

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO E SISTEMAS**

**MODELAGEM EM SIMULAÇÃO**  
**COMPUTACIONAL DE UM**  
**SISTEMA PRODUTIVO MTS**  
**APLICANDO O MÉTODO CONWIP**

**Bianca Marcelo Mamede**

**2017**

MODELAGEM EM SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA  
PRODUTIVO MTS APLICANDO O MÉTODO CONWIP

Bianca Marcelo Mamede

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Ricardo Luiz Machado, *Dr.*

Goiânia  
Maio, 2017

M264m

Mamede, Bianca Marcelo

Modelagem em simulação computacional de um sistema produtivo MTS aplicando o método CONWIP[ manuscrito]/ Bianca Marcelo Mamede.-- 2017.

120 f.; il. 30 cm

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Produção e Sistemas, Goiânia, 2017

Inclui referências 99-104

1. Planejamento da produção. 2. Controle de produção.  
3. Administração da produção. I.Machado, Ricardo Luiz.  
II.Pontifícia Universidade Católica de Goiás. III. Modelagem em simulação computacional de um sistema produtivo MTS aplicando o método CONWIP.

CDU: 658.5(043)

MODELAGEM EM SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA PRODUTIVO  
MTS APLICANDO O MÉTODO CONWIP

Bianca Marcelo Mamede

Esta Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás em Maio de 2017.

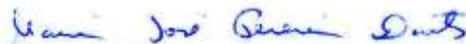


Prof. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção e Sistemas

Banca Examinadora:



Prof. Ricardo Luiz Machado, Dr.  
Orientador



Prof.ª Maria José Pereira Dantas, Dr.ª  
Avaliadora Interna - PUCGO



Prof. Roberto da Piedade Francisco, Ph.D.  
Avaliador Externo - UFG

Goiânia  
Maio, 2017

## **AGRADECIMENTOS**

A priori, agradeço a Deus por me conceder saúde, paciência, sabedoria e discernimento. Toda honra e glória a Ti, Senhor! Aos meus pais, namorado, amigos e familiares, obrigada pelo apoio, amor e por compreensão.

Aos meus colegas do mestrado agradeço pela contribuição em cada conhecimento adquirido. Em especial agradeço aos meus amigos Gyovanna Alves, Daniel Pimentel e Leonardo Merelles pela dedicação e companheirismo.

Agradeço todos os professores que passaram pela minha vida, o meu conhecimento é a soma da dedicação de todos. Em especial, agradeço ao professor Dr. Ricardo Machado pelas orientações e todos os ensinamentos.

Ao Laboratório de Estatística e Modelagem Matemática e a professora Dr<sup>a</sup>. Maria José Dantas agradeço pela disponibilidade de equipamentos específicos, pelo apoio e incentivo nas dificuldades oriundas da pesquisa e por todo o conhecimento repassado.

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por viabilizar financeiramente o desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada ao MEPROS/ PUC Goiás como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

MODELAGEM EM SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA  
PRODUTIVO MTS APLICANDO O MÉTODO CONWIP

Bianca Marcelo Mamede

Maio/2017

Orientador: Ricardo Luiz Machado, *Dr.*

O método de gerenciamento da produção CONWIP sobressai em sistemas produtivos jobbing por eliminar desperdícios e aprimorar o desempenho do processo produtivo. Sistemas de produção make-to-stock (MTS) necessitam reduzir estoques de modo a aprimorar o desempenho de seus processos produtivos. Entretanto a aplicação do CONWIP é escassa na realidade industrial de sistemas MTS. Nesse contexto foi realizada uma pesquisa, através da metodologia de modelagem e simulação computacional, com o objetivo de comparar os resultados operacionais de um sistema produtivo MTS real com os resultados que geraria ao ser gerenciado pelo método CONWIP. O CONWIP atendeu a demanda reduzindo a produção em excesso apresentada pelo MTS, utilizando 71% menos insumos e reduzindo o nível de estoques em processo (WIP) em 85%. Considerando as leis da Ciência da Fábrica o desempenho do CONWIP foi melhor, comparado ao MTS por ter aprimorado a utilização dos recursos, reduzido a variabilidade dos tempos de processamento e eliminado desperdícios. Este trabalho contribuiu para diminuir a ausência de estudos na literatura com análises do desempenho do CONWIP através da modelagem e simulação computacional.

Palavras-chaves: Planejamento e Controle da Produção; Sistema de produção; CONWIP.

Abstract of the Dissertation presented to MEPROS / PUC Goiás as part of the requisites required to obtain a Master's degree in Production Engineering and Systems.

## MODELLING IN COMPUTATIONAL SIMULATION OF A PRODUCTIVE MTS SYSTEM BY APPLYING THE CONWIP METHOD

Bianca Marcelo Mamede

May/2017

Advisor: Ricardo Luiz Machado, *Doctor*.

The CONWIP production management method overcomes in productive systems because it eliminates waste and enhances the productive process' performance. Make-to-stock production systems need to reduce stocks in order to enhance the performance of their productive processes. However, the application of CONWIP is sparse in MTS systems industrial reality. Hence a research has been done, through computational simulations and modelling methodology, with the aim to compare the operational results of a real productive MTS system with the results that a CONWIP method managed system would generate. The CONWIP has held the demand by reducing the excess production presented by MTS, using 71% less inputs and reducing the processing stocks (WIP) by 85%. Considering the Factory Physics laws, the CONWIP performance was better when compared to MTS for enhancing the resources usage, reducing the processing time variability and eliminating the waste. This work has contributed to reduce CONWIP performance analysis through computational simulation and modelling studies absence in literature.

Keywords: Planning and production control; Production system; CONWIP.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 CONTEXTO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2 PROBLEMÁTICA</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
<b>1.4 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>17</b>
<b>1.5 SÍNTESE METODOLÓGICA</b> .....	<b>19</b>
<b>1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO</b> .....	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2 MÉTODOS HÍBRIDOS DE GERENCIAMENTO DA PRODUÇÃO</b> .....	<b>26</b>
2.2.1 CONWIP .....	27
2.2.1.1 Ciência da Fábrica .....	31
2.2.2 Ciência da Fábrica integrada ao CONWIP .....	41
<b>2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</b> .....	<b>43</b>
<b>2.4 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</b> .....	<b>49</b>
<b>2.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS</b> .....	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO 3 – ABORDAGEM METODOLÓGICA</b> .....	<b>55</b>
<b>3.1 NATUREZA DA PESQUISA</b> .....	<b>56</b>
<b>3.2 OBJETIVOS E ABORDAGEM</b> .....	<b>56</b>
<b>3.3 PROCEDIMENTOS E MÉTODO</b> .....	<b>57</b>
3.3.1 Modelagem e Simulação computacional .....	57
3.3.1.1 Concepção .....	58
3.3.1.2 Implementação .....	61
3.3.1.3 Análise .....	61
<b>CAPÍTULO 4 – CONCEPÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO</b> .....	<b>63</b>
<b>4.1 MODELO ABSTRATO</b> .....	<b>63</b>
<b>4.2 MODELO CONCEITUAL</b> .....	<b>65</b>
<b>4.3 MODELAGEM E COLETA DE DADOS DO SISTEMA PRODUTIVO REAL</b> <b>66</b>	
4.3.1 Modelagem da Empresa A.....	69
4.3.2 Coleta de dados e tratamento estatístico .....	73

<b>4.4 MODELO COMPUTACIONAL</b> .....	<b>82</b>
4.4.1 Modelo computacional real.....	82
4.4.2 Modelo computacional CONWIP .....	85
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS</b> .....	<b>88</b>
<b>5.1 RESULTADOS DO MODELO OPERACIONAL REAL</b> .....	<b>88</b>
<b>5.2 RESULTADOS DO MODELO COMPUTACIONAL CONWIP</b> .....	<b>91</b>
<b>5.3 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS</b> .....	<b>93</b>
<b>CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>95</b>
<b>6.1 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS</b> .....	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>99</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>105</b>
APÊNDICE I – Dados coletados representando a quantidade de unidades por minuto do meio e da ponta da asa do frango.....	105
APÊNDICE II – Valores dos Testes Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov para as distribuições estatísticas dos dados Taxa considerados no estudo empírico de um processo produtivo real MTS. ....	114
APÊNDICE III – Dados da distribuição empírica adotada no lugar da distribuição Johnson SB para a programação da embalagem secundária do meio.....	120

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: SISTEMAS DE PRODUÇÃO .....	12
FIGURA 2: FLUXO DO CONWIP.....	14
FIGURA 3: FLUXO DO CONWIP E KANBAN.....	28
FIGURA 4: FLUXO DE PLANEJAMENTO E CONTROLE DA CIÊNCIA DA FÁBRICA.....	33
FIGURA 5: FORMA GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.....	50
FIGURA 6: FORMA GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA INVERSA.....	51
FIGURA 7: FORMA GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO PEARSON V.....	51
FIGURA 8: FORMA GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO PEARSON VI.....	52
FIGURA 9: FORMA GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO JOHNSON SB .....	53
FIGURA 10: FLUXO DO MODELO CONCEITUAL CONWIP. ....	65
FIGURA 11: FLUXO DE PRODUÇÃO DA EMPRESA A.....	67
FIGURA 12: MODELAGEM DO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA A.....	70
FIGURA 13: FORMA GRÁFICA DOS DADOS DE ENTRADA DE INSUMOS DO MEIO DA ASA....	77
FIGURA 14: FORMA GRÁFICA DOS DADOS DE ENTRADA DE INSUMOS DA PONTA DA ASA. .	77
FIGURA 15: FORMA GRÁFICA DOS DADOS DE ARMAZENAGEM DO MEIO DA ASA.....	78
FIGURA 16: FORMA GRÁFICA DOS DADOS DE ARMAZENAGEM DA PONTA DA ASA.....	79
FIGURA 17: FORMA GRÁFICA DOS DADOS DA EMBALAGEM PRIMÁRIA DO MEIO DA ASA. .	79
FIGURA 18: FORMA GRÁFICA DOS DADOS DA EMBALAGEM PRIMÁRIA DA PONTA DA ASA.	80
FIGURA 19: FORMA GRÁFICA DOS DADOS DA EMBALAGEM SECUNDÁRIA DO MEIO DA ASA	81
FIGURA 20: FORMA GRÁFICA DOS DADOS DA EMBALAGEM SECUNDÁRIA DA PONTA DA	
ASA .....	82

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: DADOS CARACTERÍSTICOS DAS AMOSTRAS. ....	75
TABELA 2: PARÂMETROS DE VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL REAL. ....	84
TABELA 3: PARÂMETROS DE VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL CONWIP.....	86
TABELA 4: RESULTADOS DOS MODELOS COMPUTACIONAIS.....	94

## LISTA DE SIGLAS

CONWIP – *Constant Work in Process* traduzido como Estoque constante em Processo

CRP – *Capacity Requirem Entsplannig* traduzido como Planejamento de Necessidades de Capacidade

CT – *Cycle time* traduzido com tempo total de produção

DES – *Discrete Event Simulation* traduzido como simulação de eventos discretos

DS – *Design Science*

DSR – *Design Science Research*

EP – Etapa(s) produtiva(s)

GO – Gestão de Operações

IQF - *Individually Quick Frozen* traduzido como congelamento individual rápido

JIT – *Just in time*

MHP – Método(s) Híbrido(s) de gerenciamento da Produção

MO – Mão de obra

MRP – *Materials Requirements Planning* traduzido como Planejamento de Necessidades de Materiais

MRPII – *Manufacturing Resources Planning* traduzido como Planejamento e Controle de Recursos de Manufatura

MTO – *make-to-order* traduzido como produção sob encomenda

MTS – *make-to-stock* traduzido como produção para estoque

OP – Ordem(s) de produção

PA – Produto(s) acabado(s)

PCP – Planejamento e Controle da Produção

PDP – Pior desempenho na prática

PMP – Planejamento Mestre da Produção ou Plano Mestre de Produção

PO – Pesquisa Operacional

RCCP – *Rough Cult Capacity Planning* traduzido como Planejamento de Capacidade de Médio Prazo

S&OP – *Sales and Operations Planning* traduzido como Planejamento de Vendas e Operações

SFC – *Shop Floor Control* traduzido como Controle do Chão de Fábrica

SP – Sistema(s) de Produção

STP – Sistema Toyota de Produção

TH – Produtividade

TR – Teoria das Restrições

WIP – Estoque(s) em processo

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Pesquisas científicas são desenvolvidas para solucionar problemas ou progredir nas soluções satisfatórias apontadas em pesquisas anteriores. A identificação e a conscientização de problemas ocorrem através da consulta em canais científicos de publicações (MIGUEL *et al.*, 2012). A consulta prévia em periódicos científicos resultou neste capítulo, expondo de maneira breve a apresentação desta pesquisa.

## 1.1 Contexto

Os produtos finais de um processo de fabricação são nomeados como produtos acabados (PA). A variedade e o volume de PA que um processo produtivo possui determina o seu Sistema de Produção (SP), conforme representa a Figura 01. SP *Jobbing* são caracterizados pela alta variedade e baixo volume de PA, resultando em produtos customizados. SP em massa, também conhecidos como *make-to-stock* (MTS), são caracterizados pela baixa variedade e alto volume de PA, resultando em produtos essencialmente padronizados.

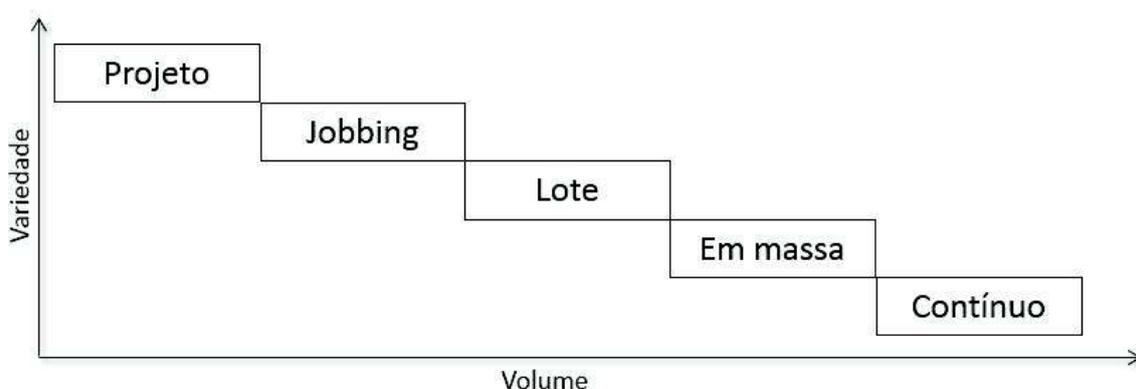


Figura 1: Sistemas de Produção

Fonte: adaptado de Slack, Chambers e Johnston (2009).

A transformação de recursos em PA é regulamentada pelo planejamento e controle da produção (PCP). No PCP o planejamento é uma ação concreta que define normativas, necessário para definir as projeções dos recursos e ações (TENHIÄLÄ, 2011). O controle é a ação responsável por manter a execução do planejamento dentro das normativas determinadas, deve possuir uma metodologia flexível, moderna e financeiramente competitiva (GLAVAN *et al.*, 2013).

O gerenciamento das operações produtivas é feito através de métodos com ferramentas e atividades específicas. Impulsionado pela Pesquisa Operacional (PO) e Gestão de Operações (GO), os métodos gerenciam os processos de maneira integrada com todas as frentes administrativas, como marketing, financeiro, recursos humanos e outros. Ainda buscam por soluções de problemas operacionais através da logística, modelagem, simulação e planejamento estratégico (JOHNES, 2015; CHIANG *et al.*, 2014).

Existem diversos métodos para o gerenciamento da produção, mas cada um possui um nível de sucesso variável, típico do SP que se encontra (HOPP; SPEARMAN, 2013). Os métodos tradicionais, tidos como principais, são: Planejamento e Controle de Recursos de Manufatura (*Manufacturing Resources Planning* - MRPII), o Sistema Toyota de Produção (STP) e a Teoria das Restrições (TR). O MRPII é um método que planeja e controla a produção de todos os recursos necessários à fabricação de um produto. Funciona como um conversor do plano mestre da produção (PMP) em ações específicas (GHOSH; SONG, 1994). O STP é um método de mentalidade enxuta, que através da integração de várias ferramentas, satisfaz as exigências dos clientes, no instante em que desejam, com a qualidade que necessitam e com o mínimo de recursos possíveis (BENTON; SHIN, 1998). A TR é um método com foco gerencial voltado a identificação dos recursos gargalos e sua respectiva otimização, resultando no aumento do lucro, que é o principal objetivo da organização (VERMA, 1997).

O mercado econômico atual é dinâmico e de competição global, exigindo das indústrias agilidade na produção com excelência em qualidade, serviços e custos (WANG; SHIH, 2015). Assim, os métodos de gerenciamento necessitam de flexibilidade. Métodos Híbridos de gerenciamento da Produção (MHP) são consequência da demanda por métodos mais flexíveis. Não há uma lógica ou método ideal para a administração industrial, no intuito de atingir resultados melhores as empresas tendem a adotar MHP que combinem os métodos tradicionais e as lógicas de processos com fluxo puxado e empurrado (MARQUES, 2008).

O *Constant Work in Process* (CONWIP) é um MHP puxado e empurrado, caracterizado por um Kanban, ferramenta do STP, adaptado ao funcionamento empurrado do MRPII, conforme apresentado na Figura 02 (SPEARMAN; WOODRUFF; HOPP, 1990).

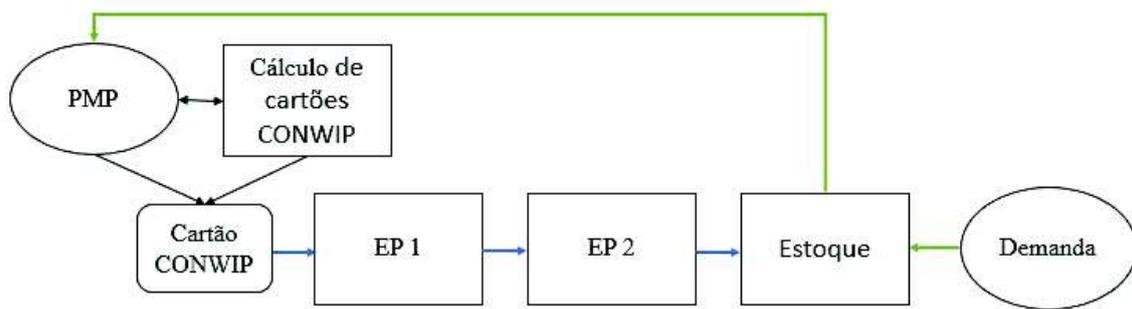


Figura 2: Fluxo do CONWIP

A capacidade produtiva e a necessidade de materiais são determinadas pelo Plano Mestre da Produção (PMP). O cálculo de cartões CONWIP distribui a quantidade de recursos necessários por cartões CONWIP, cada cartão corresponde a um lote de produção. O cartão CONWIP é empurrado, representado pelas setas azuis da Figura 02, para as demais Etapas Produtivas até se tornar um PA. A demanda retira o PA do estoque disponibilizando o cartão correspondente a aquela quantidade. Este cartão é puxado pelo PMP que verifica a necessidade de reposição da respectiva quantidade de PA, empurrando ou não, o cartão para as EP seguintes (KORUGAN; GUPTA, 2014).

O sucesso de uma indústria se dá pela eficiência e eficácia de sua administração sobre a sua gestão e recursos. Assim, alinhar as estratégias de manufatura com as estratégias de crescimento organizacional impulsionam as pesquisas de operações industriais, principalmente os estudos de SP (MARQUES, 2008). Para Sterman *et al.* (2015), Hendry, Huang e Stevenson (2013) pesquisas sobre a dinâmica de funcionamento dos métodos de gerenciamento precisam ser desenvolvidas. Gong, Yang e Wang (2014), Negahban e Smith (2014), Esmailian, Behdad e Wang (2016) destacam a importância de desenvolver pesquisas quanto ao desempenho dos métodos de gerenciamento da produção. Um bom método é aquele que tem adaptabilidade ao fluxo de processamento e informações (KORUGAN; GUPTA, 2014).

## 1.2 Problemática

Inúmeras tecnologias sofisticadas que aprimoram o desempenho dos processos produtivos são desenvolvidas. Porém, os avanços tecnológicos neste segmento devem evidenciar claramente que a sofisticação dos métodos proporcionam melhorias no desempenho do processo produtivo (TENHIÄLÄ, 2011). Destacam-se as melhorias que aprimoram a eficácia e a eficiência dos métodos de gerenciamento da produção porque o desempenho deles reflete na competitividade das empresas, de modo

que, quanto menor for os índices de erros e maior a eficácia, melhor será a eficiência do processo produtivo (PEHRSSON; NG; BERNEDIXEN, 2016).

