no que diz respeito ao erro de previsão e também lidar com o *trade off* existente entre o custo e o nível de serviço. O nível de estoque almejado depende da variação da demanda, ou seja, se existe uma pequena variação é necessário um nível de estoque menor e em caso contrário um nível maior, o que pode acarretar em custos excessivos (WATERS, 2003; KUMAR e AOUAM, 2017; ARNOLD, CHAPMAN e CLIV, 2008; KORPONAI, TÓTH e ILLÉS, 2017). Em geral, uma empresa que utiliza o conceito de ES, trabalha com um nível de serviço ao redor de 95%, pois se trata do nível de confiança estatístico mais adotado na literatura. Todavia, podem acontecer variações nesta definição, em função do nível de importância dos itens para a empresa, ou seja: muito importante, há níveis em torno de 98%, por exemplo, enquanto os menos importantes ao redor de 90%, por exemplo (WATERS, 2003; AXSÄTER, 2015). Para o cálculo de ES, uma das equações utilizadas é a Eq. (4) (WATERS, 2003; KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA, 2009):

$$ES = F_S \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{LT} \quad (4)$$

Sendo:  $ES$  – Estoque de segurança

$F_S$  – Fator de nível de serviço

$\sigma_D$  – Desvio padrão da demanda

$LT$  – *Lead time*

O ES também é conhecido como *buffer* ou estoque reserva. Na **Figura 2.3**, é ilustrada a relação entre o estoque de segurança, quantidade de pedido e ponto de reposição.

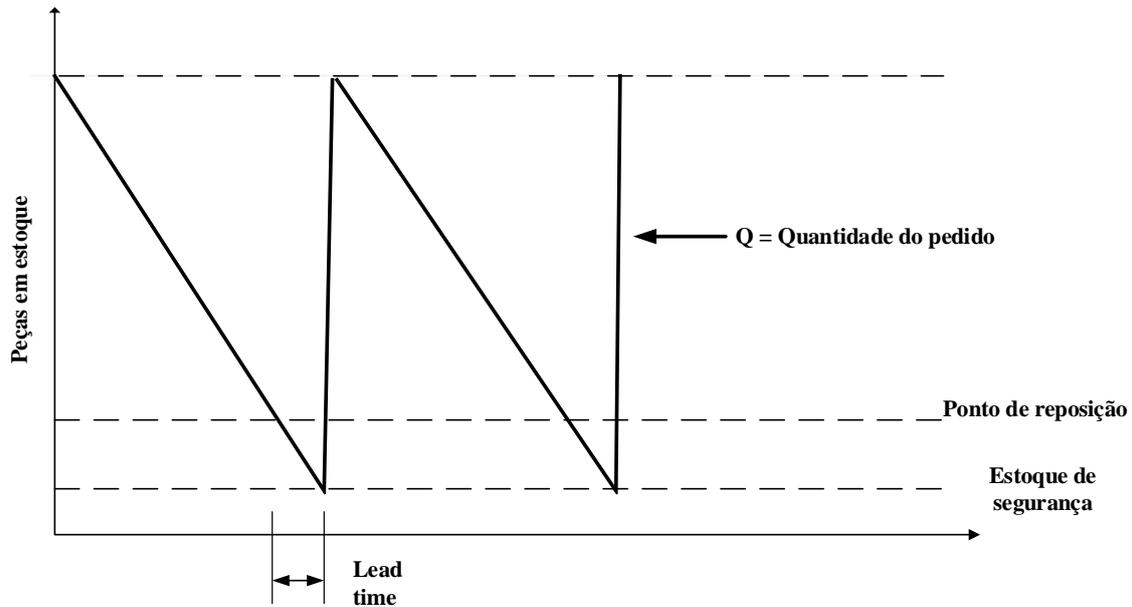


Figura 2.3 - Relação entre ES, quantidade de pedido e ponto de reposição  
 Fonte: adaptado de Arnold, Chapman e Olive (2008)

A literatura cita diferentes métodos para dimensionamento de ES, porém duas variáveis são consideradas preponderantes, sendo elas a variação da demanda histórica e o erro de previsão (URLU e ERKIP, 2020; MANZINI, ACCORSI e FERRARI, 2016; BAHAREH e NADIA, 2014). O desafio é alcançar um equilíbrio entre os custos provenientes do estoque e os níveis desejados de atendimento ao cliente. Assim sendo, a forma de cálculo adotada na tese foi conforme a Eq. (4).

## 2.5 Métodos de otimização para sistemas kanban

Na literatura existe um grande número de pesquisas em que o objetivo é encontrar a quantidade ideal de cartões *kanban* para um determinado sistema de fabricação (AGHAJANI, MOGHADAM e MIRJAVADI, 2016; XANTHOPOULOS, KOULOURIOTIS, GASTERATOS e IOANNIDIS, 2016). A maioria dos estudos relacionados ao tema otimização de *kanban* mencionam sua enorme aplicabilidade no controle de suprimentos, onde o dimensionamento adequado do número de cartões leva a empresa a atingir a manufatura JIT e, por conseguinte, obter um melhor planejamento e programação de produção (WANG e SARKER, 2006). Do ponto de vista de aplicação, as pesquisas relacionadas ao *kanban* baseiam-se em tecnologia, podendo ser divididas em: controle de produção, gerenciamento de estoque, gerenciamento da cadeia de suprimentos (HAO e SHEN, 2008). Dentre as outras publicações avaliadas sobre revisão teórica do tema otimização de *kanban*, foram encontradas as

publicações de PRICE, GRAVEL e NSAKANDA (1994), que fizeram uma revisão de literatura sobre os princípios, modelos de otimização e dimensionamento de supermercados de sistemas *kanban*; Ahmed e Sultana (2014), trataram em sua pesquisa uma revisão da literatura sobre os trabalhos baseados na filosofia JIT e otimização de *kanban*, assim como consideraram os artigos pesquisados quanto a abordagem de modelagem, variabilidade do sistema e seu efeito, sistema *CONWIP* (sistema híbrido de produção, puxado e empurrado) e a aplicação do JIT na cadeia de suprimentos.

Foi realizada uma pesquisa na base de dados do portal *Scopus*, conforme descrito, sendo que o filtro utilizado para a busca considerou as seguintes palavras chaves: *kanban optimization; lean optimization; JIT optimization e Kanban optimal*. Na literatura, foi possível destacar alguns trabalhos, cujos as propostas tratam o tema otimização de *kanban*, no que diz respeito ao uso da otimização para dimensionamento de supermercados, são eles: DAVIS e STUBIZ (1987); AYTUG; DOGAN e BEZMEZ (1996); MOEENI; SANCHES e VAKHARIA (1997); LI (2003); LAVOIE; GHARBI e KENEÉ (2010); HOU e HU (2011); AZOUZ e PIERREVAL (2018).

O trabalho de Davis e Stubiz (1987), investiga o desenvolvimento de uma estratégia de controle de produção baseada em *kanban* para um fabricante de porta personalizada. Técnicas de simulação e otimização discreta são aplicadas para configurar o sistema, com o objetivo de mostrar o quão conflitante é a otimização discreta em múltiplas respostas, sendo que os autores tinham como proposta a maximização do tempo da utilização da estação de trabalho e a minimização da ordem de produção no chão de fábrica. Observa-se que o foco dos autores não estava em otimizar a quantidade de *kanbans*, mas sim alocá-los da melhor maneira possível entre as estações de trabalho de forma a diminuir o *lead time* de produção.

Já Aytug, Dogan e Bezmez (1996) utilizaram o DOE com a técnica fatorial completo, onde foram considerados 6 fatores para a geração dos experimentos, tendo obtido assim um cenário com 64 combinações. Em seguida, os autores dimensionaram os tempos de ciclo para cada componente do modelo proposto de estudo e calcularam a quantidade de *kanbans* a partir da minimização de uma função de custo descrita na Eq. (5).

$$\begin{aligned} \text{Min } TC = & wc * (0,4cyc7 + 0,6cyc8) * n_0 + kc \\ & * (PK_5 + PK_6 + PK_7 + PK_8 + WK_5 + WK_6) * \text{makespan} \end{aligned} \quad (5)$$

Sendo:  $TC$  = Custo total de operação sob determinada configuração de *kanbans*

$wc$  = Custo de espera por minuto e pedido

$n_0$  = Número total de ordens processadas

$kc$  = custo por minutos de *kanban* (*container*)

$cyc7$  = tempo de ciclo de pedido da parte 7 (obtido a partir do metamodelo)

$cyc8$  = tempo de ciclo de pedido da parte 8 (obtido a partir do metamodelo)

$makespan$  = Tempo para conclusão de todos os pedidos

$PK$  = Quantidade de *kanbans* de produção

$WK$  = Quantidade de *kanbans* de retirada

Na proposta de Moeeni, Sanches e Vakharia (1997) foi utilizado o conceito de projeto robusto de Taguchi com o arranjo cruzado. Aplicaram um projeto experimental que permitia examinar simultaneamente três tipos de parâmetros: quantidade de *kanbans*, períodos de revisão do *kanban* e tamanho do *container*. Categorizaram como parâmetros no estudo realizado: a demanda e o período de fornecimento como uma distribuição normal; tempo de processamento, quebras e tempo de reparo como uma distribuição normal/exponencial. O ambiente de estudo continha um sistema produtivo com 3 estágios e apenas 1 produto. Os passos para a realização da proposta dos autores foram divididos da seguinte forma: passo 1- seleção do indicador de desempenho (nível de serviço medido pelo número diário de pedidos em atraso e nível de inventário); passo 2 – definição da função de custo com respectivos parâmetros de desempenho; passo 3 – identificação dos fatores; passo 4 – planejamento de experimentos; passo 5 – condução dos experimentos; passo 6 – análise dos resultados; passo 7 – confirmação dos resultados.

Foram investigados 34 fatores de ruído em seis categorias: padrões de demanda; prazos de entrega de fornecedores; tempos de preparação de máquina (*setup*) e tempos de reparos. Das categorias avaliadas, o volume de demanda e o *lead time* de fornecedor foram estabelecidos como fontes externas de ruído, enquanto os demais como fatores internos. A avaliação dos dados da proposta apresentada contemplava o horizonte de tempo de 1 dia, porém com 7656 observações. Para a elaboração do planejamento experimental foi empregada a técnica dos experimentos fatoriais junto com o RPD (Projeto de parâmetros robustos) para definir os experimentos, sendo que para cada combinação de experimento foi medida a média, variância e a perda escalonada (função de custo), tendo como alvo a combinação de experimento com menor perda escalonada. Após gerados os experimentos, os dados foram simulados no modelo de simulação gráfica SIGMA. Foram avaliados em seguida: o nível de inventário, descrito na Eq. (6); o nível de serviço, apresentado na Eq. (7); e a perda escalonada, função de custo apresentada na Eq. (8). É primordial comentar, que para avaliar a perda escalonada em relação

à média e a variância, foi aplicada uma análise gráfica.

Em relação ao indicador de nível de inventário tem-se a Eq. (6)

$$y_{ijk}^I = \sum_{h=1}^3 Ih + F3 \quad (6)$$

Sendo:  $y_{ijk}^I$  – A  $k$  ésima observação na  $j$  ésima replicação para a configuração do parâmetro  $i$  (inventário)

$Ih$  – número de recipientes cheios de inventário no estágio  $h$

$F3$  – representa um *container* fracionado de mercadorias no estágio três

No que diz respeito ao indicador nível de serviço é apresentada a Eq. (7)

$$y_{ijk}^S = \text{Número de unidades em atraso ao final do dia } k \quad (7)$$

Para a avaliação da perda escalonada é descrita a Eq. (11)

$$L_x = [\sigma^2 x + (\mu_x - \tau)^2] \quad (8)$$

Sendo:  $L_x$  – Perda escalonada

$\mu_x$  e  $\sigma^2 x$  – Média e variância de  $Y_x$

$\tau_x$  – Desvio padrão em relação ao alvo

As considerações dos autores foram bem relevantes, no que diz respeito às seguintes observações: um sistema *kanban* com desempenho médio desejável pode não ser o sistema mais barato para operar; os melhores projetos em relação ao nível de serviço podem estar entre os piores comparados ao nível de estoque e vice versa; cabe a equipe de projeto analisar as alternativas e ajustar a configuração ideal em relação às características de desempenho que melhor atendam as estratégias da organização; a escolha de parâmetros para o dimensionamento de *kanban* unicamente na média pode resultar em um projeto ruim; as características de ruído não carecem ser conhecidas precisamente ao construir o experimento.

Já Li (2003) desenvolveu em seu estudo uma melhor forma para o uso dos sistemas *kanban* em ambiente *Job Shop*. Tendo como parâmetros de performance a média de inventário

em processo, o tempo médio de fluxo e o tempo médio de processamento. O controle de produção proposto no estudo teórico realizado foi baseado em um sistema *kanban* híbrido (*push-pull*). Para realizar as análises, foi utilizada a técnica de DOE, considerando três fatores com seus respectivos níveis: coeficiente de variação (6 níveis), *layout* da loja (5 níveis) e fator de redução de *Setup* (3 níveis). Em seguida, fizeram os experimentos em uma linguagem de simulação SIMSCRIPT II.5, onde os dados estatísticos de performance foram obtidos, com o objetivo de atingir 95% de intervalo de confiança (IC). A quantidade de *kanbans* foi dimensionada a partir dos dados da simulação, tendo como parâmetro minimizar os efeitos do coeficiente de variação nos supermercados. O autor não utiliza nenhum tipo de algoritmo de otimização para chegar no quantidade de *kanbans*, se detém apenas aos dados estatísticos gerados após a simulação.

Lavoie, Kenné e Gharbi (2009), trataram em sua publicação o controle de produção por *kanban* em linhas de transferência homogêneas, tendo máquinas propensas a falhas, analisando seu impacto no nível de estoque, custos de *backlog* e satisfação dos clientes. Os autores propuseram um método heurístico para reduzir o número de parâmetros no problema de otimização e utilizam o conceito de DOE com CCD (Arranjo composto central) para planejar os experimentos, que em seguida são simulados na linguagem VISUAL SLAM, com o objetivo de minimizar o custo médio de *backlog*. Para o problema analisado, a taxa de demanda é considerada constante. As respostas almeçadas foram a média excedente de estoque e o atraso médio, expressa na Eq. (9):

$$Y \approx \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i Z_i + \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \geq i}}^m \beta_{ij} Z_{ij} \quad (9)$$

Sendo:  $Y$  = Resposta estimada,  $Z$

$Z_i - i = 1$  até  $m$  – Fatores

$\beta$  = Coeficientes estimados

Devido à alta variância apresentada nos modelos, a função de *backlog* é multiplicada pela razão de custo unitário e ambas as funções são então somadas. A função resultante é então minimizada usando programação não linear. Uma vez feita a otimização, é realizada a validação

da estimativa de custo, executando 30 réplicas com parâmetros ótimos, por meio da Eq. (10):

$$\bar{C} - \frac{1,96S}{\sqrt{n}} \leq C^* \leq \bar{C} + 1,96S \quad (10)$$

Onde:

$$S = \frac{\sqrt{\sum(C_i - \bar{C})^2}}{\sqrt{n - 1}}$$

Sendo:  $C_i, i = 1, \dots, n$  – Resultados das replicações

$\bar{C}$  = Custo médio obtido a partir das replicações

$S$  = O desvio padrão da amostra

$C^*$  = Custo ótimo

Lavoie, Kenné e Gharbi (2009) não realizaram uma otimização direta do conceito de *kanban*, entretanto concluem que se o valor obtido com a função de custo estiver dentro de um IC de 95%, a superfície de resposta estimaria com precisão o custo real, o que permitiria determinar a quantidade de *kanban* no sistema.

Hou e Hu (2011) sugeriram a utilização de um sistema baseado no algoritmo genético múltiplo objetivo integrado (MOGA), para determinar o número e o tamanho ótimo de *kanban* em uma empresa do seguimento automobilístico, fabricante de tetos solares. Um planejamento de experimento é construído com uso da técnica fatorial completo, considerando 4 fatores e 5 réplicas. Os experimentos gerados foram simulados no SIM PROCESS RELEASE 4.3, considerando demanda constante. Diferentes quantidades de *kanbans* e tamanhos foram testados em estágios distintos da produção. Logo após foi encontrado o modelo de regressão que permitiu avaliar o impacto das respostas no desempenho da produção. O modelo estatístico quadrático foi o que melhor ajuste estatístico apresentou, para as ambas respostas referentes às Eq. (11) e Eq. (12):

$$Z_{TR} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^3 \hat{\beta}_i \cdot k_i + \hat{\beta}_4 B + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} k_i^2 + \hat{\beta}_{44} B^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \hat{\beta}_{ij} k_i k_j + \sum_{i=1}^3 \hat{\beta}_{14} B \quad (11)$$

$$Z_{WIP} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^3 \hat{\beta}_i \cdot k_i + \hat{\beta}_4 B + \sum_{i=1}^3 \hat{\beta}_{ii} k_i^2 + \hat{\beta}_{44} B^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \hat{\beta}_{ij} k_i k_j \quad (12)$$

$$+ \sum_{i=1}^3 \hat{\beta}_{i4} B$$

Sendo:  $Z_{TR}$  = Taxa de transferência de peças boas (mede a eficiência do sistema)

$Z_{WIP}$  = Estoque em processo

$\beta_0$  = Valor constante

$k_i$  = Quantidade de *kanban*

$B$  = Tamanho do *kanban*

$\hat{\beta}_i$  e  $\hat{\beta}_4$  = Coeficientes parciais de regressão

Após gerados os dados estatísticos e formulado o problema estudado, as respostas foram otimizadas com o uso do algoritmo MOGA, sendo assim possível encontrar a resposta ótima, no que diz respeito a quantidade de *kanbans*.

O trabalho mais recente de otimização de cartões *kanban* foi tratado por Azouz e Pierreval (2019), que propuseram uma estratégia capaz de explorar online os dados disponíveis sobre a evolução do contexto de produção, para decidir em que momento e em qual estação de trabalho o número de cartões necessitava ser trocado. É usada uma abordagem de rede neural treinada *offline*, baseada em simulação a partir de um método de otimização multiobjetivo, com a intenção de maximizar a satisfação dos clientes e minimizar o inventário, evitando assim a necessidade de mudar frequentemente a quantidade de cartões *kanban*. Percebe-se que os autores estavam mais interessados em encontrar o equilíbrio entre o momento adequado para mudança dos números de cartões *kanban* com menor impacto no custo, ao invés de necessariamente determinar a sua quantidade ótima.

## 2.6 Análise de pesquisas da literatura sobre sistemas *kanban*

O tema otimização de *kanban* vem sendo explorado academicamente, o que leva a um número relevante de publicações. Entretanto, é importante entender quais são os métodos utilizados para tal fim. Logo, esta sessão foca na análise sistêmica da literatura.

Foi realizada uma pesquisa na base de dados do portal *Scopus*, por ser o maior banco de

dados de resumos e citações da literatura. Os dados da pesquisa são apresentados na **Figura 2.4**, sendo que o filtro utilizado para a busca considerou as seguintes palavras chaves: *kanban optimization*; *lean optimization*; *JIT optimization* e *Kanban optimal*. Foram encontrados um total de 107 artigos até o ano de 2019, todavia apenas 39 deles trabalharam o tema otimização de *kanban*. O objetivo foi analisar a maneira com que o tema otimização de *kanban*, vem sendo tratado na literatura, e quais trabalhos utilizaram a técnica DOE para a modelagem de sistemas *kanban*.

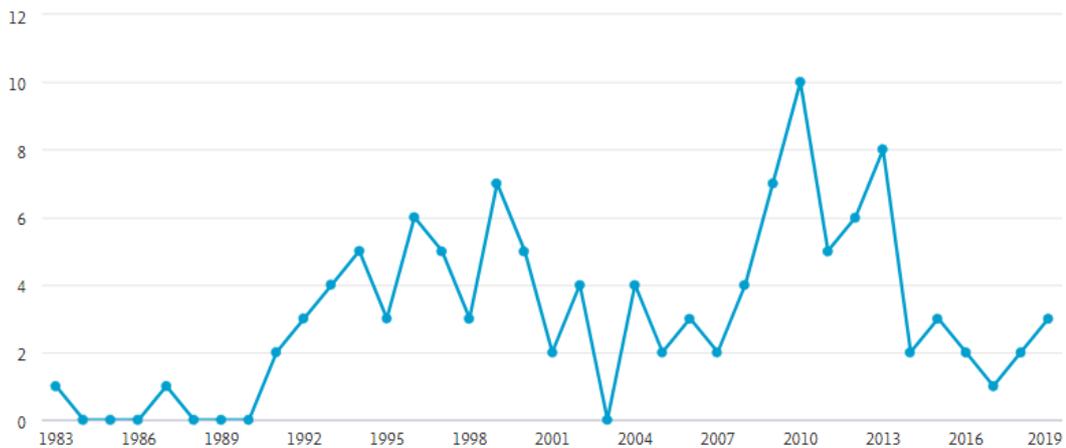


Figura 2.4 - Artigos publicados com o tema *kanban optimization*  
Fonte: Scopus (2019)

Em relação aos métodos utilizados nos artigos publicados, observou-se (**Figura 2.5**) que um total de 21,1% deles apresentavam o uso de DOE na proposta (16,9% usavam DOE e Simulação; 4,2% somente DOE).

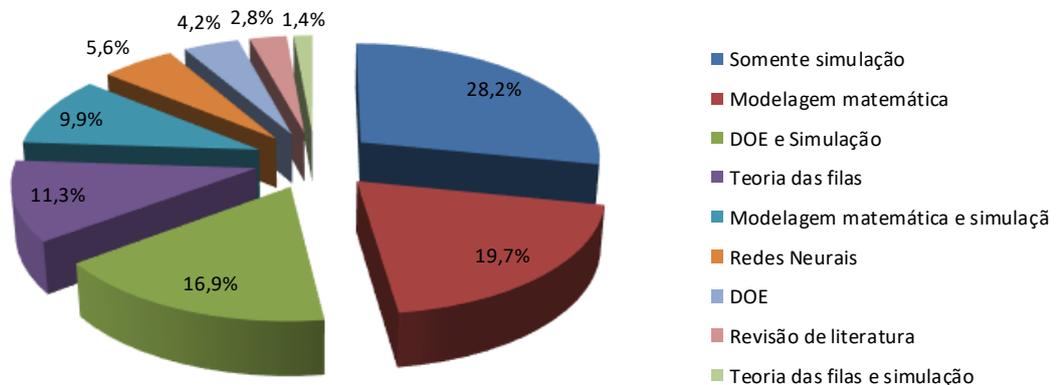


Figura 2.5 - Percentual por tipo de método utilizado nas publicações  
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

No valor total mencionado para simulação é considerado o número de vezes que o DOE aparece, mesmo quando aplicado com outro método. A análise do percentual por tipo de método

também foi estudada por Araz e Eski (2008), que relataram a otimização de *kanbans* sendo muito estudada em diferentes artigos nos últimos anos, dos quais grande parte deles a mencionam como forma de modelar o sistema concomitante a modelos de regressão, os quais na sua visão traziam as seguintes carências: são limitados para obtenção da solução, sensíveis aos desvios do modelo estatístico definido e ainda podiam errar na hora de escolher a função para análise.

O **Quadro 2.2** resume os recentes trabalhos a respeito de otimização de *kanban* com maior número de citações, sendo utilizada a base de dados *Scopus*, como referência para tal levantamento e o número de citações superior a 15 vezes. Os *papers* foram classificados em termos de métodos, contribuição e aplicação. A maioria deles utilizou a simulação como forma de validação dos dados para a otimização.

Quadro 2. 2- Trabalhos com maior número de citações

Referência	Método	Contribuição para a presente pesquisa	Aplicação/Tipo de indústria	Nº de citações
Tardif e Maaseidraag (2001)	Teoria das filas e simulação	Um sistema puxado adaptado pode funcionar melhor que um sistema puxado tradicional em ambientes com um único estágio.	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	96
Gaury; Pierreval; Kleijnen (2000)	Simulação	Os resultados mostram que as melhores estratégias são a utilização de simplificados sistemas híbridos (CONWIP).	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	67
Ohno (1995)	Modelagem matemática	Propõe um algoritmo para determinar a quantidade ideal de <i>kanbans</i> que minimize o custo médio esperado por período.	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	34
Dengiz e Alabas (2000)	Simulação	O algoritmo TS ( <i>Tabu Search</i> ) supera o algoritmo RS ( <i>Random search algorithm</i> ) para a otimização de simulação em um sistema produtivo controlado por <i>kanban</i> .	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	33
Kochel e Nielander (2002)	Simulação	Consideram variados fatores de custo em uma função objetivo e geram apenas uma solução, não conseguem mostrar soluções que representem os <i>trade-offs</i> nos fatores de custo, ou mesmo a quantidade ótima de <i>kanbans</i> .	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	32
Lavoie; Gharbi e Keneé (2010)	DOE (superfície de resposta) e simulação	Quando o custo de espaço de armazenamento é considerado como alvo, o sistema híbrido produz o menor custo comparado com o sistema puxado tradicional. Outro ponto é que o sistema híbrido se apresenta mais robusto que o sistema <i>kanban</i> .	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	32

Quadro 2.2 - Trabalhos com maior número de citações (continuação)

Referência	Método	Contribuição para a presente pesquisa	Aplicação/Tipo de indústria	Nº de citações
Paris e Pierreval (2001)	Modelagem matemática	O uso de modelagem matemática permite a construção de modelos de sistemas <i>kanbans</i> realísticos.	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	23
Fukukawa e Hong (1993)	Programação inteira mista	Identifica os fatores relevantes que influenciam no dimensionamento de <i>kanbans</i> em um sistema de fabricação multi estágio.	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	22
Kim e Tang (1997)	Teoria das filas	O tamanho do <i>container</i> é mais sensível à utilização da instalação e tempo de <i>setup</i> , enquanto o número de cartões de autorização de produção (PA) é mais sensível ao nível de serviço.	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	21
Shahabudeen; Gopinath e Krishnaiah (2002)	Simulação	São considerados vários parâmetros no estudo, tais como forma de medição de um sistema <i>kanban</i> : Média do estoque de materiais na entrada do processo; média do estoque de materiais na saída do processo; total de estoque em processo (WIP); Tempo de espera para receber peças boas; etc.	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	21
Husseini; Brien e Hosseini (2006)	Programação linear inteira	O método proposto demonstra as seguintes vantagens: Uma maior flexibilidade que o sistema <i>kanban</i> tradicional e uma vantagem de custo em situações de flutuação de demanda.	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	19
Panayiotou e Cassandras (1999)	Modelagem matemática (FPA)	A técnica FPA pode ser utilizada para se obter as estimativas de sensibilidade, a fim de reduzir a quantidade de simulação requerida em qualquer otimização baseada em simulação.	Estações de trabalho genéricas (teóricas)	18
Hall; Royce e Usher (1996)	Modelagem matemática e simulação	Boas soluções podem ser encontradas mesmo com pequenos tamanhos populacionais.	Linha de produção de fornos da empresa Whirlpool	16

Fonte: Scopus (2019)

A partir da análise realizada dos métodos de otimização e da classificação da literatura, foi possível observar algumas lacunas, no que diz respeito aos métodos de otimização utilizados, uma vez que grande parte deles definem a quantidade de *kanbans* a partir de funções de custo ou somente após a obtenção dos dados de simulação com pouco uso de algoritmos para otimização. Outro ponto interessante é que não são contemplados a variação na demanda, tempo de processamento, os quais são tratados de forma determinística na maioria dos trabalhos. Outro detalhe é que nenhum dos estudos considera o planejamento experimental a partir do estoque de segurança.

### 2.6.1 Variáveis utilizadas

Em relação às variáveis utilizadas, encontrou-se o seguinte contexto, descrito na *Tabela*

## 2.1.

Tabela 2.1- Variáveis utilizadas nos modelos prévios para otimização de *kanban*

Variáveis encontradas	Valor (%)
Demanda	24,7
Quantidade de <i>kanbans</i>	19,6
Tempo de processamento	13,4
Custo	11,3
Tamanho do lote	8,2
Número de máquinas	6,2
Estoque	6,2
Setup	5,2
Falha de máquina	5,2

São poucos os trabalhos que consideram as variáveis demanda e tempo de processamento como principal variável na otimização de *kanban*, sendo possível destacar o trabalho de MOEENI; SANCHES e VAKHARIA (1997). Nota-se que em algumas situações o mesmo referencial contempla mais de uma variável, porém de forma determinística. Outro ponto importante é que a quantidade de *kanbans* também entra no contexto das variáveis, isto acontece porque os estudos partem da variação da quantidade de *kanban* para determinar a melhor solução na diminuição do custo com estoque, custo do sistema ou ainda melhorar o aproveitamento do espaço físico disponível.

### 2.6.2 Algoritmo

Os algoritmos representam outro ponto importante nas publicações, pois nem todos os autores necessariamente o utilizam para atender sua proposta de otimização de *kanban*. A **Tabela 2.2** mostra estatisticamente os trabalhos que utilizaram algoritmos na busca da solução ótima.

Tabela 2.2 - Tipo de algoritmo

Tipo de algoritmo	Percentual
Genético	37,1
Criado pelo autor	17,0
Markoviano	8,5
<i>Simulated Annealing</i>	5,7
<i>Tabu Search</i> , Algoritmo genético, <i>Simulated Annealing</i>	5,6
<i>Hokkes</i>	2,9
<i>Kriging</i>	2,9
<i>Branch and Bound</i>	2,9
<i>Simulated Annealing</i> e Algoritmo genético	2,9
<i>PSO (Particle Swarm Optimization)</i>	2,9
<i>Tabu Search</i>	2,9
<i>PSO/Simulated Annealing</i>	2,9

Tabela 2.2 - Tipo de algoritmo (continuação)

<b>Tipo de algoritmo</b>	<b>Percentual</b>
<i>Petri Net</i>	2,9
<i>Cross Entropy</i>	2,9

A maioria das publicações, ou seja, 37,1% analisadas têm como principal algoritmo utilizado o genético (GA). Também se observa que 17% contemplam o uso de algoritmo, porém com uma abordagem de desenvolvimento própria criada pelos autores.

### 2.6.3 Indicadores dos métodos de otimização

Os indicadores são uma forma de avaliar o resultado dos métodos propostos em cada publicação, conforme **Tabela 2.3**.

Tabela 2.3 - Tipo de indicadores usados em modelos de otimização de kanban

<b>Tipo de indicador</b>	<b>Percentual</b>
Nível de estoque e serviço	28,2
Custos de estoque	22,6
Estoque em processo	11,3
Desempenho da produção	7,0
Qualidade da solução encontrada	7,0
Nível de serviço	7,0
Taxa de produção e nível de estoque	5,6
Não deixa claro	4,2
Revisão teórica	2,9
<i>Lead time</i> de produção	1,4
Custo de estoque e entrega	1,4
Tempo de ajuste de <i>kanbans</i>	1,4

O nível de estoque e serviços utilizados conjuntamente sobressaem em relação aos demais indicadores, para avaliar o desempenho dos métodos de otimização *kanban* propostos nas publicações. Entretanto, chama também a atenção o indicador avaliação dos custos relacionados ao estoque. Logo, se considerado o uso da métrica estoque de uma forma geral, mesmo aplicado conjuntamente com outro indicador, o resultado é representativo no total de artigos analisados. Estes são pontos importantes a serem observados, pois o conflito existente entre nível de serviço e nível de estoque é um constante desafio para as pesquisas que tratam a otimização de sistemas *kanban*. Por isso, este trabalho considera estes indicadores, para avaliar a proposta de parâmetros robustos para modelagem e otimização de sistemas *kanban*.

### 2.6.4 Tipos de aplicações

As aplicações observadas na **Figura 2.6** permitem analisar quais são os locais onde ocorre o maior uso da otimização de *kanban*. Concentram-se em sua maioria em estações de trabalho teóricas (74,4%). 7,6% das aplicações dizem respeito à cadeia de fornecimento logístico (cadeia de suprimentos) e apenas 18% dos trabalhos usaram a aplicação em casos reais.