Atualmente as empresas procuram por métodos que combinem a gestão de conhecimento e tecnologia da informação, resultando em métodos flexíveis, robustos e de simples operação (KRAUSE; YOUNGDAHL; RAMASWAMY, 2014). A demanda por métodos mais flexíveis e robustos é um problema bem apresentado por Benton e Shin (1998), Boonlertvanich (2005), Gartermann *et al.* (2014) e Romagnoli (2015). Segundo Gansterer (2015) esta necessidade persiste ao longo dos anos devido à redução dos ciclos de vida dos produtos e a instabilidade do mercado.

O principal desafio dos estudos sobre métodos de gerenciamento é desenvolver procedimentos adequados aos processos produtivos. A eficiência dos métodos deve considerar o estado atual dos processos produtivos, examinar os pontos passíveis de melhorias e interligar a logística interna e externa com o PCP (GARTERMANN *et al.*, 2014). Para Elmoselhy (2013) e Mhada *et al.* (2016) o desafio se resume em desenvolver métodos mais flexíveis, mantendo o padrão de qualidade que o consumidor deseja e a rentabilidade que as indústrias necessitam.

Os estudos sobre os métodos de gerenciamento da produção devem considerar os pilares: eficiência, flexibilidade, qualidade e relação custo-eficácia, tendo como objetivos o aumento de flexibilidade, a redução de custo e a melhoria da qualidade (GARTERMANN *et al.*, 2014). Para Esmaelian, Behdad e Wang (2016) o foco é a eficiência da produção, através da combinação de três variáveis: pessoas, sustentabilidade e lucro. Nas três últimas décadas destacam-se os estudos referentes ao manuseio e gerenciamento de materiais, sendo as duas últimas décadas marcadas pelos estudos de MHP.

O desenvolvimento de MHP enxutos e ágeis apresentou os melhores resultados diante da necessidade de métodos mais robustos e flexíveis (JAEGLER; BURLAT; LAMOURI, 2016). Entende-se por sistema robusto, aquele que apresenta um bom desempenho e processos eficientes perante as oscilações do PMP (MEYER; APOSTU; WINDT, 2013). O CONWIP é o MHP com os melhores resultados comparados ao demais métodos tradicionais (GARTERMANN *et al.*, 2014; JAEGLER; BURLAT; LAMOURI, 2016).

O CONWIP apresenta resultados satisfatórios, quando aplicado da maneira correta, comparado aos métodos tradicionais. Porém, assim como todos os outros métodos, há limitações em determinadas situações indicando que há espaço para a otimização do CONWIP (ROMAGNOLI, 2015).

A aplicabilidade do CONWIP, através de simulação, em SP já operantes com outros métodos de gerenciamento é comum. São pesquisas que, devido à abordagem de simulação, produzem diversos cenários comparativos com resultados indicando os pontos fortes e as possíveis melhorias do CONWIP (ZHOU *et al.*, 2016). Mesmo com inúmeros estudos referentes ao CONWIP em comparação aos demais métodos tradicionais, a implantação deste MHP é escassa na realidade industrial (GARTERMANN *et al.*, 2014, MHADA *et al.*, 2016). Romagnoli (2015) destaca 17 trabalhos relevantes sobre o tema, mas todos não conseguem apresentar o CONWIP em operação em um processo produtivo totalmente semelhante a realidade das indústrias.

Uma possível explicação referente a ausência da aplicação do CONWIP a realidade industrial é apresentada por Xanthopoulos, Koulouriotis e Gasteratos (2017) que comparam nove métodos de gerenciamento da produção adaptados do CONWIP com a ferramenta Kanban indicando que o CONWIP não é um método ideal e precisa ser aprimorado. Pergher e Almeida (2017) também afirmam que o CONWIP de fato é um bom método, mas seus resultados são limitados a SP simples tipo *jobbing*.

Hopp e Spearman (2013) através do CONWIP desenvolveram um método preditivo, estruturado para a solução de problemas, fomentado por uma abordagem técnica chamada *Factory Physics* (Ciência da Fábrica)<sup>1</sup>. A Ciência da Fábrica através de pressupostos matemáticos agrega cientificidade às soluções empíricas propostas aos problemas rotineiros de operações industriais. As 21 leis fomentadas pela Teoria das Filas e os reflexos do comportamento do chão de fábrica resultam no planejamento hierárquico da produção para o CONWIP.

A aplicação da Ciência da Fábrica como forma de aprimorar o CONWIP não é apresentada na literatura, sua aplicação tem ocorrido, em sua maioria, apenas para ajustes isolados de capacidade produtiva e análises da variabilidade do fluxo e do tempo

---

<sup>1</sup> O termo Ciência da Fábrica refere-se à obra de Hopp e Spearman (2013), traduzida para o português por um grupo de especialistas e mestres da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. A tradução da obra para o português aponta que a melhor tradução encontrada para *Factory Physics* é a expressão Ciência da Fábrica.

(MEYER; APOSTU; WINDT, 2013; PERGHER *et al.*, 2014; GODINHO FILHO; UZSOY, 2011; GODINHO FILHO; GUIMARÃES; OPRIME, 2013; ROSSI FILHO *et al.*, 2014).

Diante da problemática apresentada anteriormente, foi questionado: como analisar comparativamente os resultados operacionais de um processo produtivo MTS com o mesmo processo gerenciado pelo CONWIP, utilizando a modelagem computacional? Esta pergunta ainda abordou as seguintes indagações:

- Como deveria ser a adaptação de um sistema de produção MTS ao método CONWIP?
- Como seria classificado o desempenho produtivo de um processo pela Ciência da Fábrica?

### **1.3 Objetivos**

Com o intuito de responder as questões apontadas na problemática, o objetivo geral desta pesquisa foi comparar os resultados operacionais de um processo produtivo real com produção para estoques com os resultados do mesmo processo gerenciado pelo CONWIP, utilizando a simulação computacional como cenário de estudo. O objetivo geral subdividiu em:

- Modelar um processo produtivo MTS, semelhante à realidade industrial;
- Adequar o modelo da realidade industrial a lógica de funcionamento do CONWIP;
- Submeter os modelos ao ambiente de simulação computacional;
- Classificar os resultados de acordo com o cenário proposto pela Ciência da Fábrica;
- Comparar os resultados dos modelos simulados.

### **1.4 Justificativa**

O CONWIP é um MHP robusto e com resultados satisfatórios perante os demais métodos tradicionais. Sua mentalidade enxuta oriunda das ferramentas Kanban e JIT permite a redução de desperdícios, destacando-se: os níveis de estoque, a simplificação do processo através da gestão visual e a desburocratização do fluxo, relacionando-o apenas a um documento chamado de *backlog list*. Estes pontos otimizam

o funcionamento do processo produtivo, agregando agilidade e redução de custos (SPEARMAN; WOODRUFF; HOPP, 1990; GONG; YANG; WANG, 2014; ONYEOCHA *et al.*, 2015; ROMAGNOLI, 2015).

Um método de gerenciamento da produção ideal deve ter as fases relacionadas à matéria prima gerenciada pela lógica empurrada, enquanto a produção em do PA deve ser gerenciada pela lógica puxada, respondendo rapidamente as necessidades externas. O CONWIP possui esta combinação apresentando uma capacidade de resposta maior, maior flexibilidade e menor tempo de espera, além de ser um método de fácil operação (GARTERMANN *et al.*, 2014). Entretanto a ausência de relatos sobre os resultados pertinentes a aplicação do CONWIP na realidade industrial, abre margem para dúvidas quanto ao seu desempenho satisfatório (GARTERMANN *et al.*, 2014, MHADA *et al.*, 2016).

Para Hopp e Sperman (2013) o CONWIP pode ser aprimorado pelas leis da Ciência da Fábrica, mas são vagos em demonstrar como deve ocorrer a inserção da Ciência da Fábrica no CONWIP. Afirmam apenas que há uma pequena parte do processo produtivo que resulta em grandes impactos na atividade final, sugerindo assim, que esta parte é a que demanda maior atenção (HOPP; SPEARMAN, 2013). Na literatura há ausência de pesquisas que abordem MHP estruturados pelo CONWIP aprimorado pela Ciência da Fábrica. As aplicações da Ciência da Fábrica são superficiais e não ocorrem necessariamente sobre CONWIP (MEYER; APOSTU; WINDT, 2013; PERGHER *et al.*, 2014; GODINHO FILHO; UZSOY, 2011; GODINHO FILHO; GUIMARÃES; OPRIME, 2013; ROSSI FILHO *et al.*, 2014).

O método proposto por Hopp e Sperman (2013) segue o fluxo do CONWIP, mas os parâmetros de controle são determinados pelas leis da Ciência da Fábrica. A priori destacam-se as: Lei de Little, Lei do melhor desempenho, Lei do pior desempenho, Lei da capacidade de Mão de Obra, Lei da variabilidade, Lei da utilização, Lei da eficiência do CONWIP e Lei da robustez do CONWIP.

A Lei de Little determina a quantidade de estoques em processo (WIP) ou cartões conwip através da multiplicação do tempo total de produção pelo nível de produção alcançado nesse mesmo intervalo de tempo, considerando que a margem de segurança está inserida na capacidade de produção e no tempo total de produção. A Lei do melhor desempenho determina qual é o tempo total de produção mínimo e

respectivamente qual a quantidade ideal de produtos a serem fabricados nesse intervalo de tempo. A Lei do pior desempenho apresenta quais são os valores que jamais devem ser atingidos como tempo total de produção e sua respectiva produtividade (HOPP; SPEARMAN, 2013).

A mão de obra (MO) é um dos principais problemas encontrados no chão de fábrica, e a Ciência da Fábrica desenvolveu uma fórmula simples capaz de quantificar os operadores necessários para o bom desempenho do SP. A variabilidade sempre reduz o desempenho do processo produtivo e através da Lei da variabilidade é possível quantificar o desempenho do método aplicado. O lote de processamento ideal apresentado pela Ciência da Fábrica é o menor possível, buscando a redução de custos e desperdícios. Entretanto, a Lei da utilização afirma que quanto maior a utilização dos equipamentos do processo produtivo, maiores são os níveis de estoque em processo e tempo total de produção (HOPP; SPEARMAN, 2013).

A modelagem e a simulação computacional foram utilizadas apenas como método de avaliação de resultados do CONWIP construído por Hopp e Sperman (2013). Cenário típico das pesquisas desenvolvidas referentes a otimização de métodos de gerenciamento da produção, pela facilidade de criar cenários em tempos relativamente curtos e custos reduzidos (GONG; YANG; WANG, 2014; GARTERMANN *et al.*, 2014; ONYEOCHA *et al.*, 2015; ROMAGNOLI, 2015; MHADA *et al.*, 2016; ZHOU *et al.*, 2016).

### **1.5 Síntese metodológica**

A modelagem científica de Jung (2004) pesquisa o desenvolvimento de tecnologias, produtos e processos. A abordagem de Jung (2004) foi escolhida porque o objeto da pesquisa consiste em modelos experimentais de processos produtivos. O autor classificou a pesquisa quanto à natureza, aos objetivos, a abordagem, os procedimentos e o método pesquisa. Na respectiva ordem esta pesquisa foi classificada em aplicada, hipotético-dedutiva, quantitativa, experimental por simulação computacional. Toda esta classificação foi determinada pelo processo de modelagem, que consiste em:

- Definição de um problema através da revisão da literatura;
- Modelagem de um sistema físico real que represente a problemática;
- Determinação dos elementos envolvidos no modelo, resultando na delimitação da pesquisa;

- Concepção dos modelos e submissão dos modelos à experimentação;
- Análise dos resultados.

## **1.6 Estrutura do trabalho**

As etapas descritas na seção 1.5 compõe a estruturação da pesquisa. A conscientização a respeito do problema investigado com uma possível solução foram apresentados no Capítulo 1. Os conceitos foram determinados pela revisão bibliográfica, explanados no Capítulo 2, apresentando as principais definições e constructos necessários para a compreensão da pesquisa.

Os métodos e os procedimentos aplicados no desenvolvimento e avaliação dos objetivos são mensurados no Capítulo 3. Os resultados apresentados para cada procedimento realizado na coleta de dados, modelagem e simulação dos modelos desenvolvidos são apresentados no Capítulo 4. Os principais resultados da simulação computacional, baseados na comparação entre o desempenho do CONWIP aplicado em SP MTS são concluídos no Capítulo 5.

# CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura foi realizada em periódicos reconhecidos internacionalmente, assim os termos adotados como critérios de busca para a pesquisa são na língua inglesa, sendo eles: “*planning and production control*”, “*production control*”, “*management operations*”, “*manufacturing resource planning*”, “*Toyota Production System*”, “*Theory of Constraints*”, “*CONWIP*”, “*Factory Physics*”, “*Application Factory Physics*”, *Ciência da Fábrica*, “*CONWIP and Factory Physics*”, “*production programmes organisational*”, “*scheduling and control systems*”, “*hybrid systems*”, “*hybrid systems of production management*”, “*simulation management systems*”, “*simulation of production management systems*”, “*Flexsim*” e “*Simulation Flexsim*”.

A seleção dos trabalhos resultantes da pesquisa pelos termos ocorreu pela coerência dos resumos com os temas abordados nesta pesquisa. Das 73 obras consideradas nesta pesquisa, 82% são artigos científicos, 12% são livros clássicos para os temas abordados e 6% são dissertações e teses. Observa-se que 47% dos artigos estudados, concentram-se nos periódicos: *European Journal of Operational Research*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *International Journal Production Economics* e *Journal of Manufacturing Systems*. Com fator de impacto respectivamente de 2.679, 1.568, 2.782 e 2.240.

A explanação das obras foi parcialmente apresentada no Capítulo 1, com conceitos introdutórios. Argumentos específicos ao objetivo da pesquisa foram apresentados no Capítulo 2, estruturado pelas próximas seções.

## 2.1 Sistemas de Produção

Os SP são caracterizados pelas estruturas, regras e fluxos de estoques, materiais, pessoas, informações e lucro. Assim o comportamento de um SP é determinado pelo seu funcionamento (STERMAN *et al.*, 2015). Em outras palavras, os

SP são consequências da implantação de estratégias corporativas e mercadológicas das empresas (ELMOSELHY, 2013). Existem cinco tipos de SP que se diferenciam pela variedade e volume de suas atividades e produtos (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

SP do tipo Projeto trabalham com produtos customizados, de modo que cada EP tem seu funcionamento determinado conforme os projetos de cada produto. SP do tipo *Jobbing*, também conhecidos como *job shop*, são customizados, porém são mais especializados em um determinado segmento. Em sistemas *jobbing* as EP são compartilhadas com outros produtos em processo, entretanto cada PA é um produto único (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

Sistemas com produção em Lotes ou sob encomenda, também conhecidos como *make-to-order* (MTO), produzem produtos especializados em grandes escalas. A variedade e o volume de PA se equilibram. Processos de produção em massa, também conhecidos como MTS, são caracterizados pelo alto volume de fabricação gerando estoques, porém a variedade entre os produtos é baixa (GARTERMANN *et al.*, 2014). Por fim os sistemas contínuos possuem fluxos contínuos de produção e demanda, ou seja, o ritmo de produção é totalmente sem interrupções (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

Os SP que consideram a concretização da demanda para a fabricação do produto são considerados como sistemas de fluxo puxado, ou seja, a liberação das ordens de produção (OP) só é concedida mediante a demanda real (GASTERMANN; STOPPER, 2012). SP que fabricam para manter níveis de estoques são considerados como empurrados, pois toda a produção é empurrada ao mercado consumidor (ESMAEILIAN; BEHDAD; WANG, 2016). Em termos mais simples, os SP com fluxo puxado são aqueles cuja a demanda é encaminhada para a última EP, que por sua vez, aciona sua etapa anterior para atender aquela solicitação e assim acontece para todas as EP do processo. Os sistemas empurrados encaminham a demanda para a EP que inicia a produção assim que todos os recursos estão disponíveis, a produção da primeira EP é encaminhada para a EP seguinte, repetindo esta lógica de funcionamento até a última EP (LIN; CHEN, 2012).

Cada processo produtivo apresenta necessidades específicas, portanto adequações quanto ao fluxo e ao método de gerenciamento, são aplicadas de acordo

com o contexto de cada empresa (TENHIÄLÄ, 2011). O importante é garantir que os métodos de controle e gerenciamento sejam de fácil adaptabilidade e aderência às flexibilidades que o processo produtivo exige (KORUGAN; GUPTA, 2014). Esmaeilian, Behdad e Wang (2016) afirmam que um método deve gerenciar além do PCP, considerando também a análise e o planejamento de negócios, compras, qualidade, medição de desempenho e demanda. Para Gong, Yang e Wang (2014) os métodos de gerenciamento representam de maneira formal, como a empresa organiza e processa todas as informações pertinentes ao SP.

O funcionamento dos métodos de gerenciamento, em sua maioria, conta com o apoio de *softwares*, como ferramenta de apoio para o seu desempenho. Quanto mais sofisticada a ferramenta, maior a quantidade de dados necessários para estruturar o sistema e conseqüentemente o nível de detalhamento é maior (TENHIÄLÄ, 2011).

Diversas pesquisas são desenvolvidas sobre os métodos de gerenciamento da produção, destacando-se os estudos de Tenhiälä (2011) e Hendry, Huang e Stevenson (2013) referente aos tipos de processos produtivos e os respectivos modelos de PCP adotados. A interdisciplinaridade entre os métodos permitiu que novos métodos fossem desenvolvidos através da combinação entre ferramentas dos próprios sistemas, destacando-se o MHP CONWIP nos estudos desenvolvidos por Hopp e Spearman (2013) e Korugan e Gupta (2014). Os avanços permitidos pelo uso da tecnologia no gerenciamento das operações industriais, como a otimização através da simulação computacional são destacados por Sterman *et al.* (2015), Wang e Shih (2015) e Pehrsson, Ng e Bernedixen (2016). Esmaeilian, Behdad e Wang (2016) sintetizam toda a evolução dos métodos de gerenciamento.

Através das análises destas obras, observa-se que o sucesso dos métodos é variável, pois dependem do cenário que são implantados e a maneira como são conduzidos. Observa-se também que os MHP são estruturados pelos métodos tradicionais, sendo eles TR, MRPII e STP. A TR tem o foco voltado na identificação e otimização do recurso gargalo e na obtenção de lucro (ROSSI FILHO *et al.*, 2014). Seu foco é transformar toda a despesa operacional do processo em valor agregado ao produto, ou seja, os custos são transformados em lucro. Para que esta transformação ocorra, é preciso identificar o gargalo do processo e nivelar todo o sistema a este gargalo (PEHRSSON; NG; BERNEDIXEN, 2016). As regras clássicas da TR são: identificação do recurso gargalo, elaboração do PMP nivelado ao gargalo, aplicação da

ferramenta Tambor-Corda-Pulmão e otimização do gargalo. Estas regras são abordadas nos trabalhos de Verma (1997), Rossi Filho *et al.* (2014), Golmohammadi (2015) e Pehrsson, Ng e Bernedixen (2016).

O MRPII possui o fluxo empurrado e prioriza a programação e o planejamento de todos os recursos necessários à produção. O planejamento e a programação ocorrem de maneira hierarquica através de sete divisões funcionais. Seu principal objetivo é obter um PMP viável tanto em disponibilidade de recursos, quanto em capacidade produtiva. As divisões funcionais são: Planejamento de Vendas e Operações (*Sales and Operations Planning - S&OP*), Planejamento de Capacidade de Médio Prazo (*Rough Cult Capacity Planning - RCCP*), Plano Mestre da Produção (PMP), Planejamento de Necessidades de Capacidade (*Capacity Requirem Entsplannig - CRP*), Planejamento de Necessidades de Materiais (*Materials Requirements Planning - MRP*), Compras e Controle do Chão de Fábrica (*Shop Floor Control - SFC*) (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2001).

O S&OP tem a função de interagir com todos os setores administrativos e alinhar as estratégias de desenvolvimento e crescimento organizacional. Através dos planos de vendas e projeções de demanda, determina-se o planejamento agregado da produção para o horizonte de longo prazo. O PMP realiza a compatibilidade do plano agregado com a previsão detalhada de vendas e com a política de estoques. Em paralelo o RCCP faz o cálculo da capacidade necessária para concretizar a intenção de produção, gerando o PMP. O PMP é submetido ao MRP e ao CRP. O MRP realiza o cálculo da quantidade necessária de recursos a serem utilizados e o CRP faz a verificação da capacidade dos centros produtivos e seus respectivos roteiros e tempos de produção (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2001). O CRP e o MRP identificam excessos ou ociosidades de capacidade e recursos, corrigindo as generalizações dos planejamentos realizados nas etapas anteriores (TENHIÄLÄ, 2011).