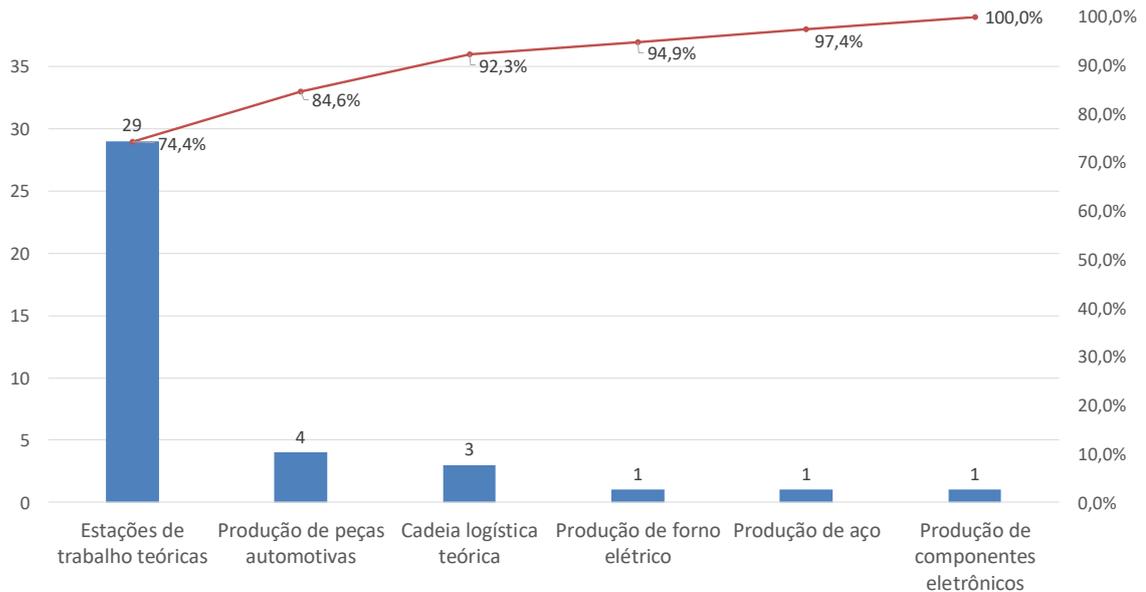


Figura 2.6 - Aplicações do uso de otimização *kanban*

A pesquisa realizada proporcionou constatar a dificuldade que existe na aplicação prática de conceitos de otimização de sistemas *kanban* em casos reais, isto se deve a impossibilidade de interromper um processo produtivo com a finalidade de validar uma proposta de otimização, visto que o tempo utilizado e os custos envolvidos acabam por ser justificativas comuns. Desta forma, os experimentos simulados tornam-se uma alternativa viável como forma de abordagem de otimização, uma vez que possibilitam avaliar de maneira teórica a aplicação do método de otimização. Portanto, buscou-se na literatura casos possíveis de serem aplicados o método proposto neste trabalho, uma vez que este estudo científico tem um caráter acadêmico e para validação seria necessário um maior tempo na avaliação da sua aplicabilidade real em um cenário produtivo.

### 2.6.5 Tipos de empresas

A **Figura 2.7** descreve os principais tipos de empresas que utilizaram a otimização de *kanban* e comprova que a maioria dos trabalhos publicados não aplica a sua proposta de

otimização *kanban* em casos reais, mas sim em empresas teóricas ou fictícias criadas pelos autores. Assim como descrito no tópico tipos de aplicações, provavelmente isto se justifica pela dificuldade de validação do método em uma situação real, a qual exigirá muitas das vezes uma disponibilidade do processo produtivo para tal fim.

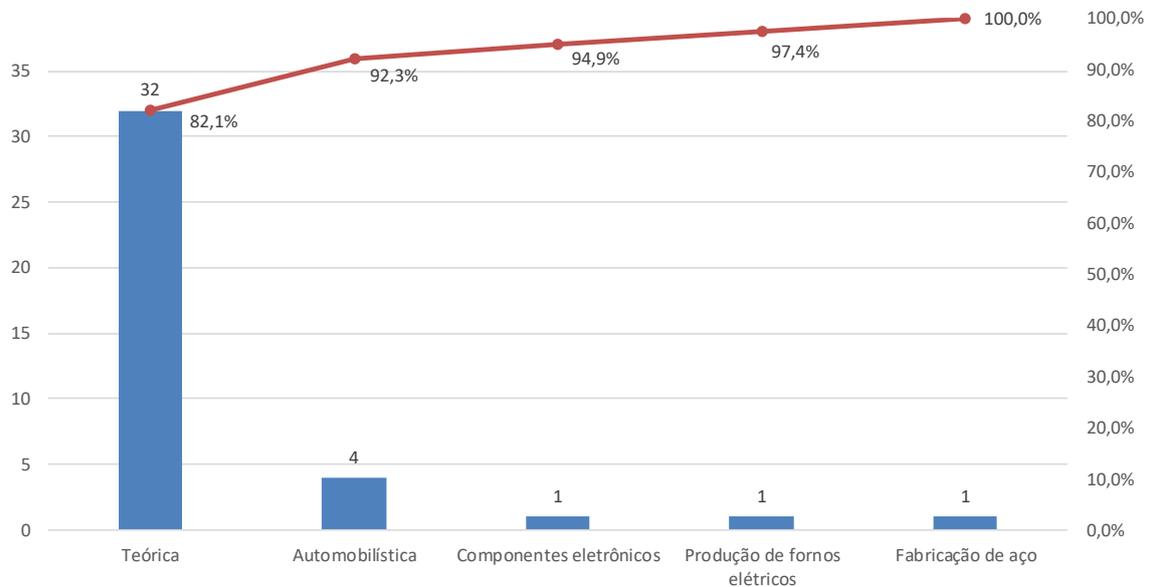


Figura 2.7 - Percentual por tipo de empresa (montadoras e fabricantes)

Todavia, é interessante destacar, que de acordo com a **Figura 2.7**, as indústrias automobilísticas são as empresas que fazem maior uso da aplicação prática dos conceitos de otimização de sistemas *kanban* no “chão de fábrica”.

Uma vez que a maioria dos trabalhos analisados na literatura faziam uso do DOE e nesta tese também será utilizada essa técnica, o próximo tópico faz uma revisão teórica sobre tema.

## 2.7 Projeto de experimentos (DOE)

O conceito de DOE pode ser definido como um processo de planejamento de experimentos com o objetivo de investigar fatores que influenciam em uma determinada variável resposta de um processo, sendo que dados são coletados e analisados por métodos estatísticos, possibilitando conclusões objetivas (MONTGOMERY, 2012; HINKELMAN e KEMPTHORNE, 2008). Em outras palavras pode ser definido como o meio de alcançar conhecimento do processo, através do estabelecimento de relações matemáticas entre as entradas do processo e suas saídas (POLITIS, COLOMBO, COLOMBO e REKKAS, 2017).

Em qualquer segmento de pesquisa existe uma grande preocupação em identificar quais

variáveis têm relevância no problema analisado, para que seja possível conhecer o impacto no resultado final. Montgomery, Myers e Cook (2009) citaram que o DOE é uma técnica experimental utilizada em algumas situações comuns, tais como: comparação de diferentes materiais, identificação e seleção de parâmetros de projeto que permitam melhorias no desempenho de utilização dos produtos e processos. Relatam ainda que quando se trata de um produto ou de um processo, a utilização do DOE se torna um grande diferencial, principalmente se aplicado nas etapas iniciais de desenvolvimento de um produto ou melhoria do mesmo, assim como na otimização de processos de fabricação existente, o que em geral, pode ser fundamental para o sucesso de uma organização, tendo uma contribuição considerável nos objetivos e metas almejadas da organização.

As estratégias experimentais mais utilizadas no DOE são: experimentos fatoriais, experimento de superfície de resposta, experimentos de mistura e experimentos de Taguchi (também chamados de experimentos robustos de Taguchi). Todavia, os experimentos fatoriais fracionados (*fractional-factorial*) tem uma maior aplicabilidade nas empresas, pois possibilitam uma grande eficiência e economia na realização dos experimentos (EVINS *et al.*, 2012). O DOE também apresenta vantagens na modelagem e análise de processos, pois torna possível obter uma série de informações que irão facilitar na tomada de decisão, uma vez que é feito um planejamento de experimentos sistemático, onde se leva em consideração todas as variáveis e fatores que podem impactar diretamente no problema estudado (LEME *et al.*, 2014).

### **2.7.1 Metodologia de Superfície de resposta**

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) pode ser considerada como um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas aplicadas para analisar problemas e otimizar uma resposta, a qual é influenciada por diferentes variáveis (BOX e DRAPER, 2007). A MSR pode ser utilizada em diferentes campos de aplicação, sendo primordial a identificação da variável de interesse (resposta), e as variáveis de entrada com seus respectivos níveis. O objetivo principal da MSR é determinar as condições ótimas de operação do sistema estudado, com o uso de poucos e eficientes experimentos (MONTGOMERY, 2012). Portanto, é possível alcançar as condições ideais de configuração das variáveis que leve às condições ótimas. Na maior parte dos problemas de MSR, a relação entre a resposta e as variáveis é desconhecida. Logo, uma aproximação se torna necessária para estabelecer uma relação entre elas. Nesse caso, um polinômio de primeira ordem, Eq. (13) e/ou segunda ordem, Eq. (14) são os mais utilizados (MONTGOMERY, 2012):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (13)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (14)$$

Sendo:  $y$  – Resposta de interesse

$x_i$  – Variáveis independentes

$\beta_1$  – Coeficientes a serem estimados

$K$  – Número de variáveis independentes

$\epsilon$  – Erro experimental

O modelo de primeira ordem é considerado apropriado quando existe o interesse em alcançar um valor próximo a uma região onde haja pouca curvatura, sendo conhecido como modelo de efeitos principais. Já o modelo de segunda ordem, devido à sua flexibilidade de tipos de funções e interações, se justifica pela presença de não linearidade, o que permite um comportamento satisfatório na aproximação da superfície de resposta (MYERS, MONTGOMERY e COOK, 2009). O projeto experimental utilizado deve garantir que todas as variáveis estudadas sejam devidamente avaliadas, sendo que os arranjos experimentais mais utilizados para a coleta de dados na MSR são: o arranjo composto central (*Central Composite Design*) e o arranjo *Box–Behnken*. Estes arranjos se diferem uns dos outros devido à seleção dos pontos experimentais, número de níveis para variáveis e número de blocagens (BEZZERRA *et al.*, 2008).

Apesar de diferentes métodos serem encontrados na literatura, a MSR foi considerada como uma das maneiras mais eficazes para executar a otimização de processos, combinando projeto e análise de experimentos, técnicas de modelagem e métodos de otimização (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

### 2.7.2 Experimentos de misturas

O experimento de mistura é um tipo especial de superfície de resposta onde cada fator ou é um ingrediente ou um componente da mistura, e a resposta é uma função da proporção de cada ingrediente. Estas proporções geralmente são medidas por peso, volume, etc.

(MONTGOMERY, MYERS e COOK, 2009). Os níveis dos parâmetros não são independentes e devem em cada experimento respeitar uma restrição de totalidade (GOMES, 2013). Em muitos processos industriais, a qualidade do produto final depende não apenas da proporção de componentes da mistura, mas também da condição das variáveis do processo de mistura (LIMMUN, CHOMTEE e BORKOWSKI, 2019).

Coronado, Segadães e Andrés (2014) afirmaram que o arranjo de misturas é uma ferramenta de modelagem que permite o processo de previsão do comportamento de produtos com um número mínimo de amostragens capazes de identificar os vários tipos de efeitos conjuntos entre variáveis. Mencionam também que uma das premissas básicas desta técnica é que as demais condições utilizadas no processo se mantenham constantes. As propriedades (variáveis de resposta) são facilmente determinadas pela proporção dos componentes na mistura (variáveis de entrada).

O arranjo de misturas foi desenvolvido com a finalidade de se tornar uma técnica aplicável para minimizar o número de experimentos, o que proporciona uma redução nos custos de experimentação e no prazo para conclusão dos resultados das variáveis investigadas (KAJTNA e KRANJNC, 2013). Experimentos com misturas são muito utilizados em alguns produtos para o desenvolvimento de diferentes seguimentos de negócios, tais como: cerâmicas, concreto, indústria farmacêutica, fertilizantes, alimentos, bebidas, mistura de gasolina, plásticos, fibras têxteis, etc.

Experimentos com mistura de ingredientes envolvem trocas de proporções de ingredientes (componentes da mistura) que compõem o produto, e consecutivamente esta mistura altera o resultado do produto. A proporção de componentes na mistura não pode variar independentemente (como um experimento fatorial), porque ao final a proporção deve resultar em um somatório igual a 1 para cada rodada no experimento (NING, ZHOU e FANG, 2011).

Os experimentos de mistura utilizam arranjos específicos e o modelo mais utilizado é o arranjo *simplex-lattice*, que foi introduzido por Scheffé no período de 1958-1965 e continua sendo muito utilizado até os dias atuais. O *simplex-lattice* tem uma melhor condição de expressar uma equação polinomial para representar uma superfície de resposta (CORNELL, 2002).

Os arranjos *simplex* são representados por uma configuração triangular, onde os vértices equivalem às proporções máximas das variáveis de entrada e os pontos interiores mostram as possíveis combinações destas variáveis (GOMES, 2013). Podem ser classificados em dois tipos principais: o arranjo *simplex lattice* e o arranjo *simplex centróide*. No arranjo *simplex lattice* (**Figura 2.8**), as  $k$  variáveis de entrada definem pontos cujas proporções encontradas

consideram  $m + 1$  valores igualmente espaçados entre 0 e 1 (CORNELL, 2002).

Além do arranjo *simplex lattice* existe a opção do arranjo *simplex centroide* (**Figura 2.9**). Neste modelo as  $k$  variáveis de entrada são escritas no formato  $2^k - 1$  pontos (MYERS, MONTGOMERY e COOK, 2009):

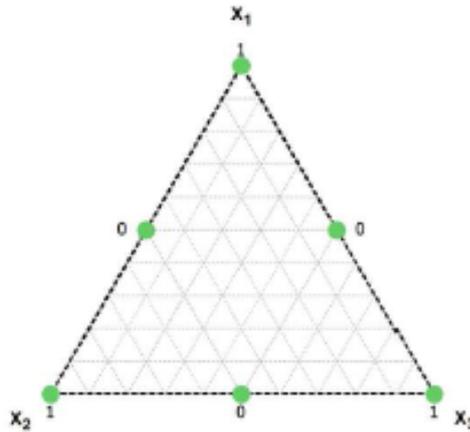


Figura 2.8 - Arranjo de misturas *Simplex lattice*

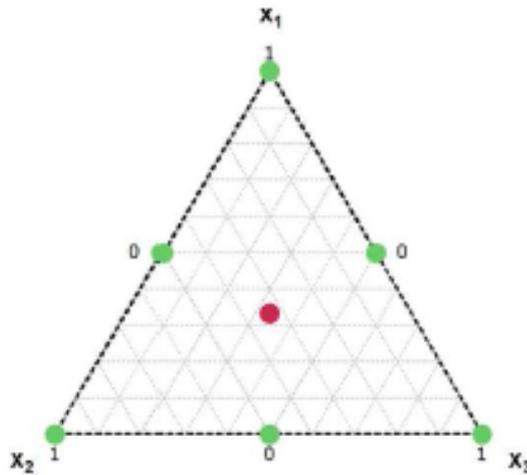


Figura 2.9 - Arranjo de misturas *Simplex centroide*

Gomes (2013) descreveu que as equações mais comuns de superfície de resposta, construídas para o experimento de mistura são a linear de acordo com a Eq. (15) e a Eq. (16) quadrática. Entretanto, o autor salientou que existem outros modelos, como o cúbico completo, cúbico especial descrito na Eq. (17), entre outros. Porém neste trabalho foi utilizado o cúbico especial.

$$y(x) = \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (15)$$

$$y(x) = \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i<j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (16)$$

$$y(x) = \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i<j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<l}^k \beta_{ijl} x_i x_j x_l \quad (17)$$

O arranjo de misturas será empregado neste estudo como uma técnica para a definição ótima dos pesos para a média e a variância, sendo capaz dessa forma alcançar o objetivo de um valor de média próximo ao alvo com mínima variabilidade, logo é possível caracterizar esta situação como um problema com mais de uma função objetivo, tal como formulado em Gomes (2013).

## 2.8 Projeto de Parâmetros Robustos

O RPD pode ser apresentado como um conjunto de técnicas de engenharia criado por Taguchi, com o objetivo de determinar os níveis de um conjunto de fatores, tais que a sensibilidade do processo a variações de ruído seja reduzida, aumentando assim a robustez ou a sua capacidade de se manter estável em situações de mudança contínua no ambiente (ARDAKANI e NOOROSSANA, 2008; GIJO e SCARIA, 2012). Logo, é um método eficiente para a melhoria da qualidade de produtos e processos. O RPD se concentra na definição adequada dos níveis dos fatores controláveis, tendo como objetivos garantir que a resposta média alcançada esteja de acordo com o nível desejado e assegurar uma variabilidade tão baixa quanto possível em relação ao alvo (MONTGOMERY, 2012; HU, 2018; CHATTERJEE *et al.*, 2018; WANG, GUO e PAN, 2019). As variáveis de ruído são definidas como fatores dentro do sistema que influenciam as variáveis de resposta do experimento em um processo, sendo muito difíceis de serem controladas e podendo alterar seu valor aleatoriamente (BRENNEMAN e MYERS, 2003; WANG, GUO e PAN, 2019).

O RPD tem como objetivo otimizar a média e a variabilidade, ou seja, buscar o valor da média próximo ao alvo desejado com mínima variância, para que o ponto de ótimo seja o mínimo possível em relação às causas especiais. Sua aplicação no desenvolvimento de produtos ou melhoria de processos visa garantir custos mínimos com baixa sensibilidade a flutuações de variáveis incontroláveis. Portanto, é necessário encontrar o nível ideal dos fatores de controle, que garantam uma menor variabilidade da resposta durante o processo, uma vez que as variáveis

de ruído são difíceis de controlar sob condições normais de operação (HU, 2018; CHATTERJEE *et al.*, 2018). Logo, essa situação leva a uma otimização dos chamados sistemas de resposta dupla (DRS – *Dual Response Surface*), onde o dual refere-se à média e ao desvio padrão do processo (KÖKSOY, 2008).

Com o intuito de tornar a metodologia criada por Taguchi mais confiável estatisticamente, surgiu a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) com a finalidade de fazer uso de um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas para avaliar o relacionamento entre uma variável resposta e um conjunto de fatores independentes, usando para isso modelos estocásticos (ZEYBECK e KÖKSOY, 2017). A MSR ajusta modelos de superfície de resposta para a média e variância separadamente, uma vez que a média e a variância são consideradas como parâmetros de desempenho na avaliação da robustez, permitindo assim atingir um processo robusto onde a média se aproxima do alvo, enquanto a variância do processo é minimizada (KHURI e MUKHOPADHYAY, 2010). Dessa maneira, o foco do desenho de experimentos é alcançar as configurações ideais dos fatores de controle, para torná-los robusto a variabilidade causada pelos fatores de ruído.

De acordo com Montgomery (2012), são utilizados três tipos de arranjos para o RPD, sendo eles o arranjo cruzado, o arranjo combinado e arranjo por réplicas. No **Quadro 2.3** são descritas as características de cada um dos arranjos experimentais para o projeto robusto.

Quadro 2. 3 - Estratégias de otimização robusta

Arranjo experimental	Vantagens	Desvantagens
Combinado	Os fatores de controle e ruído estão na mesma matriz experimental	Modelagem da variância mais elaborada. Maior probabilidade de resíduos não serem normais. Falta de ajuste ( <i>Lack-of-fit</i> < 0,05)
Réplicas experimentais	Abordagem mais simples	Não especifica os ruídos
Cruzado	Existe a possibilidade de maximizar a razão sinal ruído ( <i>S/N</i> )	Realiza um número considerável de experimentos, dependendo do contexto onde é aplicado, e raramente considera as interações entre as variáveis de controle

Fonte: adaptado de Myers, Montgomery e Cook (2009)

De acordo com Montgomery (2012), para atingir a otimização simultânea da média e variância, um caminho é o uso da metodologia de superfície de resposta dual. Tendo como variável de resposta  $y$  e as variáveis experimentais de controle  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . Na Eq. (18) é descrito o modelo para a média.

$$\mu(y) = \beta_o + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j \quad (18)$$

Sendo:  $y$ : variável de resposta

$x_1, x_2$  e  $x_k$  : variáveis experimentais

$\beta$ : coeficientes estimados do modelo

A Eq. (18) descreve a resposta  $y$  apenas como função das variáveis de controle  $x_i$ , alcançando assim um menor impacto das variáveis de ruído na variabilidade do processo. A partir da obtenção da equação de média, a otimização dual da variável de interesse pode ser empregada, com o uso das diferentes técnicas disponíveis na literatura. Neste trabalho foi usado o conceito do Erro Quadrático Médio (EQM), com o objetivo de combinar a média e a variância na otimização das variáveis respostas dos objetos de estudo.

As abordagens de projeto robusto geralmente apresentam dificuldades ao modelar as equações de média e variância devido aos distúrbios de aleatoriedade causados pelas variáveis de ruído que são propositalmente experimentadas e randomizadas para processos de experimentação (BRAGA, NAVES e GOMES, 2020).

### 2.8.1 Otimização pelo EQM

O erro quadrático médio (EQM) descrito na Eq. (19) é definido como um método utilizado para combinar a média e a variância na otimização de uma determinada variável de resposta (KÖKSOY e ALCINOZ, 2006).

Sabendo que a otimização pelo conceito robusto busca ao mesmo tempo minimizar a variância e a média, tendo como princípio diminuir a distância entre a resposta obtida e seu alvo, o EQM (Erro Quadrático Médio) se torna um método para possibilitar atingir tal objetivo (PAIVA *et al.*, 2009; GOMES *et al.*, 2013; ALMEIDA *et al.*, 2018; PEREIRA, *et al.*, 2018)

$$EQM(y_j) = [\mu(y_j) - Ty_j]^2 + \sigma^2(y_j) \quad (19)$$

Sendo:  $EQM(y_j)$  – Erro Quadrático Médio para a  $j$ -ésima resposta

$\mu(y_j)$  – Modelo estabelecido para a média da  $j$ -ésima resposta

$Ty_i$  – Alvo da  $j$ -ésima resposta, obtido pela otimização individual de  $\mu(y_j)$

$\sigma^2(y_j)$  – Modelo estabelecido para a variância da  $j$ -ésima resposta

A minimização da função EQM permite alcançar melhorias satisfatórias dos processos produtivos com variabilidade, no que diz respeito à qualidade, produtividade e custo. O conceito trabalha a otimização simultânea de média e variância de uma única resposta (SILVA, 2016). Para as situações onde o projeto estudado apresenta mais de uma característica de qualidade, Köksoy (2006) propôs a seguinte função ponderada para minimização do EQM, conforme descrito na Eq. (20).

$$EQM_G = \sum_{i=1}^m w_i \cdot EQM_i = \sum_{i=1}^m w_i \cdot \{[\mu_i(y) - T_i]^2 + \sigma_i^2(y)\} \quad (20)$$

Sendo:  $EQM_G$  – Erro Quadrático Médio Global

$m$  – Número de respostas consideradas

$w_i$  – Pesos atribuídos

$\sigma^2(y)$  – Modelo estabelecido para a variância

## 2.9 Experimentos simulados

O conceito de experimentos simulados tem relação direta com a aplicação computacional, pois a intenção é representar um sistema real e assim poder verificar seu resultado, tendo condições de sugerir alterações nas variáveis e verificar o efeito na resposta de interesse. Tal ferramenta de simulação é um grande recurso a ser utilizado na tomada de decisão (LUNESU, 2013). Os resultados dos experimentos simulados devem ser observados não somente ao final, mas também durante o processo, como vantagens para o sistema analisado. Chung (2004) descreveu como vantagens dos experimentos simulados: melhorar o nível de informações sobre a operacionalidade sem prejudicar seu funcionamento, desenvolver novas abordagens de gestão de recursos a fim de melhorar a performance e experimentar novos conceitos antes da implementação. Entretanto, seu uso não resolve problemas por si só, sendo assim necessário ter um alto nível de confiança nas informações consideradas.

A Simulação permite encontrar o número ideal de máquinas, estações de trabalho, número de operadores, que torne o processo produtivo o mais eficiente possível (AZADEH e

MAGHSOUDI, 2010). Os dados devem ser coletados no atual sistema simulado durante um período de tempo específico (por exemplo, 1 mês) e replicado a quantidade necessária de vezes para as análises a serem efetuadas (AZADEH e MAGHSOUDI, 2010).

O modelo de simulação fornece avaliações precisas dos cenários, permitindo a melhor tomada de decisão, sendo capaz de fornecer uma avaliação realista da operação sujeitas a diferentes variáveis. No entanto, em algumas situações, um grande número de simulações pode ser necessário para garantir estimativas mais confiáveis (BARLOW *et al.*, 2018).

É necessário que as considerações feitas a partir dos experimentos simulados também acompanhem técnicas estatísticas e usem em conjunto a experiência das pessoas envolvidas (diretoria, operadores, especialistas no processo estudado, etc.) para validação dos resultados, o que permitirá uma maior assertividade e consistência nos dados observados (KIM, MCGINNIS e ZHOU, 2012; BEKKER e VIVIERS, 2008). Robinson (2004) descreveu o uso de diferentes distribuições de probabilidade na simulação, mas enfatiza a distribuição normal como sendo a mais adequada, uma vez que trata os parâmetros de média e desvio padrão. Devido à complexidade de alguns sistemas (lojas, centrais de serviços, processos fabris, centros de transportes, etc.), cuja característica seja a aleatoriedade, a aplicação da experimentação na simulação a eventos discretos torna-se mais relevante (WAINER e MOSTERMAN, 2011).

Toda esta revolução que tem acontecido no mundo industrial nos últimos anos exige uma modelagem de problemas complexos que possa lidar com a falta de exatidão das propriedades de temporização, o que não é possível apenas com o uso de equações simples ou aproximações numéricas. Logo a simulação a eventos discretos se torna uma alternativa interessante e devidamente aplicável (WAINER, 2009).

A simulação a eventos discretos pode ser definida como um sistema modelado a partir de uma série de eventos, sendo que cada evento ocorre em um determinado instante e causa uma mudança de estado no sistema (ROBINSON, 2004). Os resultados obtidos de um modelo de simulação a eventos discretos são considerados, em geral, números pseudoaleatórios (sequência de número aleatórios independentes), com distribuições de probabilidade específicas que permitem estimar os valores médios, uma vez que as quantidades simuladas na maioria das vezes se referem a ocorrências que aconteceram em momentos específicos e possíveis de serem identificados (ALLEN, 2011).

Choi e Kang (2013) e Robinson *et al.* (2011) relataram que a simulação a eventos discretos é composta por um conjunto de componentes básicos para descrever a dinâmica do sistema, tais como: entidades (partes de uma fábrica, clientes em uma operação de serviço, chamadas de telefone em um *call center*, informações em um processo de negócios,

empilhadeira em um armazém); atividades (máquinas, mesas de atendimento, computadores); filas (sistemas de transportes, *buffers*, áreas de espera, entrada/saída de um processo, processamento de um computador, armazenamento) e recursos (pessoal, equipamento). Mencionam ainda que os recursos e entidades são chamados de componentes de modelagem física, enquanto atividades, estados e eventos são componentes de modelagem lógica.

Existem diferentes softwares usados para a simulação a eventos discretos. Para este trabalho, foi empregado o software *Arena*<sup>®</sup>, pois de acordo com Rossetti (2016) e Fábregas *et al.* (2003), o *Arena*<sup>®</sup> é considerado uma poderosa ferramenta de simulação, pois proporciona um ambiente de trabalho de fácil entendimento, com uma grande versatilidade na modelagem. A **Figura 2.10** mostra o ciclo de vida de um modelo de simulação.

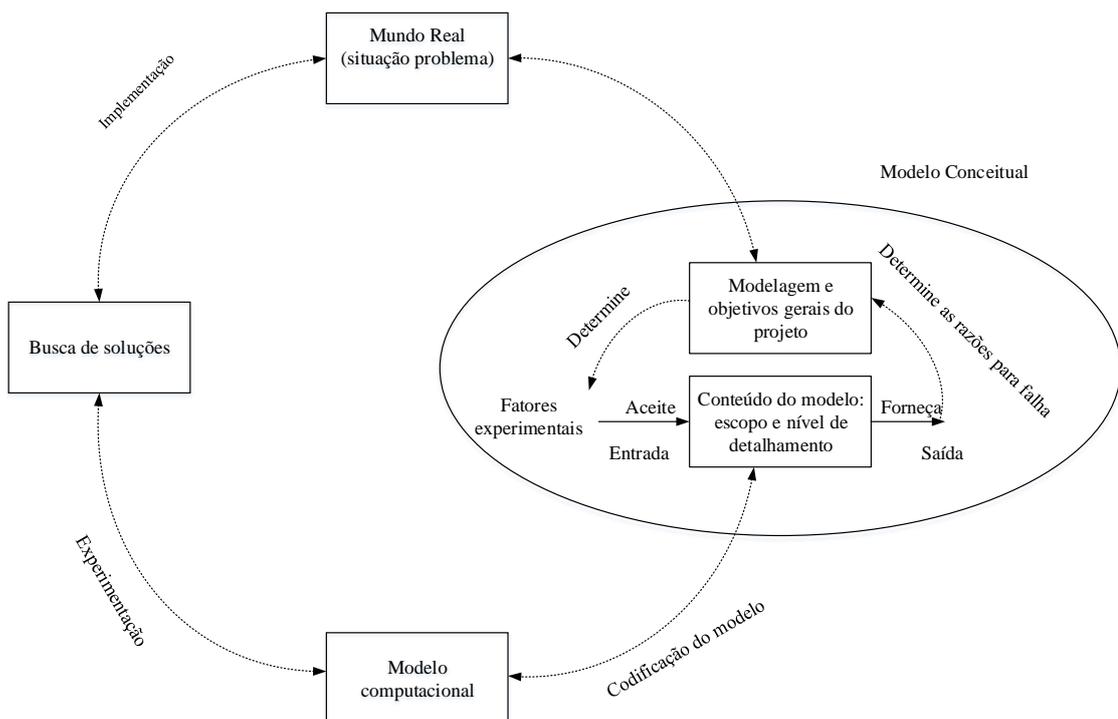


Figura 2.10 - Modelo conceitual do ciclo de vida do projeto de simulação  
Fonte: Robinson *et al.* (2011)

O *OptQuest*<sup>®</sup> é uma ferramenta de otimização incorporada ao software *Arena*<sup>®</sup>, com o objetivo de automatizar e controlar a execução do sistema de simulação para os valores correspondentes dos níveis dos fatores, procurando uma combinação das melhores soluções, as quais são utilizadas como pontos de partida para uma nova aplicação dos processos heurísticos, uma vez que estas etapas são repetidas até que os critérios definidos na função objetivo e

restrições sejam atendidos (ROSSETI, 2016). Esta ferramenta utiliza em sua abordagem de solução a tratativa do modelo de simulação no que tange aos dados de entrada e saída, para realizar o processo de otimização, onde as soluções geradas pelo *OptQuest*<sup>®</sup> são consideradas como entradas para o modelo de simulação. Em seguida, novas informações são verificadas, de acordo com os parâmetros definidos na função objetivo e restrições do *OptQuest*<sup>®</sup> (ROCWELL AUTOMATION, 2009). A vantagem desse método é a economia de tempo no processo de simulação, visto que cada uma das soluções é analisada e simulada individualmente. Os critérios de finalização utilizados, no processo de otimização realizado pelo *OptQuest*<sup>®</sup>, variam de acordo com: um determinado número especificado de simulações; encerramento da simulação até que não haja melhor resultado na função objetivo para o número de simulações definidas; assim como a combinação de ambas as regras anteriores (JERBI *et al.*, 2019). No intuito de encontrar as melhores soluções viáveis entre todas as possíveis, são empregados procedimentos heurísticos pelo software (conceitos para fornecimento de soluções viáveis em um determinado situação de otimização). Os algoritmos utilizados pelo *OptQuest*<sup>®</sup> na busca de soluções são a Busca dispersa (*scatter Search*), a Busca Tabu (*Tabu Search*) e as Redes Neurais (JERBI *et al.*, 2019). Para o uso do *OptQuest*<sup>®</sup> devem ser especificadas as variáveis de controle do modelo de otimização, que podem ser o número de recursos ou as informações definidas pelo responsável na criação do modelo de simulação. Outras variáveis são as de resposta, que afetam o modelo de otimização e podem ser tanto usadas nas restrições quanto na função objetivo, atuando como resultados da saída do modelo. Também existem as restrições do sistema, obtidas a partir dos controles e/ou respostas. E ao final é detalhada a função objetivo, determinada por uma expressão matemática, buscando maximizar ou minimizar qualquer métrica de desempenho avaliada ao longo da simulação.