O Compras realiza as aquisições de materiais necessários para o nível de estoques solicitado pelo CRP. E o SFC realiza o sequenciamento das OP, para seu respectivo centro produtivo, operacionalizando o planejamento no chão da fábrica (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2001). A principal contribuição do MRPII aos MHP é o planejamento hierárquico desenvolvido para a estruturação do PMP, com incertezas consideradas apenas nas duas primeiras etapas do planejamento (TENHIÄLÄ, 2011; GONG; YANG; WANG, 2014; MILNE; MAHAPATRA; WANG, 2015).

O STP é um conjunto de técnicas e ferramentas, desenvolvidas de maneira empírica, por Ohno e Shingo dentro das dependências da *Toyota Motor Company*. Ohno e Shingo por meio de tentativas e erros criaram um método de gerenciamento com fluxo de produção puxado, que busca de maneira incessante a redução de desperdícios e a qualidade perfeita de seus produtos e processos. Entende-se por desperdício tudo aquilo que não agrega valor ao PA, podendo ser classificado em sete categorias: superprodução, transporte, processamento, estoque, movimento e produtos defeituosos (OHNO, 1997).

Com duas frentes de abordagem, o STP visa primeiro à identificação e eliminação constante de resíduos. Para esta premissa devem-se usar as ferramentas: 5S, Mapeamento do Fluxo de Valor, Troca rápida de ferramenta, *Poka-Yoke* e JIT. A segunda abordagem é quanto à melhoria do fluxo do processo produtivo, quanto mais sincronizado, mais robusto a erros. Esta abordagem trabalha com as ferramentas: Kanban, *Kaizen*, *Heijunka*, *Comakership* e o *Jidoka* (ELMOSELHY, 2013). Destacam-se as abordagens JIT e Kanban pela compatibilidade com o objetivo da pesquisa.

O JIT é mais que uma ferramenta com uma forte filosofia de gerenciamento voltada a redução ao mínimo possível de todos os níveis de estoque (OHNO, 2011). Entretanto o desempenho e os resultados do JIT estão totalmente vinculados ao cenário interno e externo que a empresa possui, assim existem diversos estudos empíricos quanto à aplicação do JIT (CHEN; TAN, 2013). A aplicabilidade do JIT ocorre através do Kanban.

Kanban refere-se a cartões utilizados para gestão visual, é um sinal gerado autorizando a produção ou a retirada de materiais assumindo a função de uma OP (OHNO, 2011). É uma ferramenta que controla visualmente as informações necessárias para produzir somente os produtos necessários, em quantidades necessárias no momento necessário, assim a informação é fisicamente ligada ao fluxo de material (LIN; CHEN, 2012). Existem kanbans de dois gêneros: fabricação e movimentação. A quantidade de kanbans para a fabricação de cada EP é determinado pela Equação 01, os de movimentação são determinados pela Equação 02. As características de cada empresa irá refletir na necessidade dos tipos de kanbans (OHNO, 1997).

$$N_p = \left( \frac{D}{Q} \cdot T_{\text{prod}} \cdot (1 + S) \right) \quad (01)$$

$N_p$  – Número de kanbans para produção;  
 D – Demanda de fabricação;  
 Q – Quantidade de itens por lote de fabricação;  
 $T_{prod}$  – Tempo do ciclo de produção da EP;  
 S – Coeficiente do nível de estoque de segurança.

$$N_m = \left( \frac{D}{Q} \cdot T_{mov} \cdot (1 + S) \right) \quad (02)$$

$N_m$  – Número de kanbans para movimentação;  
 D – Demanda de movimentação;  
 Q – Quantidade de itens por lote de movimentação;  
 $T_{mov}$  – Tempo de movimentação do lote;  
 S – Coeficiente do nível de estoque de segurança.

O nivelamento da produção com base no recurso gargalo, o desenvolvimento do PMP através da lógica MRPII, o Kanban e o JIT são as principais contribuições dos métodos tradicionais de produção aos MHP.

## 2.2 Métodos Híbridos de Gerenciamento da Produção

A fusão entre métodos tradicionais se deve ao mercado atual, dinâmico e de competição global, exigindo das indústrias agilidade na produção com excelência em qualidade, serviço e custos. Não existe um método ideal, porém os métodos híbridos tendem a ser mais flexíveis e robustos (WANG; SHIH, 2015). Entende-se por método robusto, aquele que apresenta um bom desempenho e processos eficientes perante as oscilações de demanda de PA e de matérias primas. Entretanto, aumentar a robustez de um método pode resultar no aumento dos custos devido às alterações no fluxo do processo, aquisições e melhorias de recursos. Assim é preciso estabelecer um controle entre custos e os benefícios proporcionados pela robustez do método (MEYER; APOSTU; WINDT, 2013).

Quando um método de produção tem seu desempenho impactado de maneira negativa, chegando a extremos conhecidos como parada da fábrica, ele não é robusto e conseqüentemente pouco competitivo. Existem diversas formas de agregar robustez a um método de gerenciamento da produção, destacando-se a maneira de lançar,

organizar e acompanhar as OP e trabalhar com o excesso da capacidade produtiva (MEYER; APOSTU; WINDT, 2013).

As várias maneiras de fusão entre os métodos tradicionais de gerenciamento da produção não são mutuamente exclusivas (TENHIÄLÄ, 2011; ZHOU *et al.*, 2016). As combinações são estruturadas conforme a necessidade de cada empresa. Quando o MRPII é acoplado ao Kanban e ao JIT, produz resultados superiores comparados a métodos de fluxo empurrado (ROMAGNOLI, 2015). A composição híbrida entre Kanban e JIT, de fácil adaptação e aderência ao MRPII, é o CONWIP detalhado na próxima seção.

### **2.2.1 CONWIP**

Um dos trabalhos primórdios sobre o CONWIP é o de Spearman, Woodruff e Hopp (1990), que apresenta o CONWIP como o resultado de melhorias na ferramenta Kanban. Seu principal objetivo é ter um controle maior o WIP, reduzindo os níveis de estoques conforme prega o JIT através da programação por cartões (SPEARMAN; WOODRUFF; HOPP, 1990). O nível de WIP permanece constante para todo o processo produtivo (GONG; YANG; WANG, 2014).

O CONWIP é um método híbrido porque a liberação das OP é determinada pela retirada do PA conforme a demanda, assim, a demanda puxa o processo produtivo. A partir do momento que a OP é liberada, tornando-se um cartão conwip, o processo produtivo torna-se empurrado (SPEARMAN; WOODRUFF; HOPP, 1990). Dentro do processo produtivo deve haver apenas um cartão para todo o processo de fabricação, ou seja, um único conwip deve ser repassado a todas as EP. Diferenciando-se do Kanban que apresenta vários cartões para cada EP (ONYEOCHA *et al.*, 2015). A Figura 03 apresenta o fluxo do CONWIP e o fluxo do Kanban.

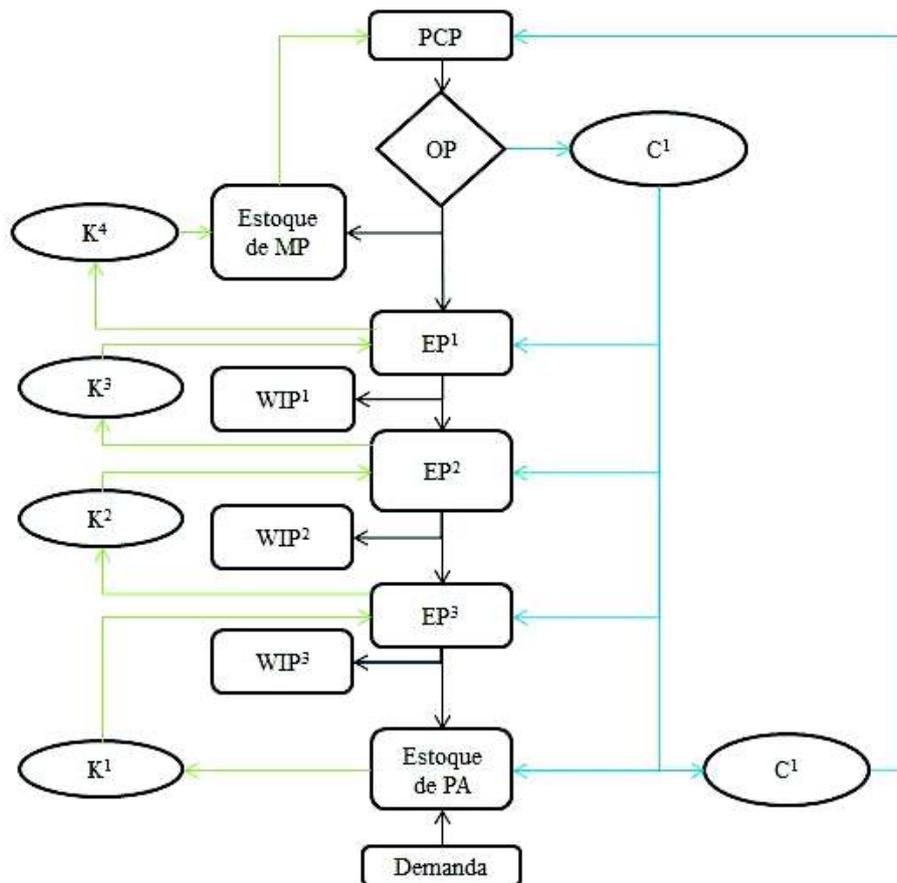


Figura 3: Fluxo do CONWIP e Kanban.

O CONWIP é representado pelo fluxo de setas em azul. O consumidor final retira o PA do estoque, gerando um conwip ( $C^1$ ) ao PCP. O mesmo conwip assume a função de OP, sendo encaminhado a todas as EP. O  $C^1$  possui a estrutura de uma lista, conhecida como *backlog list*. A lista é preenchida à medida que o cartão percorre as EP, até retornar ao estoque de PA, tornando-se disponível para uma nova demanda (SPEARMAN; WOODRUFF; HOPP, 1990).

A quantidade de cartões conwips é determinada pela Equação 03 segundo Iucksch (2005). Porém Hopp e Spearman (2013) e Jaegler, Burlat e Lamouri (2016) consideram a fórmula de Little representada pela Equação 04, como método para a determinação dos cartões conwips. Ambas as equações são estruturadas de maneiras diferentes, mas sobre as mesmas variáveis. A Equação 03 considera um fator de segurança de maneira explícita enquanto a Equação 04 considera o fator de segurança imbutido na produtividade e no tempo que o cartão necessita para completar um ciclo completo do processo de fabricação.

$$N = (D \times T) + S \quad (03)$$

N – número de cartões conwip;

D – demanda diária;

T – tempo total que um cartão leva para completar um ciclo produtivo, em percentual do dia;

S – fator de segurança, em percentual.

$$WIP = TH \cdot CT \quad (04)$$

WIP – quantidade de cartões conwip;

TH – produção média de um processo por unidades de tempo;

CT – soma dos tempos necessários para um cartão completar o ciclo de produção.

Quando o ambiente de produção possui mais de um produto ou família, cada linha de produção possui uma quantidade predeterminada de conwips. Novas liberações só ocorrem quando o conwip percorreu todo o processo e uma nova demanda é solicitada (HOPP; SPEARMAN, 2013). A quantidade total de conwips, para processos com mais de um tipo de produto em fabricação, é determinada pelo somatório de todos os cartões de autorização de produção, de todos os tipos de produtos, naquele processo produtivo. Um número alto de cartões resulta em altos níveis de WIP e possíveis congestionamento ao longo do processo de fabricação (ONYEOCHA *et al.*, 2015).

O fluxo do Kanban é representado na Figura 03 pelas setas verdes sendo que em cada EP um novo cartão Kanban é gerado. A retirada de PA do estoque gera um cartão ( $K^1$ ) que solicita a reposição da respectiva quantidade a última EP. A mesma lógica se repete até que o estoque de matéria prima solicite ao PCP a reposição dos níveis de estoque. Independente do método adotado o controle de WIP é feito em cada EP. Entretanto adotar um único cartão para todo o processo força o método de gerenciamento a determinar uma quantidade de WIP constante (HARROD; KANET, 2013).

Para Korugan e Gupta (2014), o CONWIP é um Kanban adaptado, que apresenta um desempenho melhor do que o Kanban convencional. A diferença está na quantidade de WIP para cada EP. No sistema Kanban cada lote possui um cartão que se movimenta somente dentro da EP a que pertence. Já o CONWIP impõe um limite único

considerando todo o processo produtivo, determinado pelo recurso gargalo e pelo PMP (SATYAM; KRISHNAMURTHY, 2013).

Assim como no Kanban, o CONWIP é de simples execução, podendo contar com cartões feitos de papel ou até tecnologias avançadas. O que delimita o recurso de execução é a capacidade de investimento da empresa (THÜRER *et al.*, 2016). Devido ao fato das funcionalidades empurradas do CONWIP serem semelhantes ao funcionamento do MPRII, Gastermann e Stopper (2012), sugerem que os cartões conwips sejam controlados através dos *softwares Microsoft Excel* ou *Windows Presentation Foundation* porque são *softwares* de operações simples com fácil adaptabilidade aos *softwares* de MRPII. Devido à ausência de *softwares* exclusivos para o CONWIP, a melhor alternativa está no desenvolvimento de *softwares* próprios, para a aplicação deste método de gerenciamento da produção. Desenvolver ferramentas permite que a sincronização entre o chão de fábrica e o PCP seja uniforme, e a complexidade dos *softwares* são determinados de acordo com a necessidade de cada empresa (GASTERMANN *et al.*, 2014).

Os resultados de pesquisas comparativas entre o CONWIP e o Kanban, favorecem o CONWIP em SP *jobbing*. Devido a sua execução simples, com redução de bloqueios, otimização dos níveis de estoques e os atrasos no fluxo são menores (HARROD; KANET, 2013). Independente do SP, o CONWIP possui um retorno mais ágil perante a demanda, entretanto o Kanban possui um controle mais eficiente entre as EP (BOONLERTVANICH, 2005). Para Xanthopoulos, Koulouriotis e Gasteratos (2017) apresentam que o Kanban, em vários cenários, possui resultados melhores comparado ao CONWIP.

O CONWIP é um método atraente, devido à sua facilidade de aderência e aplicação ao chão de fábrica. Entretanto, a sua limitação de WIP através de um único cartão para todo o processo pode ou não ser favorável. É favorável porque reduz os níveis de estoques para todo o processo. Desfavorável porque exige uma estrutura de PCP com precisão quanto às informações para tomadas de decisões, prejudicando a operação de empresas que não estão aptas para este método de gerenciamento e mesmo assim, tentam implanta-lo (SATYAM; KRISHNAMURTHY, 2013).

Gong, Yang e Wang (2014) realizam um estudo comparativo entre os métodos MRP e CONWIP e a ferramenta Kanban. Os autores comparam o tempo de

processamento de informações, considerando as mesmas condições para todos. O MRP possui maior tempo de processamento, seguido pelo Kanban. Os melhores resultados de desempenho são obtidos pelo CONWIP.

A maioria dos estudos referente ao CONWIP são limitados a fluxos de produção simples, ou seja, não apresentam processos flexíveis necessários à produção de muitas famílias de produtos (MHADA *et al.*, 2016). Romagnoli (2015) e Onyeocha *et al.* (2015) relatam em suas pesquisas que para a fabricação de vários produtos/famílias com demandas expressivas é necessário fazer adaptações ao CONWIP. Lin e Chen (2012) afirmam que os resultados superiores, tanto para o Kanban quanto para o CONWIP, estão sempre vinculados a cenários produtivos tipo *jobbing*. O CONWIP apresentado como uma nova abordagem de MRP robusto e flexível é desenvolvida por Hopp e Spearman (2013), por meio da Ciência da Fábrica.

#### **2.2.1.1 Ciência da Fábrica**

A Ciência da Fábrica é o resultado de consultorias desenvolvidas, para aprimorar o SP da IBM, por Hopp e Spearman entre as décadas de 80 e 90. Seu termo original é *Factory Physics*, traduzido para a linha portuguesa como Ciência da Fábrica. Consiste no estudo dos comportamentos da linha de produção, identificando tendências e oportunidades de melhorias. O termo ciência é devido à abordagem não empírica adotada, permitindo compreender as operações que sustentam a manufatura, diferente dos demais métodos como MRP e STP, que se consagraram por métodos empíricos de tentativas e erros (SPEARMAN, 2014).

A abordagem possui o foco no gerenciamento das operações de manufatura porque parte do sucesso das indústrias é consequência da eficácia de sua gestão, a outra parte consiste em obter os recursos e parcerias necessárias no momento adequado. As principais operações são o fluxo de material e o comportamento do processo de produção perante o planejamento. Assim, procuram responder à seguinte pergunta: “Como os gestores podem fazer uso do ponto de vista das operações, para identificar uma combinação sensível de políticas, que sejam eficazes e flexíveis o bastante para se adaptarem as necessidades futuras?” (HOPP; SPEARMAN, p.6, 2013).

A resposta é formulada em três pilares: no uso da ciência, para resultados precisos; na intuição, para evitar que assuntos que não são prioridades acarretem em análises detalhadas; e na síntese, para uma estrutura de trabalho unificada. Resultando

no CONWIP acoplado a pressupostos matemáticos, baseados em Teoria das Filas, que estruturam um método preditivo capaz de projetar e administrar um processo produtivo. A Ciência da Fábrica divide o processo em partes, sendo elas: os tipos de produtos, os tempos estabelecidos e a sequência das operações. Cada parte é planejada e gerenciada individualmente, mas com resultados de amplo impacto devido às similaridades entre si, pois todas pertencem ao mesmo processo e possuem recursos em comum (HOPP; SPEARMAN, 2013).

Com base nas partes do processo produtivo e suas respectivas conexões, informações atualizadas devem ser fornecidas ao PCP para a concretização do planejamento. O planejamento hierárquico, apresentado na Figura 04, resulta na projeções para a fabricação de produtos, utilizada como parâmetro para o controle da produção. O CONWIP encontra-se presente nos quadros destacados em vermelho (HOPP; SPEARMAN, 2013).

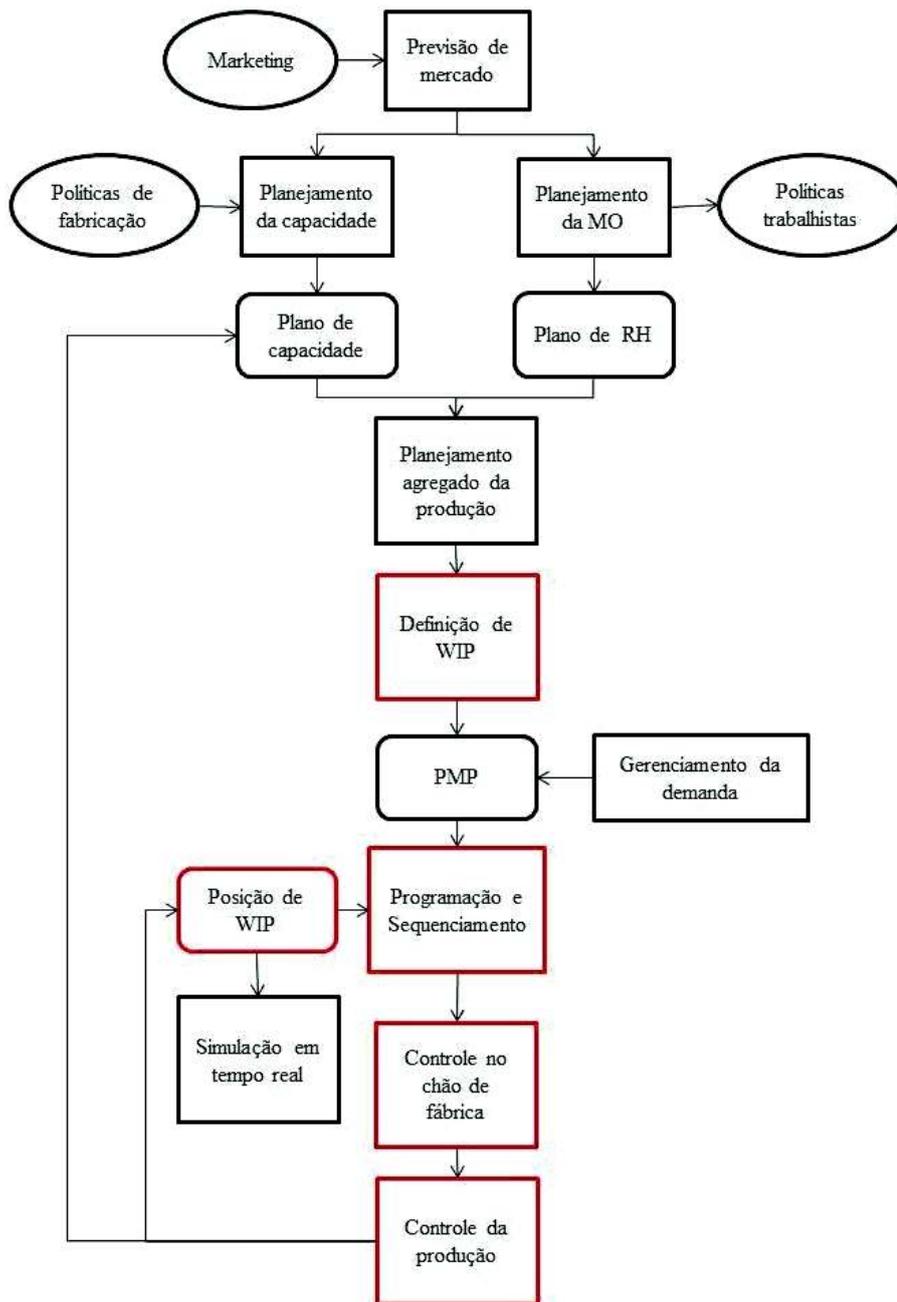


Figura 04: Fluxo de Planejamento e Controle da Ciência da Fábrica.