### 3. MÉTODO DE PESQUISA E MODELO PROPOSTO

Para a realização da aplicação desta pesquisa, o presente estudo fez uso da experimentação e da simulação. Utilizou-se uma abordagem híbrida, onde se tem uma parte que envolve a simulação, para elaborar o modelo computacional do sistema *kanban*, e na outra a técnica de planejamento experimental, para realizar a modelagem, análise e a otimização do problema considerado.

De acordo com Bryman (2005), a pesquisa experimental pode ser definida como um método de pesquisa quantitativo de considerável importância na pesquisa organizacional, devido a permitir ao investigador, por meio do uso de técnicas de análises estatísticas, fazer afirmação sobre o efeito de uma variável em relação a outra. Por sua vez, a modelagem e a simulação é uma etapa de criação e de testes, por meio de uso de recursos computacionais, que permitem simular computacionalmente um sistema físico, com o objetivo de tomar decisões operacionais ou sobre os recursos (CHUNG, 2004).

A pesquisa experimental não sofre o efeito do tempo, quando se investigam relações causais, pois o pesquisador tem controle sobre todas as variáveis independentes e aquelas que não fazem parte do experimento (MIGUEL et al., 2012).

Os métodos de pesquisas foram conduzidos por meio das etapas do procedimento desenvolvido no capítulo anterior. O ciclo para a condução de uma simulação, conforme estabelecido por Robinson *et al.* (2011), foi seguido por meio do Passo 1 do procedimento proposto. Já os experimentos, a partir das definições de Bryman (2005) e Montgomery (2012), foram executados nos passos 2, 3 e 4.

Conforme descrito no Capítulo 2, os trabalhos analisados na literatura apresentam lacunas no que diz respeito aos métodos de otimização de sistemas *kanban*, não consideram variação na demanda e tempo de processamento e são pouco aplicáveis no “chão de fábrica”. Portanto, a abordagem proposta neste trabalho tem a finalidade de contribuir com os seguintes aspectos: a utilização de abordagem experimental com base no nível de serviço e estoque de segurança; tratamento da demanda como variável de ruído; variabilidade nos tempos de processamento das máquinas e otimização robusta pelo EQM.

A abordagem proposta para otimização de sistemas *kanban* foi estruturada, primeiramente, usando o conceito da otimização robusta, para permitir analisar as estratégias experimentais por meio da consideração de uma variável de ruído, que neste trabalho foi feita com base na análise da demanda. Desta forma, identificou-se na literatura uma oportunidade de poder trabalhar esta condição como uma contribuição. Na maioria dos artigos analisados a

demanda é considerada como um valor determinístico e não como uma variável aleatória (ruído).

Logo, este estudo teve como objetivo desenvolver um método robusto que possa considerar a demanda como uma variável de ruído, tendo como foco a busca de um planejamento experimental para atingir tal fim.

O presente estudo visa contribuir com um melhor dimensionamento das quantidades de *kanban* nos supermercados. Logo, trata o estoque de segurança como uma informação importante, trazendo sua lógica para o planejamento experimental.

Assim sendo o autor propõe alguns passos para a realização da otimização robusta, com a finalidade de um adequado dimensionamento dos supermercados, os quais são descritos abaixo.

#### **Passo 1:** Simulação do sistema *kanban* a ser otimizado

O passo 1 é importante, pois trata as questões relacionadas ao modelo conceitual, sua validação, modelo computacional e sua verificação, os quais estão em acordo com os métodos de simulação existentes na literatura. Ressalta-se que o modelo foi checado de acordo com as etapas do método de simulação.

#### **Passo 2:** Planejamento experimental do supermercado

Quanto ao passo 2 (Planejamento experimental do supermercado) leva em consideração os estoques de segurança para fixação dos diferentes níveis de serviço oferecidos, podendo assim definir um planejamento que garanta um nível de serviço mais adequado. Assim o critério adotado garante um nível de serviço de 99,9%.

#### **Passo 3:** Definição do número de réplicas experimentais e execução dos experimentos simulados

No passo 3 é definido o número de réplicas experimentais e são executados os experimentos simulados. São consideradas como variáveis de controle as quantidades de *kanban* no supermercado e são mensurados: os resultados de média e variância e o erro quadrático médio entre elas; os níveis que foram definidos; qual o arranjo experimental e quantos experimentos serão necessários.

#### **Passo 4:** Registro dos dados, em função da média e variância dos resultados de cada produto (*kanbans*).

Já no passo 4 são registrados os valores de quantidades de *kanbans* não entregues após a simulação, de acordo com o planejamento experimental definido. Em seguida, são calculados os valores de média e variância e obtido o EQM.

**Passo 5:** Modelagem matemática do sistema para a média e variância, ou para os erros quadráticos médios (*EQMs*) experimentais.

No passo 5 é feita a modelagem matemática do sistema para a média, Eq. (21), variância, Eq. (22) e para o EQM, Eq. (23), levando em consideração os coeficientes codificados significativos encontrados após a análise de variância.

$$\mu(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j \quad (21)$$

$$\sigma^2(y) = \sum_{i=1}^r \left[ \frac{\partial y(x, z)}{\partial z_i} \right]^2 \sigma^2 z_i + \sigma^2 \quad (22)$$

$$EQM(y_i) = [\mu(y_i) - T y_i]^2 + \sigma^2(y_i) \quad (23)$$

**Passo 6:** Otimização robusta pelo EQM.

No passo 6 é desenvolvida a otimização robusta pelo EQM levando em consideração a equação de variância ( $\sigma^2$ ), para que os valores não sejam negativos, e respeitada a restrição de espaço experimental para o EQM, produto de um vetor de variáveis de decisão multiplicado por ele mesmo ( $x^T x$ ), Eq. (24).

$$Min_{EQM} = \sum_{i=1}^m w_i \cdot \{[\mu_i(y) - T_i]^2 + \sigma_i^2(y)\} \quad (24)$$

**Passo 7:** Análise da robustez para os resultados ótimos.

Já o passo 7 faz a análise da robustez (média próxima do alvo com mínima variância) para os resultados ótimos. Se atingiu a robustez, é verificada a coerência com os dados simulados e finalizado o procedimento (Passo 9). Caso contrário, siga o passo 8.

**Passo 8:** Otimização robusta pelo EQM Ponderado, com base na identificação de pesos ótimos.

No passo 8 é aplicada a ponderação, com o objetivo de encontrar os valores ideais de peso para a média e variância, Eq. (25). Assim, o critério adotado neste método estabelece que a soma total dos pesos deva ser igual a um. Nesta etapa cada combinação de pesos experimentada é um novo problema de otimização.

$$\text{Min } EQM_p = \sum_{i=1}^m w_i \cdot EQM_i = \sum_{i=1}^m w_i \cdot \{[\mu_i(y) - T_i]^2 + \sigma_i^2(y)\} \quad (25)$$

Sendo:  $EQM_p$  – Erro Quadrático Médio Ponderado

$m$  – Número de respostas consideradas

$w_i$  – Pesos atribuídos

$T_i$  – Alvo da  $j$ -ésima resposta, obtido pela otimização individual de  $\mu(y_j)$

$\sigma^2(y)$  – Modelo estabelecido para a variância

$$\text{sujeito a: } 0 \leq w_1 \leq 1$$

$$0 \leq w_2 \leq 1$$

$$w_1 + w_2 = 1$$

Sendo:  $w_1$  e  $w_2$  respectivamente os pesos ponderados para a média e variância.

**Passo 9:** Confirmação dos resultados.

No passo 9 os resultados da otimização são confirmados. Nesta etapa foi utilizado o teste de *power and sample size* para verificar se o tamanho da amostra é adequado. Este teste garantiu a coleta de dados suficientes para conduzir uma análise estatística confiável e ter certeza sobre os resultados encontrados. Neste caso foi considerado um IC de 95%, o que resultou em um número de 10 experimentos, os quais foram executados no modelo simulado, com o intuito de confirmar se os resultados da simulação condiziam com os do modelo estatístico. Esta etapa de verificação feita pode também servir para validar os resultados encontrados, proporcionando uma maior segurança na tomada de decisão. Em seguida, o procedimento é finalizado.

Em comparação aos trabalhos analisados no Capítulo 2, a abordagem proposta para

otimização de sistemas *kanban* visa completar os seguintes *gaps* observados na literatura:

- Inicialmente, o método proposto trata-se de uma abordagem experimental, ao contrário de boa parte dos métodos analisados.
- Os experimentos foram definidos com base no estoque de segurança.
- A estratégia de otimização pelo EQM resolve em grande parte problemas relacionados à modelagem da média e da variância, pois torna possível diminuir a variabilidade e garantir a robustez.
- O efeito da variância na variável resposta e consecutivamente alcançar o objeto de estudo deste trabalho que é a otimização de supermercados *kanban*.
- Permitir um melhor dimensionamento de supermercados *kanban* a partir da consideração da demanda como ruído, trazendo assim uma maior robustez ao sistema.

No que diz respeito à identificação da quantidade ótima de *kanban* para cada produto, optou-se por trabalhar com o Algoritmo GRG ao invés do algoritmo genético, que é o mais utilizado de acordo com a análise da literatura. Tal decisão é justificada porque o algoritmo GRG identifica os pontos de ótimo e apresenta um bom resultado em termos de robustez e eficiência (KÖKSOY e DOGANAKSOY, 2003), além do que também pode ser utilizado para fins de validação e comparação, apresentando bons resultados para busca de um valor ótimo local (JALAL e GOHARZAY, 2018).

E por fim, resume-se a proposta de inovação em relação ao método por meio do fluxograma, apresentado na **Figura 3.1**.

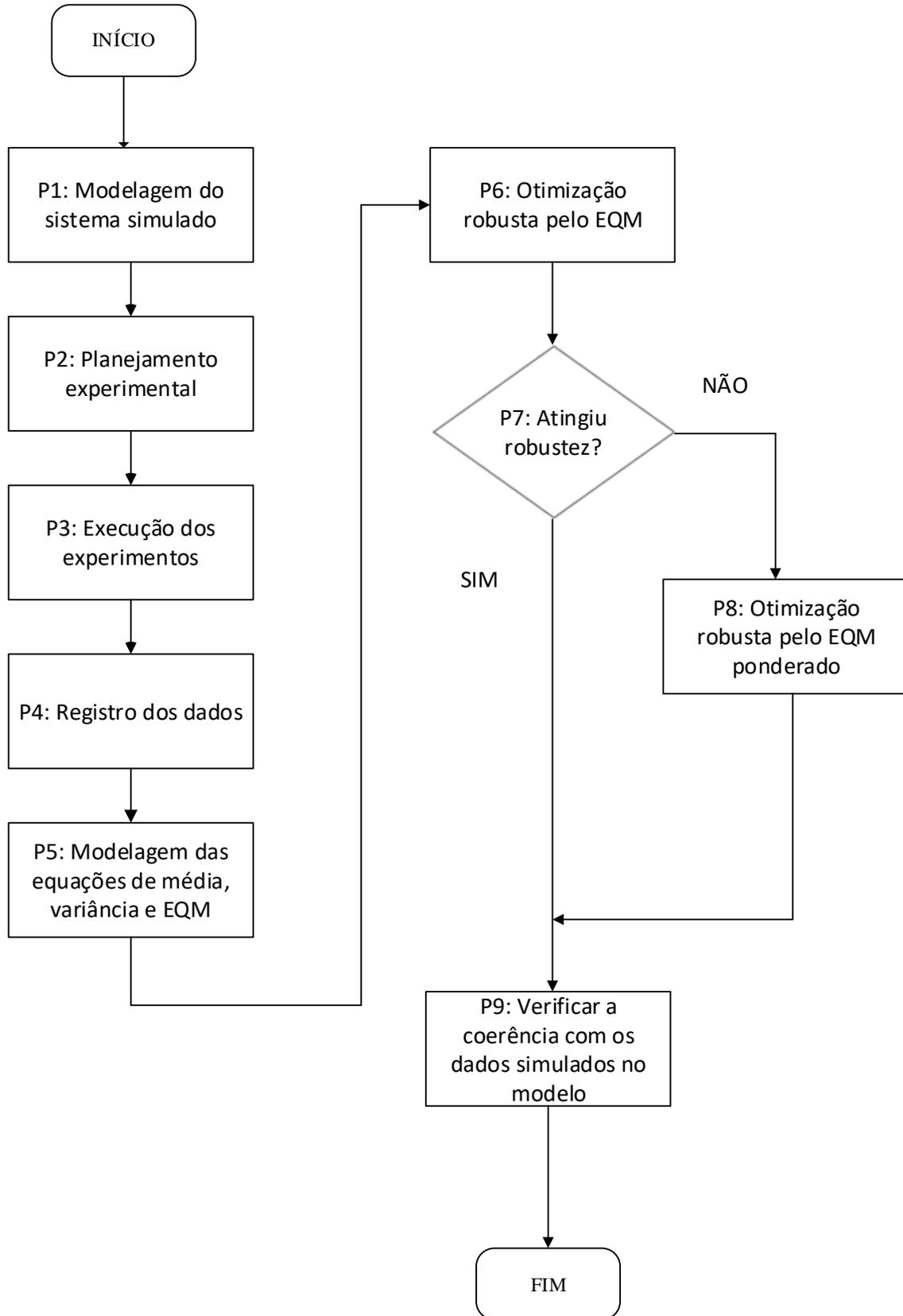


Figura 3.1 - Abordagem proposta para otimização de sistemas *kanban*  
Resultado da pesquisa – Elaborado pelo autor (2020)

## 4. APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Nesta parte do trabalho é aplicado o método desenvolvido no Capítulo 3, para os dois Casos (TUBINO, 2007; HURRION, 1997) de estudo mencionados anteriormente.

### CASO 1 – TUBINO

Para fins de aplicação inicial do método proposto, foi selecionado e adaptado um caso de uma malharia com três produtos citado por Tubino (2007), um caso didático de uso bastante difundido. É importante salientar que o projeto apresentado nesta parte da tese discute a proposta no âmbito acadêmico e não profissional. Tubino (2007) utilizou a classificação ABC para definir a prioridade dos itens em estoque. Desta forma, os produtos considerados neste trabalho são descritos como: malha 151 (M151) de classificação A; malha 191 (M191) de classificação A e malha 1074 (M1074) de classificação B. Segundo Tubino (2007), por questões de transporte e armazenamento, optou-se por lotes padrão unitário. Todavia, como rolos de diferentes malhas têm pesos diferentes, os lotes definidos variavam de 16 a 37 quilos por rolo. Além do dimensionamento da quantidade de cartões, a malharia também precisava organizar os recursos produtivos para permitir que a produção, uma vez puxada pelo cliente, fosse capaz de atender. Tubino (2007) descreve que os objetivos da implantação do sistema puxado na empresa eram reduzir a sobra de malhas ao final de uma coleção e garantir o nível de atendimento ao cliente, que estava abaixo de 70% antes da implantação do sistema puxado. Os dados adaptados são descritos na **Tabela 4.1**.

Tabela 4. 1- Dimensionamento do número de teares

Tipo de malha	Demanda semanal (kg)	Demanda diária (kg)	Capacidade do <i>kanban</i> (kg)	Taxa de produção por tear (kg/h)	Número de teares necessários
M151	19000	3800	16	18,73	8,45
M191	14000	2800	37	23,87	4,89
M1074	2000	400	35	14,4	1,16

Fonte: Adaptado de Tubino (2007)

O objeto de estudo em questão faz uso do cálculo da quantidade de *kanban*, a partir da expressão matemática descrita anteriormente na Eq. (3) citada por SHINGO (1989).

Na **Tabela 4.2**, são relacionados os valores de demanda e *lead time* de reposição

definidos pelo autor. Quanto aos dados da variação da demanda ( $\sigma_D$ ) e tempo de processamento dos equipamentos, o presente trabalho considerou respectivamente um desvio padrão de 10% e 3%, para tornar o objeto de estudo um sistema influenciado por variáveis aleatórias. Um sistema *kanban* consegue se adaptar prontamente às mudanças diárias na demanda dentro de 10% de desvios no programa mestre mensal (VOLLMAN, BERRY e WHYBARK, 1990).

Tabela 4. 2 - Dados usados no cálculo de kanban

<i>Tipo de malha</i>	<i>(D)</i>	<i>(LT)</i>	<i>(<math>\sigma_D</math>)</i>	<i>(c)</i>
M151	3800 kg	1 dia	380 kg	16 kg/ <i>kanban</i>
M191	2800kg	1 dia	280 kg	37 kg/ <i>kanban</i>
M1074	400 kg	1 dia	40 kg	35 kg/ <i>kanban</i>

A partir do objeto de estudo adaptado de Tubino (2007), foi construído o modelo de simulação, conforme descrito pela aplicação, no capítulo seguinte, do procedimento para otimização proposto neste trabalho. As adaptações realizadas no modelo proposto pelo autor dizem respeito a: alteração da quantidade de produtos; demanda e tempos de processamento variáveis.

#### **4.1 Passo 1: Modelagem do sistema a ser simulado**

Após o levantamento dos dados necessários para a contextualização do objeto de estudo apresentado, foi desenvolvido a descrição esquemática do objeto de estudo (*Figura 4.1*), O fluxograma do modelo conceitual (*Figura 4.2*) e o modelo de simulação (*Figura 4.3*). Assim como foram realizadas as etapas de validação do modelo conceitual e a verificação do modelo computacional, conforme as etapas dos métodos de simulação.

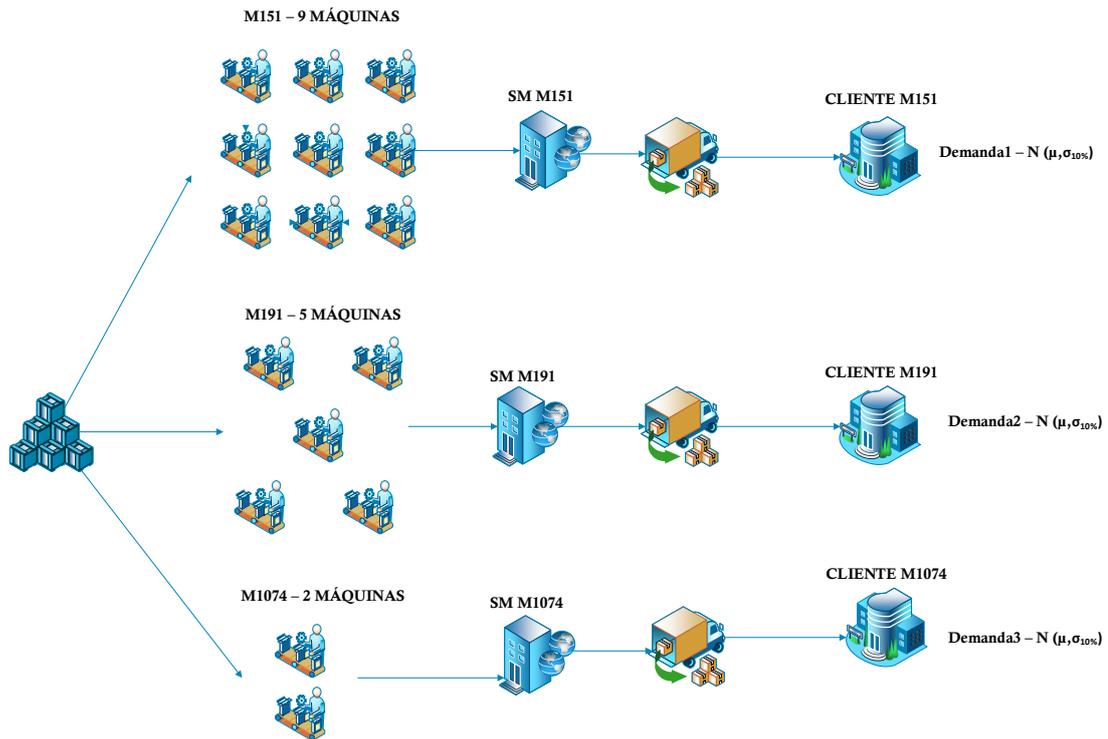


Figura 4. 1 - Descrição esquemática do objeto de estudo Caso Tubino  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A **Figura 4.1** faz a descrição esquemática ou representação do objeto de estudo de acordo com a lógica do sistema puxado para cada demanda correspondente aos produtos trabalhados. Esta puxada acontece como um desvio padrão de 10%, conforme já descrito anteriormente. Após a puxada de cada produto, os itens são retirados de seus respectivos supermercados, e os mesmos são repostos na quantidade de retirada pelo grupo de máquinas dedicadas a cada produto, sendo que para a malha M151 são consideradas 9 equipamentos, para a malha M191 5 equipamentos e para a malha M1074 2 equipamentos, atendendo assim perfeitamente a capacidade produtiva para a demanda média diária esperada. Logo após os grupos de máquinas retiram do estoque a quantidade para atendimento a sua demanda de produtos.

A **Figura 4.2** representa a lógica do modelo conceitual, ou seja, como deve ser feita a programação no *Arena*<sup>®</sup>, traduzindo a maneira que o software está organizado. Mostra a transição do funcionamento da fábrica para o modelo computacional (**Figura 5.3**).

A **Figura 4.3** desenvolve o modelo computacional para o objeto de estudo, sendo que foi programado no modelo de simulação a mesma lógica definida no modelo conceitual. Os recursos de programação do software *Arena*<sup>®</sup> permitiram registrar para cada produto a quantidade de matéria prima liberada, o quanto foi processado nos equipamentos e o resultado final de estoque nos supermercados para cada produto. Ao final também é possível obter a

quantidade de produtos entregues, informação que será comparada com o total planejado e realizado o cálculo para o número de produtos não entregues, sendo que esta informação é fundamental para a modelagem matemática dos experimentos e aplicação do método de otimização proposto. É possível ainda observar que cada produto tem uma criação de demanda, que acontece conforme os dados gerados de variação diária de 10% ao longo dos 30 dias, dados estes registrados e possíveis de serem visualizados nos ícones Dia, puxada 151, puxada 191 e puxada 1074.

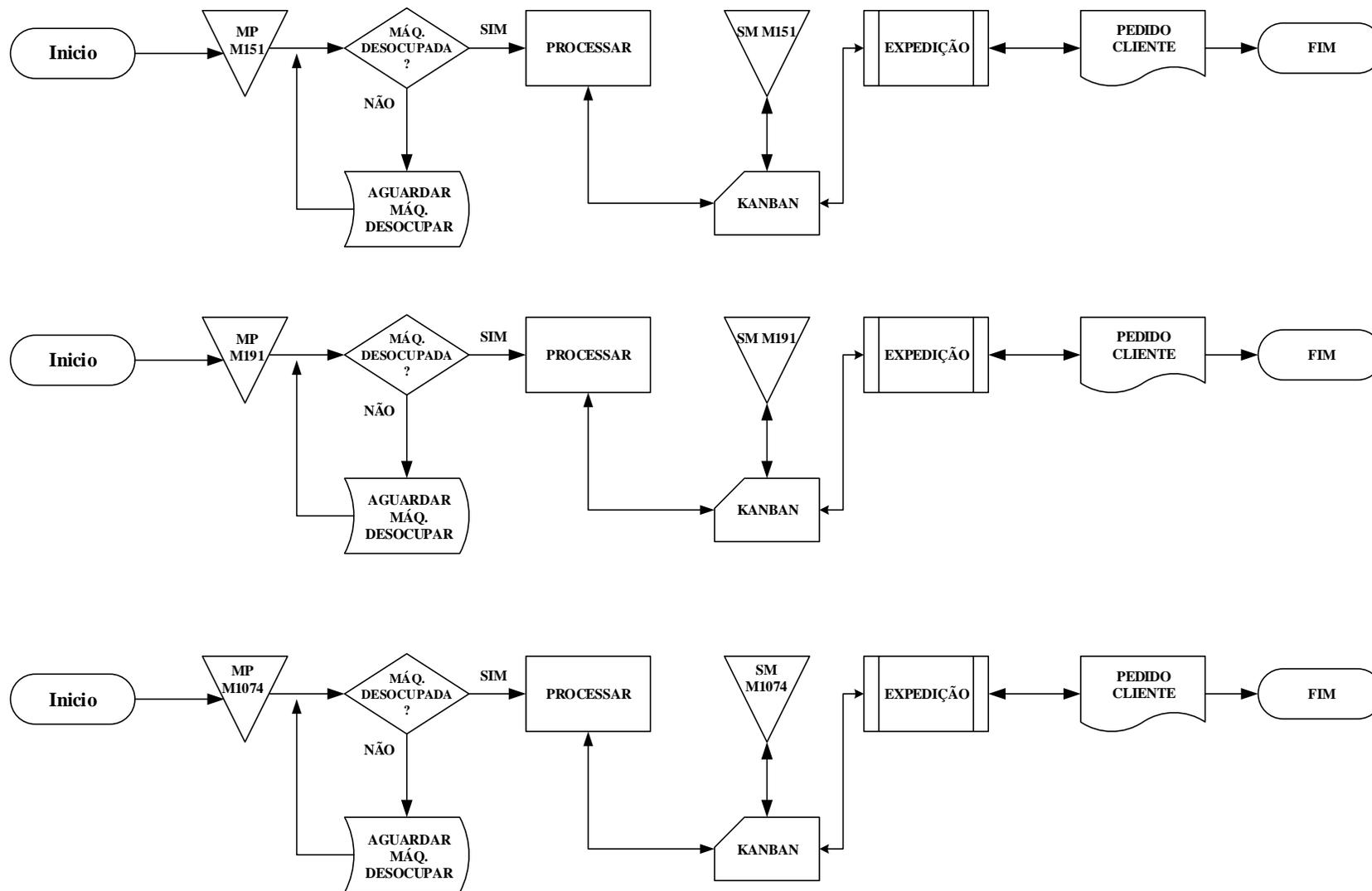


Figura 4. 2 - Fluxograma do modelo conceitual – Caso Tubino  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

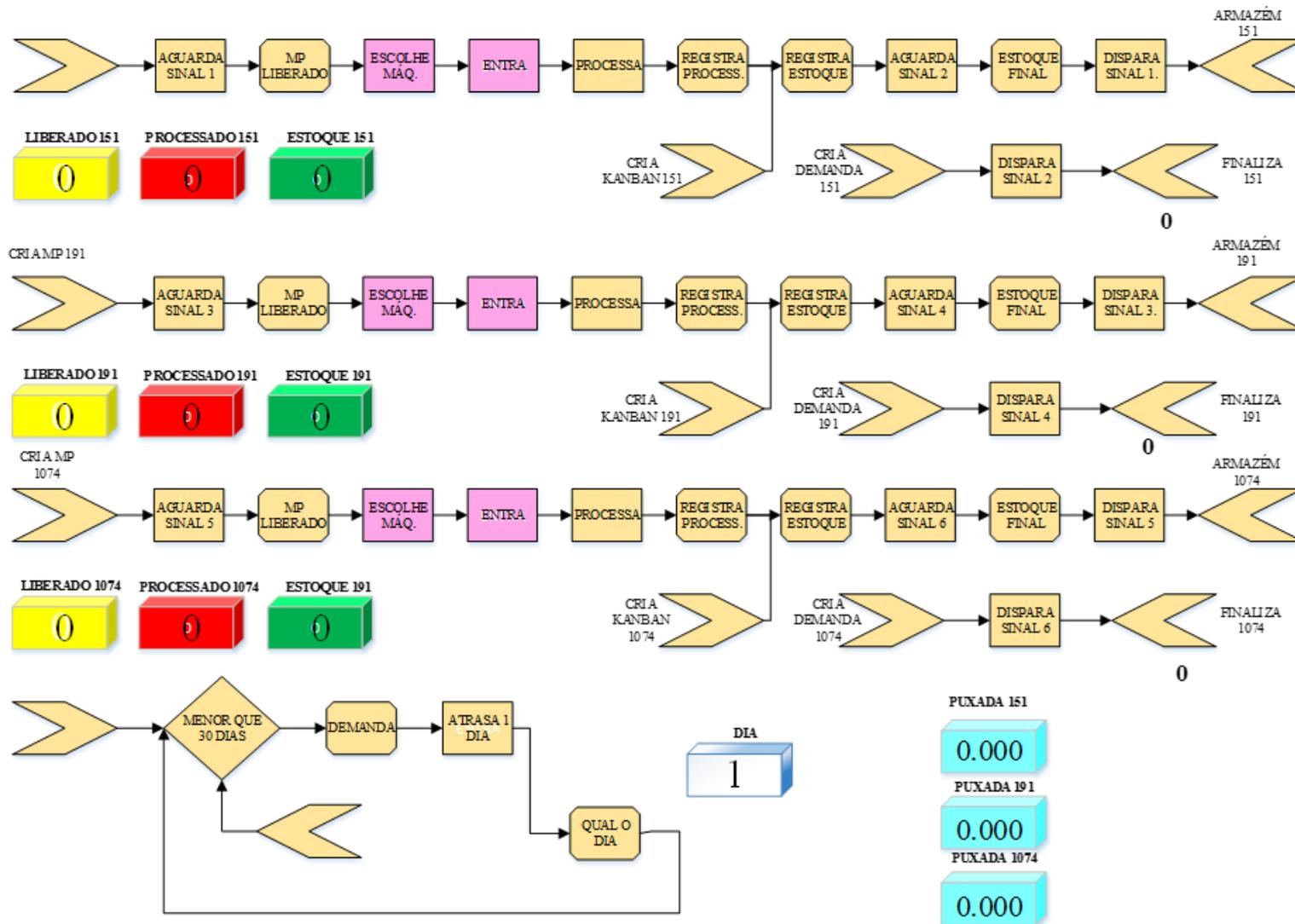


Figura 4. 3 - Modelo computacional do objeto de estudo Caso Tubino  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Na modelagem do sistema simulado existe a preocupação com a adequada construção do modelo, chamada de verificação. A verificação é a comparação entre o modelo conceitual e o modelo computacional, com o objetivo de verificar se os parâmetros de entrada e a estrutura lógica foram corretamente representados no software de simulação (BANKS et al., 2005; SARGENT, 2010).

No processo de verificação dos modelos computacionais objetos de estudo foram utilizados os seguintes critérios, de acordo com BANKS (2005):

- Foram examinadas atentamente as saídas estatísticas do modelo sob uma variedade de configurações dos parâmetros de entrada, onde a lógica utilizada para inserir as demandas no modelo computacional foi traduzi-las em um ritmo de *pitch* de puxada.
- Foram registrados os parâmetros de entrada e verificado se os mesmos não alteraram ao final da simulação.
- Foi documentado o modelo operacional com uma definição clara de cada variável usada.
- Foram feitas algumas simulações preliminares para verificar se o modelo computacional estava funcionando de acordo com o conceitual.
- Foi feito o uso do depurador para encontrar possíveis erros de simulação, tais como: se a simulação progredia adequadamente conforme o tempo e se as informações processadas estavam coerentes ao longo do período de simulação.

Após a simulação de alguns cenários, observou-se que seguiam o processo de verificação proposto por Banks (2005), o que permitiu partir para os experimentos.

## **4.2 Passo 2: Planejamento dos experimentos simulados**

As variáveis de controle estudadas no objeto de estudo foram as quantidades de *kanbans* nos supermercados e a resposta medida foi o total de *kanbans* não entregues. Como a demanda foi considerada como uma variável de ruído, foi atribuído um desvio padrão de 10% durante um período de 30 dias, dado que um sistema *kanban* consegue se adaptar prontamente às mudanças diárias na demanda dentro de 10% de desvios no programa mestre mensal (VOLLMAN, BERRY e WHYBARK, 1990).

Dessa forma, para as variáveis anteriores, o arranjo experimental foi organizado de acordo com um arranjo composto central (CCD) para a composição dos experimentos de superfície de resposta, sendo gerados 20 experimentos. Os experimentos foram simulados com 5 réplicas, onde em cada réplica novas demandas eram geradas, de acordo com o desvio padrão

de 10%.

Para a fixação dos níveis das variáveis para o arranjo CCD, o presente método utilizou como referência o cálculo dos estoques de segurança para as quantidades de *kanbans*. Assim, foi empregada a Eq. (26), tal como sugerido por KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA (2009).

$$ES = F_S \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{LT} \quad (26)$$

Sendo:  $ES$  = Estoque de segurança

$F_S$  = Fator de nível de serviço

$\sigma_D$  = Desvio padrão da demanda

$LT$  = *Lead time*

O *lead time* foi fixado em um dia, sendo que o trabalho desenvolvido considerou a demanda estocástica. De acordo com Krajewski, Ritzman e Malhotra (2009) para um nível de serviço de 99,99%, tem-se um valor para  $F_S$  de 3,62. Dessa forma, obtém-se a seguinte quantidade de *kanbans* em estoque de segurança (**Tabela 4.3**) conforme descreve a Eq. (26) utilizada para cálculo do ES.

Tabela 4. 3 - Estoque de segurança

<b>Tipo de Malha</b>	<b>Total <i>kanban</i></b>
M151	86
M191	28
M1074	5

A partir das quantidades calculadas para o estoque de segurança, definiu-se o planejamento de experimentos, onde  $-\alpha$  corresponde ao nível inferior do arranjo (**Tabela 4.4**), ou seja, sem ES.

Tabela 4. 4 - Quantidade de *kanban* sem estoque de segurança (ES)

Produto	Demanda diária	Capacidade <i>container</i>	Quantidade de <i>kanban</i> ( $-\alpha$ )
M151	3800	16	238
M191	2800	37	76
M1074	400	37	11

Com os valores alcançados para o ES chega-se ao nível  $+\alpha$  ou nível superior do arranjo com estoque de segurança (*Tabela 4.5*).

Tabela 4. 5- Quantidade de *kanban* com ES

Produto	Quantidade de <i>kanban</i> sem ES	Estoque de segurança	Quantidade de <i>kanban</i> com ES ( $+\alpha$ )
M151	238	86	324
M191	76	28	104
M1074	11	5	16

A partir da quantidade de *kanbans*, nível inferior do arranjo sem estoque de segurança ( $-\alpha$ ) e nível superior do arranjo com estoque de segurança ( $+\alpha$ ), foram obtidos com o uso do DOE, técnica experimental Superfície de resposta - CCD, os valores intermediários dos níveis dos *kanbans* (*Tabela 4.6*).

Tabela 4. 6 - Níveis *kanbans* no Caso Tubino

<i>Kanban</i>	$-\alpha$	$-1$	$0$	$+1$	$+\alpha$
M151	238	255	281	307	324
M191	76	82	90	98	104
M1074	11	12	13	14	16

Tendo como base os níveis dos *kanbans* descritos (*Tabela 4.6*) foi gerado o arranjo experimental por superfície de resposta, onde 20 combinações de experimentos foram obtidas, sabendo que o foco do modelo de simulação é quantificar a quantidade de *kanbans* não entregues, a partir dos estoques iniciais nos supermercados e de suas respectivas demandas.

Como a proposta do trabalho está voltada ao uso do projeto de parâmetros robustos, utilizou-se como técnica experimental o arranjo por réplicas, sendo definidas 5 réplicas (como

forma de diminuir o erro amostral) para cada um dos 20 experimentos, simulados durante 30 dias com demandas aleatórias entre os dias. Após este planejamento, foram realizados os experimentos simulados por meio do modelo computacional construído no *Arena*<sup>®</sup>.

### 4.3 Passo 3: Execução dos experimentos simulados

Nesta etapa são executados os experimentos simulados, onde são consideradas como variáveis de controle as quantidades de *kanban* no supermercado e são mensurados: os resultados de média e variância e o EQM entre elas; considerando os níveis definidos; qual o arranjo experimental e quantos experimentos serão necessários.

Como a demanda foi tratada nesta aplicação como uma variável de ruído, de forma que os experimentos fossem diretamente influenciados por sua aleatoriedade, é descrito na **Tabela 4.7** um exemplo de como ela foi configurada nos experimentos. Os dados gerados para cada faixa de valores de demanda, foram obtidos no Minitab<sup>®</sup>, considerando valores diários de demanda com um desvio padrão de 10% ao longo de 30 dias.

Tabela 4. 7- Demandas aleatórias para o experimento 1 (*kanbans*/dia)

Valores de Demanda	M151	M191	M1074
1 a 10	249;212;253;230;	78;85;73;81;	11;14;13;13
	246;263;272;207	66;76;88;75	11;13;12;13
	263;239	72;78	13;10
11 a 20	274;240;261;222	72;74;70;76	12;13;11;10
	216;212;214;267	74;74;67;89	11;13;12;12
	228;265	68;76	10;11
21 a 30	246;246;237;204	81;80;74;67	12;10;11;10
	207;275;248;284	70;72;70;86	11;12;12;12
	231;250	76;70	11;12

Na **Figura 4.4** é possível visualizar a aleatoriedade da demanda para cada produto, em um comportamento estacionário (se desenvolve no tempo aleatoriamente ao redor de uma média constante). Não foram considerados, nos valores de demanda gerados, os *outliers*, para não interferir nos valores da análise de regressão.

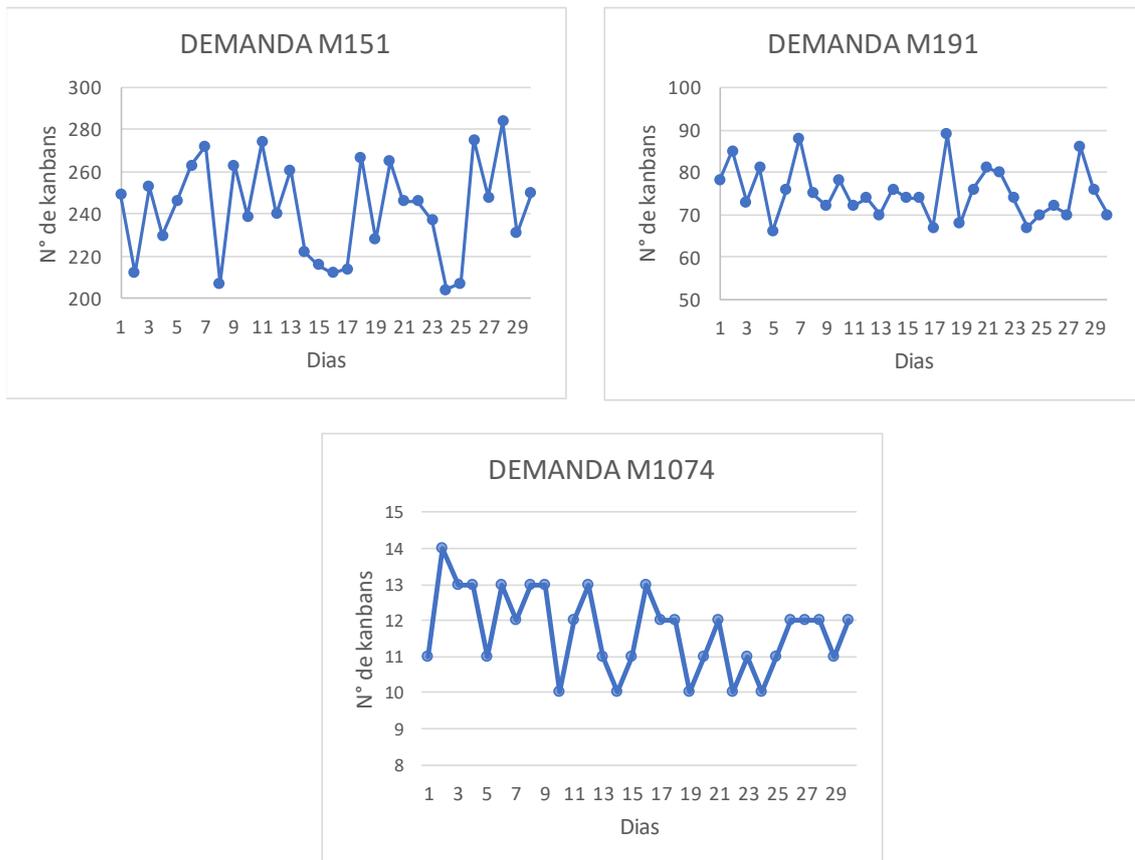


Figura 4. 4 - Comportamento aleatório e estacionário da demanda para o experimento 1 Caso Tubino

#### 4.4 Passo 4: Registro dos dados

Após os resultados gerados na simulação, os valores de média, variância foram calculados (*Tabela 4.8*) para cada combinação das malhas definidas no planejamento de experimento e registrados na matriz.

Tabela 4. 8 - Matriz de experimentos

<b>Experimento</b>	<b>Produto M151</b>	<b>Produto M191</b>	<b>Produto M1074</b>	<b>Réplica 1</b>	<b>Réplica 2</b>	<b>Réplica 3</b>	<b>Réplica 4</b>	<b>Réplica 5</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
1	255	82	12	38	149	234	96	151	134	5293
2	307	82	12	228	94	56	25	40	89	6733
3	255	98	12	28	81	31	73	53	53	573
4	307	98	12	83	34	78	72	50	63	429
5	255	82	14	57	118	24	99	35	67	1649
6	307	82	14	33	12	32	80	173	66	4202
7	255	98	14	59	55	67	23	13	43	569
8	307	98	14	68	73	138	17	75	74	1846
9	238	90	13	132	20	26	41	25	49	2225
10	324	90	13	25	70	50	166	73	77	2855
11	281	76	13	130	104	69	286	98	137	7371
12	281	104	13	1	18	92	11	13	27	1359
13	281	90	11	75	117	114	61	172	108	1878
14	281	90	15	66	121	219	122	73	120	3733
15	281	90	13	65	42	80	111	116	83	972
16	281	90	13	98	55	110	85	181	106	2187
17	281	90	13	78	107	133	82	45	89	1092
18	281	90	13	18	42	137	34	100	66	2525
19	281	90	13	72	72	114	31	0	58	1905
20	281	90	13	106	119	73	101	84	97	331

Os dados representados na **Tabela 4.8** foram encontrados após a simulação no modelo computacional para cada combinação de experimento da quantidade de *kanbans* armazenado no supermercado com as respectivas demandas e desvio padrão para cada produto, conforme já mencionado anteriormente. Foi registrado ao final de cada combinação de experimento o número de itens não entregues após o período de 30 dias. Em seguida foram calculados os valores de média e variância amostral.

#### 4.5 Passo 5 - Modelagem matemática das equações de média, variância e EQM

Os dados obtidos da matriz experimental (**Tabela 4.8**) foram analisados no software Minitab® e encontrados os seguintes resultados estatísticos para os modelos de média e variância (**Tabela 4.9**).

Tabela 4. 9 - Ajustes estatísticos da análise da média e variância

	R-sq (adj)	Pvalue
Média	54,76%	0,163
Variância	76,59%	0,040

Em seguida são apresentadas as equações do modelo reduzido para a média, Eq. (27) e variância, Eq. (28)

$$\mu = 80,98 + 3,11x_1 - 22,426x_2 - 4,96x_3 - 9,58x_1^2 + 8,52x_3^2 + 10,83x_1x_2 + 8,13x_1x_3 + 11,33x_2x_3 \quad (27)$$

$$\sigma^2 = 1706,73 + 452,79x_1 - 1799,23x_2 - 120,31x_3 + 846,43x_2^2 + 295,08x_3^2 - 357,40x_1x_2 + 948,47x_2x_3 \quad (28)$$

Como a modelagem da média não foi considerada satisfatória, uma vez que apresentou um *pvalue* maior que 5% (**Tabela 4.9**), então o próximo passo foi calcular o EQM (**Tabela 4.10**), de acordo com a Eq. (23) e modelá-lo para cada condição experimental.

Tabela 4. 10 - Valores de EQM

Experimento	Produto M151	Produto M191	Produto M1074	EQM
1	255	82	12	23142
2	307	82	12	14583
3	255	98	12	3403
4	307	98	12	4448
5	255	82	14	6085
6	307	82	14	8558
7	255	98	14	2452
8	307	98	14	7351
9	238	90	13	4606
10	324	90	13	8753
11	281	76	13	26250
12	281	104	13	2088
13	281	90	11	13499
14	281	90	15	18181
15	281	90	13	7828
16	281	90	13	13380
17	281	90	13	9013
18	281	90	13	6908
19	281	90	13	5246
20	281	90	13	9663

Logo após, foi desenvolvida a sua modelagem no mesmo procedimento indicado para a média e variância, de acordo com o que é descrito na Eq. (29) do modelo reduzido.

$$\begin{aligned}
 EQM = & 8521,22 + 500,2x_1 - 5517,19x_2 - 2724,6x_3 - 929,59x_1^2 \\
 & + 1718,16x_2^2 + 1503,85x_1x_2 + 1860,77x_1x_3 \\
 & + 3129,32x_2x_3
 \end{aligned} \tag{29}$$

Os ajustes estatísticos obtidos da modelagem do EQM, retiradas as interações não significativas, foram um *pvalue* de 0,022 e um *R-sq (adj)* de 80,44%, o que podem ser considerados como adequados, então o próximo passo é a otimização pelo EQM e a verificação em relação ao alvo da otimização. É fundamental apontar os valores de alvo das respostas, os quais podem ser obtidos pela otimização individual da função de média.

#### 4.6 Passo 6 - Otimização robusta pelo EQM

Nesta parte do trabalho é desenvolvida a otimização robusta pelo EQM, conforme a Eq. (30):

$$\begin{aligned}
 \text{MinEQM} = & 8521,22 + 500,2x_1 - 5517,19x_2 - 2724,6x_3 - 929,59x_1^2 \\
 & + 1718,16x_2^2 + 1503,85x_1x_2 + 1860,77x_1x_3 \\
 & + 3129,32x_2x_3
 \end{aligned} \quad (30)$$

S. a:

$$\sigma^2 \geq 0,01$$

$$EQM \geq 0,01$$

$$x^t x \leq 2,829$$

Onde  $\sigma^2$  corresponde à equação da variância do modelo apresentado na Eq. (28). Esta restrição foi adicionada para que o modelo não apresente valores negativos para a variância, que pode ser uma consequência negativa da estimação matemática desta modelagem. A restrição do EQM também foi inserida com o objetivo de não apresentar valores negativos. O  $x^t x$  descreve a restrição para uma região de solução do espaço experimental.

O problema de otimização descrito na Eq. (30) foi programado com o recurso da planilha eletrônica usando o algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e então foi identificado o ponto de ótimo. Observa-se a seguir a melhor combinação de *kanban* (**Tabela 4.11**).

Tabela 4. 11- Quantidade de *kanbans*

Produto	Quantidade de <i>kanbans</i>
M151	251
M191	99
M1074	14

Após encontrar a quantidade ótima de *kanban*, para um IC de 95%, os dados foram simulados em um total de 10 réplicas, onde os resultados do total de *kanban* não entregue em cada réplica foi registrado, em seguida foram calculados os valores de média e variância (**Tabela 4.12**).

Tabela 4. 12 - Valores após otimização do EQM

	Média	Variância
Resultados simulação	86	3351
Alvo	29	1286

#### 4.7 Passo 7 – Análise da robustez para os resultados ótimos

Nesta etapa é feita a análise da robustez para o resultado ótimo encontrado para o EQM após a otimização robusta. São comparados os valores estatísticos encontrados com os valores da média e variância.

Com os valores de alvo, tem-se então que o resultado alcançado para a média foi considerado satisfatório, porém a variância nessa configuração mostrou-se com um valor alto, o que foge do princípio do projeto de parâmetros robustos que é média próxima da condição ideal do alvo com mínima variabilidade, então torna-se necessário a ponderação da média e variância.

#### 4.8 Passo 8 - Ponderação da média e variância

Nessa etapa é aplicada a ponderação, com o objetivo de encontrar os valores ideais de peso para a média e variância. Para que seja possível chegar aos valores ideais de peso a técnica experimental arranjo de misturas é a mais adequada, de acordo com o que foi exposto por Gomes (2013). Para a geração dos experimentos foram consideradas as informações do **Quadro 4.1**.

Quadro 4. 1- Dados para o arranjo de misturas dos pesos

Simplex lattice	sim
Número de componentes	2
Grau do lattice	2
Com pontos axiais	sim
Número de réplicas	1
Mistura total	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

No **Quadro 4.1** foi utilizado o *Simplex Lattice* porque ele expressa de maneira mais adequada uma equação polinomial na representação da superfície de resposta. Os 2 componentes considerados referem-se a média e a variância. Já o grau do *lattice* 2 diz respeito a ordem do modelo ajustado, necessário para modelar adequadamente a superfície de resposta. O uso dos pontos axiais permite estimar a curvatura da superfície de resposta. O não uso de réplica se deve ao fato de serem analisados apenas dois componentes. A soma das composições

tem que ser igual a 1 (100%).

É necessário ficar claro, que para cada combinação de pesos experimentada é um novo problema de otimização, porque são gerados novos coeficientes, novos modelos de EQM, e eles são experimentados em uma rotina de otimização (**Tabela 4.13**). Após os cinco procedimentos experimentais para os pesos, tem-se os resultados.

Tabela 4. 13 - Matriz experimental para as combinações de pesos

Experimento	(W1)	(W2)	EQM CALCULADO
1	1,0	0,0	1476,16
2	0,5	0,5	928,41
3	0,0	1,0	581,38
4	0,75	0,25	1344,76
5	0,25	0,75	591,44

Os dados da **Tabela 4.13** foram analisados estatisticamente e o modelo que apresentou os melhores resultados, descartando as interações não significativas, foi o *full cubic* de acordo com a Eq. (31), o qual permitiu obter um valor de *pvalue* de 0,046 e um *R-sq (adj)* de 99,89%.

$$EQM_p = 1477,81w_1 + 583,1w_2 - 368,1w_1w_2 + 1631,6w_1w_2(w_1 - w_2) \quad (31)$$

Sendo assim, foi possível realizar a minimização do  $EQM_p$ , Eq. (32), em busca dos pesos ótimos, por meio do uso da planilha eletrônica com o algoritmo GRG.

$$\text{Min } EQM_p = 1477,8w_1 + 583,1w_2 - 368,1w_1w_2 + 1631,6w_1w_2(w_1 - w_2) \quad (32)$$

$$\text{s. a: } 0 \leq w_1 \leq 1$$

$$0 \leq w_2 \leq 1$$

$$w_1 + w_2 = 1$$

Os valores ótimos resultantes para os pesos, sendo  $w_1$  e  $w_2$  respectivamente, foram 0,1179 e 0,8821. Após os pesos encontrados, os valores foram inseridos no problema formulado e em seguida obtidos os coeficientes, com o seu respectivo modelo descrito na Eq. (33).

$$\begin{aligned} \text{Min } EQM_p = & 1863,77 + 388,86x_1 - 1909,11x_2 - 180,65x_3 + 812,01x_2^2 \\ & + 402x_3^2 + 419,30x_1x_3 + 1035,02x_2x_3 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a: } & \sigma^2 \geq 0,01 \\ & EQMP \geq 0,01 \\ & x^T x \leq 2,829 \end{aligned}$$

Com os respectivos coeficientes, foi executada a otimização por meio da planilha eletrônica com o uso do algoritmo GRG e encontrada a quantidade otimizada de *kanbans* (Tabela 4.14):

Tabela 4. 14 - Quantidade otimizada de *kanbans*

Descrição do Produto	Quantidade de <i>kanbans</i>
M151	281
M191	102
M1074	12

A **Figura 4.5** retrata a comparação da primeira otimização sem peso (curva azul) com a otimização após ponderação (curva verde).

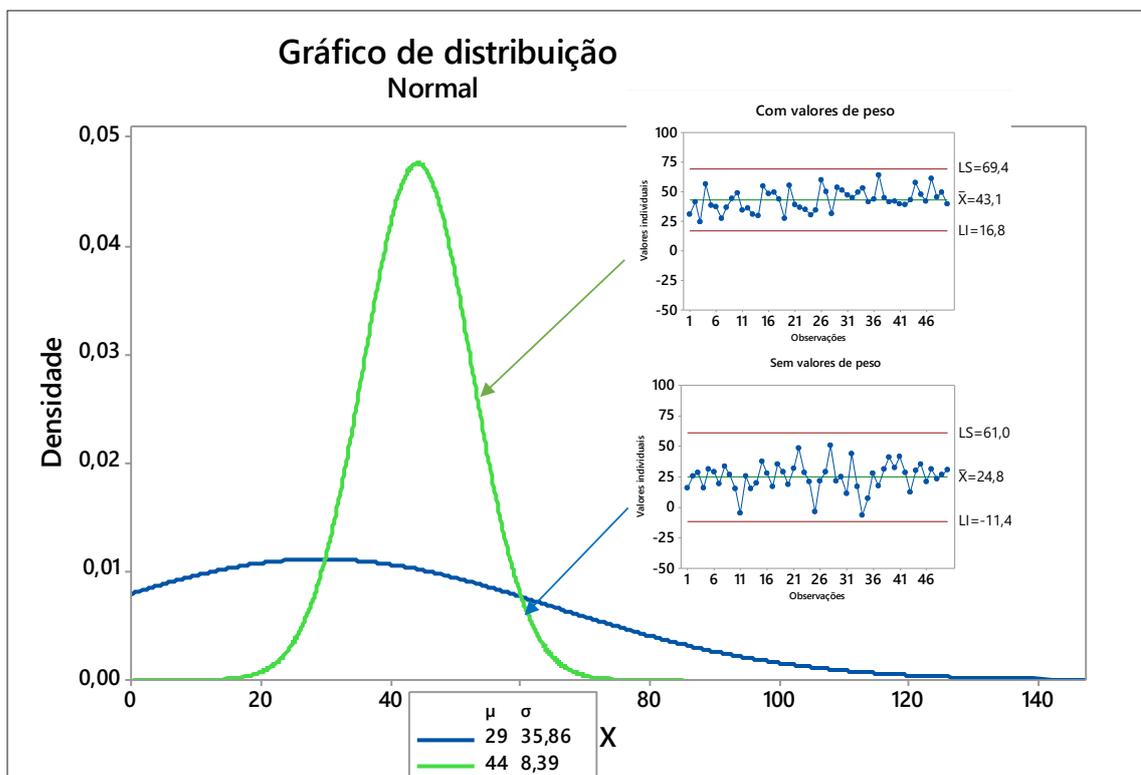


Figura 4. 5 - Valores teóricos ótimos sem peso x ótimos com peso  
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A Otimização robusta mostra claramente como é uma estratégia eficaz para diminuir a variabilidade de um sistema sujeito a variáveis de ruído. Quando é percebido uma instabilidade no modelo de simulação, a qual não permite modelar a média e a variância, a ideia de fazer a ponderação antes do EQM torna possível diminuir a distância entre a resposta e o seu alvo, garantindo assim uma maior robustez no sistema. Para os ambientes produtivos, que trabalham com o conceito de *kanban* na programação e controle de produção, a consistência no adequado dimensionamento dos supermercados é fundamental para garantir uma maior competitividade em termos de custo e nível de serviço.

#### 4.9 Passo 9 – Verificação da coerência dos dados simulados com o modelo

Logo após a definição da quantidade de *kanbans* ótimo, foi necessário fazer a verificação dos resultados alcançados no modelo de simulação. Para se chegar ao número de experimentos de confirmação (**Tabela 4.15**) foi realizado o teste *Power and Sample size*, sendo que para a definição do poder do teste foram utilizados os valores: 0,80 0,85 0,90 0,95.

Tabela 4. 15 - Número de experimentos

95% IC	
Média	(9,50444; 78,1707)
Variância	(0; 1708,92)

Logo, é possível notar que para um intervalo de 95% de confiança, são sugeridas 5 amostras para a média e 9 para a variância (**Figura 4.6**), com o objetivo de confirmar se os valores encontrados na simulação (média e variância) estão condizentes com os resultados do modelo matemático otimizado. Dessa forma, se optou pela maior quantidade, arredondado para 10 experimentos, onde foram configurados os parâmetros para as demandas, desvio padrão de 10% em um período de 30 dias, e para os tempos de processamento dos equipamentos, desvio padrão de 3%. Para validar os resultados encontrados, foram executados experimentos de confirmação no próprio modelo simulado com o objetivo de verificar se os valores da simulação vão condizer com o resultado do modelo estatístico. Em seguida foram registrados os valores do total não entregue para cada uma das réplicas (**Tabela 4.16**).

Tabela 4. 16 - Resultado de *kanbans* não entregues

<b>Réplicas</b>	<b>Total <i>kanban</i></b>
1	18
2	54
3	39
4	32
5	26
6	32
7	12
8	13
9	11
10	24
<b><math>\mu</math></b>	26
<b><math>\sigma</math></b>	14
<b><math>\sigma^2</math></b>	187

A **Tabela 4.17** apresenta uma comparação entre os resultados da confirmação com os valores calculados para um IC de 95%, sendo possível observar que os valores alcançados atendem perfeitamente os princípios do projeto de parâmetros robusto, média próxima ao alvo com mínima variabilidade.

Tabela 4. 17 - Resultados experimentos confirmados

	<b>Intervalo de confiança (95%)</b>	<b>Valor alcançado</b>
Média	9,5; 78	26
Desvio padrão	0; 41	14
Variância	0; 1709	187

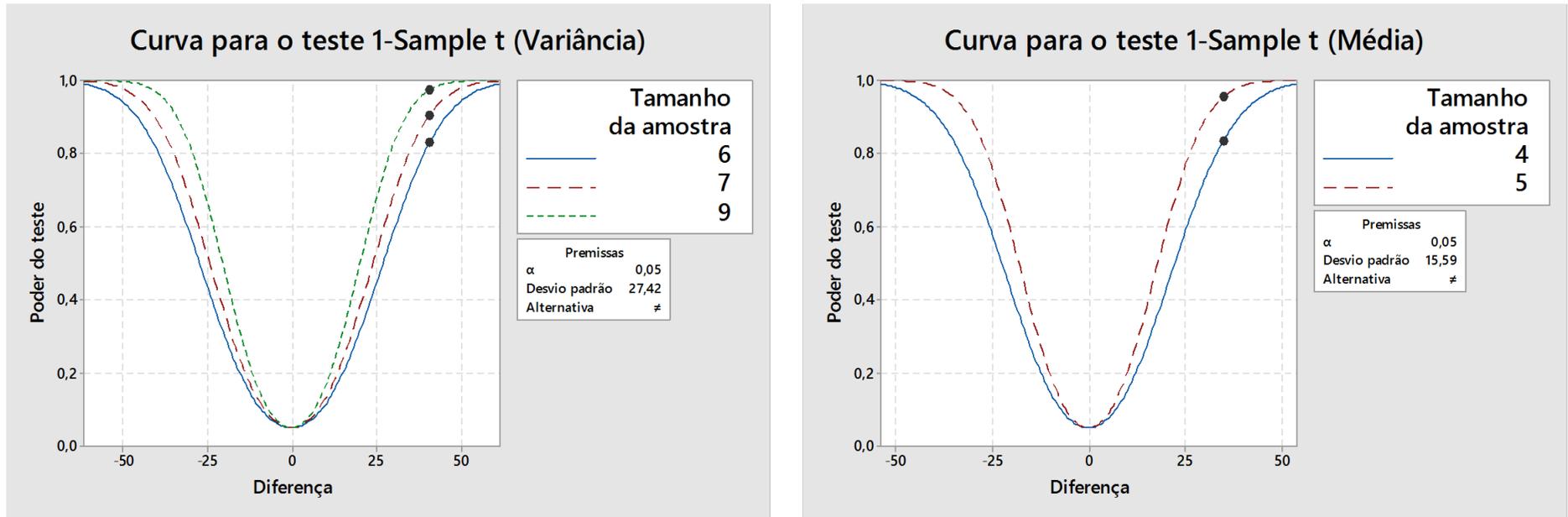


Figura 4. 6 – Amostras para confirmação dos valores otimizados

Também é feita uma comparação gráfica (**Figura 4.7**) entre os valores obtidos da otimização robusta pelo EQM com peso (curva verde) e os valores simulados (curva cinza), sendo possível notar que o modelo computacional confirmou os dados obtidos na modelagem estatística.

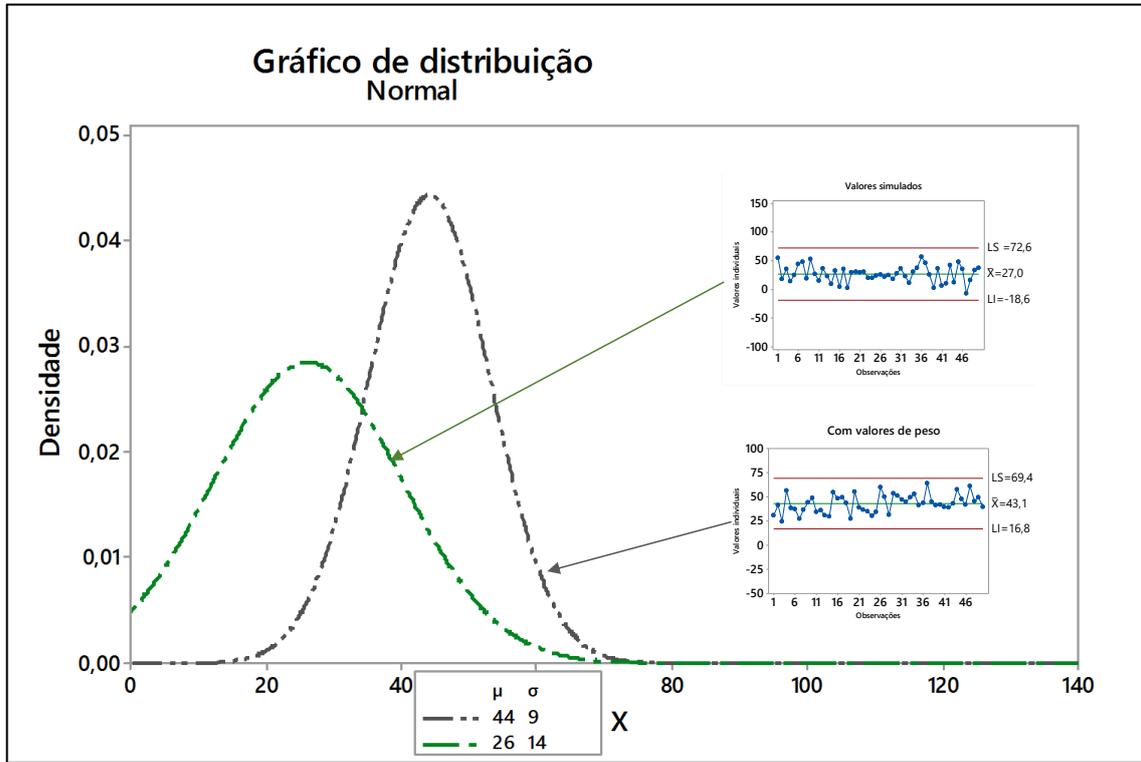


Figura 4. 7 - Valores modelados com peso x valores simulados (confirmação)  
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

#### 4.10 Comparação dos resultados com o otimizador do *Arena*<sup>®</sup>

No presente trabalho foi desenvolvida uma proposta de otimização, que tornou possível estabelecer uma nova abordagem para dimensionamento de sistemas *kanban*, a partir da otimização de projeto de parâmetros robusto com o uso de experimentos simulados, sendo possível alcançar resultado satisfatório comparado com os métodos propostos na literatura discutidos no Capítulo 2. Entretanto, como forma de comparar os resultados alcançados a partir da aplicação do método proposto no caso adaptado de Tubino (2007), com os resultados de outro método de otimização, o presente estudo fez uso do otimizador do software *Arena*<sup>®</sup>, o *OptQuest*<sup>®</sup>, permitindo pesquisar soluções ótimas no modelo de simulação.

As informações utilizadas para configuração do otimizador foram (**Quadro 4.2**): as variáveis de controle; as variáveis respostas; as restrições e a função objetivo.