Fonte: adaptado de Hopp e Spearman (2013).

Considerando as previsões de demanda e tendências de mercado, o planejamento de capacidade produtiva e o planejamento da MO necessária para a fabricação prevista são determinados. Ambos influenciados por regulamentações técnicas e políticas que a empresa adota, resultando no plano agregado de produção, contendo quais e quantos recursos são necessários para a produção da demanda prevista. A projeção das quantidades a serem produzidas resulta no plano de ação que prepara a empresa para a fabricação (HOPP; SPEARMAN, 2013).

As definições de WIP determinam a quantidade de cartões conwips necessários ao chão de fábrica, gerando o PMP. O PMP verifica, com apoio do *marketing*, quais são as previsões de demanda que já foram concretizadas. Determinando a programação e o sequenciamento das ações para os próximos dias e semanas. Em paralelo ocorre o controle dos níveis de WIP através das políticas do CONWIP. Estudos sobre a alteração do cenário de produção também são desenvolvidos em um ambiente de simulação semelhante ao comportamento real do sistema. Estes estudos são desenvolvidos no intuito de analisar o comportamento do processo perante as alterações de determinadas variáveis, descobrindo e aprimorando a estrutura do processo (HOPP; SPEARMAN, 2013).

O controle do chão de fábrica é responsável por acompanhar, em tempo real, o fluxo de materiais nos processos de fabricação. Enquanto o controle da produção acompanha os progressos do processo de produção, com base no planejamento de capacidade previsto. Ambos os controles são realizados com base na movimentação dos cartões conwips (HOPP; SPEARMAN, 2013). Observa-se que a estrutura de planejamento hierárquico da Ciência da Fábrica difere-se das estruturas convencionais.

O STP é um método oriundo de tentativas e erros (OHNO, 1997), situação limitada ao ambiente de simulação sugerido pela Ciência da Fábrica (HOPP; SPEARMAN, 2013). Os fluxos de planejamento e produção são totalmente puxados no STP e são gerenciados por inúmeras ferramentas (ELMOSELHY, 2013). Já na Ciência da Fábrica o planejamento ocorre de maneira hierárquica e empurrada. Porém o fluxo de produção no chão de fábrica ocorre pela lógica do CONWIP (HOPP; SPEARMAN, 2013).

Mesmo apresentando um planejamento hierárquico empurrado, a Ciência da Fábrica difere-se do MRPII por apresentar um planejamento mais minucioso e ainda permite ajustes ao PMP, sem que seja necessário o replanejamento nos primeiros níveis organizacionais responsáveis pelo planejamento agregado da produção. O controle do chão de fábrica e da produção é executado separadamente e altos níveis de estoques não são permitidos devido ao CONWIP (HOPP; SPEARMAN, 2013; CORRÊA; GIANESI; CAON, 2001).

Para Spearman (2014), a Ciência da Fábrica é o método mais completo e robusto para o gerenciamento da produção, impulsionando novas abordagens para o

controle de estoques. A execução do planejamento hierárquico ocorre através de 21 leis desenvolvidas por Hopp e Spearman, aplicadas e gerenciadas pelo *software* CSUITE desenvolvido pelos próprios autores. Para compreender as leis faz-se necessário o entendimento sobre as seguintes variáveis (HOPP; SPEARMAN, 2013):

- *Cycle time* (CT): é a soma dos tempos de movimentação, fila, *setup*<sup>2</sup>, processamento, espera para formar um lote, esperas dentro da fabricação em um lote e espera por outras peças. Pode ser de uma estação de trabalho ou de uma linha;
- WIP (w): é o estoque existente entre o começo e o final de um roteiro de produção;
- *Lead time*: é o tempo alocado para a produção de uma peça naquele roteiro de produção;
- Produtividade (TH): é a saída média de um processo de produção por unidades de tempo.

A aplicação das leis ocorre por fórmulas matemáticas ou por pensamento intuitivo. Hopp e Spearman (2013) estruturam seus fundamentos da seguinte maneira:

- 1) Lei de Little: comprovada matematicamente por John D. C Little, determina a quantidade de WIP através da multiplicação do CT pela TH, representada pela Equação 05;

$$WIP = TH * CT \quad (05)$$

WIP – quantidade de cartões conwip;

TH – produção média de um processo por unidades de tempo;

CT – soma dos tempos necessários para um cartão completar o ciclo de produção.

- 2) Lei do melhor desempenho: em um cenário ideal a quantidade de WIP e a TH são regulares, a falta de oscilações acarreta em variabilidade zero. Assim, o processo apresentará um CT mínimo e uma produtividade máxima para um determinado nível de WIP *w*. O CT mínimo é determinado pela Equação 06. A melhor taxa de produtividade é determinada pela Equação 07;

---

<sup>2</sup> *Setup* é o tempo que o fluxo de produção permanece parado para ajustes técnicos.

$$CT_{\text{Melhor}} = \begin{cases} T_0 & \text{SE } w \leq W_0 \\ \frac{w}{r_b} & \text{nos outros casos} \end{cases} \quad (06)$$

$CT_{\text{Melhor}}$  – melhor tempo total de produção;  
 $T_0$  – tempo bruto de processamento;  
 $w$  – nível de WIP;  
 $r_b$  – taxa do gargalo, determinada com base na maior utilização do processo;  $W_0$  – nível crítico de WIP.

$$TH_{\text{Melhor}} = \begin{cases} \frac{w}{T_0} & \text{SE } w \leq W_0 \\ r_b & \text{nos outros casos} \end{cases} \quad (07)$$

$TH_{\text{Melhor}}$  – melhor taxa de produtividade;  
 $T_0$  – tempo bruto de processamento;  
 $w$  – nível de WIP;  
 $r_b$  – taxa do gargalo, determinada com base na maior utilização do processo;  $W_0$  – nível crítico de WIP.

- 3) Lei do pior desempenho: o pior cenário de um processo produtivo é representado por um CT máximo, determinado pela Equação 08. Com TH mínima, determinado pela Equação 09. Ambas as equações são relacionadas aos índices de  $r_b$  e  $T_0$  do processo;

$$CT_{\text{Pior}} = w \cdot T_0 \quad (08)$$

$CT_{\text{Pior}}$  – pior tempo total de produção;  
 $T_0$  – tempo bruto de processamento;  
 $w$  – nível de WIP.

$$TH_{\text{Pior}} = \frac{1}{T_0} \quad (09)$$

$TH_{\text{Pior}}$  – pior taxa de produtividade;  
 $T_0$  – tempo bruto de processamento.

3.1) É extremamente raro encontrar um processo produtivo com variabilidade zero e fluxo constante, como as leis do Melhor ou Pior Desempenho determinam, considerando assim o Pior Desempenho na Prática (PDP) como um parâmetro mais próximo da realidade das rotinas industriais, por considerar possíveis alterações nos tempos de processamento. A essas alterações, como a parada de um equipamento, dá-se o nome de aleatoriedade e todas as aleatoriedades do sistema

devem possuir a mesma possibilidade de ocorrer. O PDP é considerado como um ponto médio entre o melhor e pior desempenho mencionados nas Leis 2 e 3. Se o CT, a TH e os níveis médios de WIP estiverem entre os valores obtidos para o PDP e o melhor desempenho, significa que o processo é enxuto. Se os valores de CT, TH e WIP estiverem entre o PDP e o pior desempenho, significa que é preciso focar neste processo, porque é uma fonte de oportunidade para melhorias. Os valores do PDP são determinados pela Equação 10 e Equação 11;

$$CT_{PDP} = T_0 + \frac{w-1}{r_b} \quad (10)$$

$CT_{PDP}$  – tempo mais próximo da realidade para o tempo total de produção;

$T_0$  – tempo bruto de processamento;

$w$  – nível de WIP;

$r_b$  – taxa do gargalo, determinada com base na maior utilização do processo.

$$TH_{PDP} = \frac{w}{W_0 + w - 1} \cdot r_b \quad (11)$$

$TH_{PDP}$  – taxa mais próxima da realidade para a produtividade;  $w$  – nível de WIP;

$r_b$  – taxa do gargalo, determinada com base na maior utilização do processo;  $W_0$  – nível crítico de WIP.

- 4) Lei da Capacidade de MO: considerando que os operadores do chão de fábrica podem exercer múltiplas funções, estando sempre ocupados, porém sem exercerem mais de um trabalho ao mesmo tempo. A capacidade máxima de produtividade para um processo com  $n$  operadores de ritmos de trabalhos iguais é determinada pela Equação 12;

$$TH_{Max} = \frac{n}{T_0} \quad (12)$$

$TH_{Max}$  – capacidade máxima de produtividade;

$n$  – quantidade de operadores com ritmos de trabalhos

iguais;  $T_0$  – tempo bruto de processamento.

- 5) Lei da variabilidade: a falta de uniformidade nos tempos de processamento ou fluxos do processo produtivo é conhecida como variabilidade. Medir, compreender e gerenciar a variabilidade é possível através da variância calculada pela Equação 13, desvio padrão calculado pela Equação 14 e coeficiente de variação calculado

pela Equação 15, sendo  $c$  um parâmetro relativo mais representativo do cenário em estudo. O aumento da variabilidade sempre reduzirá o desempenho de um processo de produção;

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (13)$$

$\sigma^2$  – variância entre os valores de um conjunto numérico X;

$\sum_{i=1}^n$  – somatório dos valores de um conjunto numérico, com início no elemento  $i=1$  e término no elemento  $n$ ;

$x_i$  – elemento  $i$  de um conjunto de dados X;

- valor médio de um conjunto de dados;

$n$  – quantidade de elementos  $x_i$  de um conjunto de dados X.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (14)$$

$\sigma$  – desvio padrão do conjunto numérico X;

$\sum_{i=1}^n$  – somatório dos valores de um conjunto numérico, com início no elemento  $i=1$  e término no elemento  $n$ ;

$x_i$  – elemento  $i$  de um conjunto de dados X;

- valor médio de um conjunto de dados;

$n$  – quantidade de elementos  $x_i$  de um conjunto de dados X.

$$c = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (15)$$

$c$  – coeficiente de variação;

$\sigma$  – desvio padrão do conjunto numérico X;

$\bar{x}$  - valor médio de um conjunto de dados.

- 6) Lei das reservas da variabilidade: o impacto da variabilidade sobre o desempenho é inevitável, entretanto o gestor consegue gerenciar este impacto através da combinação dos estoques de segurança: materiais, tempo e capacidade. Mesmo que sejam por segurança, os estoques são vistos como desperdícios e podem ser minimizados pela flexibilidade. Um mesmo estoque deve ser aplicado de diversas maneiras, assim a flexibilidade reduz a necessidade de reservas de variabilidade;
- 7) Lei da conservação de materiais: em um processo de produção em que as entradas não excedem a capacidade produtiva, a taxa de PA é igual à taxa das entradas. Retirando-se as perdas de rendimento e acrescentando-se a produção de outras peças a partir de uma única peça inserida na entrada;

- 8) Lei da capacidade: em um processo de produção constante, quando a demanda se aproximar da capacidade produtiva, a empresa automaticamente adota alternativas como a terceirização e turnos extras de trabalho, aumentando a capacidade produtiva da empresa. Assim a liberação dos trabalhos possui uma taxa estritamente menor do que a taxa média de sua capacidade, pois a ampliação da capacidade é sempre possível;
- 9) Lei da utilização: quanto mais aumentar a taxa de utilização ( $u$ ), determinada pela Equação 16, sem que haja outras alterações no processo, maiores serão os níveis de WIP e CT. Este aumento ocorre de maneira não linear, quanto mais próximo de um for à taxa de utilização, maiores serão os impactos nos índices de WIP e CT;

$$u = \frac{\text{taxa de chegada}}{\text{taxa efetiva}} \quad (16)$$

$u$  – taxa de utilização;

taxa de chegada - taxa que representa a quantidade real de itens inseridos por um intervalo e tempo;

taxa efetiva – taxa que representa a capacidade máxima de itens inseridos por um intervalo e tempo.

- 10) Lei dos lotes de processamento: o ideal para qualquer processo produtivo que visa à redução de custos e desperdícios é adotar lotes de produção com apenas uma unidade, porém isto compromete os *setups*, os prazos estipulados e a capacidade fabril. Assim os processos produtivos com lotes ou tempo significativos de *setups* podem ter um lote mínimo de processamento maior do que um. Entretanto à medida que o lote aumenta, de maneira proporcional aumenta-se o CT do processo, mas o de uma única EP tende a ser minimizado por lotes maiores;
- 11) Lei da movimentação dos lotes: o CT de uma EP é proporcional ao tamanho do lote de transferência adotado, considerando que não há necessidade de se esperar pelos meios de transporte. Lotes de transferência menores exigem mais esforços de movimentação, entretanto pode servir como eliminação de fila adicional;
- 12) Lei das operações de montagem: a montagem consiste na combinação de diversas peças, assim o desempenho da EP de montagem é impactado: pela quantidade de produtos que são montados, a variabilidade da chegada das peças e pela falta de coordenação entre as chegadas das peças;

- 13) Lei do retrabalho: o retrabalho implica em desperdício e aumenta a variabilidade dentro do processo, assim aumenta a média do desvio padrão do CT do processo;
- 14) Lei do *lead time*: considerando o nível de atendimento ao cliente, o *lead time* da produção é uma função crescente da média e do desvio padrão do CT daquele processo produtivo. Ou seja, é o resultado do CT mais a variabilidade que afeta os tempos de processamento;
- 15) Lei da eficiência do CONWIP: comparando o MRPII com o CONWIP, observa-se que ambos possuem a mesma produtividade. Entretanto a quantidade de WIP necessário para o CONWIP é consideravelmente menor, os autores relatam índices de redução de 25%. Considerando o mesmo nível de produtividade, o CONWIP apresenta índices menores de WIP perante qualquer processo puramente empurrado, conseqüentemente os CT também são menores para o CONWIP;
- 16) Linha de robustez do sistema CONWIP: comparado a um processo com fluxo puramente empurrado, se os níveis de WIP e TH estiverem abaixo de uma condição ótima, o lucro é maior e mais nivelado em processos com o método CONWIP;
- 17) Lei do interesse pessoal: somente as pessoas que estruturam a organização é que podem melhorar a si mesmas. A organização é apenas uma fonte de influência, entretanto a decisão de se deixar influenciar é das pessoas;
- 18) Lei da individualidade: as pessoas são diferentes, portanto conclusões simplistas sobre a padronização de tarefas tendem a não representar o nível de habilidade de cada pessoa;
- 19) Lei do gênio: as pessoas que se destacam no desenvolvimento de atividades complexas normalmente são responsáveis por ela. Exercem tremenda influência no sucesso da atividade, entretanto é comum na rotina das empresas que essas pessoas sejam substituídas por diversos motivos e o desenvolvimento da atividade fica comprometido. Assim para quase todos os programas, sempre há um “gênio” ou um especialista que pode fazer dar certo, pelo menos por algum tempo;
- 20) Lei do esgotamento: os fracassos decorrentes da vida tornam as pessoas céticas, promovendo o esgotamento e o estresse pessoal, forçando a empresa adotar medidas práticas de incentivo;

21) Lei da responsabilidade: a responsabilidade concedida a pessoas que não possuem posição de autoridade é desmoralizante e contraproducente, tanto para quem recebe a responsabilidade, quanto para aqueles que estão diretamente ligados a ele.

Para Standridg (2004) as leis da Ciência da Fábrica formam um modelo analítico de como os processos produtivos funcionam. Este modelo é facilmente transformado em modelo de simulação com potencial de boas contribuições aos estudos de otimização de processos produtivos.

### **2.2.2 Ciência da Fábrica integrada ao CONWIP**

Hopp e Spearman (2013, p. 355) adotam o CONWIP como método de operação para o processo de produção por considera-lo o melhor método de controle de materiais, porque permite que os níveis de WIP sejam reduzidos em até 25% comparados aos processos com fluxos puramente empurrados. Como informado na seção 2.2.1, o CONWIP também apresenta resultados superiores de desempenho comparados a processos produtivos com fluxo puramente puxados (THÜRER *et al.*, 2016; KORUGAN; GUPTA, 2014; HARROD; KANET, 2013).

A aderência da Ciência da Fábrica com o CONWIP pode ocorrer de diversas maneiras. Hopp e Spearman (2013) sugerem que a incorporação das leis seja de acordo com as prioridades indicadas pela aplicação da Lei de Pareto no processo produtivo. Uma atenção especial deve ser designada ao grupo de variáveis que apresentam a maior relevância para o funcionamento completo do processo. Normalmente este grupo é formado por poucas variáveis comparado aos demais grupos que envolvem o processo. Diante de um método aparentemente tão robusto e completo, poucas pesquisas são desenvolvidas neste segmento e apenas com aplicações parciais.

Godinho Filho e Uzsoy (2011) verificaram o impacto que os programas de melhoria contínua de qualidade, proporcionaram no CT e no tamanho dos lotes de produção. Através da Ciência da Fábrica os autores extraíram do processo, equações matemáticas que representaram a ligação entre a média e a variância dos parâmetros pesquisados. Em seguida aplicaram as equações em um modelo de sistema dinâmico, desenvolvendo diversos cenários comparativos. Concluindo que pequenas melhorias aplicadas uniformemente e alinhadas com o tamanho certo de lotes, obtém os melhores resultados.

Com os dados do trabalho de Godinho Filho e Uzsoy (2011), um estudo mais robusto e na mesma linha de pesquisa foi desenvolvido por Godinho Filho, Guimarães e Oprime (2013). Através da simulação com Ciência da Fábrica e Sistemas Dinâmicos os autores estudaram o desempenho do processo de um único produto com cinco EP alternando melhorias. Concluindo que as melhorias realizadas nos tempos entre falhas e de reparo obtiveram reduções significativas no tempo de espera. O tempo de espera também é otimizado quando melhorias são aplicadas apenas no recurso gargalo (GODINHO FILHO; UTIYAMA, 2015).

Meyer, Aportu e Windt (2013) através da relação custo-eficiência apresentada pela Ciência da Fábrica para dimensionar a capacidade produtiva, concluíram que a capacidade produtiva pouco interfere na robustez do processo, sendo o planejamento e os métodos de controle, variáveis de maiores impactos. Fei e Jin (2013) através de um estudo teórico empírico apontam a Ciência da Fábrica como um bom método para gerenciar o CT na fabricação de semicondutores. Pergher *et al.* (2014) simularam os impactos da variabilidade, determinada pela Ciência da Fábrica, no funcionamento de um Kanban, concluindo que o Kanban é totalmente frágil as variabilidades típicas das rotinas dos processos produtivos.

A Ciência da Fábrica é um método voltado para a aplicação em CONWIP, destacando-se as Leis de eficiência e robustez do sistema CONWIP desenvolvidas como fundamentos essenciais para a aplicação da Ciência da Fábrica (HOPP; SPEARMAN, 2013). Entretanto, pesquisas com o CONWIP aprimorado pela Ciência da Fábrica são escassas. Devido à compatibilidade com o objetivo desta pesquisa a Lei do melhor desempenho, Lei do pior desempenho, Lei da variabilidade, Lei da utilização, Lei da eficiência e da robustez do CONWIP foram importantes para a composição da análise comparativa do CONWIP.