Quadro 4. 2- Informações utilizadas na programação do *OptQuest*<sup>®</sup>

Informações	Descrição
Variáveis de controle	<i>kanban</i> M151; <i>kanban</i> M191 e <i>Kanban</i> M1074;
Variável resposta	Total de entrega M151 (TE151); total de entrega M191 (TE191); total de entrega M1074 (TE1074).
Objetivo	Maximizar o total de produtos <i>kanbans</i> entregues (Z)

A Eq. (34) apresenta o equacionamento matemático para as informações inseridas no software *OptQuest*<sup>®</sup> :

$$\text{Maximizar } Z = 1*(TE151) + 1*(TE191) + 1*(TE1074) \quad (34)$$

S.a:

$$Kanban \ M151 \leq 324$$

$$Kanban \ M151 \geq 238$$

$$Kanban \ M191 \leq 104$$

$$Kanban \ M191 \geq 76$$

$$kanban \ M1074 \leq 16$$

$$kanban \ M1074 \geq 11$$

A Eq. (34) definiu para o problema de otimização um cenário onde deve ser encontrada a melhor solução para o total de produtos *kanbans* entregues, respeitando as condições de quantidades máximas e mínimas no supermercado de cada item. Os parâmetros de mínimo e máximo descritos para as restrições estão de acordo com os níveis informados na **Tabela 4.6**, para a definição do arranjo experimental.

Foram realizadas 100 simulações com um número de 3 réplicas, valores de *default* do sistema. Ao final foram encontrados os resultados ótimos descritos na **Tabela 4.18**.

Tabela 4. 18- Valores ótimos *OptQuest*<sup>®</sup>

Descrição do Produto	Quantidade de <i>kanbans</i>
<i>Kanban</i> M151	238
<i>Kanban</i> M191	104
<i>Kanban</i> M1074	16

É importante salientar que os valores encontrados a partir do simulador trazem a melhor configuração em termos de quantidade de *kanbans* em estoque, para atingir a máxima quantidade entregue. A **Tabela 4.19** permite comparar os valores do otimizador com o método proposto.

Tabela 4. 19 - Comparação quantidade de *kanbans* Caso Tubino

	M151	M191	M1074	TOTAL
Método proposto	281	102	12	395
<i>OptQuest</i> <sup>®</sup>	238	104	16	358
Diferença	+18,07%	-1,92%	-25%	+10,34%

Na **Tabela 4.19** observa-se que o otimizador do software *Arena*<sup>®</sup> traz uma resposta melhor (-10,34%) no que diz respeito ao total de *kanbans* em estoque, entretanto não apresenta uma solução robusta quando se avalia o comportamento da média e variância no total de itens não entregues, onde o método proposto permite atingir um valor mais robusto com uma menor variabilidade (**Tabela 4.20**), diferente do que é visto nos resultados gerados pelo *OptQuest*<sup>®</sup>, após experimentação no modelo de simulação.

Tabela 4. 20 - Comparação média variância otimizador x método proposto

	Resultados método proposto	Resultados <i>OptQuest</i> <sup>®</sup>
Média	26	76
Desvio padrão	14	54
Variância	187	2938

Ao observar a **Tabela 4.20** e comparar os resultados entre o método proposto e aqueles obtidos do *Optquest*<sup>®</sup>, é possível notar que a abordagem proposta nesta tese diminui aproximadamente dezesseis vezes a variância no total de itens não entregues, o que representa uma maior robustez do sistema estudado. Dessa forma, no objeto de estudo analisado, o nível

de estoque e serviço apresentou melhores resultados em situações de instabilidade de demanda e tempos de processamento.

## CASO 2 – HURRION

O segundo caso de estudo para aplicação do método proposto trata-se do modelo desenvolvido por Hurriion (1997), cujo os dados foram adaptados para tornar o modelo estocástico.

Na versão original do artigo de Hurriion (1997), a empresa objeto de estudo trabalha com 4 produtos: A, B, C e D, sendo utilizadas três tipos de matérias primas, C1, C2 e C3. Neste exemplo assume-se que o tempo de atividade necessário para a fabricação de cada componente e matéria prima é dado por uma distribuição normal com seu respectivo desvio padrão, conforme *Tabela 4.21*.

Tabela 4. 21 - Dados de tempos de processamento

Item	Tipo de componente	Tempo de processamento (min)
C1	Célula 1	N (6; 1,3 <sup>2</sup> )
C2	Célula 1	N (3; 0,5 <sup>2</sup> )
C3	Célula 1	N (2; 0,3 <sup>2</sup> )
A	Célula 2	N (6; 1,5 <sup>2</sup> )
B	Célula 2	N (30; 4,9 <sup>2</sup> )
C	Célula 2	N (18; 3,3 <sup>2</sup> )
D	Célula 2	N (10; 1,2 <sup>2</sup> )

O autor define a utilização de duas células de produção para a fabricação dos produtos, dos quais a composição das matérias primas é representada no *Quadro 4.3*.

Quadro 4. 3- Componentes requeridos

Produto	Componentes requeridos
A	1 C1 + 1 C2 + 1 C3
B	1 C1 + 2 C2 + 2 C3
C	3 C2 + 3 C3
D	1 C3

As demandas externas para os produtos seguem uma média de 10 *kanban* por hora, o que resulta em um total de 240 *kanban* por dia (24 horas) representada por um processo de *Poisson*, sendo que a probabilidade de uma ordem específica ser do tipo A, B, C ou D resulta nos valores mostrados na **Tabela 4.22**. Neste exemplo, assume-se que existe um fornecimento ininterrupto de matérias-primas e uma capacidade de fabricação suficiente das células.

Tabela 4. 22- Valores de demanda

Produto	Probabilidade	Demanda diária
A	0,40	96
B	0,10	24
C	0,16	38
D	0,34	82

Para efeitos de simulação, onde seja possível considerar o comportamento discreto da demanda e dos tempos de processamento, foram feitas as seguintes adaptações no modelo:

- As matérias primas entregues pelo fornecedor na composição de *kits*, conforme componentes requeridos para cada item descritos no **Quadro 4.3**, ficando a cargo da empresa apenas a montagem. Assim faz-se necessário o cálculo do desvio padrão total, a partir da Eq. (35).

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_n^2} \quad (35)$$

Sendo:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_n$  = Desvio padrão de cada matéria prima

$$\sigma_T = \text{Desvio padrão total}$$

- Cada tamanho de ordem é dado por uma distribuição discreta com uma faixa de intervalo entre 1 e 5, o que resultaria em 3 *kanbans*. Logo, o presente estudo utiliza cada ordem de produção de cada produto (A, B, C e D) composto por um *kanban* com 3 itens.
- Foi atribuída apenas 1 célula de produção como responsável pela fabricação de todos os produtos.

Com base então nas adaptações descritas anteriormente e na Eq. (35), tem-se a **Tabela 4.23** com os valores de tempos de processamento calculados.

Tabela 4. 23 - Tempos de processamento

Produto	Tempo de processamento (min/un)	Número de itens por <i>kanban</i>	Tempo total (min/un)	$\sigma$ (min/un)	$\sigma_T$ (min/ <i>kanban</i> )
A	6	3	18	1,5	2,60
B	30	3	90	4,9	8,49
C	18	3	54	3,3	5,72
D	10	3	30	1,2	2,08

Para efeito de ajuste de capacidade da célula produtiva de maneira a ser possível respeitar ao atendimento a qualquer demanda, os tempos de processamento e o  $\sigma_T$  foram adaptados, sendo os dados a serem utilizados na modelagem do sistema descritos na **Tabela 4.24**, o que resulta em uma necessidade total de 8 recursos na célula para atender todos os pedidos.

Tabela 4. 24 - Dados ajustados

Produto	Demanda diária ( <i>kanban</i> )	Demanda mensal ( <i>kanban</i> )	Tempo de processamento (min/ <i>kanban</i> )	$\sigma_T$ (min/ <i>kanban</i> )	Tempo total necessário (min)
A	96	2880	28,8	3,9	82944
B	24	720	117	11,03	84240
C	38	1140	75,6	7,43	86184
D	82	2460	34,5	2,49	84870

As correções do tempo de processamento e  $\sigma_T$  tornaram-se necessárias para atender o princípio básico proposto por Hurrión (1997), ou seja, um fornecimento ininterrupto de matérias primas e uma capacidade de fabricação suficiente.

#### 4.11 Passo 1: Modelagem do sistema simulado

Após o levantamento dos dados necessários para a contextualização do objeto de estudo apresentado, foi desenvolvida a descrição esquemática do objeto de estudo (*Figura 4.8*), e o modelo de simulação (*Figura 4.9*), assim como foram realizadas as etapas de validação do modelo conceitual e a verificação do modelo computacional, conforme as etapas dos métodos de simulação.

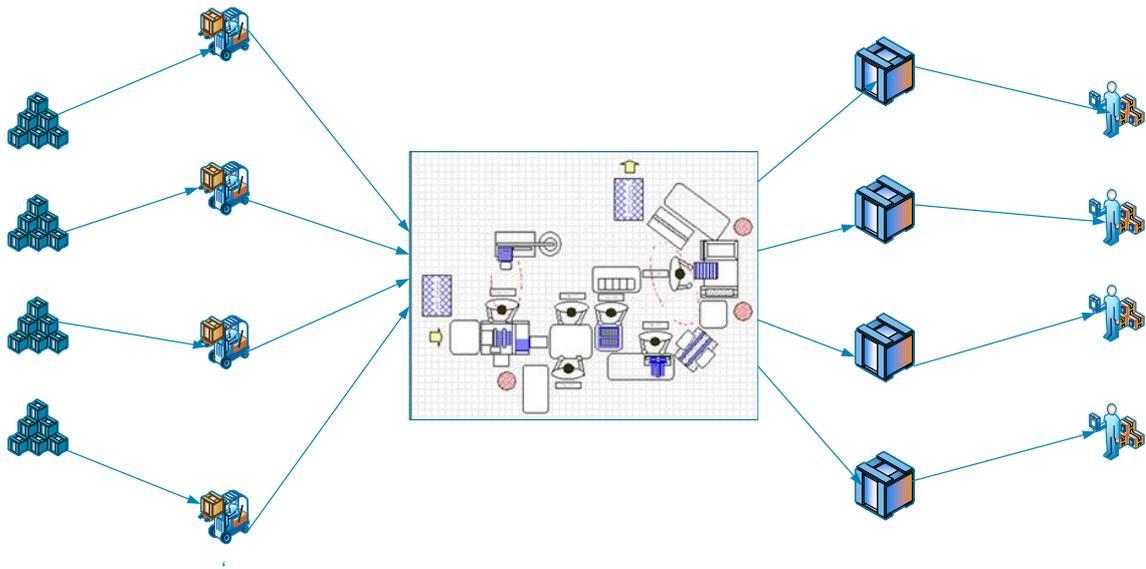


Figura 4. 8 - Descrição esquemática do objeto de estudo Caso Hurrion  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A **Figura 4.8** faz a descrição esquemática ou representação do objeto de estudo de acordo com a lógica do sistema puxado para cada demanda correspondente aos produtos trabalhados. Esta puxada acontece de acordo com uma distribuição de *Poisson*, conforme o que já foi descrito anteriormente. Após a puxada de cada produto, os itens são retirados de seus respectivos supermercados, e os mesmos são repostos na quantidade de retirada pela célula produtiva com um total de 8 recursos, atendendo assim perfeitamente a capacidade produtiva para a demanda média diária esperada. Logo após a célula produtiva retira do estoque a quantidade para atendimento à sua demanda de produtos.

A **Figura 4.9** traz o fluxograma do modelo conceitual, ou seja, como será a programação no *Arena*<sup>®</sup>, que permitirá a construção do modelo computacional (**Figura 4.10**)

A **Figura 4.10** desenvolve o modelo computacional para o objeto de estudo, sendo que foi programado no modelo de simulação a mesma lógica definida no modelo conceitual. Os recursos de programação do software *Arena*<sup>®</sup> permitiram registrar para cada produto a quantidade de matéria prima liberada, o quanto foi processado na célula e o resultado final de estoque nos supermercados para cada produto. Ao final também é possível obter a quantidade de produtos entregues, informação que será comparada com o total planejado e realizado o cálculo para o número de produtos não entregues, sendo que esta informação é fundamental para a modelagem matemática dos experimentos e aplicação do método de otimização proposto. É possível ainda observar que cada produto tem uma criação de demanda, que acontece conforme os dados gerados de variação diária seguindo uma distribuição de *Poisson* ao longo

dos 30 dias, dados estes registrados e possíveis de serem visualizados nos ícones correspondentes.

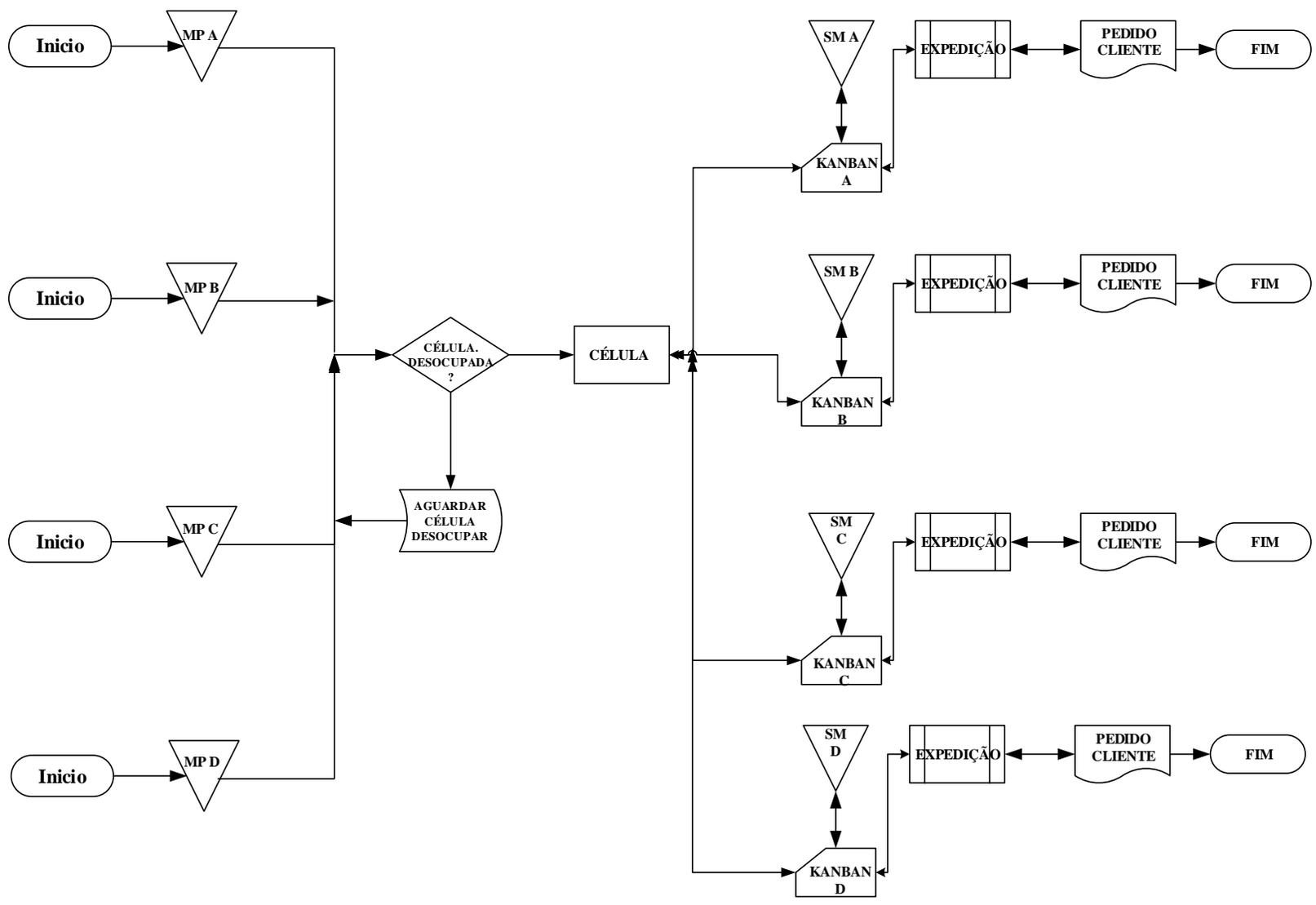


Figura 4. 9 - Fluxograma do modelo conceitual Caso Hurriion  
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

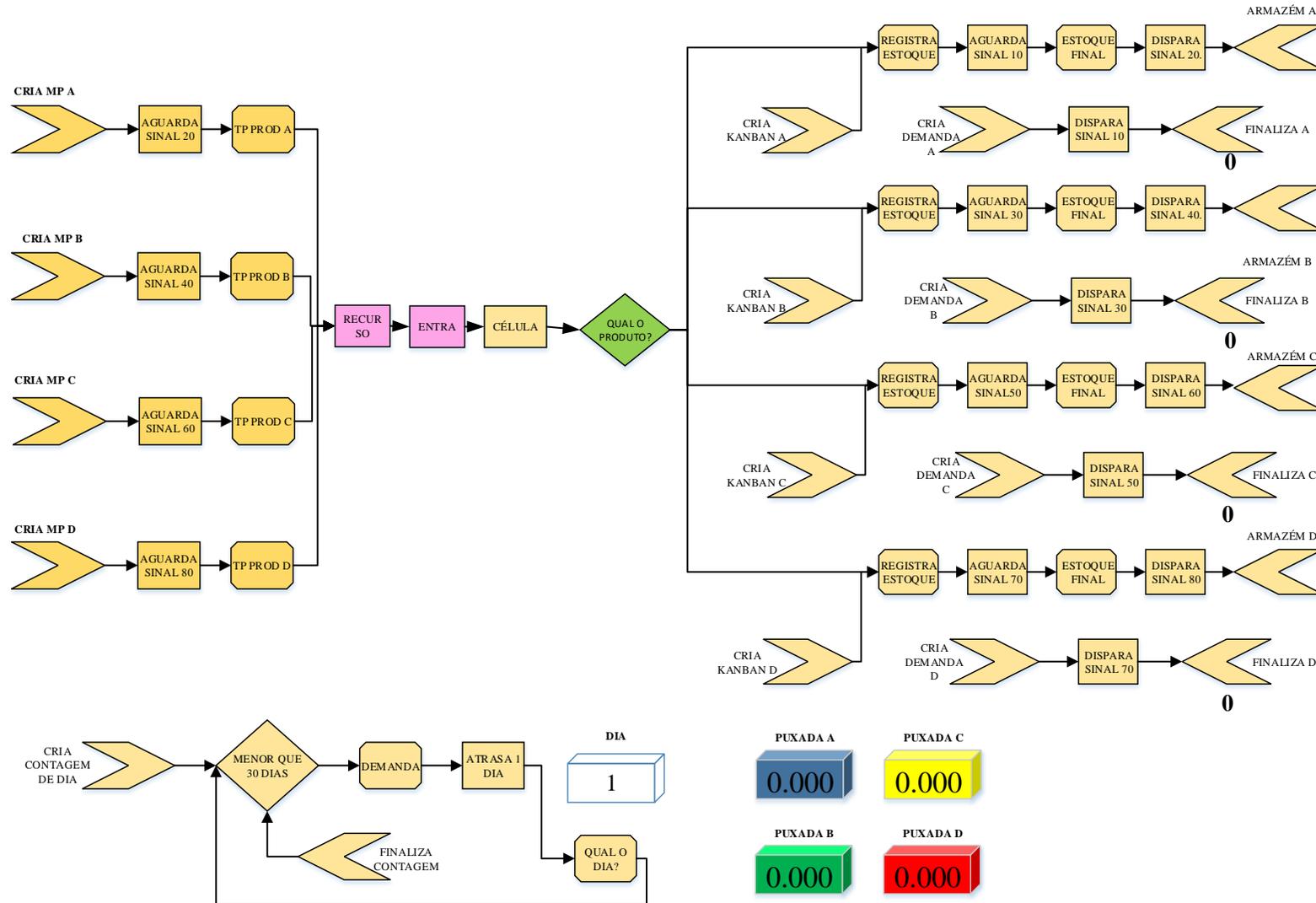


Figura 4. 10 - Modelo computacional do objeto de estudo Caso Hurriion  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Na modelagem do sistema simulado existe a preocupação com a adequada construção do modelo, chamada de verificação. Após alguns cenários, observou-se que seguiam o processo de verificação proposto por Banks (2005), o que permitiu partir para os experimentos.

#### 4.12 Passo 2: Planejamento dos experimentos simulados

As variáveis de controle estudadas no objeto de estudo foram as quantidades de *kanbans* nos supermercados e a resposta medida foi o total de *kanbans* não entregues. A demanda foi considerada como uma variável de ruído, apresentando um comportamento de acordo com uma distribuição de *Poisson* durante um período de 30 dias.

Dessa forma, para as variáveis anteriores, o arranjo experimental foi organizado de acordo com um arranjo composto central (CCD) para a composição dos experimentos de superfície de resposta, sendo gerados 31 experimentos. Os experimentos foram simulados com 5 réplicas, onde em cada réplica novas demandas eram geradas, de acordo com a distribuição de *Poisson*.

Para a fixação dos níveis das variáveis para o arranjo CCD, o presente método utilizou como referência o cálculo dos estoques de segurança para as quantidades de *kanbans*. Assim, foi empregada a Eq. (36), tal como sugerido por KRAJEWSKI, RITZMAN e MALHOTRA (2009).

$$ES = F_S \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{LT} \quad (36)$$

Sendo:  $ES$  = Estoque de segurança

$F_S$  = Fator de nível de serviço

$\sigma_D$  = Desvio padrão da demanda

$LT$  = *Lead time*

O *lead time* foi fixado em um dia, sendo que o trabalho desenvolvido considerou a demanda estocástica. De acordo com Krajewski, Ritzman e Malhotra (2009) para um nível de serviço de 99,99%, tem-se um valor para  $F_S$  de 3,62. Dessa forma, obtém-se as seguintes quantidades de *kanbans* em estoque de segurança (**Tabela 4.25**) conforme descreve a Eq. (36) utilizada para cálculo do ES.

Tabela 4. 25 - Valores de estoque de segurança

Descrição	Total <i>kanban</i>
Produto A	35
Produto B	9
Produto C	14
Produto D	30

A partir das quantidades calculadas para o estoque de segurança, definiu-se o planejamento de experimentos (**Tabela 4.26**).

Tabela 4. 26 - Quantidade de *kanban* sem estoque de segurança (ES)

Produto	Demanda diária	ES ( <i>kanban</i> )	Quantidade de <i>kanbans</i> com ES
A	96	35	131
B	24	9	33
C	38	14	53
D	82	30	112

Logo, tem-se os seguintes níveis para o arranjo, sendo que  $-\alpha$  corresponde ao nível inferior do arranjo, ou seja, sem ES, e  $+\alpha$  ao nível superior com ES (**Tabela 4.27**).

Tabela 4. 27- Quantidade de *kanban* com ES

Produto	Nível $-\alpha$	Nível $+\alpha$
A	96	131
B	24	33
C	38	53
D	82	112

A partir da quantidade de *kanbans*, nível inferior do arranjo sem estoque de segurança ( $-\alpha$ ) e nível superior do arranjo com estoque de segurança ( $+\alpha$ ), foram obtidos com o uso do DOE, técnica experimental Superfície de resposta-CCD, os valores intermediários dos níveis dos *kanbans* (**Tabela 4.28**).

Tabela 4. 28 - Níveis para os *kanbans* Caso Hurriion

Produto	Nível - $\alpha$	Nível - 1	Nível 0	Nível + 1	Nível + $\alpha$
A	96	105	114	122	131
B	24	26	29	31	33
C	38	42	46	49	53
D	82	90	97	105	112

Tendo como base os níveis dos *kanbans* descritos (**Tabela 4.28**) foi gerado o arranjo experimental por superfície de resposta, onde 31 combinações de experimentos foram obtidas, sabendo que o foco do modelo de simulação é quantificar a quantidade de *kanbans* não entregues, a partir dos estoques iniciais nos supermercados e de suas respectivas demandas.

Como a proposta do trabalho está voltada ao uso do projeto de parâmetros robustos, utilizou-se como técnica experimental o arranjo por réplicas, sendo definidas 5 réplicas (como forma de diminuir o erro amostral) para cada um dos 31 experimentos, simulados durante 30 dias com demandas seguindo uma distribuição de *Poisson* entre os dias. Após este planejamento, foram realizados os experimentos simulados por meio do modelo computacional construído no *Arena*<sup>®</sup>.

### 4.13 Passo 3: Execução dos experimentos simulados

Nesta etapa são executados os experimentos simulados, onde são consideradas como variáveis de controle as quantidades de *kanban* no supermercado e são mensurados: os resultados de média e variância e o erro quadrático médio entre elas; os níveis que foram definidos; qual o arranjo experimental e quantos experimentos serão necessários.

Como a demanda foi considerada nesta aplicação como uma variável de ruído, de forma que os experimentos fossem diretamente influenciados por sua aleatoriedade, é descrito na **Tabela 4.29** um exemplo de como ela foi configurada nos experimentos. Os dados gerados para cada faixa de valores de demanda foram obtidos no Minitab<sup>®</sup>, considerando valores diários de demanda com um comportamento de *Poisson* ao longo de 30 dias.

Tabela 4. 29 - Demandas aleatórias para o experimento 1 (*kanbans/dia*)

Valores de Demanda	Produto A	Produto B	Produto C	Produto D
1 a 10	81;107;101;95; 98;90;96;106; 103;82	22;23;26;21; 23;34;23;24; 28;23	44;38;47;37; 33;38;44;37; 32;39	79;80;82;76; 90;81;84;71 81;72
11 a 20	94;107;84;100 94;83;82;103 114;91	30;23;19;21; 18;34;29;24; 24;16	45;44;38;34; 26;30;36;41; 40;31	75;77;79;103; 76;94;94;74 80;76
21 a 30	83;106;88;117; 92;100;101;108; 108;92	28;27;27;16; 29;26;24;21; 25;17	40;35;41;41; 34;40;32;31; 27;46	84;67;76;80; 100;88;95;92; 78;82

Na **Figura 4.11** é possível visualizar a aleatoriedade da demanda para cada produto, em um comportamento estacionário (se desenvolve no tempo aleatoriamente ao redor de uma média constante). Não foram considerados, nos valores de demanda gerados, os *outliers*, para não interferir nos valores da análise de regressão.

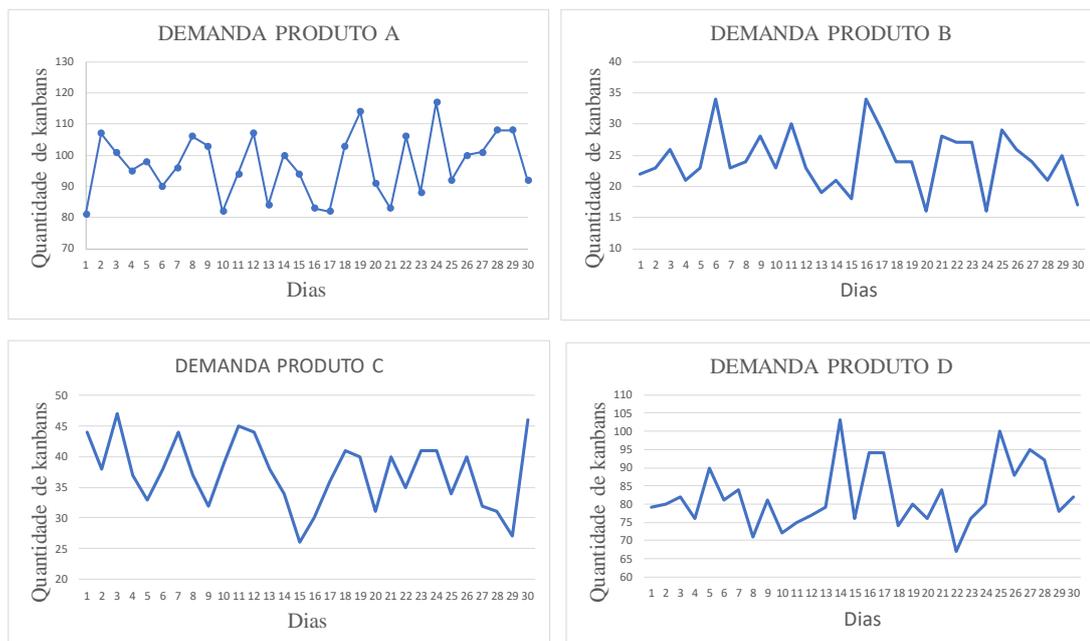


Figura 4. 11- Comportamento aleatório e estacionário da demanda para o experimento 1 Caso Hurrion

#### 4.14 Passo 4: Registro dos dados

Após os resultados gerados na simulação, os valores de média, variância foram calculados (**Tabela 4.30**) para cada combinação dos produtos definidas no planejamento de experimento e registrados na matriz.

Tabela 4. 30 - Matriz de experimentos

<b>Experimento</b>	<b>Produto A</b>	<b>Produto B</b>	<b>Produto C</b>	<b>Produto D</b>	<b>Réplica 1</b>	<b>Réplica 2</b>	<b>Réplica 3</b>	<b>Réplica 4</b>	<b>Réplica 5</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
1	105	26	42	90	358	247	397	395	344	348,20	3731,70
2	122	26	42	90	359	389	148	350	249	299,00	9900,50
3	105	31	42	90	435	230	405	348	264	336,40	7781,30
4	122	31	42	90	357	460	387	427	303	386,80	3721,20
5	105	26	49	90	387	437	234	433	274	353,00	8753,50
6	122	26	49	90	141	330	363	291	264	277,80	7265,70
7	105	31	49	90	351	292	409	388	346	357,20	2011,70
8	122	31	49	90	305	366	192	245	319	285,40	4591,30
9	105	26	42	105	260	332	463	226	249	306,00	9272,50
10	122	26	42	105	322	247	293	344	209	283,00	3028,50
11	105	31	42	105	483	314	302	373	203	335,00	10575,50
12	122	31	42	105	203	274	346	392	242	291,40	5914,80
13	105	26	49	105	390	345	332	292	242	320,20	3134,20
14	122	26	49	105	324	219	250	306	150	249,80	4893,20
15	105	31	49	105	244	362	344	331	225	301,20	3873,70
16	122	31	49	105	294	270	256	434	351	321,00	5306,00
17	96	29	46	98	395	370	335	336	210	329,20	5070,70
18	131	29	46	98	268	223	398	214	300	280,60	5517,80
19	114	24	46	98	245	224	283	305	153	242,00	3476,00
20	114	33	46	98	349	253	214	357	292	293,00	3768,50
21	114	29	38	98	397	271	253	258	346	305,00	4053,50
22	114	29	53	98	333	219	457	154	224	285,40	12061,30

Tabela 4.30 - Matriz de experimentos (continuação)

<b>Experimento</b>	<b>Produto A</b>	<b>Produto B</b>	<b>Produto C</b>	<b>Produto D</b>	<b>Réplica 1</b>	<b>Réplica 2</b>	<b>Réplica 3</b>	<b>Réplica 4</b>	<b>Réplica 5</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
23	114	29	46	83	316	487	517	390	366	415,20	7103,70
24	114	29	46	112	337	372	492	255	347	360,60	7322,30
25	114	29	46	98	312	384	309	360	230	319,00	3494,00
26	114	29	46	98	371	292	403	246	390	340,40	4642,30
27	114	29	46	98	261	381	190	275	333	288,00	5294,00
28	114	29	46	98	363	259	439	479	348	377,60	7301,80
29	114	29	46	98	295	376	341	298	321	326,20	1123,70
30	114	29	46	98	242	307	184	273	363	273,80	4533,70
31	114	29	46	98	273	301	359	287	344	312,80	1374,20

Os dados representados na **Tabela 4.30** foram encontrados após a simulação no modelo computacional para cada combinação de experimento da quantidade de *kanbans* armazenado no supermercado com as respectivas demandas, conforme já mencionado anteriormente. Foi registrado ao final de cada combinação de experimento o número de itens não entregues após o período de 30 dias. Em seguida foram calculados os valores de média e variância amostral.

#### 4.15 Passo 5 - Modelagem matemática das equações de média, variância e EQM

Os dados obtidos da matriz experimental foram analisados no software Minitab® e encontrados os resultados estatísticos para os modelos de média e variância (**Tabela 4.31**).

Tabela 4. 31- Ajustes estatísticos

	R-sq (adj)	Pvalue
Média	70,93%	0,050
Variância	43,33%	0,003

Em seguida são apresentadas as equações do modelo reduzido para a média, Eq. (37) e variância, Eq. (38):

$$\begin{aligned} \mu = & 305,65 - 15x_1 + 11,64x_2 - 6,64x_3 - 14,39x_4 - 9,78x_2^2 + 20,32x_4^2 \\ & + 10,79x_1x_2 - 8,26x_1x_3 \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & 4111,65 - 71,64x_1 - 793,99x_3 + 486,96x_4 + 828,57x_4^2 \\ & + 1630,47x_1x_3 - 800,83x_1x_4 \end{aligned} \quad (38)$$

Como a modelagem da variância não foi considerada satisfatória, uma vez que apresentou um ajuste muito baixo (**Tabela 4.31**), então o próximo passo foi calcular o EQM (**Tabela 4.32**), de acordo com a Eq. (19) e modelá-lo para cada condição experimental.

Tabela 4. 32 - Valores de EQM

Experimento	Produto A	Produto B	Produto C	Produto D	EQM
1	105	26	42	90	20683,74
2	122	26	42	90	16461,50
3	105	31	42	90	21799,86
4	122	31	42	90	32214,64
5	105	26	49	90	26978,50
6	122	26	49	90	10841,74
7	105	31	49	90	21388,34
8	122	31	49	90	9134,06
9	105	26	42	105	17016,50
10	122	26	42	105	7253,50
11	105	31	42	105	24264,50
12	122	31	42	105	11302,36
13	105	26	49	105	13579,04
14	122	26	49	105	5904,44
15	105	31	49	105	10795,94
16	122	31	49	105	15915,00
17	96	29	46	98	17436,14
18	131	29	46	98	9436,56
19	114	24	46	98	4052,00
20	114	33	46	98	9393,50
21	114	29	38	98	11622,50
22	114	29	53	98	16604,06
23	114	29	46	83	45991,54
24	114	29	46	112	27657,06
25	114	29	46	98	13695,00
26	114	29	46	98	19624,06
27	114	29	46	98	10194,00
28	114	29	46	98	32773,96
29	114	29	46	98	12830,94
30	114	29	46	98	7647,34
31	114	29	46	98	10361,24

Em seguida foi desenvolvida a sua modelagem no mesmo procedimento indicado para a média e variância, de acordo com o que é descrito na Eq. (39) do modelo reduzido.

$$EQM = 13019,91 - 1986,48x_1 + 2274,24x_2 - 4414,29x_4 - 1527,59x_2^2 + 5997,80x_4^2 + 2744,81x_1x_2 \quad (39)$$

Os ajustes estatísticos obtidos da modelagem do EQM, retiradas as interações não significativas, foram um *pvalue* de 0,014 e um *R-sq (adj)* de 80,26%, o que podem ser considerados como adequados, então o próximo passo é a otimização pelo EQM e a verificação em relação ao alvo da otimização. É fundamental apontar os valores de alvo das respostas, os quais podem ser obtidos pela otimização individual da função de média.

#### 4.16 Passo 6 - Otimização robusta pelo EQM

Nesta parte do trabalho é desenvolvida a otimização robusta pelo EQM, conforme a Eq. (40):

$$\begin{aligned} MinEQM = 13019,91 - 1986,48x_1 + 2274,24x_2 - 4414,29x_4 \\ - 1527,59x_2^2 + 5997,80x_4^2 + 2744,81x_1x_2 \end{aligned} \quad (40)$$

S. a:

$$\sigma^2 \geq 0,01$$

$$EQM \geq 0,01$$

$$x^t x \leq 4$$

Onde  $\sigma^2$  corresponde à equação da variância do modelo apresentado na Eq. (38). Esta restrição foi adicionada para que o modelo não apresente valores negativos para a variância, que pode ser uma consequência negativa da estimação matemática desta modelagem. A restrição do EQM também foi inserida com o objetivo de não apresentar valores negativos. O  $x^t x$  descreve a restrição para uma região de solução do espaço experimental.

O problema de otimização descrito na Eq. (40) foi programado com o recurso da planilha eletrônica usando o algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e então foi identificado o ponto de ótimo. Observa-se a seguir a melhor combinação de *kanban* (**Tabela 4.33**).

Tabela 4. 33 - Quantidade de *kanbans*

Produto	Quantidade de <i>kanbans</i>
A	124
B	26
C	46
D	103

Após encontrar a quantidade ótima de *kanban*, para um IC de 95%, os dados foram simulados em um total de 30 réplicas, onde os resultados do total de *kanban* não entregue em cada réplica foi registrado, em seguida foram calculados os valores de média e variância (**Tabela 4.34**).

Tabela 4. 34 - Valores após otimização do EQM

	Média	Variância
Resultados simulação	275	4013
Alvo	235	4154

#### 4.17 Passo 7 – Análise da robustez para os resultados ótimos

Nesta etapa é feita a análise da robustez para o resultado ótimo encontrado para o EQM após a otimização robusta. São comparados os valores estatísticos encontrados com os valores da variância

Com os valores de alvo, tem-se então que o resultado alcançado para a média foi considerado mais alto, porém a variância nessa configuração mostrou-satisfatória, o que foge do princípio do projeto de parâmetros robustos que é média próxima da condição ideal do alvo com mínima variabilidade, então torna-se necessário a ponderação da média e variância.

#### 4.18 Passo 8 - Ponderação da média e variância

Nessa etapa é aplicada a ponderação, com o objetivo de encontrar os valores ideais de peso para a média e variância. Para que seja possível chegar aos valores ideais de peso a técnica experimental arranjo de misturas é a mais adequada, de acordo com o que foi exposto por Gomes (2013). Para a geração dos experimentos foram consideradas as informações do *Quadro 4.4*.

Quadro 4. 4 - Dados para o arranjo de misturas dos pesos

Simplex lattice	sim
Número de componentes	2
Grau do lattice	2
Com pontos axiais	sim
Número de réplicas	1
Mistura total	1

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

No *Quadro 4.4* foi utilizado o *Simplex Lattice* porque ele expressa de maneira mais

adequada uma equação polinomial na representação da superfície de resposta. Os 2 componentes considerados referem-se a média e a variância. Já o grau do *lattice* 2 diz respeito a ordem do modelo ajustado, necessário para modelar adequadamente a superfície de resposta. O uso dos pontos axiais permite estimar a curvatura da superfície de resposta. Não foram necessárias réplicas e o total do experimento de mistura deve ser igual a 1 (100%).

É necessário ficar claro, que para cada combinação de pesos experimentada é um novo problema de otimização, porque são gerados novos coeficientes, novos modelos de EQM, e eles são experimentados em uma rotina de otimização (**Tabela 4.35**). Após os cinco procedimentos experimentais para os pesos, tem-se os resultados.

Tabela 4. 35 - Matriz experimental para as combinações de pesos

Experimento	(W1)	(W2)	EQM CALCULADO
1	1,0	0,0	4380,34
2	0,5	0,5	4457,61
3	0,0	1,0	16489,98
4	0,75	0,25	4045,39
5	0,25	0,75	6018,08

Os dados da **Tabela 4.35** foram analisados estatisticamente e o modelo que apresentou os melhores resultados, descartando as interações não significativas, foi o *full cubic* de acordo com a Eq. (41), o qual permitiu obter um valor de *pvalue* de 0,0209 e um *R-sq (adj)* de 97,26%.

$$EQMP = 4275,17w_1 + 16384,81w_2 - 26013,66w_1w_2 + 21771,36w_1w_2(w_1 - w_2) \quad (41)$$

Sendo assim, foi possível realizar a minimização do  $EQM_P$ , Eq. (42), em busca dos pesos ótimos, por meio do uso da planilha eletrônica com o algoritmo GRG.

$$\begin{aligned} \text{Min } EQM_P = & 4275,17w_1 + 16384,81w_2 - 26013,66w_1w_2 \\ & + 21771,36w_1w_2(w_1 - w_2) \end{aligned} \quad (42)$$

$$s. a: 0 \leq w_1 \leq 1$$

$$0 \leq w_2 \leq 1$$

$$w_1 + w_2 = 1$$

Os valores ótimos resultantes para os pesos, sendo  $w_1$  e  $w_2$  respectivamente, foram

0,5251 e 0,4749. Após os pesos encontrados, os valores foram inseridos no problema formulado e identificados os resultados dos pesos ótimos com o seu respectivo modelo descrito na Eq. (43).

$$\begin{aligned} \text{Min } EQM_p = & 6467,01 - 651,63x_1 + 966,50x_2 - 2699,13x_4 - 838,29x_2^2 \\ & + 3068,28x_4^2 + 2032,59x_1x_2 - 853,68x_2x_4 \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a: } \quad & \sigma^2 \geq 0,01 \\ & EQM_p \geq 0,01 \\ & x^T x \leq 4 \end{aligned}$$

Com os coeficientes, foi executada a otimização por meio da planilha eletrônica com o uso do algoritmo GRG e obtido o número otimizado de *kanbans* (**Tabela 4.36**):

Tabela 4. 36 - Quantidade otimizada de *kanbans*

Descrição do Produto	Quantidade de <i>kanbans</i>
A	123
B	26
C	46
D	102

A **Figura 4.12** retrata a comparação da primeira otimização sem peso (curva azul) com a otimização após ponderação (curva verde).

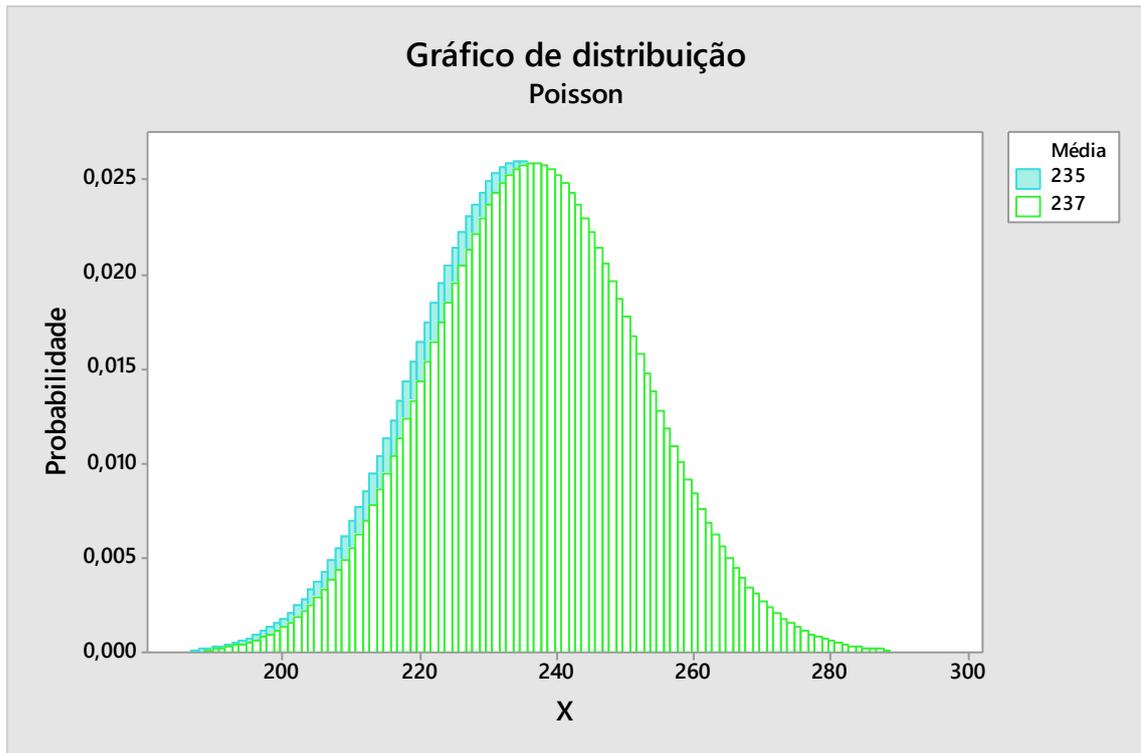


Figura 4. 12 - Valores teóricos ótimos sem peso x ótimos com peso  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A Otimização robusta, aplicada no caso apresentado por Hurrion (1997), mostra que os valores antes e após a ponderação não se diferem consideravelmente no que diz respeito a média, não sendo possível observar graficamente a diminuição da variabilidade entre a otimização com peso e sem peso. Entretanto, na **Figura 4.13** quando se compara os valores de média obtidos após a otimização pelo EQM (curva em azul) e antes da otimização (curva em vermelho), nota-se uma redução expressiva devida a abordagem proposta neste tese.

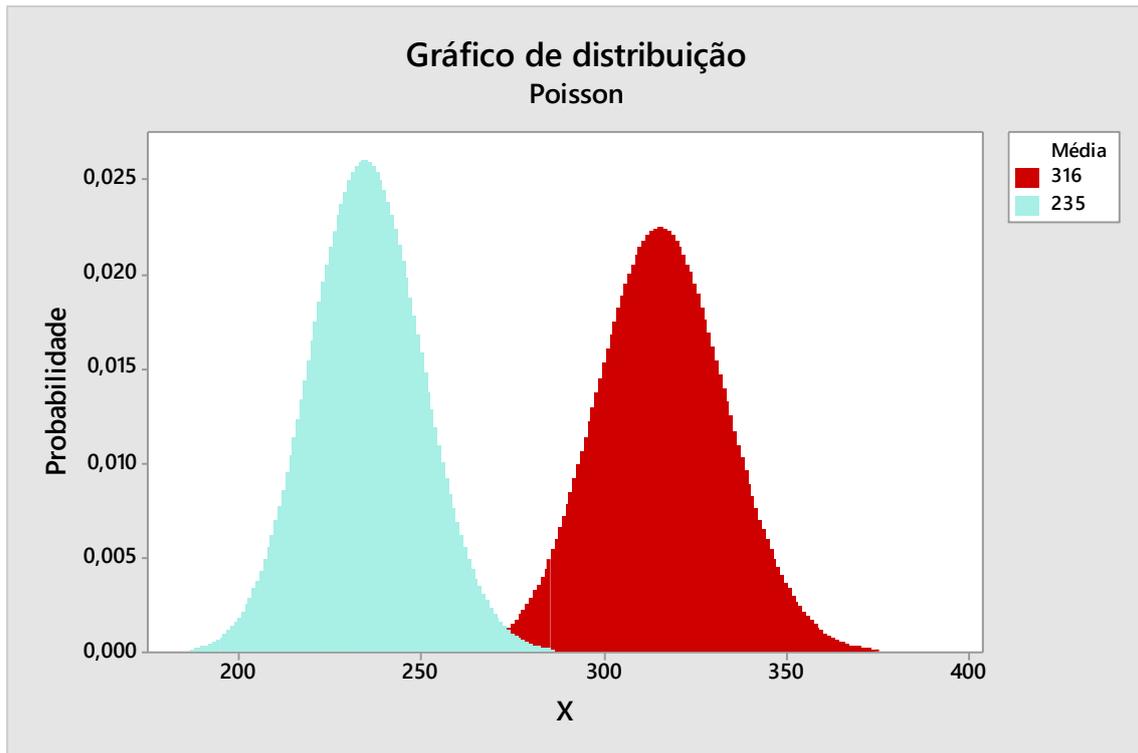


Figura 4. 13 - Comparação valor após e antes da otimização  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Outro ponto é quando se compara os valores de variância, antes e depois da otimização, onde é possível notar o ganho em termos de robustez, variância 32,56% menor após a otimização, de acordo com o que é visto na **Tabela 4.37**.

Tabela 4. 37 - Comparação antes x após otimização

Após otimização	Antes otimização	Diferença
4134	5480	-32,56%

#### 4.19 Passo 9 – Verificação da coerência dos dados simulados com o modelo

Logo após a definição da quantidade de *kanbans* ótimo, foi necessário fazer a verificação dos resultados alcançados no modelo de simulação. Para se chegar ao número de experimentos de confirmação foi realizado o teste *Power and Sample size*, sendo que para a definição do poder do teste foram utilizados os valores: 0,80 0,85 0,90 0,95, e determinado o número de amostras (**Figura 4.14**).

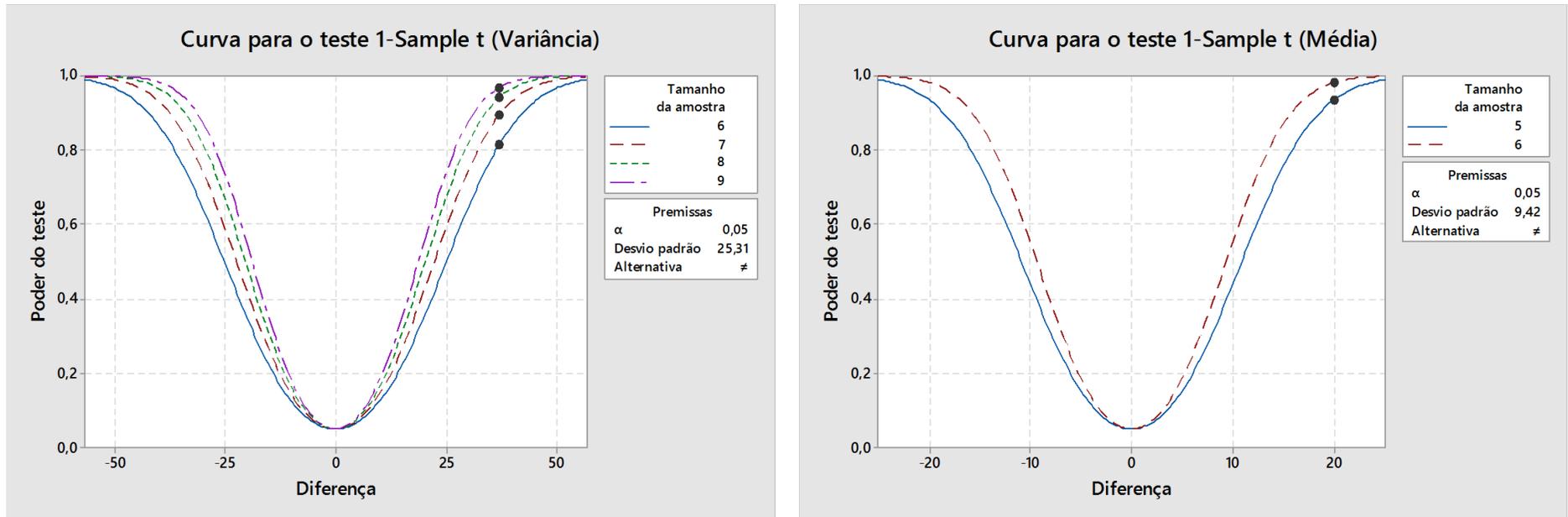


Figura 4. 14 - Amostras para confirmação dos valores otimizados

Dessa forma, para um IC de 95% são sugeridas 6 amostras para a média e 9 para a variância. Logo, optou-se pelo maior número de amostras, arredondado para 10 experimentos, onde foram configurados os parâmetros para as demandas, distribuição de *Poisson*, para um período de 30 dias e tempos de processamento anteriormente mencionados. Para validar os resultados encontrados, foram executados experimentos de confirmação no próprio modelo simulado com o objetivo de verificar se os valores da simulação vão condizer com o resultado do modelo estatístico. Em seguida foram registrados os valores do total não entregue para cada uma das réplicas (**Tabela 4.38**).

Tabela 4. 38 - Resultado de *kanbans* não entregues

<b>Réplicas</b>	<b>Total <i>kanban</i></b>
1	323
2	349
3	219
4	290
5	281
6	299
7	249
8	206
9	384
10	320
<b><math>\mu</math></b>	292
<b><math>\sigma</math></b>	55,98
<b><math>\sigma^2</math></b>	3134

Logo após é possível observar na **Tabela 4.39** a comparação entre os resultados da confirmação com os limites calculados para um IC de 95%.

Tabela 4. 39 - Resultados experimentos confirmados

	<b>IC de 95%</b>	<b>Valor alcançado</b>
Média	236,76; 276	292
Desvio padrão	54,19; 75	56
Variância	2936,17; 5601	3134

É possível notar que o modelo computacional confirmou os dados obtidos na modelagem estatística.

## 4.20 Comparação dos resultados com o otimizador do software *Arena*<sup>®</sup>

O objeto de estudo adaptado de Hurrion (1997) contribuiu na comparação entre o método de otimização proposto com os resultados obtidos a partir do otimizador do próprio *Arena*<sup>®</sup>, o *OptQuest*<sup>®</sup>, permitindo pesquisar soluções ótimas no modelo de simulação.

As informações utilizadas para configuração do otimizador foram: as variáveis de controle; as variáveis respostas; as restrições e a função objetivo, descritas no **Quadro 4.5**.

Quadro 4. 5- Informações utilizadas na programação do *OptQuest*<sup>®</sup>

Informações	Descrição
Variáveis de controle	<i>Kanban</i> produto A; <i>kanban</i> produto B; <i>kanban</i> produto C; <i>kanban</i> produto D
Variável resposta	Total de entrega produto A (TEA); total de entrega produto B (TEB); total de entrega produto C (TEC); total de entrega produto D (TED);
Objetivo	Maximizar o total de produtos <i>kanbans</i> entregues (Z)

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Na Eq. (44) segue o equacionamento matemático para as informações inseridas no software *OptQuest*<sup>®</sup>:

$$\text{Maximizar } Z = 1*(TEA)+1*(TEB)+1*(TEC)+1*(TED) \quad (44)$$

S.a:

$$Kanban A \leq 131$$

$$Kanban A \geq 96$$

$$Kanban B \leq 33$$

$$Kanban B \geq 24$$

$$kanban C \leq 53$$

$$kanban C \geq 38$$

$$kanban D \leq 112$$

$$kanban D \geq 82$$

A Eq. (44) procurou definir para o problema de otimização um cenário onde deve ser encontrada a melhor solução para o total de produtos *kanbans* entregues, respeitando as condições de quantidades máximas e mínimas no supermercado de cada item. Os parâmetros de mínimo e máximo definidos para as restrições estão de acordo com os níveis descritos na **Tabela 4.28**, para a definição do arranjo experimental.

Foram realizadas 100 simulações com um número de 3 réplicas, valores de *default* do sistema, com o objetivo de estimar melhor os resultados entregues pelo otimizador. Ao final foram encontrados os resultados ótimos descritos na **Tabela 4.40**.

Tabela 4. 40 - Valores ótimos *OptQuest*<sup>®</sup>

Descrição do Produto	Quantidade de <i>kanbans</i>
<i>Kanban A</i>	131
<i>Kanban B</i>	33
<i>Kanban C</i>	53
<i>Kanban D</i>	112

É importante destacar que os valores encontrados a partir do simulador trazem uma pior configuração em termos de quantidades de *kanbans* em estoque (+10,77%), quando se compara com o método proposto (**Tabela 4.41**).

Tabela 4. 41 - Comparação entre o método proposto e o *OptQuest*<sup>®</sup>

	A	B	C	D	TOTAL
Método proposto	123	26	46	102	297
<i>OptQuest</i> <sup>®</sup>	131	33	53	112	329
Diferença	-6%	-21%	-13%	-9%	-10,77%

Além disso, não apresenta uma solução robusta quando se avalia o comportamento da média e variância (**Tabela 4.42**), onde o método proposto permite atingir um valor mais robusto com uma menor variância.

Tabela 4. 42 - Comparação de resultados da média e variância

	Resultados método proposto	Resultados <i>OptQuest</i> <sup>®</sup>
Média	292	645
Desvio padrão	56	79
Variância	3134	6156

De acordo com a **Tabela 4.42**, os resultados encontrados após a simulação dos valores ótimos de cada método, demonstram que a abordagem proposta reduz aproximadamente duas vezes a variância, quando comparado aos valores fornecidos pelo *Optquest*<sup>®</sup>. Considerando que este objeto de estudo proposto por Hurrion (1997), possui uma demanda com distribuição de probabilidade de *Poisson*, diferente da distribuição de probabilidade apresentado no caso de Tubino (2007), é assertivo dizer que o método proposto também fornece valores ótimos mais robustos, com melhores resultados em termos de nível de estoque e nível de serviço.

#### **4.21 Comparação dos resultados dos dois casos da literatura**

Após aplicação do método proposto nos dois casos da literatura, Tubino (2007) e Hurrion (1997), é possível estabelecer algumas comparações:

- a) Em relação ao desenvolvimento do modelo simulado, o primeiro caso demandou mais tempo, uma vez que toda a lógica inicial do sistema puxado foi desenvolvida neste momento e replicada no segundo caso.
- b) Em relação a execução dos experimentos, o segundo caso gastou 50% a mais do tempo para a simulação, uma vez que foram geradas mais combinações após a criação do planejamento experimental.
- c) O segundo caso demonstrou maior dificuldade na obtenção de ajustes estatísticos adequados, provenientes dos modelos analisados de média, variância e EQM.
- d) O primeiro caso mostrou um melhor resultado em relação a robustez, quando se compara os valores antes e após o EQM<sub>P</sub>.

## 5. CONCLUSÕES

Esta tese cumpriu com os objetivos propostos, uma vez que foi possível desenvolver um procedimento baseado em técnicas de otimização robusta e analisar a sua aplicação no contexto de casos da literatura. Destaca-se que os resultados alcançados se contrapõem a estudos da literatura anteriormente mencionados, uma vez que foi possível dimensionar supermercados *kanban* em cenário de variação de demanda e tempos de processamento dos equipamentos, garantindo níveis adequados de estoque e serviço ao cliente.

O conceito de experimentos simulados traz vantagens à tomada de decisão, devendo assim ser mais bem explorado nas organizações, a fim de possibilitar atingir maior competitividade, no que diz respeito a aumento de produtividade, redução de custos e melhoria no atendimento ao cliente.

O uso da modelagem pelo EQM apresentou-se como uma estratégia eficaz e a ideia de fazer a ponderação antes do EQM prioriza a resposta desejada, uma vez que esta pode se apresentar inadequada. Nas abordagens de projeto robusto é comum que exista essa dificuldade com relação à modelagem das equações de média e variância por causa das perturbações de aleatoriedade causadas pelas variáveis de ruído, que são experimentadas e aleatorizadas de maneira proposital para fins de experimentação.

A otimização dual pode utilizar técnicas de otimização de funções multiobjetivo descritas na literatura. Entretanto, no presente trabalho foi considerado o conceito do EQM como o uso da ponderação da média e variância, mais adequado para cenários onde existam muita instabilidade da variância.

O uso do algoritmo GRG para a resolução dos problemas modelados nas equações de otimização também apresentou uma precisão satisfatória dos dados obtidos.

A utilização da abordagem experimental foi fundamental para a pesquisa, uma vez que permitiu a modelagem, análise e otimização dos supermercados de *kanban* e fundamentalmente para avaliar a aplicabilidade do método proposto.

A estratégia de dimensionamento dos experimentos a partir das equações de estoque de segurança, tornou possível equilibrar um *trade-off* que é muito comum nas organizações, ou seja, a dificuldade em garantir o nível de serviço sem aumentar a quantidade de materiais em estoque. Outro ponto importante é que tornou possível avaliar de forma adequada, por meio de exemplos da literatura, a configuração ótima do sistema, sem impactar em custos e disponibilidade de equipamentos parados para tal fim em um cenário real.

A aplicação do método também permitiu verificar a robustez e determinar a quantidade

ótima de *kanban*, para diferentes cenários de demanda, como foi o caso de Tubino (2007) com uma demanda seguindo uma distribuição normal com um desvio padrão de 10% e o caso de Hurrion (1997), com uma demanda seguindo um padrão de distribuição de Poisson.

A comparação dos resultados do método proposto no Capítulo 3 com o otimizador *OptQuest*<sup>®</sup> do software *Arena*<sup>®</sup> proporcionou uma maior confiabilidade no estudo desenvolvido, destarte asseverou que a proposta é robusta e possível de ser implementada.

A abordagem proposta neste artigo é aplicável ao dimensionamento físico dos estoques de supermercados controlados pelo *kanban*, usando o sistema tradicional com cartão ou o conceito do *kanban* eletrônico, sem qualquer interferência na variedade de produtos ou na escala de produção.

## 5.1 Contribuições do trabalho

A contribuição essencial desta pesquisa, como o que foi mostrado no decorrer do trabalho, diz respeito a um procedimento estruturado e diferenciado em relação às técnicas encontradas na literatura para dimensionamento de sistemas *kanban* com valores de demanda e processamento aleatórios. Servindo de apoio à tomada de decisões gerenciais no planejamento e controle de produção, com a finalidade de garantir um elevado nível de atendimento ao cliente com um menor custo de estoque.

As demais contribuições são detalhadas a seguir:

- No que diz respeito a abordagem do planejamento experimental, definido a partir de equações de cálculo do estoque de segurança, levando em consideração diferentes níveis de serviço oferecidos.
- Na consideração da demanda classificada como fator de ruído e as máquinas com tempo de processamento variável, sendo possível executar um planejamento de experimentos mais adequado do que o observado na literatura.
- Na utilização do conceito da estratégia de otimização robusta por réplicas, o que permitiu gerar resultados satisfatórios sem um grande número de experimentos.
- No uso de experimentos simulados como uma alternativa viável na forma de abordagem de otimização para sistemas *kanban*.
- Por conseguinte, que a abordagem proposta no Capítulo 3 para otimização de sistemas *kanban*, seja aplicável em diferentes ambientes industriais, trazendo maior competitividade no que diz respeito as métricas relacionadas ao nível de serviço e nível

de estoque.

- Durante o desenvolvimento dessa pesquisa ao longo dos últimos anos, alguns dos resultados aqui tratados, conjuntamente com outras aplicações e trabalhos paralelos foram realizados, na linha de pesquisa “Controle e Otimização de Processos e Sistemas de Produção”, sendo convertidos em publicação de artigos em periódicos de caráter internacional e anais de congresso nacional, pertinentes à área de atuação. Logo, um pequeno acervo de publicações é relacionado ao final deste documento, sendo considerado como uma relevante contribuição do presente trabalho.
- Ao final, como forma de contribuir na fase de implantação do método proposto, é descrito no Apêndice A uma recomendação de uso, com a determinação dos pré-requisitos necessários.

## 5.2 Sugestões de trabalhos futuros

A partir da proposição da otimização de sistemas *kanban* baseada na aplicação de projeto de parâmetros robustos, as pesquisas futuras devem entrever a evolução e a consolidação da estratégia desenvolvida. Desta forma, as sugestões para estudos carecem de orientação nos seguintes pontos:

- Aplicação do método proposto no ambiente industrial, objetivando os ajustes necessários para a perfeita adequação da proposta em cenário real.
- Testar novos arranjos experimentais e outras técnicas de programação matemática, com o intuito de comparar os resultados com o procedimento proposto nesta tese para dimensionamento da quantidade de *kanban*.
- Avaliar o emprego de outros algoritmos de otimização, com a finalidade de buscar entender o efeito na média e variância.
- Experimentar o método proposto em outros tipos de sistemas *kanban* e analisar o resultado no nível de serviço e nível de estoque.
- Explorar a possibilidade de transformar o método proposto para otimização de sistemas *kanban* em um software, para maior agilidade na tomada de decisão.
- Realizar os experimentos simulados em outros softwares de simulação, como forma de comparação na precisão dos dados obtidos.
- Aplicação do método proposto em outros ambientes empresariais, tais como o agronegócio, serviços e parte administrativa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULMALEK, F.A., RAJGOPAL, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. *Int. J. Production Economics* 107 (2007) 223–236.
- AGHAJANI, M.; KERAMATI, A., MOGHADAM RT; MIRJAVADI SS. A mathematical programming model for cellular manufacturing system controlled by *kanban* with rework consideration. *Int J Adv Manuf Technol* 83:1377–1394. 2016.
- AGRAHARI, R. S.; DANGLE, P. A.; CHANDRATRE, K. V. Implementation of 5S Methodology in the Small Scale Industry: a Case Study. *International Journal of Advance Research and Innovation*. Volume 3, Issue 1 (2015) 130-137.
- AHMAD, M. F.; AZIATI, A. H. N.; BON, A. T. B.; NGADIMAN, Y.; CHAN, S. W. Review Relationship TPM as Mediator between TQM and Business Performance.
- AHMED, I. S. SULTANA, I. A state of art review on optimization techniques in just in time. *Uncertain Supply Chain Management* 2 (2014) 15–26.
- AHUJA, I.P.S.; KHAMBA, J. S. Total productive maintenance: literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management* Vol. 25 No. 7, 2008 pp. 709-756.
- AL-BAIK, O.; MILLER, J. The *kanban* approach, between agility and leanness: a systematic review. *Empir Software Eng. Springer Science+Business Media*, 2014.
- ALLEN, T. T. Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-based Modeling – Voting System, Health Care, Military, and Manufacturing. Springer-Verlag London Limited 2011.
- ALMEIDA, F. A.; GOMES, G. F.; PAULA, V. R.; CORREA, J. E.; PAIVA, A. P.; GOMES, J. H. F.; TURRIONI, J. B. A Weighted Mean Square Error Approach to the Robust Optimization of the Surface Roughness in an AISI 12L14 Free-Machining Steel-Turning Process. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 64(2018)3, 147-156.
- ÅHLSTRÖM, P. Wiley Encyclopedia of Management, edited by Professor Sir Cary L Cooper. 2014. John Wiley & Sons, Ltd.
- AMIRJABBARI, B.; BHUIYAN, N. Determining supply chain safety stock level and location. *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 7, No. 1, pp.42–71 (2014).
- AOMAR, R. A. Handling multi-lean measures with simulation and simulated annealing. *Journal of the Franklin Institute* 348 (2011) 1506–1522.
- ARAZ, O. U.; ESKI, O.; ARAZ, C. Determining the parameters of dual-card *kanban* system: an integrated multicriteria and artificial neural network methodology. *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 38:965–977. DOI 10.1007/s00170-007-1138-1.
- ARDAKANI, M. K.; NOOROSSANA, R. A new optimization criterion for robust parameter design — the case of target is best. *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 38:851–859.