As Leis do melhor e pior desempenho (leis 02 e 03) e a aplicação do pior desempenho na prática (lei 3.1) permitiram o desenvolvimento de valores comparativos para avaliar o desempenho do processo de produção. Os cenários desenvolvidos com os valores obtidos pelas Leis do pior e melhor desempenho permitiram observações quanto ao comportamento da Lei da variabilidade (lei 05) e Lei da utilização (lei 09). O objeto em estudo possuía um fluxo de produção puramente empurrado, permitindo que as Leis da eficiência e da robustez do CONWIP (leis 15 e 16) também fossem analisadas (HOPP; SPEARMAN, 2013). As demais leis da Ciência da Fábrica podem ser

incorporadas em um ambiente CONWIP, entretanto estão relacionadas com as políticas de gerenciamento de materiais e pessoas. Assim, interferem no resultado obtido de todas as leis apresentadas pela Ciência da Fábrica, mas não de maneira explícita.

Nesta pesquisa o modelo CONWIP foi validado no ambiente de simulação computacional. Observou-se que a simulação computacional esteve presente nos estudos de Ciência da Fábrica desenvolvidos por Godinho Filho e Uzsoy (2011), Godinho Filho, Guimarães e Oprime (2013), Meyer, Aportu e Windt (2013), Pergher *et al.* (2014), Godinho Filho e Utiyama (2015) e Xanthopoulos, Koulouriotis e Gasteratos (2017).

### **2.3 Simulação Computacional**

Entende-se por simulação computacional a experiência de imitar o funcionamento de um sistema real, através da concepção de um modelo que funciona com o auxílio de um computador (CHWIF; MEDINA, 2010). O primeiro passo para o desenvolvimento de um sistema de simulação computacional consiste na definição do modelo, através da descrição dos processos a serem simulados (MERODE; GROOTHUIS; GOLDSCHMIDT, 1999).

O modelo é desenvolvido com base em um cenário real ou fictício, tido como objeto de estudo, a projeção de objetos e instruções representam as entidades e suas respectivas interações, imitando o comportamento do objeto de estudo. Não é possível representar fielmente o objeto de estudo real, devido a falta de domínio sobre determinadas variáveis, como o comportamento humano. Quanto mais próximo o modelo for do objeto de estudo, mais se aproxima da realidade as análises e resultados (ONYEOCHA *et al.*, 2015).

Os modelos de simulação são classificados de acordo com a sua estrutura, ou seja, os objetivos pelos quais respondem interfere na determinação do modelo (SCHUBERT *et al.*, 2015). Podem ser classificados em simulação de Monte Carlo, simulação contínua e simulação de eventos discretos (CHWIF; MEDINA, 2010). A complexidade dos modelos pode resultar na subdivisão do modelo em partes chamadas de subsistemas, cada parte representa uma área funcional específica dentro de um conjunto maior (TAYLOR *et al.*, 2012).

Em seguida ocorre a coleta de dados, os dados representam as variáveis que determinam o comportamento dos processos (MERODE; GROOTHUIS; GOLDSCHMIDT, 1999). Cada conjunto de dados possui uma distribuição de probabilidade identificadas através de análises estatísticas, as características estatísticas dos dados são inseridas em suas respectivas entidades no modelo de simulação, representando as ações típicas do objeto de estudo (SCHUBERT *et al.*, 2015).

De acordo com a complexidade do objeto de estudo, pode acontecer do objeto dispor de uma grande quantidade de dados. A determinação de quais dados são considerados na concepção do modelo, é vinculada com os objetivos pelos quais o modelo é desenvolvido. Se o projetista não dispõe de conhecimento prévio de quais dados devem ser considerados na construção do modelo e se houver muitos dados e variáveis disponíveis, recomenda-se o uso de Mineração de Dados para obter as principais variáveis (AQLAN; LAM; RAMAKRISHNAN, 2014).

Para certificar que o objeto de estudo está representado no modelo de simulação, testes estatísticos devem ser realizados em ambos, a comparação dos valores obtidos pelos testes é a validação do modelo. Após ser validado o modelo esta apto para receber as alterações, de acordo com os objetivos determinados antes da concepção do modelo. Neste momento ocorre uma verificação quanto a estrutura do modelo, o objetivo é averiguar se não há erros no desenvolvimento do modelo, garantindo que o comportamento obtido está correto, independente dos resultados pretendidos pelo projetista (MERODE; GROOTHUIS; GOLDSCHMIDT, 1999).

A verificação indica se o modelo foi desenvolvido e funciona corretamente, a validação indica que ele é compatível com o cenário do qual foi retirado (AQLAN; LAM; RAMAKRISHNAN, 2014). Após as alterações necessárias pela verificação o modelo é validado e os resultados obtidos através da análise do comportamento do modelo são mensurados (MERODE; GROOTHUIS; GOLDSCHMIDT, 1999). Uma das principais vantagens da simulação é a condição de prever aproximadamente, os impactos das alterações pretendidas, na implantação de um projeto no cenário real. Assim os projetos são passíveis de otimização antes de serem implantados (LIM; ALPAN; PENZ, 2014).

A simulação mais utilizada para o estudo de sistemas produtivos é a simulação de eventos discretos (*Discrete Event Simulation* - DES) devido a

flexibilidade que possui (AQLAN; LAM; RAMAKRISHNAN, 2014). A DES é utilizada para modelos que tem seu comportamento alterado a partir da ocorrência de um evento, em um momento discreto do tempo (CHWIF; MEDINA, 2010). Para Aqlan, Lam e Ramakrishnan (2014) a concepção de modelos para DES segue o fluxo: determinação dos objetivos, coleta de dados, tratamento estatístico dos dados para o cenário de simulação, construção do modelo, verificação e validação e análise *what-if*<sup>3</sup>. Semelhante ao fluxo de Merode, Groothuis e Goldschmidt (1999).

Chwif e Medina (2010) também possuem uma metodologia consagrada e semelhante a de Aqlan, Lam e Ramakrishnan (2014) e Merode, Groothuis e Goldschmidt (1999), porém é mais detalhada e adota nomes aos modelos concebidos nas fases intermediárias. O processo inicia-se com a determinação dos objetivos pelos quais o modelo de simulação irá atender, obtendo um modelo abstrato do que se pretende obter, em outras palavras é a ideia mentalizada do modelo a ser desenvolvido pelo autor ou projetista. Em seguida ocorre a coleta de dados e o tratamento estatístico dos mesmos, antes de ir para o ambiente de simulação uma representação do modelo é realizada resultando no modelo conceitual (CHWIF; MEDINA, 2010).

Em seguida a representação do modelo é inserida no ambiente de simulação e os dados inseridos em suas respectivas entidades, representando o modelo computacional do sistema. O modelo conceitual é verificado e validado se tornando um modelo operacional, pronto para receber as alterações desejadas pela análise *what-if*. Por fim os resultados obtidos pela análise experimental são mensurados (CHWIF; MEDINA, 2010). Independente da abordagem adotada para a modelagem e simulação computacional o importante é o rigor científico na concepção, implantação e análise dos modelos.

Os modelos de simulação para processos produtivos representam principalmente os fluxos de materiais, estoques, informações, pessoas e financeiro. Simular processos com tomada de decisão é uma forte limitação dos modelos, pois existem inúmeras variáveis externas a empresa que interferem no comportamento do sistema. Mesmo com esta forte limitação, a simulação de modelos reais permite inúmeros avanços (STERMAN *et al.*, 2015).

---

<sup>3</sup> Análise “*what-if*” são verificações quanto ao comportamento do modelo de simulação, sempre que uma alteração é realizada. A cada alteração o comportamento do modelo é analisado, até que os objetivos sejam atendidos fazem-se alterações.

Negahban e Smith (2014) fizeram uma revisão de literatura considerando 290 obras entre período de 2002 e 2013, sobre a aplicação da simulação na manufatura. Destacaram-se as aplicações voltadas as análises quanto a disposição física dos recursos no chão de fábrica e o desempenho operacional dos processos de produção, com resultados eficazes e próximo a realidade das indústrias. Chiang *et al.* (2014) aponta a relevância dos estudos desenvolvidos na área de gestão de operações, com o uso da simulação para a comparação entre cenários ideiais e atuais, impulsionando melhorias nas empresas.

Pesquisas com modelagem e simulação computacional são desenvolvidas expressivamente para o estudo de processos, apoio para o PCP, gestão de recursos e cibernética de processos de produção (WANG; SHIH, 2015). Esmaeilian, Behdad e Wang (2016) reforçam o quanto estudos são desenvolvidos com o uso de simulação para apoiar o PCP, principalmente através da otimização dos atuais métodos adotados para o controle do processo produtivo.

Melouk *et al.*, (2013) através da simulação pelo *software* Arena analisam os níveis de WIP, a capacidade de produção e utilização com o objeto de reduzir os custos de produção para uma indústria de aço. Godinho Filho, Guimarães e Oprime (2013) simulam com o *software* Vensim os efeitos de seis programas de melhoria da qualidade no comportamento do chão de fábrica. Godinho Filho e Utiyama (2015) aprofundam as análises para as melhorias implantadas apenas no recurso gargalo e melhorias implantadas ao longo da linha de produção.

Aqlan, Lam e Ramakrishnan (2014) analisam a organização do chão de fábrica comparando um arranjo físico determinado por processos e um arranjo físico determinado por produtos. O tratamento estatístico dos dados é totalmente realizado pelo *software* ExpertFit e a simulação é feita com o *software* Arena. Com o objetivo de gerar flexibilidade ao processo produtivo Lim, Alpan e Penz (2014), quantificam a política de vendas, o planejamento e as operações de fabricação da Renault através da simulação computacional com linguagem Java.

Pergher *et al.* (2014) através da DES estuda a variabilidade da Ciência da Fábrica em um Kanban, a simulação é feita no *software* Micro Saint e as análises foram realizadas no *software* Minitab. Romagnoli (2015) implanta o CONWIP através da simulação em uma empresa de fluxo empurrado, a simulação é feita

pelo *software* SIMUL8 e o tratamento dos dados para o ambiente de simulação é feito pelo *software* Microsoft Excel.

Golmohammadi (2015) identifica o recurso gargalo em um processo de fabricação de um automóvel, seu estudo é desenvolvido pela simulação no *software* Arena. Pehrsson, Ng e Bernedixen (2016) desenvolvem um estudo que além de identificar quais são os pontos de estrangulamentos no processo de produção, indicam quais são as prioridades. Os autores destacaram como limitação a ausência de *softwares* com os algoritmos já implantados. Jain e Foley (2016) através da simulação estudam falhas em processos de produção automatizados, os *softwares* utilizados são o Simul8-Planner e o Símio.

Existem inúmeros programas de simulação, mas para os projetistas que desconhecem a linguagem de programação computacional, recomenda-se os programas de interação gráfica. Estes possuem ícones graficamente semelhantes a objetos do cenário em estudo facilitando o desenvolvimento do modelo de simulação (MERODE; GROOTHUIS; GOLDSCHMIDT, 1999).

O FlexSim é um *software* de simulação computacional desenvolvido especialmente para projetar modelos de produção automatizados e informatizados, com capacidade de fabricar um ou vários tipos de produtos. Sua flexibilidade se deve a base de dados agregada ao simulador. A tela de trabalho é uma plataforma gráfica 3D que permite a criação e alterações de configurações nos modelos de simulação, sem que o programador tenha conhecimento específico na linguagem de programação. A plataforma gráfica é baseada na representação lógica de objetos de processos de fabricação reais (GELENBE; GUENNOUNI, 1991).

Bancos de dados informatizados reais são facilmente transportados para a base de dados de simulação do FlexSim. As funções de destaque do FlexSim consistem em: verificação da consistência dos modelos desenvolvidos; quantificação de dados como taxas de produção, utilização, armazenamento e gargalos; identificação de bloqueios; indicação dos efeitos das alterações físicas e de carga de trabalho; e ainda permite otimizações (GELENBE; GUENNOUNI, 1991).

O FlexSim é conhecido como um *software* de fácil interação, sem que o usuário tenha que dominar linguagens específicas de programação para a concepção dos modelos. Permitindo assim uma maior exploração por parte dos usuários leigos que

trabalham com simulação em um ambiente 3D, em um período de tempo relativamente menor que o necessário para o aprendizado de linguagens de programação (GREENWOOD; BEAVERSTOCK, 2011).

Pawlewski et al. (2012) escolheram o FlexSim por ser um *software* de fácil interação e aplicabilidade, com arquitetura aberta, permitindo a inserção de novos objetos. Assim estudam a quantidade de recipientes com janelas, necessários na fila do processo de montagem de automóveis. Huang *et al.* (2013) através do FlexSim estudaram a alta variedade e o baixo volume de demanda em uma indústria de televisores com tela de cristal líquido (LCD), para modelar um processo de produção de linha mista. O objetivo deste trabalho foi resolver o problema construindo um modelo de programação e re-agendamento.

Pan, Shih e Wu (2015) usaram o FlexSim para aplicar um algoritmo genético de grupo e obter resultados quanto à distribuição do arranjo físico de uma linha de embalagem e a quantidade de lotes na linha. O objetivo foi reduzir o tempo de operação no processo de embalagens por seção. O FlexSim foi utilizado por Keizer *et al.* (2015) para desenvolver um modelo que analisa a localização, o fluxo e a alocação dos processos de um distribuidor de produtos perecíveis. Rifai *et al.* (2016) usaram o FlexSim para identificar a sequência ótima de postos de trabalho e seus respectivos roteamentos em um MHP.

O tratamento estatístico dos dados é como uma espinha dorsal para a simulação, todos os comandos e o desempenho do modelo são reflexos do tratamento estatístico dos dados utilizados no modelo. O FlexSim permite que os dados sejam tratados através do *software* estatístico ExpertFit, que retorna as funções prontas para o ambiente de simulação do FlexSim, minimizando os erros no tratamento estatístico dos dados (GREENWOOD; BEAVERSTOCK, 2011).

O ExpertFit é um *software* estatístico que permite a análise e o desenvolvimento dos dados que representam o comportamento dos modelos de simulação. De maneira automática ele identifica as meninas de dispersão e posição do conjunto de dados e as classifica em uma distribuição estatística. O ExpertFit possui 40 distribuições estatísticas e sua determinação é resultante de três testes de ajustes de qualidade (FLEXSIM). A seção seguinte descreve os parâmetros estatísticos típicos da simulação computacional.

## 2.4 Parâmetros estatísticos utilizados na análise do desempenho de modelos de simulação computacional

Os modelos de simulação de um processo real são a representação digital do processo produtivo adotado como objeto de estudo. O comportamento estocástico dos dados é representado pela distribuição de probabilidade identificada (FREITAS FILHO, 2008). Amostras com um número finito de possibilidades assumem distribuições discretas e são representadas por sua função de probabilidade. As amostras com um número infinito de possibilidade assumem distribuições contínuas e são representadas por sua função de densidade (WALPOLE *et al.*, 2009).

As distribuições estatísticas são representadas principalmente pela sua função de densidade e sua forma gráfica. Dentre as inúmeras distribuições contínuas, destacam-se, devido à compatibilidade com os dados de estudo: Weibull, Weibull Invertida, Gaussiana Inversa, Pearson V e VI e Johnson SB.

A distribuição Weibull é típica em estudos de confiabilidade de sistemas ou equipamentos, representando tempos de falhas. Sua forma gráfica é determinada pelo parâmetro forma, podendo assumir diversas formas gráficas, sendo mais comuns as formas de sino e longas caudas tanto para a esquerda quanto para a direita (FREITAS FILHO, 2008). Sua função de densidade é representada pela Equação 17 e sua forma gráfica é apresentada na Figura 5. A distribuição Weibull Invertida é semelhante à Weibull, entretanto uma de suas variáveis é exponenciada. Sua função de densidade é representada pela Equação 18 (HASSAN *et al.*, 2014).

$$f(x) = \alpha \beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} \exp^{-(x/\beta)^\alpha} \quad (17)$$

$\alpha$  – parâmetro de escala;

$\beta$  – parâmetro de forma;

$\exp$  – distribuição exponencial;

x – variável aleatória com distribuição weibull.

$$f(x^k) = \alpha^{\frac{k}{\beta}} \Gamma\left(1 - \frac{k}{\beta}\right) \quad \text{se } \beta > k \quad (18)$$

$\alpha$  – parâmetro de escala;

$\beta$  – parâmetro de forma;

k – momento da distribuição weibull invertida;

$x$  – variável aleatória com distribuição weibull invertida;

$\Gamma$  – função gama.

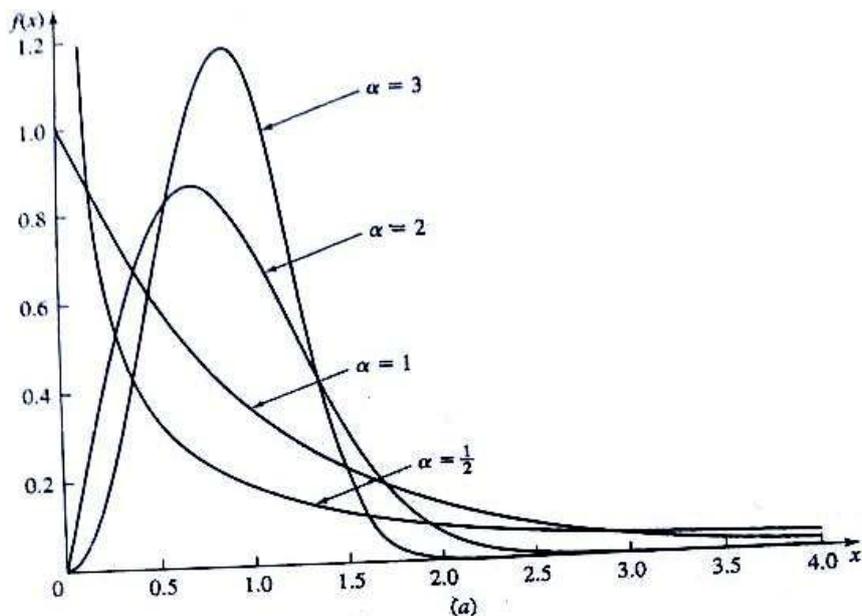


Figura 5: Forma gráfica da distribuição Weibull.

Fonte: Law e Kelton (1991).

A distribuição Gaussiana Inversa é usualmente aplicada para relatar a confiabilidade da probabilidade de vida de um produto ou equipamento e para representar movimentos Brownian (CHEN; CHANG; CHENG, 2004). Sua função de densidade é representada pela Equação (19) e suas formas gráficas mais comuns são apresentadas na Figura 6.

$$f(x) = \alpha(2\pi\beta)^{-1/2}x^{-3/2} \exp\left\{-\frac{1}{2\beta x}(\beta x - \alpha)^2\right\} \quad (19)$$

$x$  – variável aleatória com distribuição gaussiana inversa;

$\alpha$  – parâmetro de escala;

$\beta$  – parâmetro de forma;

$\exp$  – distribuição exponencial;

$\pi$  – pi.

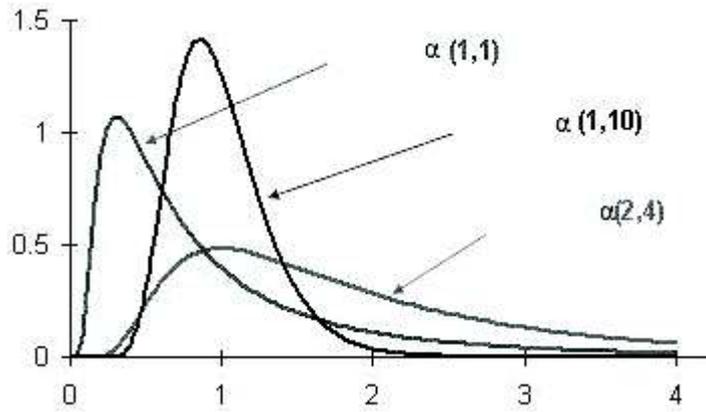


Figura 6: Forma gráfica da distribuição Gaussiana Inversa.  
Fonte: Law e Kelton (1991).

A distribuição Pearson tipo V é semelhante a distribuição Gamma Invertida, sendo utilizada para representar o tempo de atendimento ou operação e estudos referentes a transmissão de vídeo (LAZARIS; KOUTSAKIS; PATERAKIS, 2008). Sua função de densidade é representada pela Equação 20 e suas formas gráficas mais comuns são apresentadas na Figura 7.

$$f(x) = \frac{x^{-(\alpha+1)} \exp^{-\beta/x}}{\beta^{-\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad (20)$$

$\alpha$  – parâmetro de escala;

$\beta$  – parâmetro de forma;

$\exp$  – distribuição exponencial;

$\Gamma$  – função gamma;

$x$  – variável aleatória com distribuição pearson V.