ARDAKANI, M. K. The Impacts of Errors in Factor Levels on Robust Parameter Design Optimization. *Quality and Reliability Engineering International*. 2015.

ASHRAF, R. B.; RASHID, M.; RASHID, A. R. M. H. Implementation of 5S Methodology in a Food & Beverage Industry: A Case Study. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume: 04 Issue: 03 | Mar -2017.

AYTUG, H.; DOGAN, C. A.; BEZMEZ, G. Determining the Number of *Kanbans*: A Simulation Metamodeling Approach. *Simulation* 67:1; 23-32. 1996. Simulation Councils, Inc.

AZADEH, A., MAGHSOUDI, A. Optimization of production systems through integration of computer simulation, design of experiment, and Tabu search: the case of a large steelmaking workshop. *Int J Adv Manuf Technol* (2010) 48:785–800.

AZOUS, N.; PIERREVAL, H. Adaptive smart card-based pull control systems in context-aware manufacturing systems: Training a neural network through multi-objective simulation optimization. *Applied Soft Computing Journal* 75 (2019) 46–57.

BARLOW, E. et al. A mixed-method optimisation and simulation framework for supporting logistical decisions during offshore wind farm installations. *European Journal of Operational Research*, v. 264, n. 3, p. 894–906, 2018.

BATAINEH, O.; HAWARI, T.; ALSHRAIDEH, H.; DALAH, D. A sequential TPM-based scheme for improving production effectiveness presented with a case study. *Journal of Quality in Maintenance*. 2017. Engineering

BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. *Discrete-Event System Simulation*. Fourth Edition. Pearson/Prentice Hall.

BEKKER, J. VIVIERS, L. Using computer simulation to determine operations policies for a mechanized car park. *Simulation Modelling Practice and Theory* 16 (2008) 613–625.

BEZZERRA, M. A.; SANTELLI, R. E.; OLIVEIRA, E. P.; VILLAR, L. S.; ESCALEIRA, L. A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta* 76 (2008) 965–977.

BHAMU, J.; SANGWAN, K. S. Lean manufacturing: literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management*. Vol. 34 No. 7, 2014.

BIDARRA, T.; GODINA, R.; MATIAS, J. C. O.; AZEVEDO, S. G. SMED Methodology Implementation in an Automotive Industry Using a Case Study Method. *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM)*, Vol. 9 No 1, 2018, pp. 1-16.

BRAGA, W. L. M; NAVES, F. L.; GOMES, J. H. F. Optimization of Kanban systems using robust parameter design: a case of study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2020) 106:1365–1374.

BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M.; GALLO, M.; MARRAZZINI, L. Lean manufacturing tool in engineer-to-order environment: Project cost deployment. *International Journal of Production*

Research, 2018.

BRYMAN, A. Research Methods and Organization Studies. Taylor & Francis e-Library, 2005.

BRENNEMAN, W.; MYERS, W. Robust Parameter Design with Categorical Noise Variables. Journal of Quality Technology. Vol. 35, n° 4, October 2003.

BOX, G. E. P; DRAPER, N. R. Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses. 2007 John Wiley & Sons.

CARNERUD, D.; JACA, C.; BÄCKSTRÖM, I. Kaizen and continuous improvement – trends and patterns over 30 years. The TQM Journal Emerald Publishing Limited 1754-2731. 2018.

CHAOUIYA, C.; LIBEROPOULOS, G.; DALLERY, Y. The extended *kanban* control system for production coordination of assembly manufacturing systems. IIE Transactions (2000) 32, 999-1012.

CHATTERJEE, K.; DROSOU, K.; GEORGIU, S. D.; KOUKOUVINOS, C. Response modelling approach to robust parameter design methodology using supersaturated designs. JOURNAL OF QUALITY TECHNOLOGY, 2018, Vol. 50, n° 1, 66-75.

CHENG, Y.; CHEN, K.; SUN, H.; ZHANG, Y. TAO, F. Data and Knowledge Mining with Big Data towards Smart Production. Journal of Industrial Information Integration, 9, 1-13. 2017.

CHIARINI, A.; BRUNETTI, F. What really matters for a successful implementation of Lean production? A multiple linear regression model based on European manufacturing companies. PRODUCTION PLANNING & CONTROL. 2019.

CHIARINI, A.; BACCARANI, C.; MASCHERPA, V. Lean production, Toyota Production System and Kaizen philosophy: A conceptual analysis from the perspective of Zen Buddhism. The TQM Journal. 2017

CHOI, B. K.; KANG, D. Modeling and Simulation of Discrete-Event Systems. John Wiley & Sons. 2013.

CHUNG, C. Simulation modeling handbook: a practical approach. CRC PRESS LLC, 2004. The TQM Journal Emerald Publishing Limited. 2018. 1754-2731

CHUNG, C. H. The Kaizen Wheel – an integrated philosophical foundation for total continuous improvement.

CHWIF, L. Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal. 1999. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CORNELL, J. Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture. 3° ed. New York: John Wiley & Sons, 2002, 643 p.

CORONADO, M., SEGADÃES, A.M., ANDRÉS. A. Combining mixture design of experiments with phase diagrams in the evaluation of structural ceramics containing foundry by-products. *Applied Clay Science* xxx (2014) xxx–xxx.

COSTA, C. M., MARTA, M. M., BENEDITO, E., COROMINAS, A. A review of mathematical programming models for strategic capacity planning in manufacturing. *Int. J. Production Economics* 153 (2014) 66-85.

DAL FORNO, A. J.; PEREIRA, F. A.; FORCELLINI, F. A.; KIPPER, L. M. Value Stream Mapping: a study about the problems and challenges found in the literature from the past 15 years about application of Lean tools. *Int J Adv Manuf Technol* (2014) 72:779–790.

DAVIS, W. J.; STUBITZ, S. J. Configuring a *Kanban* system using a discrete optimization of multiple stochastic responses. *IST. J. PKOI). KES.*, 1987, VOL. 25, NO. 5, 721-740.

DADASHNEJAD, A. A.; VALMOHAMMADI, C. Investigating the effect of value stream mapping on operational losses: a case study. *Journal of Engineering, Design and Technology*. Emerald Publishing Limited 1726-0531, 2017.

DALLERY, Y.; LIBEROPOULOS, G. Extended *kanban* control system: combining *kanban* and base stock. *IIE Transactions* (2000) 32, 369-386.

DANESE, P.; MANFÈ, P.; ROMANO, P. A Systematic Literature Review on Recent Lean Research: State-of-the-art and Future Directions. *International Journal of Management Reviews*, Vol. 00, 1–27 (2017).

DENGIZ, B.; ALABAS, C. Simulation Optimization Using Tabu Search. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*.

DIBIA, I. K., DHAKAL, H. N. Lean “Leadership People Process Outcome” (LPPO) implementation model. *Journal of Manufacturing Technology Management* Vol. 25 No. 5, 2014 pp. 694-711.

DRESCH, A.; VEIT, D. R.; LIMA, P. N.; LACERDA, D. P.; COLLATTO, D. C. Inducing Brazilian manufacturing SMEs productivity with Lean tools. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2017.

EBNER, J.; YOUNG, P.; GERAGHTY, J. Intelligent Self-Designing Production Control Strategy: Dynamic Allocation Hybrid Pull-Type Mechanism Applicable to Closed-Loop Supply Chains. *Computers & Industrial Engineering*. 2019.

EMILIANI, M. L. Standardized work for executive leadership. *Leadership & Organization Development Journal* Vol. 29 No. 1, 2008 pp. 24-46 © Emerald Group Publishing Limited 0143-7739.

ENTEZAMINIA, A.; HEIDARI, M.; RAHMANI, D. Robust aggregate production planning in a green supply chain under uncertainty considering reverse logistics: a case study. *Int J Adv Manuf Technol*. 2016.

EVINS, R., POINTER, P., VAIDYANATHAN, R., BURGESS, S. A case study exploring

regulated energy use in domestic buildings using design of- experiments and multi-objective optimization. *Building and Environment* 54 (2012) 126-136.

FÁBREGAS, A.; ROJAS, R. W.; ARBOLEDA, C. P.; HERRERA, A. M. Simulación de sistema productivos com RS *Arena*<sup>®</sup>. Ediciones Uninorte, 2003.

FANG, Y.; FEI, J. OPTIMAL DESIGN OF FLEXIBLE *KANBAN* SYSTEM FOR A MULTI-STAGE MANUFACTURING LINE. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. Volume 10, Number 5, October 2014.

FIDALGO, L. V.; ESCUDERO, M. M. E.; SOMONTE, M. D. Applying kaizen to the schedule in a concurrent environment. *PRODUCTION PLANNING & CONTROL*. 2019.

FUKUKAWA, T.; HONG, S. C. The determination of the optimal number of *kanbans* in a just-in-time production system. *Computers ind. Engng* Vol. 24, No. 4, pp. 551-559, 1993.

GAAFAR, L.; NASSEF, A. O.; ALY, A. I. Fixed-quantity dynamics lot sizing using simulated annealing. *Int J Adv Manuf Technol* (2009) 41:122–131.

GAPP, R.; FISHER, R.; KOBAYASHI, K. Implementing 5S within a Japanese context: an integrated management system. *Management Decision* Vol. 46 No. 4, 2008 pp. 565-57.

GAURY, E. G. A; PIERREVAL, H.; KLEIJNEN, J. P. C. An evolutionary approach to select a pull system among *Kanban*, Conwip and Hybrid. *Journal of Intelligent Manufacturing* (2000) 11, 157-167.

GOMES, J. H. F.; PAIVA, A. P.; COSTA, S. C.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, E. J. Weighted Multivariate Mean Square Error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings. *European Journal of Operational Research* 226 (2013) 522–535

GOMES, J. H. F. Método de polinômios canônicos de misturas para otimização multi-objetivo. Primeira tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, julho de 2013.

GONG, Q., YANG, Y. WANG, S. Information and decision-making delays in MRP, *kanban*, and CONWIP. *Int. J. Production Economics* 156 (2014) 208–213.

GOODARZI, A. H.; ZEGORDI, S. H. Vehicle routing problem in a *kanban* controlled supply chain system considering cross-docking strategy. *Operational Research*. 2018.

GRUBBSTROM, R.W., TANG, O. The space of solution alternatives in the optimal lot sizing problem a for general assembly systems applying MRP Theory. *Int. J. Production Economics* 140 (2012) 765–777.

GUNERI, A. F.; KUZU, A.; GUMUS, A. T. Flexible *kanbans* to enhance volume flexibility in a JIT environment: a simulation based comparison via ANNs. *International Journal of Production Research*. Vol. 47, No. 24, 15 December 2009, 6807–6819.

GUPTA, S. M.; TURKI, Y. A. Y.; PERRY, R. F. Flexible *kanban* system. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 19 No. 10, 1999.

HABIDIN, N. F.; HASHIM, S.; FUZI, N. M.; SALLEH, M. I. "Total productive maintenance, kaizen event, and performance". *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2017.

HALL, J. D.; ROYCE, O.; USHER, J. M. Using Evolution Strategies and Simulation to Optimize a Pull Production System. *Journal of Materials Processing Technology* 61 (1996) 47-52.

HAO, Q. SHEN, W. Implementing a hybrid simulation model for a *kanban*-based material handling system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (2008) 635–646.

HAILU, H.; MENGSTU, S.; HAILU, T. An integrated continuous improvement model of TPM, TPS and TQM for boosting profitability of manufacturing industries: An innovative model & guideline. *Management Science Letters* 8 (2018) 33–50.

HAMMARBERG, M.; SUNDÉN, J. *Kanban in action*. Manning Publications Co. 2014.

HASLETT, T.; OSBORNE, C. Local rules: their application in a *kanban* system. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 20 N° 9, 2000, pp. 1078-1092.

HINKELMANN, K.; KEMPTHORNE, O. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons. 2008.

HENDERSON, B. D. *The logic of kanban*. Emerald Backfiles 2007.

HOU, T. H., HU, W. C. An integrated MOGA approach to determine the Pareto-optimal *kanban* number and size for a JIT system. *Expert Systems with Applications* 38 (2011) 5912–5918.

HOUTI, M.; ABBADI, L. E.; ABOUABDELLAH, A. *E-Kanban* the new generation of traditional *Kanban* system, and the impact of its implementation in the enterprise. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Rabat, Morocco, April 11-13, 2017*.

HU, S.; YI, W. *Simulation and Optimization of Kanban System for Steel Rolling*. *Intelligent Systems and Applications, 2009. ISA 2009. International Workshop on*.

HUSSEINI, S. M. M.; O'BRIEN, C. O.; HOSSEINI, S. T. A method to enhance volume flexibility in JIT production control. *Int. J. Production Economics* 104 (2006) 653–665.

IMAI, M. *Gemba Kaizen: A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

IRELAND, F.; DALE, B. G. A study of total productive maintenance implementation. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 7 No. 3, 2001, pp. 183-191. MCB University.

ISMAIL, M. Z. M.; ZAINAL, A. H.; KASIM, N. I.; MUKHTAR, M. A. F. M. A mini review: Lean management tools in assembly line at automotive industry. *1st International Postgraduate*

Conference on Mechanical Engineering (IPCME 2018).

JALAL, M.; GOHARZAY, M. Cuckoo search algorithm for applied structural and design optimization: float system for experimental setups. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2018.

JASTI, N. V. K.; KODALI, R. Lean production: literature review and trends. *International Journal of Production Research*, 2014.

JERBI, A.; AMMAR, A.; RID, M.; SALAH, B. Performance optimization of a flexible manufacturing system using simulation: the Taguchi method versus OptQuest®.

KAJTNA, J., KRAJNC, M. Design of experiments' analysis in study of solventless UV crosslinkable acrylic pressure sensitive adhesives. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 41 (2013) 152–159.

KE, G.; CHEN, R. S.; CHEN, Y. C.; WANG, S.; ZHANG, X. Using ant colony optimisation for improving the execution of material requirements planning for smart manufacturing. *ENTERPRISE INFORMATION SYSTEMS*, TAYLOR & FRANCIS. 2020.

KEHR, T. W.; PROCTOR, M. D. People Pillars: Re-structuring the Toyota Production System (TPS) House Based on Inadequacies Revealed During the Automotive Recall Crisis. *Quality and Reliability Engineering International*. 2016.

KHURI, A. I; MUKHOPADHYAY, S. Response surface methodology. *WIREs Computational Statistics*. Volume 2, March/April 2010. 2010 John Wiley & Son s, Inc.

KIM, H., MCGINNIS, L., ZHOU, C. On fidelity and model selection for discrete event simulation. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International* (2012) 88(1) 97–109.

KIM, I.; TANG, C. S. Lead time and response time in a pull production control system. *European Journal of Operational Research* 101 (1997) 474—485.

KIM, B. S.; CHUNG, B. D. Affinely Adjustable Robust Model for Multiperiod Production Planning Under Uncertainty. *EEE TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT*. 2017.

KING, P. L.; KING, J. S. Value Stream Mapping for the Process Industries – Creating a Roadmap for Lean Transformation. Taylor & Francis Group, LLC CRC Press. 2015.

KLUG, F. A hybrid push/pull design of *kanban* systems during production ramp-up phase. *Int. J. Services and Operations Management*, Vol. 24, No. 3, 2016.

KOCHEL, P.; NIELANDER, U. *Kanban* optimization by simulation and evolution. *PRODUCTION PLANNING & CONTROL*, 2002, VOL. 13, NO. 8, 725–734.

KÖKSOY, O. A nonlinear programming solution to robust multi-response quality problem. *Applied Mathematics and Computation* 196 (2008) 603–612.

KÖKSOY, O.; YALCINOZ, T.; Mean Square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm. *Applied Mathematics and Computation* 175 (2006) 1657–1674

KÖKSOY, O. e DOGANAKSOY, N. Joint optimization of mean and standard deviation using response surface methods. *Journal of Quality Technology*, v. 35, n. 3, p. 237-334, 2003.

KRAJEWSKI, L. J; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. *Operations Management*, 9ª. Edição. Pearson Prentice Hall, 2009.

LAGE JUNIOR, M.; GODINHO FILHO, M. Variations of the *kanban* system: Literature review and classification. *Int. J. Production Economics* 125 (2010) 13–21.

LANTZ, A.; HANSEN, N.; ANTONI, C. Participative work design in lean production  
A strategy for dissolving the paradox between standardized work and team proactivity by stimulating team learning?

LAVOIE, P., GHARBI, A., KENEÉ, J. P. A comparative study of pull control mechanisms for unreliable homogenous transfer lines. *Int. J. Production Economics* 124 (2010) 241–251.

LAVOIE, P.; KENNÉ, J. P.; GHARBI, A. Optimization of production control policies in failure-prone homogenous transfer lines. *IIE Transactions* (2009) 41, 209–222.

LEME, R., PAIVA, A. P., SANTOS, P. E. S. S., BALESTRASSI, P. P., GALVÃO, L. L. Design of experiments applied to environmental variables analysis in electricity utilities efficiency: The Brazilian case. *Energy Economics* 45 (2014) 111–119.

LEONARDO, D. G.; SERENO, B.; SILVA, D. S. A.; SAMPAIO, M.; MASSOTE, A. A. Implementation of hybrid Kanban-CONWIP system: a case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 28 No. 6, 2017.

LI, J. W. Improving the performance of job shop manufacturing with demand-pull production control by reducing set-up/processing time variability. *Int. J. Production Economics* 84 (2003) 255–270.

LIKER, J. K.; MEIER, D. *The Toyota Way Field Book: A practical Guide for implementing Toyota's 4P's*. New York: Mc Graw Hill. 2006.

LIMMUN, W.; CHOMTEE, B.; BORKOWSKI, J. The construction of robust mixture-process experimental designs via genetic algorithm. *Qual Reliab Engng Int.* 2019;1–21.

LOULY, M.A., DOLGUI, A. Optimal MRP parameters for a single item inventory with random replenishment lead time, POQ policy and service level constraint. *Int. J. Production Economics* 143(2013)35–40.

LOCHER, D. A. *Value Stream Mapping for Lean Development – A How-To Guide for Streamlining Time to Market*. Taylor & Francis Group. 2008.

LOZANO, J. C.; DIEZ, S.; MARTÍNEZ, E.; JIMÉNEZ, E.; BLANCO, J. Centerline-SMED integration for machine changeovers improvement in food industry. *PRODUCTION*

PLANNING & CONTROL. 2019.

LUNESU, M. I. Process Software Simulation Model of Lean *kanban* approach. Tesi doctoral subjected to cagliari University for obtaining the title of PHD in electronics and computer engineering. April 2013.

MACPHERSON, W. G.; LOCKHART, J. C.; KAVAN, H.; IAQUINTO, A. Kaizen: a Japanese philosophy and system for business excellence. VOL. 36 NO. 5 2015, pp. 3-9.

MÁCSAY, V.; BÁNYAI, T. TOYOTA PRODUCTION SYSTEM IN MILKRUN BASED IN-PLANT SUPPLY. Journal of Production Engineering. 2017.

MAGLARAS, L. A. Coupling of the synchronization stations of an Extended *Kanban* system. EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks And Intelligent Systems. 2015.

MANZINI, R.; BHUIYAN, B; FERRARI, E. Weibull vs. normal distribution of demand to determine the safety stock level when using the continuous-review (S, s) model without backlogs. Int. J. Logistics Systems and Management, Vol. 24, No. 3, 2016.

MARTIN, T. D.; BELL, J. T. New Horizons in Standardized Work – Techniques for Manufacturing and Business Process Improvement. Productivity Press Taylor & Francis Group. 2011.

MARTIN, T. D.; BELL, J. T.; MARTIN, S. A. The Standardized Work – Field Guide. CRC Press Taylor & Francis Group. 2017.

MELEGA, G. M.; ARAUJO, S. A.; JANS, R. Classification and literature review of integrated lot-sizing and cutting stock problems. European Journal of Operational Research 271 (2018) 1-19.

MICHELS, B. T. Application of Shingo's Minute Exchange of Dies (SMED) Methodology to Reduce Punch Press Changeover Times at Krueger International. A Research Paper Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Master of Science Degree in Technology Management. The Graduate School University of Wisconsin-Stout. May, 2007.

MIGUEL, P. A.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; LIMA, E. P.; TURRIONI, J. B.; HO, L. L.; MORABITO, R.; MARTINS, R. A.; SOUSA, R.; COSTA, S. E. G.; PUREZA, V. Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. Elsevier: ABEPRO, 2012.

MIRZAD, W. K.; ESEONU, C. A Conceptual Map of the Lean Nomenclature: Comparing Expert Classification to the Lean Literature. Engineering Management Journal Vol. 27 No. 4 December 2015.

MIRZAPOUR, S.M.J., HASHEM, A., BABOLI, A., SAZVAR, Z. A stochastic aggregate production planning model in a green supply chain: Considering flexible lead times, nonlinear purchase and shortage cost functions. European Journal of operation Research 230 (2013) 26-41.

MOEENI, F.; SANCHES, S. M.; VAKHARIA, A. J. A robust design methodology for *Kanban* system design. *int. j. prod. res.*, 1997, vol. 35, no. 10, 2821- 2838.

MONDEN, Y. *Toyota Production System: An integrated approach to just in time*. 4th. ed. Taylor & Francis Group, 2012.

MONDEN, Y. *Toyota production system: practical approach to production management*. Engineering & Management Press, 1983.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 2012 John Wiley & Sons.

MONTGOMERY, D. C., MYERS, R. H., COOK, C. M. A. *Response Surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. 3<sup>o</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009, 680 p.

MORIONES, A. B.; RINTADO, A. B.; CERIO, J. M. D. 5S use in manufacturing plants: contextual factors and impact on operating performance. *International Journal of Quality & Reliability Management* Vol. 27 No. 2, 2010 pp. 217-230.

MOUAKAY, M.; BENABBOU, L.; BERRADO, A. DMADV approach to evaluate the Adaptive *Kanban* performance for inventory management process: the case of Moroccan public pharmaceutical supply chain. *SUPPLY CHAIN FORUM: AN INTERNATIONAL JOURNAL*. 2018.

MOXHAM, C.; GREATBANKS, R. Prerequisites for the implementation of the SMED methodology. A study in a textile processing environment. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 18 No. 4, 2001, pp. 404-414.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C; COOK, C. M. A. *Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 2009 John Wiley & Sons.

NAKAJIMA, S. *Introduction to Tpm: Total Productive Maintenance*. English Translation copyright<sup>®</sup> 1988. Productivity Press, Inc.

NASH, M. A.; POLING, S. R. *Mapping. The Total Value Stream: A comprehensive Guide for Production and Transactional Processes*. Taylor & Francis Group, LLC. 2008.

NING, J. H., ZHOU, Y. D., FANG, K. T. Discrepancy for uniform design of experiments with mixtures. *Journal of Statistical Planning and Inference* 141 (2011) 1487–1496.

OHNO, K.; NAKASHIMA, K.; KOJIMA, M. Optimal numbers of two kinds of *kanbans* in a JIT production system. *INT. 1. PROD. RES.*, 1995, VOL. 33, No.5, 1387-1401.

OLIVEIRA, L. G.; PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P.; FERREIRA, J. R.; COSTA, S. C.; CAMPOS, P. H. S. Response surface methodology for advanced manufacturing technology optimization: theoretical fundamentals, practical guidelines, and survey literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019.

PAIVA, A. P.; PAIVA, E. J.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P.; COSTAS, S. C. A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. *Int J Adv*

Manuf Technol (2009) 43:631–643.

PANAYIOTOU, C. G.; CASSANDRAS, C. G. Optimization of *kanban*-based manufacturing systems. *Automatic* 35 (1999) 1521-1533.

PANIZZOLO, R. Applying the lessons learned from 27 lean manufacturers. The relevance of relationships management. *Int. J. Production Economics* 55 (1998) 223-240.

PARIS, J. L.; PIERREVAL, H. A distributed evolutionary simulation optimization approach for the configuration of multiproduct *kanban* systems. *INT. J. COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING*, 2001, VOL. 14, NO. 5, 421–430.

PATCHONG, A. *Implementing Standardized Work: Writing Standardized Work Forms*. Boca Raton: CRC Press, 2013.

PEREZ, R. Calculating Optimal Inventory Size. *Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two*, Vol. 3, Iss. 1 [2010], Art. 30

PÉREZ, F.; TORRES, F. An integrated production-inventory model for deteriorating items to evaluate JIT purchasing alliances. *International Journal of Industrial Engineering Computations* 10 (2019) 51–66.

PEREIRA, R. B. D.; SILVA, L. A. S.; LAURO, C. H.; BRANDÃO, L. C.; FERREIRA, J. R.; DAVIM, P. Multi-objective robust design of helical milling hole quality on AISI H13 hardened steel by normalized normal constraint coupled with robust parameter design. *Applied Soft Computing Journal* (2018).

PIPLANI, R.; ANG, A. W. H. Performance comparison of multiple product *kanban* control systems. *International Journal of Production Research*, 2017.

POKSINSKA, B.; SWARTLING, D.; DROTZ, E. *The daily work of Lean leaders – lessons from manufacturing and healthcare*. Total Quality Management, 2013.

POLITIS, S. N.; COLOMBO, P.; COLOMBO, G.; REKKAS, D. M. Design of experiments (DoE) in pharmaceutical development. *DRUG DEVELOPMENT AND INDUSTRIAL PHARMACY*, 2017. VOL. 43, NO. 6, 889–901.

PRICE, W.; GRAVEL, M.; NSAKANDA, A. L. A review of optimization models of *Kanban*-based production systems. *European Journal of Operational Research* 75 (1994) 1-12 North-Holland.

PRASZKIEWICZ, K. Machine Learning in Smed. *Journal of Machine Engineering*, 2018, Vol. 18, No. 2, 31-40.

RANDHAWA, J. S.; AHUJA, I. S. 5S implementation methodologies: literature review and directions. *Int. J. Productivity and Quality Management*, Vol. 20, No. 1, 2017.

RAJU, V. R. S. R. systematic literature review of Lean Six Sigma in different industries", *International Journal of Lean Six Sigma*, Vol. 7 Iss 4 pp. 2016.

RAZAFUAD, R.; RIDWAN, A. Y.; SANTOSA, B. Development of e -*Kanban* Application Using Stock Stock-Needs Rule Prioritizing Policy to Reduce 0-Pick for Pharmaceutical Warehousing. 2018 6th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT).

REZA, J. R.; ALCARAZ, J. L. G.; SOSA, L. A.; FONG, J. R. M.; MURO, J. C. S. D.; FERÁNDEZ, J. B. The Role of Managerial Commitment and TPM Implementation Strategies in Productivity Benefits. *Appl. Sci.* 2018, 8, 1153.

ROBINSON, S. *Simulation: The Practice of Model Development and use.* John Wiley & Sons Ltd., 2004.

ROBINSON, S.; BROOKS, R.; KOTIADIS, K.; ZEE, D. J. V. D. CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.

ROSSETTI, M. D. *Simulation modeling and Arena®.* 2ª. Edição. John Wiley & Sons, 2016.

ROCWELL SOFTWARE, 2009. *OptQuest® for Arena® USER´S GUIDE,* Supersedes Publication ARENAO-UM001 E-EN-P.

ROTHER, M.; SHOOK, J. *Learning to see – value stream mapping to add value and eliminate muda.* Lean Enterprise Institute. Bookline, Massachusetts, US. Version 1.2. 1999

SAHOO, S. Assessment of TPM and TQM practices on business performance: a multi-sector analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering.* 2018.

SCOPUS. Disponível em <https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus>. Acesso em 10 de janeiro de 2020.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference.*

SETH, D.; SETH, N.; DHARIWAL, P. Application of value stream mapping (VSM) for lean and cycle time reduction in complex production environments: a case study.

SHAHABUDEEN, P.; GOPINATH, R.; KRISHNAIAH, K. Design of bi-criteria *kanban* system using simulated annealing technique. *Computers & Industrial Engineering* 41 (2002) 355-370.

SHINGO, S. *A Revolution in Manufacturing: The SMED System.* Cambridge: Productivity Press, 1985.

SHINGO, S. *A Study of the Toyota production system from an industrial engineering.* English retranslation copyright 1989, Productivity Inc.

SILVA, P. A. P. Projeto de parâmetros robustos para um sistema de refrigeração utilizando arranjo combinado de superfície de resposta. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Produção. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2016.

SINGH, J.; SINGH, H.; SINGH, I. SMED for quick changeover in manufacturing industry – a case study. *An International Journal*. Vol. 25 No. 7, 2018, pp. 2065-2088.

SRIKANTH, O.; RAJU, A. V. S. R.; MURTY, B.V. R. Evaluation of Manufacturing Process Performance by CONWIP Hybridization of Pull Controlled Production Systems. *MATEC Web of Conferences* 144, 05006 (2018).

STAATS, B.R., BRUNNER, D.J., UPTON, D.M. Lean principles, learning, and knowledge work: Evidence from a software services provider. *Journal of Operations Management* 29 (2011) 376–390.

STADNICKA, D.; LITWIN, P. Value Stream Mapping and System Dynamics Integration for Manufacturing Line Modelling and Analysis. *International Journal of Production Economics*. 2018

SUNDAR, R.; BALAJI, A. N.; SATHEESHKUMAR, R. M. A Review on Lean Manufacturing Implementation Techniques. 12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT, GCMM 2014. *Procedia Engineering* 97 (2014) 1875 – 1885.

TARDIF, V.; MAASEIDVAAG; L.; An adaptive approach to controlling *kanban* systems. *European Journal of Operational Research* 132 (2001) 411-424.

TALIBI, Z., H. B. EL HAOUZI, AND A. THOMAS. “The Relevance Study of Adaptive *Kanban* in a Multicriteria Constraints Context Using Data-Driven Simulation Method.” In *Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Proceedings of 2017*.

TUBINO, D. F. *Planejamento e Controle da Produção: Teoria e prática*. São Paulo: Atlas, 2007.

URLU, B.; ERKIP, K. N. Safety stock placement for serial systems under supply process uncertainty. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2020.

VILLAMIZAR, A. M.; SANTOS, J.; SABATER, J. J. G.; LLEO, A.; GRAU, P. Green value stream mapping approach to improving productivity and environmental performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*. Emerald Publishing Limited 1741-0401, 2018.

VINING, G. G.; MYERS, R. H. Combining Taguchi and response surface philosophies: a dual response approach. *J Quality Technol* 1990, 22:38–45.