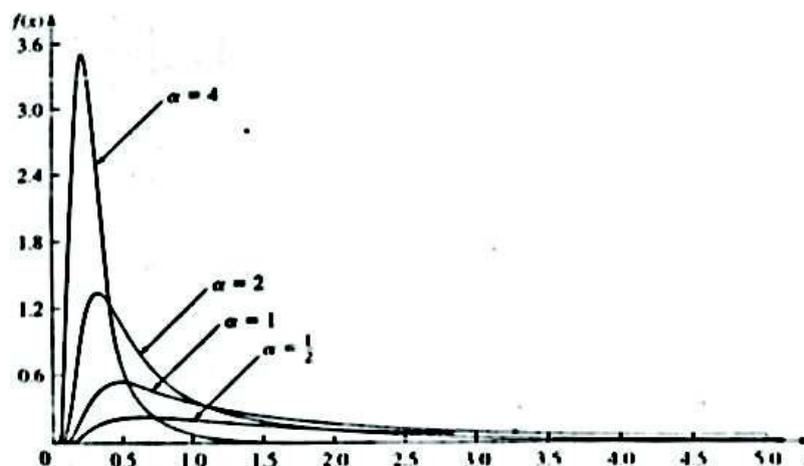


Figura 7: Forma gráfica da distribuição Pearson V  
Fonte: Law e Kelton (1991).

A distribuição Pearson VI tem sua utilização vinculada a modelo de filas, apesar do seu nome ser semelhante a Pearson V ela se aproxima da distribuição Beta. Sua forma gráfica é característica de picos afinados e caudas longas, representado na Figura 8 (JINHWAN *et al.*, 2011). Sua função de densidade é representada pela Equação 21.

$$f(x) = \frac{(x/\beta)\alpha_1^{-1}}{\beta B(\alpha_1, \alpha_2)[1+(x/\beta)]^{\alpha_1 + \alpha_2}} \quad (21)$$

$\alpha_1$  – primeiro parâmetro de escala;

$\alpha_2$  – segundo parâmetro de escala;

$\beta$  – parâmetro de forma;

B – distribuição beta;

$x$  – variável aleatória com distribuição pearson VI.

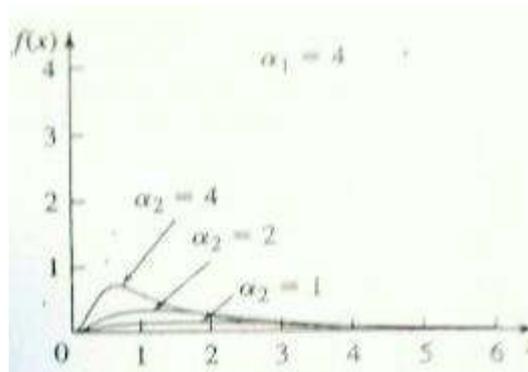


Figura 8: Forma gráfica da distribuição Pearson VI.  
Fonte: Law e Kelton (1991).

A distribuição Johnson SB é de ampla aplicação sendo comum para representar um conjunto de dados com quedas de valores. Possui domínio limitado, mas dentro deste domínio pode assumir diferentes formas gráficas (D'ADDERIO *et al.*, 2016). A função de densidade é apresentada na Equação 22 e algumas de suas formas gráficas são ilustradas na Figura 9.

$$f(x) = \frac{\alpha_2(b-a)}{(x-a)(b-x)\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{1}{2} \left[ \alpha_1 + \alpha_2 \ln \left( \frac{x-a}{b-x} \right) \right]^2 \quad (22)$$

$\alpha_1$  – primeiro parâmetro de escala;

$\alpha_2$  – segundo parâmetro de escala;

$b$  – número máximo do conjunto de dados;

$a$  – número mínimo do conjunto de dados;

$x$  – variável aleatória com distribuição Johnson SB;

$exp$  – distribuição exponencial;

$ln$  – logaritmo.

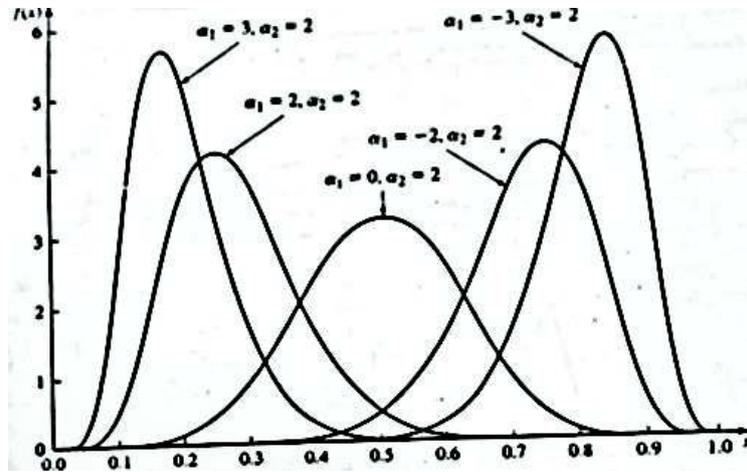


Figura 9: Forma gráfica da distribuição Johnson SB

Fonte: Law e Kelton (1991).

A distribuição estatística é importante no ambiente de simulação computacional porque é através de seus parâmetros que o *software* de simulação gera dados aleatórios para estruturar o comportamento do modelo simulado. Para verificar o nível de ajuste da distribuição com os dados analisados existem testes estatísticos de qualidade de ajustes, que possuem o objetivo de verificar se os dados da amostra seguem a distribuição identificada. O teste de Anderson Darling é calculado pela Equação 23. Sendo reconhecido como um bom teste de aderência, porque as distâncias verticais são integradas em todos os valores de  $x$  para fazer uso máximo dos dados observados, dando ênfase nos extremos da distribuição. A aceitação do valor obtido para o teste de Anderson Darling é correspondente aos níveis de confiabilidade que cada autor deseja (WALPOLE *et al.*, 2009).

$$A_n^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |F_n(x) - F(x)|^2 \psi(x) \cdot f(x) \cdot dx \quad (23)$$

O teste de Kolmogorov Smirnov é calculado pela Equação 24 e verifica a aderência da distribuição através da distância máxima entre a função de distribuição da amostra e a função de distribuição da distribuição, com aceitação correspondente ao nível de confiabilidade desejado (WALPOLE *et al.*, 2009).

$$D_n = \max[|F_n(x) - F(x)|] \quad (24)$$

## 2.5 Considerações parciais

Um dos motivos que os MHP não proporcionam melhores resultados é a falta de conhecimento dos planejadores sobre a importância de combinar métodos e a maneira como realizar essa combinação (TENHIÄLÄ, 2011). Um bom método é aquele que possui detalhes suficientes para refletir a dinâmica do controle de produção, mas com uma interface simples e um processamento lógico (GLAVAN *et al.*, 2013). Além de satisfazer a competitividade desejada pela empresa e mercado consumidor (GARTERMANN *et al.*, 2014; MHADA *et al.*, 2016).

O CONWIP é um MHP por ser puxado e empurrado, e possui resultados superiores, em determinados cenários, comparado aos STP e MRPII (KORUGAN; GUPTA, 2014; GONG; YANG; WANG, 2014). Mas é um método que possui falhas prejudicando a sua aplicabilidade no cenário real das indústrias (GARTERMANN *et al.*, 2014; ROMAGNOLI, 2015; ZHOU *et al.*, 2016; MHADA *et al.*, 2016; XANTHOPOULOS; KOULOURIOTIS; GASTERATOS, 2017; PERGHER; ALMEIDA, 2017). A Ciência da Fábrica é um método recente que concilia métodos tradicionais e abordagem científica, aprimorando o funcionamento do CONWIP, pois todas as suas leis e o planejamento hierárquico foram desenvolvidos considerando o CONWIP como método operacional (HOPP; SPEARMAN, 2013). Entretanto não há correlatos expressivos com a combinação entre o CONWIP e a Ciência da Fábrica.

Com o objetivo de comparar o desempenho de um processo produtivo MTS com o desempenho do mesmo processo gerenciado pelo CONWIP, o ambiente de simulação computacional é considerado para obtenção dos resultados. A seguir os procedimentos metodológicos adotados são apresentados.

# Capítulo 3 – ABORDAGEM METODOLÓGICA

Pesquisas científicas são importantes porque relatam os avanços científicos de suas respectivas áreas, norteando o desenvolvimento profissional do segmento considerado no estudo (HSIEH; CHANG, 2009). A divulgação da informação desenvolvida por meio de pesquisa científica ocorre através dos meios de publicações, entretanto, o seu reconhecimento é vinculado ao rigor metodológico, passível de debate e verificação, garantindo que o desenvolvimento das áreas de estudo seja promissor (DRESCH, 2013).

Pesquisas desenvolvidas no campo de conhecimento da Engenharia de Produção buscaram principalmente o desenvolvimento de novos artefatos e melhorias em processos já existentes, com a finalidade de melhorar as organizações, aproximando a prática do engenheiro com a realidade (DRESCH, 2013). Entende-se por abordagem metodológica o conjunto de atividades sistemáticas e racionais que norteiam o desenvolvimento da pesquisa de modo a satisfazer um objetivo (MARCONI & LAKATOS, 2010).

Jung (2004) desenvolveu etapas que determinaram a metodologia científica para estudos voltados a modelagem científica para o desenvolvimento de tecnologias, produtos e processos. Esta pesquisa teve seu tema voltado ao estudo de processos, especificamente processos de produção industrial com o fluxo MTS. Assim, foi adotado como roteiro científico a abordagem apresentada por Jung (2004), devido à compatibilidade com a proposta da pesquisa. A princípio definiu o problema de pesquisa e identificaram os elementos envolvidos, resultando no modelo mental de um sistema físico real. Este roteiro classificou a pesquisa quanto à natureza, aos objetivos, a abordagem, os procedimentos e o método. A seguir todas as classificações são apresentadas.

### **3.1 Natureza da pesquisa**

Consultas aos meios científicos foram realizadas, verificando quais questões problemáticas necessitavam de contribuições. As informações foram coletadas através da pesquisa bibliográfica, caracterizando-se pela análise de documentos publicados de teor científico (MARCONI; LAKATOS, 2010). Foram considerados, conforme apresentado no Capítulo 2, artigos disponíveis nos periódicos com fator de impacto relevante, dissertações e teses disponíveis nos principais bancos de dados de universidades que são referências no desenvolvimento de pesquisas em Engenharia de Produção.

Foi constatado na revisão da literatura a ausência de MHP flexíveis e robustos a ponto de satisfazer as exigências das empresas e do mercado consumidor (KRAUSE; YOUNGDAHL; RAMASWAMY, 2014; GANSTERER, 2015; MHADA *et al.*, 2016). Sendo os resultados mais promissores apresentados até o momento pelo CONWIP, entretanto, não possui resultados expressivos referentes ao seu funcionamento e aplicação em processos produtivos reais (GARTERMANN *et al.*, 2014; ROMAGNOLI, 2015; JAEGLER; BURLAT; LAMOURI, 2016). Para Hopp e Spearman (2013) o CONWIP é o melhor método de gerenciamento da produção se considerado junto com a Ciência da Fábrica, mas são poucos os estudos que relatam a combinação do CONWIP com a Ciência da Fábrica

Diante do que foi exposto, a pesquisa foi de natureza aplicada porque teve o intuito de desenvolver a aplicação do conhecimento já apresentado por meio da pesquisa básica (JUNG, 2004). Em seguida ocorreu a delimitação da pesquisa identificando os elementos envolvidos, resultando no objetivo.

### **3.2 Objetivos e abordagem**

Considerando os recursos disponíveis e sua respectiva acessibilidade o objetivo da pesquisa foi comparar o desempenho de um processo produtivo MTS com o desempenho do mesmo processo gerenciado pelo CONWIP, utilizando a simulação computacional como cenário de estudo.

A determinação do objetivo classificou a pesquisa como hipotético-dedutiva porque gerou informações averiguando se o CONWIP foi capaz de aprimorar o desempenho de um processo produtivo MTS. A análise dos resultados foi realizada por meio da comparação dos valores assumidos por determinadas variáveis e pela

classificação do cenário produtivo através das leis da Ciência a Fábrica, portanto sua abordagem foi quantitativa (JUNG, 2004). As variáveis estudadas que influenciam o desempenho dos SP normalmente são: TH, CT, capacidade produtiva, nível de utilização dos recursos, estoques e filas (AQLAN; LAM; RAMAKRISHNAN, 2014; GODINHO FILHO; UZSOY, 2011; GODINHO FILHO; GUIMARÃES; OPRIME, 2013; GODINHO FILHO; UTIYAMA, 2015; GANSTERER, 2015; XANTHOPOULOS; KOULOURIOTIS; GASTERATOS, 2017). Todas estas variáveis foram analisadas pelos estudos correlatos de maneira comparativa através dos resultados obtidos em simulação computacional.

### **3.3 Procedimentos e método**

Os objetivos exigiram que procedimentos adequados fossem considerados para satisfazer as necessidades práticas de execução da pesquisa. Os procedimentos determinaram à maneira que os dados foram coletados e analisados para solucionar a problemática considerada e estruturaram o modelo de sistema físico real (JUNG, 2004). Assim o objeto de estudo foi um processo produtivo com fluxo MTS, sendo este modelado e submetido à experimentação de novos parâmetros. Os procedimentos adotados caracterizaram a pesquisa como experimental, pelo método da modelagem e simulação computacional.

A simulação computacional é caracterizada por um ambiente que permite a imitação do funcionamento de um sistema real ou hipotético através do auxílio de um *software* (CHWIF; MEDINA, 2010). É um cenário muito utilizado em estudos de SP porque permite a concepção de cenários próximos a realidade, viabilizando a análise dos processos produtivos, sem que sejam necessários experimentos reais com altos custos e pouco controle sobre as variáveis e o tempo (AQLAN; LAM; RAMAKRISHNAN, 2014).

#### **3.3.1 Modelagem e Simulação computacional**

A modelagem e simulação computacional geram dados robustos com potencial de medições estatísticas, indicando a eficiência de modelos (LAW; KELTON, 1991). Isto é possível devido a capacidade dos modelos de abstração da realidade tornando-se um sistema mais simples do que o real, mas é próximo do verdadeiro comportamento do sistema (CHWIF; MEDINA, 2010). O modelo é a descrição e a

representação de como as coisas são ou deveriam ser. (LACERDA *et al.*, 2013). A escolha do modelo como artefato de solução à problemática se deve a sua capacidade de representar a realidade, através de suas variáveis e do estudo de suas relações (DRESCH, 2013).

Para satisfazer a problemática um modelo estruturado por CONWIP foi desenvolvido. O modelo foi classificado como abstrato quantitativo experimental, porque através da simulação computacional foram observadas as alterações de variáveis em um ambiente de domínio específico e os resultados foram mensurados (MIGUEL *et al.*, 2012). O modelo ainda foi classificado de acordo com Chwif e Medina (2010) como um arquétipo de DES porque seu estado foi alterado em um intervalo de tempo discreto por meio do acontecimento de um evento.

O método de simulação proposto por Chwif e Medina (2010) foi considerado por ser de fácil compreensão e aplicação para leigos em simulação computacional. O método consiste em três etapas: concepção do modelo, implementação do modelo e análise dos resultados.

### **3.3.1.1 Concepção**

A concepção do modelo foi caracterizada pela formulação dos modelos abstrato, conceitual e coleta de dados. O modelo abstrato é o que se tem em mente na definição da problemática e dos objetivos, sendo estruturado graficamente (fluxograma) ou por algoritmo (pseudocódigo) tornando-se o modelo conceitual (CHWIF; MEDINA, 2010). A representação deste trabalho é gráfica porque definiu os componentes, descrevendo as variáveis e interações lógicas que constituíram o fluxo do processo. O *software* utilizado para o desenvolvimento do fluxograma foi o Bizagi Modeler 3.0.0.022.

A coleta de dados foi necessária para programar o modelo de simulação, de modo que ele operasse semelhante a um processo real. Foi adotado como perfil de empresa uma indústria consolidada no mercado há no mínimo cinco anos, com um quadro mínimo de 100 funcionários, gerenciada por pelo MRPII ou MRP com fluxo MTS. O gerenciamento das informações era realizado com o apoio de um *software* capaz de exportar seus dados. Ainda apresentou informações referentes aos seguintes elementos: demanda; consumo de matérias primas; processo de transformação dos recursos materiais em PA; políticas de planejamento para o PMP; metodologia adotada

para converter o PMP em OP e requisições de materiais; níveis de estoques praticados para a matéria-prima, produtos em processo e PA; controle do processo produtivo; relatórios de capacidade produtiva; fluxo das OP; o tempo de produção para cada EP; velocidade das esteiras utilizadas no processo produtivo; políticas adotadas para alterações no PMP que não estão planejadas e margem de segurança praticada.

Essas características foram necessárias para resultar em dados robustos e precisos para o ambiente de simulação e interpretação da análise comparativa. Após a identificação da empresa com este perfil e a liberação de acesso as informações, foi realizado a coleta de dados. Os dados foram coletados por análises documentais abrangendo documentos escritos disponibilizados pela empresa. Informações não explícitas nos documentos foram obtidas através de entrevistas não padronizadas e observação direta. Entrevistas não padronizadas permitem que o pesquisador explore amplamente a situação, pois as perguntas são formuladas conforme a necessidade da pesquisa (MARCONI; LAKATOS, 2010). As observações foram feitas por meio de visitas da pesquisadora ao chão de fábrica da indústria adotada como estudo empírico. A pesquisadora não possuiu papel ativo nas observações, pois foram feitas apenas para relatar o comportamento real do processo no ambiente de simulação computacional.

A presença da pesquisadora não interferiu no comportamento do sistema porque a maioria das operações do chão de fábrica são automatizadas. As técnicas adotadas para coleta de dados permitiram maior proximidade entre o autor e a realidade, atendendo ao rigor da modelagem dos dados para a simulação computacional (MARCONI; LAKATOS, 2010). A quantidade de dados considerados para a modelagem computacional não pode ser pequena demais, a ponto de não representar o comportamento do sistema em estudo, e nem grande demais a ponto de apresentar observações não relevantes ao sistema, atrapalhando o foco da pesquisa (CHWIF; MEDINA, 2010).

A princípio foi coletado uma série histórica de dados reais de outubro de 2015 a setembro de 2016, os produtos que possuíam maior volume de demanda foram considerados no modelo. Foi observado que o período de seis meses expressava uma quantidade relevante de dados para a simulação. A série histórica de dados deve ser considerada sempre que possível, desde que o comportamento do sistema não tenha sofrido grandes alterações (CHWIF; MEDINA, 2010). O período de abril a setembro de 2016 dos produtos foi considerado no modelo como população (N), sendo o período de

julho a setembro de 2016 considerado como amostra piloto. Da amostra piloto o desvio-padrão ( $\sigma^2$ ) foi calculado e adotou 90% de nível de confiança ( $\alpha$ ) e 10% de erro ( $e$ ). O tamanho da amostra ( $n$ ) necessário para representar um dia de produção típico dos seis meses, foi calculado pela Equação 25 (STEVENSON, 2001).

$$n = \frac{Z_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot \sigma^2 \cdot N}{e^2 \cdot (N-1) + Z_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot \sigma^2} \quad (25)$$

$N$  – população;

$\sigma$  – desvio padrão da amostra piloto;

$\alpha$  – nível de confiança;

$Z_{\frac{\alpha}{2}}$  – valor crítico que corresponde ao nível de confiança pretendido;

$e$  – erro aceitável;

$n$  – tamanho da amostra.

Se o valor obtido para  $n$  fosse fracionado, arredonda-se para o próximo número inteiro acima do valor obtido (WALPOLE *et al.*, 2009). Sendo 10% o maior valor usual para a margem de erro, após a coleta da amostra determinada por  $n$  na Equação 25, o erro amostral é calculado para cada amostra através da Equação 26 com o intuito de observar o erro real obtido na amostragem (STEVENSON, 2001).

$$e = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (26)$$

$\sigma$  – desvio padrão da amostra;

$n$  – tamanho da amostra.

Os dados numéricos foram submetidos a análises estatísticas de posição e dispersão. Os dados espúrios das amostras - *outliers* - foram identificados através de gráficos *boxplot* e retirados dos conjuntos de dados. As análises foram desenvolvidas com o apoio dos *softwares* Microsoft Excel e Action. Em seguida foram submetidos ao *software* ExpertFit para identificação das distribuições estatísticas que conduzem o fluxo do processo produtivo, formando o modelo probabilístico dos dados. O modelo probabilístico dos dados foi submetido a testes de aderência para verificar se as distribuições probabilísticas determinadas eram adequadas. Os testes escolhidos são

Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov com um nível de significância da 5%. Assim, analisou a rejeição ou não das hipóteses estatísticas:

- $H_0$ : a distribuição probabilística representa o modelo;
- $H_a$ : a distribuição probabilística não representa o modelo.