VOLLMAN, T. E.; BERRY, W. L. e WHYBARK, D. C. *Manufacturing Planning and Control Systems*, Dow Jones-Irwin, Homewood, IL, 1990.

XANTHOPOULOS A. S.; KOULOURIOTIS DE. Multi-objective optimization of production control mechanisms for multi-stage serial manufacturing-inventory systems. *Int J Adv Manuf Technol* 74(9–12):1507–1519. 2016.

XANTHOPOULOS A. S.; LOANNIDIS, S.; KOULOURIOTIS, D. E. Optimal adaptive *Kanban*-type production control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018) 97:2887–2905.

WAINER, G. A. Discret-Event Modeling and Simulation – A Practitioner’s Approach. Taylor & Francis Group. 2009.

WAINER, G. A; MOSTEMAN, P. J. Discrete-event modeling and simulation: Theory and applications. CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.

WANG, H., WANG, H.P. Optimum number of *kanbans* between two adjacent workstations in a JIT system. International Journal of Production Economics, 22 (1991) 179-188.

WANG, S.; SARKER, B. R. Optimal models for a multi-stage supply chain system controlled by *kanban* under just-in-time philosophy. European Journal of Operational Research 172 (2006) 179–200.

WANG, J.; GUO, Y.; PAN, J. Grade-efficiency modeling and robust parameter design for gas solids cyclone separators. Ptec (2018).

WATERS, D. Inventory Control and Management. 2nd ed. John Wiley & Sons Inc., 2003.

WITT, C. M.; SANDOE, K.; DUNLAP, J. C. Decision Sciences Journal of Innovative Education Volume 16 Number 4.

WOMACK, JAMES P.; JONES, D. T.; ROOS, D.; The machine that changed the world, Macmilkin Publishing Cumpany, 1990.

YALAOUI, A., CHAABI, K., YALAOUI, F. Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. Information Sciences 278 (2014) 841–861.

ZEYBEK, M.; KOKSÖY, O. A Fuzzy Modelling Approach to Robust Design via Loss Functions. Turkish Journal of Forecasting vol. 01 no. 2 (2017) pp. 40-45.

## ANEXOS

**ANEXO A** – Planilha para otimização das respostas no passo 5 e 6 (Caso Tubino) do método experimental

### Modelos reduzidos

	$\mu$	$\sigma^2$	EQM
<b>Constante</b>	80,980	1706,730	8521,220
<b>M151</b>	3,111	452,790	500,200
<b>M191</b>	-22,426	-1799,230	-5517,190
<b>M1074</b>	-4,961	-120,310	-2724,460
<b>M151*M151</b>	-9,578	0,000	-929,590
<b>M191*M191</b>	0,000	846,430	1718,160
<b>M1074*M1074</b>	8,524	295,080	0,000
<b>M151*M191</b>	10,825	-357,400	1503,850
<b>M151*M1074</b>	8,125	0,000	1860,770
<b>M191*M1074</b>	11,325	948,470	3129,320

### Resultados

	$\mu$	$\sigma^2$	EQM
<b>Modelo</b>	<b>28,49</b>	<b>1286,09</b>	<b>0,01</b>
<b>Alvos</b>	<b>21,60</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>R<sup>2</sup> (adj.)</b>	54,76%	76,59%	80,44%

### Variáveis

1333,59

	<b>M151</b>	<b>M191</b>	<b>M1074</b>
<b>Coded</b>	-1,159	1,074	0,576
<b>Uncoded</b>	<b>251</b>	<b>99</b>	<b>14</b>

### Função objetivo

**F.O.:**     **0,01**

### Restrições

$x^T x$ :     2,829 <= 2,829

## ANEXO B – Planilha para otimização dos pesos no passo 8 (Caso Tubino) do método experimental

### Modelos reduzidos

TERMO	EQMP
W1	1477,830
W2	583,050
W1xW2	-368,070
W1xW2 (-)	1631,630

### Variáveis

	W1	W2
Coded	0,11790	0,88210

### Função objetivo

**F.O.:** 520,59

### Restrições

**LIMITES:** 0,000 <=> 1,000  
**SOMATÓRIO:** 1,000 = 1,000

## ANEXO C – Planilha para otimização das respostas no passo 8 (Caso Tubino) do método experimental

### Modelos reduzidos

	$\mu$	$\sigma^2$
<b>Constante</b>	80,980	1706,730
<b>M151</b>	3,111	452,790
<b>M191</b>	-22,426	-1799,230
<b>M1074</b>	-4,961	-120,310
<b>M151*M151</b>	-9,578	0,000
<b>M191*M191</b>	0,000	846,430
<b>M1074*M1074</b>	8,524	295,080
<b>M151*M191</b>	10,825	-357,400
<b>M151*M1074</b>	8,125	0,000
<b>M191*M1074</b>	11,325	948,470

EQM		EQM P
8521,220		1863,770
500,200	A	388,860
-5517,190	B	-1909,110
-2724,460	C	-180,650
-929,590	AA	
1718,160	BB	812,010
0,000	CC	402,000
1503,850	AB	
1860,770	AC	419,300
3129,320	BC	1035,020

### Resultados

	$\mu$	$\sigma^2$
<b>Modelo</b>	<b>43,52</b>	<b>70,46</b>
<b>Alvos</b>	<b>21,60</b>	<b>0,01</b>
<b>R<sup>2</sup> (adj.)</b>	54,76%	76,59%

EQM
<b>2593,68</b>
<b>0,01</b>
80,44%

EQMP
<b>0,01</b>
<b>0,01</b>
-

### Variáveis

551,19

	M151	M191	M1074
<b>Coded</b>	-0,005	1,486	-0,787
<b>Uncoded</b>	<b>280,880</b>	<b>101,891</b>	<b>12,213</b>

### Função objetivo

F.O.: 0,01

### Restrições

 $x^T x:$  2,829 <= 2,829

## ANEXO D – Planilha para otimização das respostas no passo 5 e 6 (Caso Hurrion) do método experimental

### Modelos reduzidos

	$\mu$	$\sigma^2$
Constante	305,6542	4111,648
A	-15,0083	-71,639
B	11,6417	
C	-6,6417	-793,988
D	-14,3917	486,964
A*A		
B*B	-9,7797	
C*C		
D*D	20,3203	828,569
A*B	10,7875	
A*C	-8,2625	1630,471
A*D		-800,828
B*C		
B*D		
C*D		

EQM
13019,911
-1986,475
2274,236
-4414,291
-1527,586
5997,802
2744,809

### Resultados

	$\mu$	$\sigma^2$
<b>Modelo</b>	<b>234,98</b>	<b>4153,44</b>
<b>Alvos</b>	<b>217,54</b>	<b>1807,98</b>
<b>R<sup>2</sup> (adj.)</b>	<b>70,93%</b>	<b>43,33%</b>

EQM
<b>0,01</b>
<b>17161,56</b>
80,26%

### Variáveis

4457,76

	A	B	C	D
<b>Coded</b>	<b>1,200</b>	<b>-1,401</b>	<b>0,000</b>	<b>0,772</b>
<b>Uncoded</b>	<b>124</b>	<b>26</b>	<b>46</b>	<b>103</b>

### Função objetivo

**F.O.:** **0,01**

### Restrições

 $x^T x:$  4,000 <= 4,000

## ANEXO E– Planilha para otimização dos pesos no passo 8 (Caso Hurrion) do método experimental

### Modelos reduzidos

TERMO	EQMP
W1	4275,16714
W2	16384,8071
W1xW2	-26013,657
W1xW2 (-)	21771,36

### Variáveis

	W1	W2
Coded	0,52511	0,47489

### Função objetivo

**F.O.:** 3811,55

### Restrições

**LIMITES:** 0,000 <=> 1,000  
**SOMATÓRIO:** 1,000 = 1,000

## ANEXO F – Planilha para otimização das respostas no passo 8 (Caso Hurrion) do método experimental

### Modelos reduzidos

	$\mu$	$\sigma^2$
Constante	305,654	4111,648
A	-15,008	-71,639
B	11,642	
C	-6,642	-793,988
D	-14,392	486,964
A*A		
B*B	-9,780	
C*C		
D*D	20,320	828,569
A*B	10,788	
A*C	-8,262	1630,471
A*D		-800,828
B*C		
B*D		
C*D		

EQM
13019,911
-1986,475
2274,236
-4414,291
-1527,586
5997,802
2744,809

EQM P
6467,014
-651,631
966,499
-2699,129
-838,288
3068,277
2032,585
-853,683

### Resultados

	$\mu$	$\sigma^2$
Modelo	236,64	4134,21
Alvos	217,54	1807,98
R <sup>2</sup> (adj.)	70,93%	43,33%

EQM
185,09
17161,56
80,26%

EQMP
0,01

### Variáveis

EQM CALC: 4498,97

	A	B	C	D
Coded	1,116	-1,390	0,000	0,674
Uncoded	123	26	46	102

### Função objetivo

F.O.: 0,01

### Restrições

$x^T x$ : 3,632 <= 4,000

## APÊNDICE A – Recomendações de uso

Este anexo trata das recomendações de uso da abordagem proposta para modelagem e otimização de sistemas *kanban* por meio de experimentos simulados.

- a) conhecimentos necessários: para utilização da abordagem proposta serão necessários conhecimentos relacionados ao funcionamento do sistema *kanban*, simulação (desenvolvimento do modelo conceitual, computacional e validação), planejamento de experimentos (DOE), análise estatística de variância e otimização com uso do algoritmo GRG (planilha eletrônica Excel);
- b) recursos necessários: software de simulação (*Arena*<sup>®</sup>, *Flexsim*<sup>®</sup> ou outro similar), software de análise estatística (*Minitab*<sup>®</sup> ou outro similar), planilha eletrônica Excel;
- c) orientações quanto ao tipo de *kanban*: A abordagem proposta foi desenvolvida e testada no sistema *kanban* tradicional (TKS) desenvolvido pela Toyota, com um cartão;
- d) orientações quanto ao modelo simulado: Primeiramente desenvolver o modelo conceitual do sistema produtivo estudado e realizar sua validação, logo após construir o modelo computacional e fazer sua verificação, conforme estabelecido por Robinson *et al.* (2011);
- e) orientações quanto ao estoque de segurança: Como a abordagem proposta tem como princípio o cálculo do estoque de segurança para determinar o planejamento experimental, é necessário a empresa definir o nível de serviço desejado ao cliente, conhecer o histórico do comportamento estatístico da demanda com seu respectivo desvio padrão e por fim o *lead time* de reposição;
- f) orientações quanto ao planejamento experimental: Os níveis mínimos e máximos são definidos com base nos resultados obtidos com a equação do estoque de segurança. Em seguida utiliza-se como técnica de experimentos a Metodologia de superfície de resposta com um arranjo composto central (CCD), para definição dos níveis intermediários das variáveis e cálculo do número de experimentos;
- g) orientações quanto à execução dos experimentos: Como a proposta do trabalho está voltada

ao uso do projeto de parâmetros robustos, sugere-se como técnica experimental o arranjo por réplicas. Logo é necessário definir o número de réplicas para simulação e gerar as demandas aleatórias no software estatístico ou planilha eletrônica, considerando um período de 30 dias. É fundamental que as demandas aleatórias geradas sigam o tipo de distribuição de probabilidade referente ao seu comportamento histórico e respectivo desvio padrão;

- h) orientações quanto ao registro dos dados: Ao simular no modelo computacional os valores de demanda diária, com as respectivas quantidades de *kanban* nos supermercados para cada experimento e respectiva réplica, faz-se necessário determinar o total de itens não entregues. Logo após, são obtidos os valores de média e variância amostral e construída a matriz experimental;
- i) orientações quanto à modelagem matemática: A modelagem matemática é feita no software estatístico a partir da análise de variância dos valores da matriz experimental, considerando os coeficientes significativos e descartando os *outliers*. Busca-se o melhor ajuste estatístico para a média e variância, tendo como alvo um  $R-sq(adj)$  maior ou igual a 75% e um  $pvalue$  menor que 5%. Caso os valores dos ajustes estatísticos da média ou variância não atendam ao alvo, torna-se necessário a modelagem matemática do EQM da mesma forma;
- j) orientações quanto à otimização robusta: Após a modelagem matemática do EQM, é realizada a otimização robusta na planilha eletrônica do Excel com o uso do Algoritmo GRG (minimização do EQM), para identificar os pontos de ótimo referentes as quantidades de *kanban* de cada produto. Após encontrada a quantidade ótima de *kanban* é feita a validação no modelo computacional;
- k) orientações quanto à análise de robustez: Para verificar o número adequado de amostras é realizado o teste *power and sample size* (software estatístico). Em seguida, são geradas demandas aleatórias no software estatístico e juntamente com o número ótimo de *kanban* é executada a simulação no modelo computacional. O que se busca é verificar se os resultados do modelo computacional simulado estão de acordo com os valores encontrados no modelo estatístico;
- l) orientações quanto à otimização robusta pelo EQM<sub>P</sub>: Esta otimização acontece toda vez que na análise da robustez não seja possível atingir a média próxima ao alvo com mínima

variabilidade. A ponderação da média e variância permite através da técnica experimental arranjo de misturas determinar os pesos ótimos para a média e variância, de forma a ser possível diminuir a variabilidade. É utilizado o *simplex lattice* com 2 componentes de grau 2, com pontos axiais e 1 réplica. Após geradas as combinações dos experimentos pelo arranjo de mistura, os valores encontrados para a média e variância são substituídos na matriz experimental para obter os valores de  $EQM_P$ , que em seguida são analisados no software estatístico e alcançados os coeficientes significativos, os quais são inseridos na planilha eletrônica de otimização e encontrado o valor do  $EQM_C$ . Para as demais combinações geradas pelo arranjo de misturas é feita a mesma rotina. Após obtidos todos os valores de  $EQM_C$ , realiza-se a análise no software estatístico e encontra-se os coeficientes significativos, os quais são inseridos em uma rotina de otimização e os pesos ótimos da média e variância são alcançados. Os valores dos pesos ótimos são substituídos na matriz experimental e encontrados os valores do  $EQM_P$ , que são analisados no software estatístico e obtidos os coeficientes significativos, para em seguida realizar a otimização robusta e chegar aos valores ótimos da quantidade de *kanbans*;

- m) orientação quanto a verificação: Nessa etapa é feita a validação do resultado ótimo encontrado. Para isso é determinada a quantidade de amostras necessária por meio do uso do software estatístico (teste *power and sample size*). Novas demandas são geradas e os valores são simulados no modelo computacional. É registrada a quantidade de itens não entregues e obtida a média e variância. O objetivo principal é garantir que os resultados do modelo computacional sejam condizentes com aqueles gerados pelo modelo estatístico.

## PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

### Artigos publicados em periódicos

BRAGA, W. L. M; NAVES, F. L.; GOMES, J. H. F. Optimization of Kanban systems using robust parameter design: a case of study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2020) 106:1365–1374.

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2020) 106:1365–1374  
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04756-1>

ORIGINAL ARTICLE

 Check for updates

### Optimization of Kanban systems using robust parameter design: a case of study

W. L. M. Braga<sup>1,2</sup> · F. L. Naves<sup>3</sup> · J. H. F. Gomes<sup>2</sup>

Received: 29 August 2019 / Accepted: 26 November 2019 / Published online: 14 December 2019  
© Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2019

**Abstract**  
The current competitive market demands that manufacturing companies have a survival strategy which should totally focus on providing high-quality products, being consistent in the level of service provided, having lower inventory levels and higher flexibility in operations. In this context, Kanban can be classified as a tool that assists in the proper sizing of inventory levels and production control of the system. However, numerous studies have been developed with the aim of reliably reducing stock levels in Kanban supermarkets, yielding different optimization techniques, but for fixed demands. This work proposes the minimization solution of the supermarket from randomly different demands, using environments with simulated experiments from the ARENA® software, from a response surface methodology (RSM) along with a weighted minimization of the mean standard error and compare with the results provided by the use of optimizer Arena OptQuest®, thus, it is possible to evaluate the robustness question.

**Keywords** Kanban · Design of experiments · Robust project design · Simulation experiments · OptQuest®

BRAGA, W. L. M.; MELO, D. H. A.; MORAIS, D.; SMANAMUD, G. R. L.; FRANÇA, A. B.; QUINTÃO, C. M. F.; LOURES, C. C. A.; URZEDO, A. P. F. M.; NAVES, L. L. R.; GOMES, J. H. F.; NAVES, F. L. Optimization of the treatment of sanitary by the ozonation catalysed by modified nanovermiculite in a rotating packed bed. *Journal of Cleaner Production* 249 (2020) 119395.

Journal of Cleaner Production 249 (2020) 119395

---



**ELSEVIER**

Contents lists available at ScienceDirect

**Journal of Cleaner Production**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jclepro](http://www.elsevier.com/locate/jclepro)



---

## Optimization of the treatment of sanitary landfill by the ozonation catalysed by modified nanovermiculite in a rotating packed bed

Washington Luis Moreira Braga <sup>a</sup>, Diego Henriques Aguiar de Melo <sup>a</sup>, Daiana de Moraes <sup>b</sup>, Gisella Rossana Lamas Samanamud <sup>c</sup>, Alexandre Boscaro França <sup>b</sup>, Cristiane Medina Finzi Quintão <sup>b</sup>, Carla Cristina Almeida Loures <sup>d</sup>, Ana Paula Fonseca Maia de Urzedo <sup>b</sup>, Luzia Lima Rezende Naves <sup>b</sup>, José Henrique de Freitas Gomes <sup>a</sup>, Fabiano Luiz Naves <sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Institute of Industrial Engineering and Management, Federal University of Itajubá, Itajubá a, MG, Brazil  
<sup>b</sup> Department in Chemical Engineering, Federal University of São João del Rei, Ouro Branco, Research Group on Waste Treatment and Management Processes, Brazil  
<sup>c</sup> University of Kentucky, Department in Chemical Engineering, Paducah, United States  
<sup>d</sup> CEFET-RJ, Mechanical Engineering Department, Brazil



---

**ARTICLE INFO**

*Article history:*  
Received 2 April 2019  
Received in revised form 18 November 2019  
Accepted 19 November 2019  
Available online 20 November 2019

*Handling editor:* Jiri Jaronir Klemes

*Keywords:*  
Landfill leachate treatment  
Ozonation  
Rotating packed bed  
Vermiculite

**ABSTRACT**

Conventional processes fail to improve the treatment of landfill leachate. Thus, the use of advanced molecular ozone oxidation processes combined with Rotating Packed Bed (RPB) reactor provides greater gas diffusion to the medium in a catalytic bed with vermiculite and it is a process likely to remove organic discharge. This study aimed to increasing the ratio between biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) as well as improving color removal through a modified vermiculite-catalyzed ozonation process in an RPB reactor. The factors of rotation of the bed in the reactor, initial pH and ozone flow were analyzed through experimental design represented by the central composite design (CCD) and later optimized through the Normal Boundary Intersection (NBI) algorithm. In the optimized operational conditions: rotation of 915 rpm, pH of 5.8 and ozone flow of 3.9 L min<sup>-1</sup>, the COD and color removal were 16.5% and 40.54%, respectively. An increase in biodegradability (BOD<sub>5</sub>/COD), from 0.13 to 0.49, under optimized conditions, demonstrated the efficiency of the process as a pretreatment of landfill leachate enabling further biological treatment.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

BRAGA, W. L. M.; ROBERTO, J. A.; VAZ, C.; SAMANAMUD, G. R. L.; LOURES, C. C. A.; FRANÇA, A. B.; LOFRANO, R. C. Z.; NAVES, L. L. R.; GOMES, J. H. F.; NAVES, F. L. Extraction and optimization of tannin from the flower of *Musa* sp. applied to the treatment of iron ore dump. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6 (2018) 4310–4317.

Journal of Environmental Chemical Engineering 6 (2018) 4310–4317



Contents lists available at ScienceDirect

## Journal of Environmental Chemical Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jece](http://www.elsevier.com/locate/jece)



---

**Extraction and optimization of tannin from the flower of *Musa* sp. applied to the treatment of iron ore dump** 

Washington Luis Moreira Braga<sup>a</sup>, Jaqueline Alves Roberto<sup>b</sup>, Carlos Vaz<sup>b</sup>,  
 Gisella Rossana Lamas Samanamud<sup>c</sup>, Carla Cristina Almeida Loures<sup>d</sup>, Alexandre Boscaro França<sup>b</sup>,  
 Renata Carolina Zanetti Lofrano<sup>b</sup>, Luzia Lima Rezende Naves<sup>e</sup>,  
 José Henrique José Henrique de Freitas Gomes<sup>a</sup>, Fabiano Luiz Naves<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Institute of Industrial Engineering and Management, Federal University of Itajubá, Itajubá, MG, Brazil  
<sup>b</sup> Chemical Engineering and Statistics Department, Federal University of São João Del Rei, São João Del Rei, MG, Brazil  
<sup>c</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, University of Texas at San Antonio, UTSA, San Antonio, TX, 78249, USA  
<sup>d</sup> Department of Mechanical Engineering (DEPMC), Federal Center for Technological Education, Angra dos Reis, RJ, Brazil  
<sup>e</sup> University Center of Lavras, UNILAVERAS, Lavras, MG, Brazil

---

**ARTICLE INFO**

**Keywords:**  
*Musa* sp.  
 Tannins  
 Coagulation  
 Flocculation  
 Iron ore

**ABSTRACT**

This work studies low cost coagulants and flocculants with satisfactory efficiency, using the flower from *Musa* sp. as raw material. Many coagulants already used in the market, have high application cost and they may also be pollutants. The tannins, natural bio-coagulants, coming from the secondary mechanism of plants, are somewhat chemically reactive and they have already been used in processes. The present work has the objective of obtaining tannins using hot percolation as the extraction method, with the following factors: extraction solvent type, batch extraction number and percolation time. To evaluate the best extraction condition, a response surface methodology characterized by a Central Composite Design (CCD) was used, which could analyze each of the respective factors in five levels. The optimization of the model generated from the response surface aiming at a higher concentration of tannins was done using the Generalized Reduced Gradient (GRG) algorithm. Under these conditions, the tannin concentration was 0.93 µg/mL in the experimental conditions defined by the following factors: acetic acid solution 12.5% v/v, 6 batch with 45 min each. Under these conditions, the efficiency of the extract in the coagulation and flocculation of sludge from the mining industry was 98.78% for turbidity removal and 99.24% for solid removal.

NAVES, F. L.; PAULA, T. I.; BALESTRASSI, P. P.; BRAGA, W. L. M.; SAWHNEY, R. S.; PAIVA, A. P. Multivariate Normal Boundary Intersection based on rotated factor scores: A multiobjective optimization method for methyl orange treatment. *Journal of Cleaner Production* 143 (2017) 413 e 439.

Journal of Cleaner Production 143 (2017) 413–439

Contents lists available at ScienceDirect

**Journal of Cleaner Production**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jclepro](http://www.elsevier.com/locate/jclepro)






## Multivariate Normal Boundary Intersection based on rotated factor scores: A multiobjective optimization method for methyl orange treatment

Fabiano Luiz Naves<sup>a</sup>, Taynara Incerti de Paula<sup>b</sup>, Pedro Paulo Balestrassi<sup>b, \*</sup>, Washington Luis Moreira Braga<sup>b</sup>, Rapinder Singh Sawhney<sup>c</sup>, Anderson Paulo de Paiva<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Chemical Engineering and Statistics Department, Federal University of São João Del Rei, São João Del Rei, MG, Brazil*  
<sup>b</sup> *Institute of Industrial Engineering and Management, Federal University of Itajubá, Itajubá, MG, Brazil*  
<sup>c</sup> *Industrial and Systems Engineering Department, The University of Tennessee at Knoxville, Knoxville, TN, USA*

---

**ARTICLE INFO**

*Article history:*  
 Received 24 February 2016  
 Received in revised form 14 December 2016  
 Accepted 18 December 2016  
 Available online 26 December 2016

*Keywords:*  
 Principal component factor analysis  
 Normal Boundary Intersection  
 Pareto frontier  
 Methyl orange treatment

**ABSTRACT**

This paper presents the multiobjective optimization of methyl orange treatment with ozone using Normal Boundary Intersection and response surface models of rotated principal component factor scores for the expected value  $E[f(x)]$  and prediction variance  $Var[f(x)]$  of dye removal ( $Y_1$ ) and chemical oxygen demand removal ( $Y_2$ ). The innovation and the main contribution of this paper consists of building a 2-dimensional equispaced and convex Pareto Frontier for rotated factor scores representing the original multivariate set, reducing the number of objective functions without inverting the correlation among the original responses. Furthermore, this proposal provides a practical way to generate the narrowest possible prediction confidence intervals for a desired optima using the fuzzy membership function criterion in order to select the best compromise solution between  $E[f(x)]$  and  $Var[f(x)]$ . To illustrate the proposal's feasibility, a central composite design for the ozonation process of methyl orange solution with three factors ( $x_1$  – pH,  $x_2$  – air flow and  $x_3$  – ozone dosage) was run. The optimization results showed a maximum dye removal of  $94.1\% \pm 4.3$  with a respective chemical oxygen demand removal of  $88.4\% \pm 5.3$  obtained at  $x^* = [9.5; 7.1 \text{ l min}^{-1}; 18.4 \text{ g h}^{-1}]$ . However, this point have presented the largest 95% prediction confidence interval. Based on the fuzzy membership of Pareto set it was possible to select the narrowest 95% confidence intervals with maximum removal rates ( $Y_1 = 90.5 \pm 2.2$  and  $Y_2 = 88.3 \pm 2.7$ ), obtained at  $x^* = [7.9, 5.6 \text{ l min}^{-1}, 18.4 \text{ g h}^{-1}]$ . Confirmation runs and comparisons among several optimization methods were done and indicated that the results fell within the respective confidence intervals for predictions, which corroborates the good adequacy of the proposal.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## Artigos publicados em anais de congressos nacionais

BASAGLIA, T. R.; BRAGA, W. L. M. A importância da Manutenção Produtiva total como ferramenta do Sistema Toyota de Produção. EMEPRO 2018.



### **A importância da Manutenção Produtiva Total como ferramenta do Sistema Toyota de Produção**

Taiga Ricardo Basaglia (FATEC/SP) trbasaglia@gmail.com

Washington Luís Moreira Braga (PUC/MG) washington@pucpcaldas.br

*Resumo: O desafio de produzir cada vez mais com menos recursos está presente nas empresas modernas que buscam aprimorar a utilização de matérias-primas distribuindo-as de maneira nivelada de acordo com a demanda de produção. O Sistema Toyota de Produção surge pela necessidade de readequar o modo de produção em massa de Henry Ford à realidade japonesa no período pós-Segunda Guerra Mundial além de garantir o aprimoramento da qualidade no produto final, dessa forma, torna-se essencial adotar ferramentas para mensurar, analisar a efetividade e propor melhorias no processo de produção. A Manutenção Produtiva Total é uma das ferramentas do Sistema Toyota de Produção que será abordada nesta pesquisa, onde será destacado seu planejamento até os benefícios de sua aplicação dentro de uma empresa e como seu desempenho pode colaborar para a melhoria dos processos internos. Esta pesquisa possui caráter teórico tendo como base os principais autores do tema, além da contribuição de pesquisadores de vários países como Japão, Estados Unidos, Índia, Brasil, Polônia, Grécia, Egito, Portugal, etc. Esta diversidade cultural colabora para um estudo com diferentes pontos de vista, porém que se complementam, além de contribuir para o enriquecimento do conteúdo apresentado.*

*Palavras-chave: Sistema Toyota de Produção; Ferramentas; Manutenção Produtiva Total.*

JUNIOR, F. C.; BRAGA, W. L. M.; CARDOSO, D. C. O. Teoria das Filas como Uma Ferramenta Auxiliar do Just in Time. XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO. Joinville, SC, Brasil, 10 a 13 de outubro de 2017.

XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO  
 "A Engenharia de Produção e as novas tecnologias produtivas: Indústria 4.0, manufatura aditiva e outras abordagens  
 avançadas de produção"

## TEORIA DAS FILAS COMO UMA FERRAMENTA AUXILIAR DO JUST IN TIME.

**Francisco Chagas Junior (Unifeg)**  
 francisco.chagas260@gmail.com  
**Washington Luis Moreira Braga (Unifeg)**  
 bragaw1@ig.com.br  
**Debora Cristina Oliveira Cardoso (Unifeg)**  
 deboracristina1961@hotmail.com



*Atualmente, no cenário industrial, a busca por melhorias e redução de custos permitiu o uso da gestão de filas como uma ferramenta auxiliar para programas de redução de perdas como o Just in Time. Nesse contexto, foi estudada a implantação do sistema Kanban e Heijunka através da modelagem da Teoria das Filas em uma empresa multinacional metal mecânica objetivando a obtenção de uma ferramenta prática para os gestores. Ainda que as filas tenham se tornado comuns no dia a dia, elas se mostram um excelente indicador de desempenho por facilitar a identificação de desperdícios, ao mostrar onde ocorrem os maiores tempos de processamento e interrupções no fluxo produtivo. Desse modo, foi possível compreender o processo de formação de filas e estoques intermediários que causam atrasos e comprometem a programação diária da produção. Sendo assim, através dos cálculos de utilização do sistema do modelo M/M/1, foi possível observar que a empresa possui capacidade para a demanda dos clientes, porém por falta de balanceamento nas*

JUNIOR, F. C.; BRAGA, W. L. M. Metodologia para Implementação da Ferramenta *Kanban*: Uma Pesquisa Ação em Uma Metalúrgica. XXIV SIMPEP – SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 08, 09 e 10 de NOVEMBRO de 2017.



**XXIV SIMPEP**  
SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

08, 09 e 10  
Novembro  
2017

CONTRIBUIÇÕES DA  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
PARA UMA ECONOMIA  
DE BAIXO CARBONO

## METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA KANBAN: UMA PESQUISA-AÇÃO EM UMA METALÚRGICA.

FRANCISCO CHAGAS JUNIOR - francisco.chagas260@gmail.com  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO EDUCACIONAL GUAXUPÉ - UNIFEG

WASHINGTON LUIS MOREIRA BRAGA - bragawl@ig.com.br  
FACULDADE DE TECNOLOGIA - FATEC

*Área: 1 - GESTÃO DA PRODUÇÃO*  
*Sub-Área: 1.1 - GESTÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO*

*Resumo: O ATUAL MERCADO COMPETITIVO GLOBAL TEM EXIGIDO CADA VEZ MAIS DAS ORGANIZAÇÕES QUANTO A UMA GESTÃO DE RECURSOS E TAMBÉM EFICÁCIA NOS SEUS PROCESSOS PRODUTIVOS, SENDO QUE A SISTEMÁTICA UTILIZADA PARA LIDAR COM OS DESPERDÍCIOS PODE DEFINIR SUA SOBREVIVÊNCIA. TENDO ESTE PONTO COMO PREMISSA, O SISTEMA TOYOTA DE PRODUÇÃO (TPS) TEM DEMONSTRADO UM ENORME SUCESSO NA GESTÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS, UMA VEZ QUE TRAZ EM SUA FILOSOFIA INÚMERAS TÉCNICAS CONSOLIDADAS NOS DIFERENTES SEGUMENTOS DE NEGÓCIOS. NESSE CENÁRIO, O KANBAN, CUJO SIGNIFICADO É CARTÃO, TEM UMA ENORME RELEVÂNCIA NAS EMPRESAS QUE UTILIZAM O TPS, UMA VEZ QUE PERMITE UMA MELHOR GESTÃO NA PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DE PRODUÇÃO. TODAVIA, DESDE SUA ORIGEM INÚMEROS ESTUDOS TÊM SIDO REALIZADOS SOBRE O TEMA, MAS POUCO A RESPEITO DO OBJETO DESTE ESTUDO. LOGO, BUSCA-SE COMO OBJETIVO PRINCIPAL DO TRABALHO O DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA KANBAN. FOI UTILIZADO COMO EMPRESA OBJETO DE ESTUDO UMA INDÚSTRIA DO SEGUIMENTO METAL MECÂNICO E A METODOLOGIA A PESQUISA AÇÃO. O PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO FOI DESMEMBRADO EM 7 PASSOS, APLICADOS EM UMA CÉLULA PILOTO DE UM DETERMINADO PRODUTO FABRICADO PELA*