### **3.3.1.2 Implementação**

A implementação do modelo consistiu na transformação do modelo conceitual em um modelo computacional por meio da linguagem de simulação. Atualmente diversos *softwares* comerciais de simulação adotam uma interface gráfica, facilitando que leigos em programação computacional consigam desenvolver modelos de simulação (CHWIF; MEDINA, 2010). O modelo conceitual da pesquisa foi transformado em modelo computacional através do *software* FlexSim versão 2016 Update 1. A escolha do *software* de simulação foi devida a sua aderência ao problema.

Em seguida o modelo computacional foi verificado, entende-se que a verificação consistiu no funcionamento correto do sistema (JIANG *et al.*, 2016). A verificação do modelo foi através da animação gráfica disponibilizada pelo FlexSim. Depois de verificado o modelo computacional foi configurado conforme as características apresentadas pelo modelo probabilístico dos dados e submetido a validação. A validação do modelo de simulação consistiu na comparação dos resultados obtidos pelo modelo com os dados reais coletados (JIANG *et al.*, 2016). A variável analisada, por meio da comparação do modelo simulado com os dados das amostras, foi a contagem média de unidades que cada EP apresentou em um determinado tempo. Após validado o modelo recebeu as alterações desejadas.

Assegurado que o modelo computacional representava a realidade industrial do estudo empírico levantado, as configurações do modelo conceitual desenvolvido com base no CONWIP e Ciência da Fábrica foram inseridas no modelo de simulação resultando no modelo operacional da pesquisa.

### **3.3.1.3 Análise**

O modelo operacional foi submetido à simulação experimental para identificar a quantidade de replicações necessárias e o tempo de aquecimento. Os efeitos das condições iniciais de operação do modelo, conhecido como período de aquecimento, foram desconsiderados para efeito de análises de resultados (CHWIF;

MEDINA, 2010). O tempo de aquecimento do modelo foi determinado pelo maior valor obtido entre dez replicações, do tempo gasto pelo primeiro produto desde a sua origem na primeira EP até a chegada do mesmo na etapa de estoque. O tempo considerado para análise dos resultados foi determinado com base no tempo útil que a empresa possuía para finalizar uma OP. Sendo assim, o tempo de simulação considerado para cada replicação do modelo foi o resultado da subtração do tempo de aquecimento com o tempo útil.

A quantidade de replicações necessárias ( $r^*$ ) foi determinada pela Equação 28 (CHWIF; MEDINA, 2010). Os valores inseridos na Equação 27 foram obtidos através da análise do CT nas dez replicações iniciais mencionadas no parágrafo anterior. Se  $r^*$  fosse  $\leq 10$  considerou as dez replicações já realizadas, se fosse  $\geq 10$  complementa-se as replicações considerando as dez replicações já realizadas.

$$r^* = \left\lceil r \left( \frac{h}{h^*} \right)^2 \right\rceil \quad (27)$$

$r$  – número de replicações realizadas;

$h$  – precisão alcançada;

$h^*$  - precisão desejada.

O resultados médios de todas as replicações foram comparados, estes valores foram fornecidos como *outputs* do *software* FlexSim. Modelos de métodos de gerenciamento da produção podem ser replicados em ambientes de simulação computacional. A sua capacidade de estudo e utilidade é vinculada com o seu nível de representação da realidade. Quanto maior a capacidade do modelo de simulação de imitar a realidade, melhor é o modelo e seus resultados (STERMAN *et al.*, 2015).

Os resultados obtidos em cada etapa do método adotado e as análises comparativas entre o modelo real e o CONWIP foram apresentados nas seções seguintes desta pesquisa.

# Capítulo 4 – CONCEPÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

A pesquisa comparou o desempenho de um processo produtivo configurado com produção para estoques (MTS) com o desempenho do mesmo processo gerenciado pelo CONWIP, utilizando a simulação computacional como cenário de estudo. O desenvolvimento dos modelos, a coleta de dados e a simulação foram realizados conforme as técnicas e procedimentos recomendados por Jung (2004) e Chwif e Medina (2010), apresentados no Capítulo 3.

A simulação de eventos discretos (DES) é ideal para o estudo de ambientes produtivos porque é uma abordagem flexível, boa para analisar as interações entre as variáveis que estruturam os processos produtivos (AQLAN; LAM; RAMAKRISHNAN, 2014). Antes da simulação computacional do modelo operacional, foram desenvolvidos os modelos abstrato, conceitual e computacional (CHWIF; MEDINA, 2010).

## 4.1 Modelo Abstrato

O CONWIP apresenta os melhores resultados referentes à redução de estoques finais, estoques em processo (WIP) e tempo total de produção (CT), e aumento da produtividade (TH) em processos produtivos caracterizados como *jobbing* (THÜRER *et al.*, 2016; KORUGAN; GUPTA, 2014). Outros tipos de processos produtivos podem ser controlados pelo CONWIP, entretanto é comum o uso de outras ferramentas acopladas ao método para o gerenciamento e controle dos cartões conwips e a utilização dos recursos (ROMAGNOLI, 2015; ONYEOCHA *et al.*, 2015).

O modelo abstrato desta pesquisa caracterizou-se pelo processo produtivo MTS adaptado ao funcionamento do CONWIP, com início na entrada de matéria prima e término na retirada de produto acabado (PA). Através da demanda e dos tempos praticados pelo processo produtivo real, os cartões conwips foram determinados pela Equação 03, apresentada na Seção 2.2.1. A Equação 03 foi considerada por apresentar a margem de segurança diretamente, facilitando o controle desta variável.

Entretanto o CONWIP não possui nenhum parâmetro que analisa se os valores obtidos para WIP, CT e TH foram satisfatórios em um cenário ideal. Através dos resultados apresentados pela simulação computacional do processo produtivo real para as respectivas variáveis, o cenário do processo produtivo real foi classificado. A mesma classificação foi realizada com os resultados da simulação do CONWIP, possibilitando a comparação entre os cenários dos dois modelos.

A Ciência da Fábrica possui leis capazes de complementar as análises do CONWIP, tornando-o um método aplicável a processos de produção em massa, resultando em um método híbrido de produção (MHP) robusto e flexível perante as oscilações de demanda do mercado consumidor (HOPP; SPEARMAN, 2013). Suas fórmulas determinaram os valores a serem adotados para o gerenciamento e controle da produção e apresenta leis que classificaram o cenário produtivo, sendo assim possível verificar se o desempenho do processo foi satisfatório ou não. Todas as leis da Ciência da Fábrica podem ser incorporadas ao CONWIP, umas de maneira direta como o cálculo de cartões conwip, realizado pela lei de Little, outras de maneira indireta, como a Lei do esgotamento, que reduz a produtividade.

Para a estruturação do modelo abstrato foram consideradas apenas as leis diretamente vinculadas à operação do chão de fábrica do CONWIP. As Leis do Melhor e Pior desempenho foram aplicadas através do cálculo das Equações 06 e 07, apresentadas na Seção 2.2.1.1. Estes valores representaram as condições ideais de CT e TH que um processo produtivo deveria apresentar. As piores condições para CT e TH, as quais o modelo jamais deveria se aproximar, foram definidas pelas Equações 08 e 09, apresentadas na Seção 2.2.1.1.

A Lei da capacidade de mão de obra (MO) é uma lei diretamente relacionada a operação do CONWIP, mas não foi considerada na formulação do modelo porque o processo produtivo real adotado como base para o estudo comparativo era essencialmente automatizado. Através dos valores obtidos para o CT a variabilidade do processo foi mensurada de acordo com as Equações 13, 14 e 15 apresentadas na Seção 2.2.1.1.

A simulação dos modelos CONWIP e o do estudo empírico real permitiram que as leis da utilização, da eficiência e robustez do CONWIP fossem analisadas e

comparadas. A ilustração lógica do raciocínio proposto pelo modelo abstrato foi observada no modelo conceitual.

## 4.2 Modelo Conceitual

A concepção do modelo CONWIP com a Ciência da Fábrica foi realizada inicialmente por meio da representação gráfica, devido à importância do mapeamento do fluxo do processo (AQLAN; LAM; RAMAKRISHNAN, 2014). O Bizagi Modeler é um *software* desenvolvido para a modelagem de processos através da representação gráfica, com linguagem simbólica padronizada. A representação do modelo conceitual foi realizada pelo Bizagi Modeler 3.1.0.011, conforme ilustrado na Figura 10:

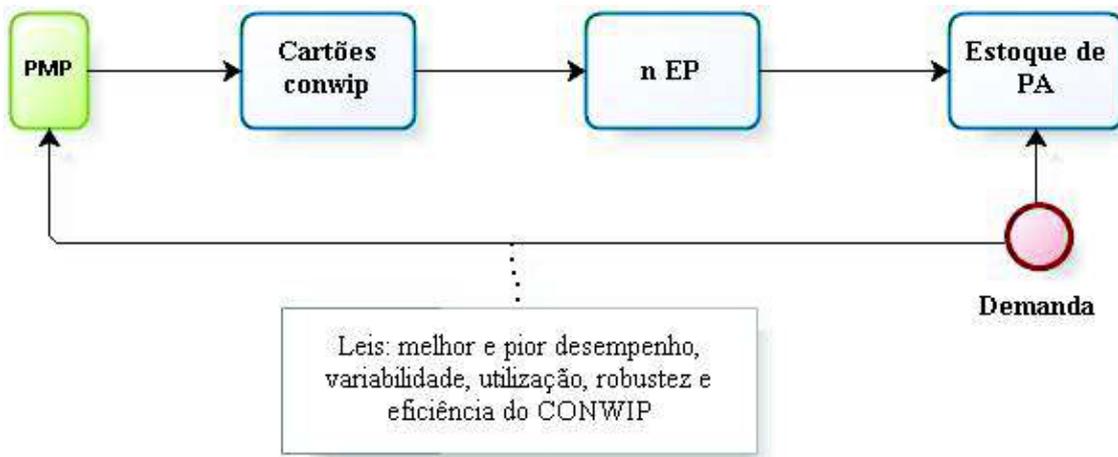


Figura 10: Fluxo do Modelo Conceitual CONWIP.

O fluxo puxado e empurrado característico do CONWIP foi mantido no modelo, por considerar que os resultados satisfatórios relatados ao CONWIP eram vinculados ao fluxo puxado e empurrado. Os estoques finais eram retirados pela concretização da demanda do mercado consumidor, acionando o planejamento e controle da produção (PCP), através de um cartão conwip disponível, a desenvolver um plano mestre de produção (PMP) que produziria a quantidade referente aos produtos retirados, alimentando o estoque de produto acabado (PA). A produção que alimentava os estoques de PA foi simulada através do FlexSim resultando em variáveis passíveis de análises para esta pesquisa.

O CONWIP não possuía nenhum parâmetro que verificasse o desempenho do processo e o impacto das alterações constantes, provocadas pelas alterações de demanda. Através das leis da Ciência da Fábrica o CT, WIP e da TH resultantes de todo o processo foram observados pelas leis da variabilidade, utilização, eficiência e robustez

do CONWIP. A lei da variabilidade analisa através do coeficiente de variação apresentado pela Equação 15 da seção 2.2.1.1, as variações que o CT apresentou para o modelo. A variabilidade impacta de maneira negativa o desempenho do SP: quanto maior a variabilidade, maiores são os níveis de estoques e perdas de TH. Coeficientes com variabilidade acima de 1,33 indicam que o CT está alto e que em determinados momentos o nível de WIP estará maior que em outros. Indicando que o CT e a margem de segurança considerados no cálculo de cartões precisam ser ajustados. Coeficientes entre 0,75 e 1,33 indicam CT moderados com possibilidade de melhorias através de simples ajustes, como os tempos destinados a manutenção. Coeficientes abaixo de 0,75 são os ideais, porque indicam baixa variabilidade (HOPP; SPEARMAN, 2013).

Diminuir e aumentar o CT e a quantidade de cartões conwips interfere automaticamente no nível de utilização das EP. Segundo a lei da utilização da Ciência da Fábrica, quanto maior a utilização, maior são os níveis de WIP e CT. Assim, a utilização de cada EP foi dimensionada com base no CT efetivo, sendo um parâmetro de controle preventivo para altos níveis de WIP e CT. A utilização das EP é diretamente vinculada com o tamanho do lote que o cartão possui, o ideal é trabalhar com lotes menores possíveis, mas quanto maior o lote menor é o CT considerando o processo completo de produção.

Todos os resultados considerados na pesquisa eram reflexos de todo o processo e foram obtidos pelas estatísticas disponíveis no FlexSim pela simulação dos modelos real e CONWIP. O funcionamento dos modelos foi através da simulação computacional com a modelagem baseada no estudo empírico de um processo de fabricação MTS real. A utilização de um processo de produção real como base de dados garante que a validação do modelo ocorra em um ambiente artificial, porém com resultados próximos a realidade das indústrias.

#### **4.3 Modelagem e coleta de dados do sistema produtivo real**

O estudo empírico de um processo produtivo real visou resguardar a pesquisa quanto à aplicabilidade dos resultados em um cenário compatível com a realidade industrial. Obtendo resultados úteis, de modo que, outros processos produtivos semelhantes tenham resultados próximos dos obtidos. A empresa considerada como modelo real estava no mercado desde 1998. Sendo um frigorífico de frangos, intitulado nesta pesquisa por Empresa A. Possuía um quadro aproximado de 1500 funcionários,

produzia aproximadamente 60 produtos diferentes, com capacidade de produzir até 1,2 mil toneladas de PA por dia. O método de gerenciamento da produção adotado pela empresa era o Planejamento e Controle de Recursos de Manufatura (MRPII), gerenciado com o apoio do *software* TOTVS e planilhas em Excel. Todas estas características atendiam aos critérios de seleção estabelecidos na metodologia de pesquisa para a adoção de um objeto de estudo.

A empresa possuía seis linhas de produção com ramificações. A linha de produção considerada como objeto de estudo desta pesquisa foi à linha *Individually Quick Frozen* (IQF), que não possuía nenhuma ramificação e era caracterizada pelo congelamento rápido de peças individuais do frango. A escolha desta linha como objeto de estudo foi restringida por uma solicitação da Empresa A, devido ao interesse de aprimorá-la. A linha IQF possuía dez EP, representadas na Figura 11, e dez tipos de matéria prima, resultando em 21 PA classificados em quatro famílias.

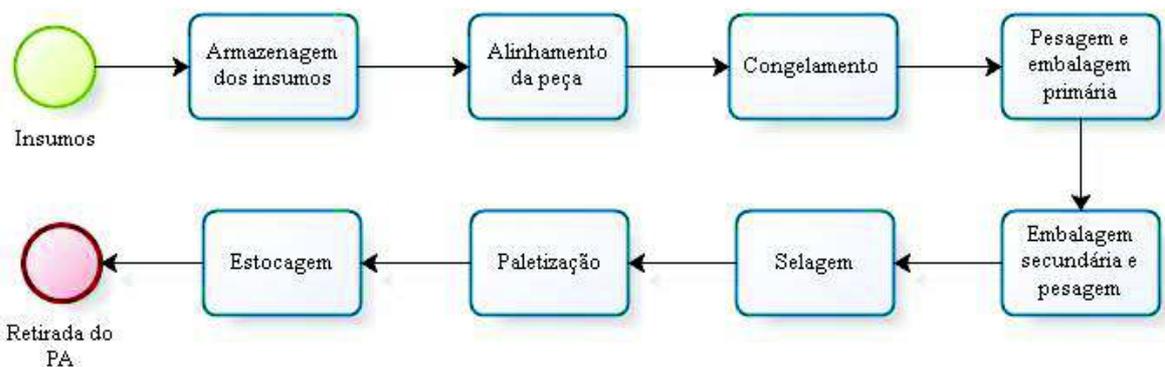


Figura 11: Fluxo de produção da Empresa A.

A capacidade máxima de produção por dia era de 22000Kg, sendo este valor determinado pela capacidade do recurso gargalo, produzindo dois produtos simultaneamente. O fluxo iniciava com a inserção da matéria prima na linha, sendo as partes referentes às famílias do peito, perna, asa e outras partes classificada como grupo especial, resultando em dez insumos diferentes. Por meio de uma esteira os insumos eram destinados a armazenagem, tinham disponíveis quatro recipientes com capacidade individual para estocar até 1500Kg. Este estoque era considerado, pela empresa, essencial ao processo porque a etapa de congelamento era vista como o gargalo do processo.

Após a armazenagem, a matéria prima era destinada ao congelamento por meio de uma esteira. Entretanto as peças não poderiam ser congeladas se estivessem em contato umas com as outras. Assim, a esteira pré-freezer era vibratória e dois operadores

ficavam ao lado da esteira garantindo que uma peça não encostasse na outra. Em seguida as peças entravam no freezer e permaneciam entre 43 e 47 minutos. O tempo de congelamento dependia do peso e do tamanho de cada peça. Considerando que a linha produzia dois produtos simultaneamente, a empresa congelava simultaneamente os produtos que possuíam o menor tempo para o encerramento da OP. A partir desta EP todas as EP subsequentes eram alocadas em áreas refrigeradas.

Os produtos congelados eram encaminhados por meio de uma esteira até a seção de embalagem primária, onde eram pesados e embalados em sacos plásticos de um, dois, dois e meio e quinze quilos. Um intervalo de 5% em gramas para mais ou menos era aceitável. As embalagens primárias eram depositadas em uma esteira que possuía uma balança acoplada a mesma; se alguma embalagem não tivesse a pesagem desejada ela retornava para a embalagem primária.

Na etapa de embalagem secundária os sacos que eram aprovados na balança eram depositados em caixas de papelão através de dois operadores, compondo unidades de doze e quinze quilos. As caixas seguiam pela esteira até a selagem, que consistia no envelopamento das caixas através de um equipamento acoplado junto à esteira. Em seguida, dois operadores retiravam as caixas da esteira e empilhavam-nas sobre *pallets*. Cada *pallet* comportava 60 caixas. Através de uma empilhadeira os *pallets* eram transportados até a área de estocagem, onde os produtos permaneciam em câmara fria até que sejam destinados ao mercado consumidor. No estoque havia 2300 posições, porém 15% não eram ocupadas por medidas de segurança, e 180 posições eram destinadas ao IQF sendo distribuídas pelos produtos de acordo a demanda média de três dias e meio.

Todo o fluxo da linha IQF e suas respectivas características resultaram na representação do processo produtivo real. Foi o mais próximo possível da realidade e ao mesmo instante, atendeu aos métodos científicos que estruturam a modelagem (ONYEOCHA *et al.*, 2015). O funcionamento real da linha foi observado através da observação direta da pesquisadora. As dúvidas provenientes quanto ao fluxo foram apresentadas aos supervisores das respectivas EP e aos gerentes de controle e processo e foram respondidas instantaneamente de maneira verbal ou por correspondência eletrônica. O detalhamento desta fase da pesquisa foi apresentado na seção seguinte.

### 4.3.1 Modelagem da Empresa A

A linha IQF foi caracterizada por uma produção totalmente empurrada, essencialmente automatizada e com poucas perdas. As paradas de produção eram provenientes das necessidades da MO e higienização e ocorriam fora do horário produtivo. A linha possuía seis operadores que trabalhavam em dois turnos, subtraindo os horários de descanso e higienização, resultou em 15 horas e 12 minutos trabalhados por dia.

Os produtos fabricados pelo IQF possuíam demandas oscilantes e esporádicas. Para facilitar a coleta de dados apenas os produtos que apresentaram os maiores volumes de demanda foram considerados. A escolha dos produtos foi proveniente do histórico de OP diárias do período de outubro de 2015 a setembro de 2016, sendo que dois produtos juntos resultaram em 51% das OP referentes ao período. Assim, os produtos considerados foram: meio da asa, com embalagem de 2,5Kg e a ponta da asa exportação, com embalagem de 2Kg.

A modelagem do processo produtivo real, ilustrada na Figura 12 da página 72, foi realizada através da presença da pesquisadora na Empresa A, em diversos dias, entre os meses de setembro e dezembro de 2016. Para garantir que o modelo fosse desenvolvido nas mesmas dimensões da linha IQF, um arquivo em *autocad* contendo o desenho do processo produtivo foi disponibilizado pela empresa e utilizado como base de projeção gráfica. As dimensões necessárias para a modelagem foram coletadas da seguinte maneira: altura, comprimento e largura foram extraídas do modelo *autocad*, as velocidades das esteiras foram obtidas por um tacógrafo e a capacidade das máquinas foram informadas pela Empresa A.

O fluxo do modelo é semelhante ao apresentado na Figura 11, da seção anterior. O processo tinha início com a entrada a 3 metros (m) de altura das partes da asa do frango, sendo o meio representado pela cor verde e a ponta representada pela cor laranja. Cada produto era transportado até os silos por esteiras individuais. Apenas dois silos foram representados no modelo porque somente dois produtos foram simulados. Ambos os silos comportam 1500 Kg, correspondendo a 32609 unidades de meio, com peso médio unitário de 46g e 150000 unidades de ponta, com peso médio unitário de 10 gramas.

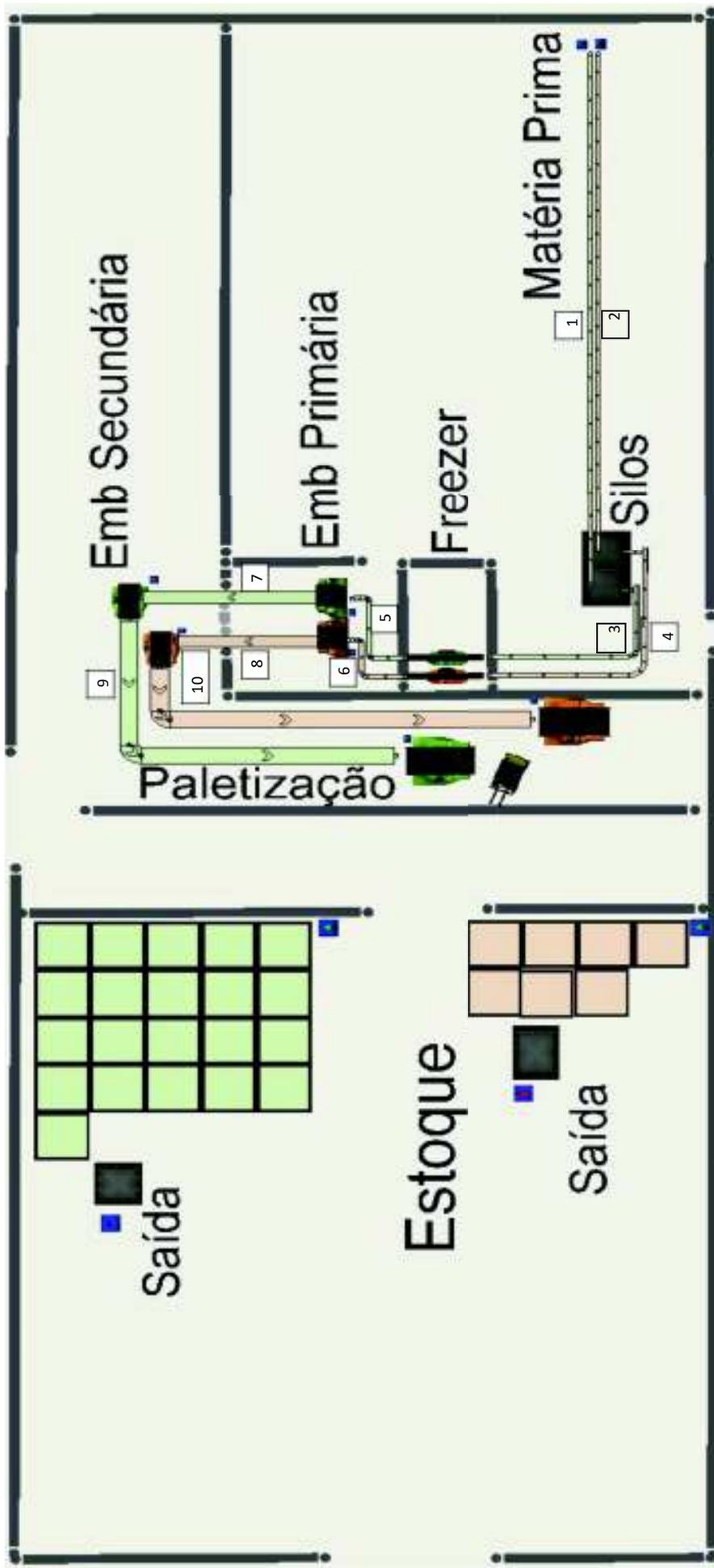


Figura 12: Modelagem do processo produtivo da Empresa A.

Legenda: 1\_ Esteira entrada de insumos meio da asa  
 Alt.Comp.Larg: 2,9x33,3x0,2m  
 Velocidade: 27m/min

2\_ Esteira entrada de insumos ponta da asa  
 Alt.Comp.Larg: 2,9x30,8x0,2m  
 Velocidade: 17,4m/min

3\_ Esteira do meio da asa entre o silo e a entrada do freezer  
 Alt.Comp.Larg: 1x11,8x0,25m  
 Velocidade: 93,6m/min

4\_ Esteira da ponta da asa entre o silo e a entrada do freezer  
 Alt.Comp.Larg: 1x15,15x0,25m  
 Velocidade: 40,8m/min

5\_ Esteira do meio entre o freezer e a embalagem primária  
 Alt.Comp.Larg: 2,95x6,32x0,25m  
 Velocidade: 93,6m/min

6\_ Esteira da ponta entre o freezer e a embalagem primária  
 Alt.Comp.Larg: 2,95x4,73x0,25m  
 Velocidade: 93,6m/min

7\_ Esteira do meio entre a embalagem primária e secundária  
 Altura: inicial 0,4m e final 1,5m  
 Comprimento: 9,5m  
 Largura: 0,7m  
 Velocidade: 24,6m/min

8\_ Esteira da ponta entre a embalagem primária e secundária  
 Altura: inicial 0,4m e final 1,5m

Comprimento: 7,5m  
 Largura: 0,7m  
 Velocidade: 24,6m/min  
 9\_ Esteira final do meio  
 Alt.Comp.Larg: 1x23,33x1m  
 Velocidade: 39m/min  
 10\_ Esteira final da ponta  
 Alt.Comp.Larg: 1x22,13x1m  
 Velocidade: 45m/min

Em seguida os insumos eram transportados em esteiras individuais até o freezer, sendo os dois últimos metros de cada esteira vibratória. Na parte vibratória da esteira haviam dois colaboradores com a função de verificar se a vibração separou as peças, não interferindo em nenhum aspecto no comportamento do processo produtivo. Portanto, para fins de simplificação do modelo, esses dois operadores foram desconsiderados. Em seguida, as unidades de meio e ponta adentravam no freezer em suas respectivas esteiras.

O freezer era uma câmara de congelamento por onde o produto permanecia em movimento em suas respectivas esteiras por um determinado tempo. A capacidade máxima do freezer era de 22000 Kg, distribuídos igualmente para ambos os produtos. Durante o congelamento as peças perdiam peso devido ao ultracongelamento sem adição de umidade. Assim, o peso médio unitário do meio na entrada do freezer era de 46 gramas e na saída do freezer era de 40 gramas. Os valores correspondentes para a ponta foram de 10 gramas e 8 gramas. Portanto, para determinar a quantidade de unidades que cada esteira comportava no freezer foi adotado 43 gramas para o meio, correspondendo a 255814 unidades de meio no freezer e 9 gramas para a ponta, correspondendo a 122222 unidades de ponta no freezer. O tempo de congelamento para cada unidade de meio e ponta foram de respectivamente 47 e 43 minutos.

Os itens congelados eram transportados até a embalagem primária através de esteiras individuais. Pacotes de 2,5 Kg eram gerados pela embalagem primária do meio, comportando aproximadamente 63 unidades. Os pacotes gerados para a ponta eram de 2Kg, comportando aproximadamente 125 unidades. Através de esteiras as embalagens plásticas são encaminhadas para a embalagem secundária. Ambas as esteiras possuíam uma balança acoplada que verificava a pesagem das embalagens plásticas, aceitando oscilações positivas e negativas de 5%. As embalagens que não possuíam a pesagem desejada eram automaticamente empurradas para uma esteira paralela e encaminhadas à entrada da embalagem primária e eram embaladas novamente. Este retrabalho não era comum no fluxo do processo, porque na máquina que embalava primariamente os produtos existiam três balanças de precisão, portanto não foi considerado na modelagem.

A etapa de embalagem secundária era desempenhada por dois operadores, sendo um para cada produto. A função consistia em pegar os sacos plásticos que

chegavam pela esteira e armazenar os mesmos em caixas de papelão, eram seis unidades para cada caixa. Assim que finalizavam as caixas de papelão eram depositadas em esteiras para a continuação do processo. Para facilitar a programação do modelo de simulação, os operadores foram substituídos na modelagem por entidades, de modo que o comportamento das entidades era determinado pela distribuição estatística obtida na coleta de dados dos operadores. As caixas de papelão eram transportadas por esteiras e envelopadas a vácuo. Este processo ocorria por meio de uma máquina acoplada às esteiras, não interferindo no ritmo das mesmas.

As caixas de papelão eram removidas das esteiras por operadores e organizadas sobre *pallets*, eram 60 unidades sobre cada *pallet*. Entretanto, a paletização não possuía um ritmo comum de operação. Às vezes um único operador atendia a demanda das duas esteiras, às vezes eram dois operadores. Os operadores não eram exclusivos para esta função. Portanto, a cada momento um operador diferente realizava a função e possuíam ritmos diferentes de trabalho. Em determinados momentos as caixas permaneciam na esteira até que se formasse uma fila. Entretanto, se o operador estivesse ocioso ele permanecia neste posto organizando as caixas instantaneamente. Diante de um cenário tão complexo para programação computacional, no final de cada esteira foi colocado uma entidade que funcionou de acordo com o fluxo do processo.

Os *pallets* depois de organizados eram transportados por uma empilhadeira até a câmara fria de estoque. A velocidade média das empilhadeiras era de 150 metros/minuto. As mesmas condições dos operadores que realizavam a paletização permaneciam para os operadores de empilhadeira, eles não eram exclusivos para uma determinada linha de produção, atendiam toda a fábrica em ritmos não específicos. Assim, a empilhadeira de acordo com a sua velocidade, realizava o transporte dos *pallets* para a câmara de acordo com o fluxo do processo. O estoque era organizado por prateleiras com três posições horizontais e quatro verticais, mas na modelagem as posições foram todas horizontais, devido à qualidade da visualização no modelo. As 180 posições do IQF foram distribuídas entre seus produtos, de acordo com o volume médio de três dias e meio de demanda. Assim, foram 21 posições para o meio porque normalmente eram retirados seis *pallets* por dia e sete para a ponta porque normalmente eram retirados dois *pallets* por dia.

Todas as descrições apresentadas nesta seção representou o detalhamento dos processos simulados, concretizando a primeira etapa mencionada por Merode,

Groothuis e Goldschmidt (1999). As entidades e suas conexões representou a modelagem do objeto de estudo, ressaltando que as adaptações previstas por Onyeocha *et al.*(2015) ocorreram. Através das conexões de todas as entidades utilizadas para o funcionamento do modelo real, verificou-se o funcionamento correto das mesmas (CHWIF; MEDINA, 2010). Em seguida, ocorreu a coleta dos dados necessários que representou as variáveis que determinaram o comportamento do modelo.

#### 4.3.2 Coleta de dados e tratamento estatístico

O período considerado para simulação foi de seis meses, sendo abril a setembro de 2016, por apresentar um total de 250 OP, representando as oscilações de demanda e uma quantidade satisfatória de informações. Os três últimos meses deste período apresentaram 65 OP para o produto meio da asa e 36 OP para o produto ponta da asa, sendo considerados como amostra piloto para o cálculo de amostragem pela Equação 25, assumindo respectivamente 202 e 99 observações.

A coleta de dados foi realizada em nove dias úteis, entre os meses de novembro e dezembro em horários alternados. Os locais para a coleta de dados foram definidos com base na modelagem descrita na seção anterior, sendo: as saídas das etapas de inserção de insumos, armazenagem de insumos, embalagem primária e embalagem secundária. O erro considerado como base de cálculo na Equação 25 foi de 0,1, entretanto os erros reais obtidos pelas amostras através da Equação 26 foram para o meio da asa: 0,000055 para a inserção de insumos, 0,000043 para a armazenagem de insumos, 0,0067 para a embalagem primária e 0,04 para a embalagem secundária. Para a ponta da asa os erros foram de: 0,00015 para a inserção de insumos, 0,0000094 para a armazenagem de insumos, 0,024 para a embalagem primária e 0,05 para a embalagem secundária.

No freezer não foi realizada a coleta de dados por limitações físicas de acesso. Assim, foi considerado o tempo padrão de congelamento praticado pela empresa para cada produto, sendo: 47 minutos para o meio da asa e 43 minutos para a ponta da asa. Na paletização e no transporte dos *pallets* não foi realizada a coleta de dados devido à complexidade do comportamento das variáveis envolvidas. O ritmo de processamento da paletização foi configurado para seguir o fluxo do processo. O relatório de demanda do período de abril a setembro de 2016 não foi disponibilizado porque possuía informações referentes ao faturamento da empresa. A quantidade média diária de *pallets*

retirados neste respectivo período foi informada pelo departamento comercial e considerada como parâmetro pela pesquisa, sendo seis *pallets* para o meio da asa e dois *pallets* para a ponta da asa.

Os dados coletados consistiram na contagem da quantidade de peças que passavam pelo local em um intervalo de tempo aleatório, apresentados no Apêndice I. As quantidades e os tempos foram submetidos à identificação e remoção de *outliers* pela função *boxplot* do Action. Para as análises do ExpertFit foi gerado um valor (taxa) que representasse o intervalo entre as chegadas de cada produto, através da divisão do tempo pela quantidade respectiva de unidades que haviam passado naquele intervalo de tempo. Em seguida os dados foram submetidos ao ExpertFit para identificar suas respectivas distribuições estatísticas.

Para todas as distribuições identificadas foram aplicados os testes de Anderson-Darling (AD) e Kolmogorov-Smirnov (KS) com o objetivo de verificar se as distribuições identificadas realmente representavam os dados. Os resultados dos testes, conforme apresentado no Apêndice II, mostraram que os valores críticos apresentados pelas distribuições encontravam-se dentro do nível de significância. Indicando que as distribuições representaram os dados há um nível de significância de 5%, exceto a distribuição Johnson SB identificada para a embalagem secundária do meio.

O teste AD não rejeitou a aderência da Johnson SB para a embalagem secundária do meio apenas com um nível de significância de 1% e o teste KS rejeitou para todos os níveis de significância. Para garantir que o modelo fosse simulado com o funcionamento semelhante ao processo produtivo real foi gerada uma distribuição estatística empírica de acordo com a amostra, apresentada no Apêndice III.

De acordo com Schubert *et al.* (2015) os dados podem ser representados pelas entidades de simulação por suas distribuições estatísticas. A Tabela 1 apresenta as posições e as distribuições assumidas pelos dados. A confiabilidade dos dados foi mensurada por meio do intervalo de confiança (IC), determinado pela Equação 28, com um nível de confiança ( $\alpha$ ) de 90% (STEVENSON, 2001).

$$IC = \mu \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (28)$$

$\sigma$  – desvio padrão da amostra;

$z_{\frac{\alpha}{2}}$  – valor crítico que corresponde ao nível de confiança pretendido;

$\mu$  – quantidade média da amostra;

$n$  – tamanho da amostra.

Tabela 1: Dados característicos das amostras.

EP	Unidades por tempo	IC (unidades por minuto)	Média e desvio padrão da taxa	Função de distribuição
Meio da asa				
Entrada de insumos	336 em 1min	326 a 346	$3,10 E^{-3}$ e $7,77 E^{-4}$	invertedweibull (0.000000, 0.002708, 5.146104)
Armazenagem de insumos	287 em 1min	281 a 293	$3,60 E^{-3}$ e $6,18 E^{-4}$	pearsont5 (0.000000, 0.117827, 33.738197)
Embalagem Primária	04 em 1min	3,7 a 4,3	0,25 e 0,09	invertedweibull (0.142343, 0.066171, 2.206408)
Embalagem Secundária	01 em 2min	0,9 a 1,1	1,63 e 0,56	johnsonbounded (0.937947, 2.585926, 0.257211, 0.452430) substituída pela distribuição empírica (Apêndice III)
Ponta da asa				
Entrada de insumos	308 em 1min	289 a 327	$3,63 E^{-3}$ e $1,43 E^{-3}$	inversegaussian (0.000627, 0.003002, 0.012588)
Armazenagem de insumos	266 em 1min	260 a 272	$3,75 E^{-3}$ e $9,34 E^{-5}$	weibull (0.003454, 0.000332, 3.445365)
Embalagem Primária	02 em 1min	1,7 a 2,3	0,55 e 0,24	pearsont6 (0.352741, 0.020717, 10.155203, 2.071659)
Embalagem Secundária	01 em 3min	0,94 a 1,06	2,63 e 0,55	johnsonbounded (1.024472, 3.289752, -0.825991, 0.628967)

O corte das partes do frango foi realizado de maneira automatizada resultando em um volume considerável de *inputs* em um tempo relativamente pequeno. A quantidade de insumos foi toda absorvida pelas embalagens primárias e secundárias que também eram processos automatizados. O nível de automatização elevado de todo o



processo produtivo resultou em uma variabilidade pequena para o processo, de modo que as máquinas conseguiam manter um ritmo de processamento uniforme.

Os dados referentes à embalagem secundária da ponta não foram suficientes para identificar uma distribuição estatística. Assim, foi realizada uma nova coleta de dados com 20 observações mantendo as mesmas condições da coleta de dados inicial. As 20 observações foram acrescidas ao conjunto de dados referentes à embalagem secundária da ponta, resultando em 119 observações. A variável Taxa de cada amostra, resultante da divisão do tempo pela quantidade, foi submetida ao ExpertFit para identificação das distribuições estatísticas.

Todas as distribuições resultam em funções estruturadas por três parâmetros, sendo na ordem: a localização de onde os dados se encontram no eixo X, determinado pela variável Gamma ( $\gamma$ ); a escala, determinada através de Beta ( $\beta$ ). A unidade de medição para o intervalo dos dados e a forma foi a variável alfa ( $\alpha$ ) determinada pela função de densidade das distribuições. As distribuições Johnson SB e a Pearson VI possuem dois parâmetros para a forma por isso suas funções foram estruturadas por quatro valores.

A forma gráfica assumida pelos dados da Tabela 1 são oriundas do ExpertFit apresentadas como Figuras 13,14,15,16,17,18,19 e 20. Para todas as imagens as colunas de cor azul representaram o histograma dos dados e a linha de cor vermelha representou a forma da distribuição estatística, identificada pelo ExpertFit como a melhor representação dos dados do histograma.

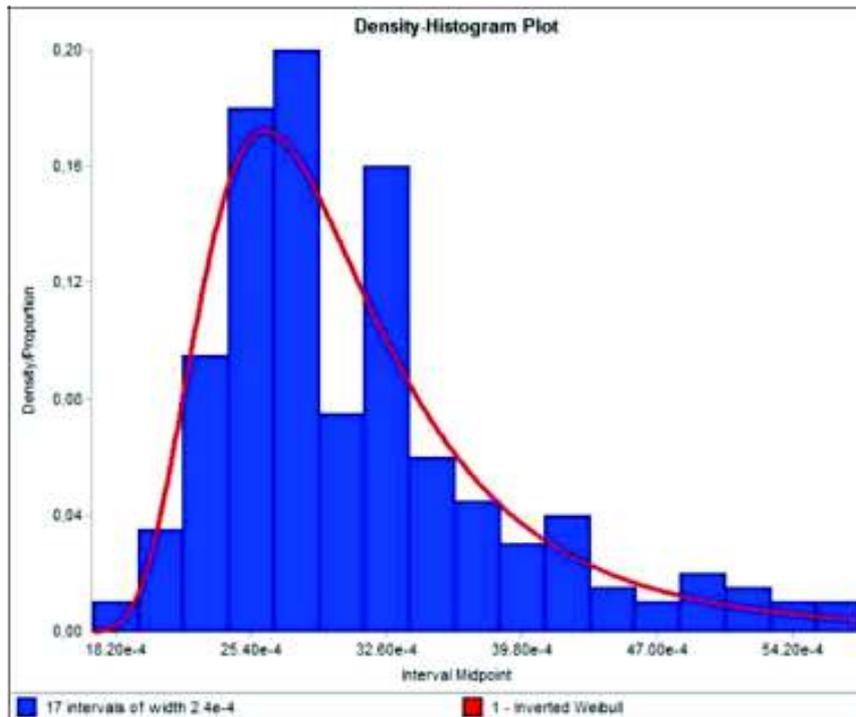


Figura 13: Forma gráfica dos dados de entrada de insumos do meio da asa.

O histograma representado na Figura 13 foi dos dados da amostra coletada para a inserção de insumos do meio da asa, assumiu uma média de  $3,10 \text{ E}^{-3}$  e um desvio padrão de  $7,77 \text{ E}^{-4}$ . A curva em vermelho representou a forma gráfica da distribuição Weibull Invertida, com localização de 0.000000, escala de 0.002708 e forma de 5.146104. A forma gráfica dos dados referentes à inserção de insumos da ponta da asa foi representada pela Figura 14.

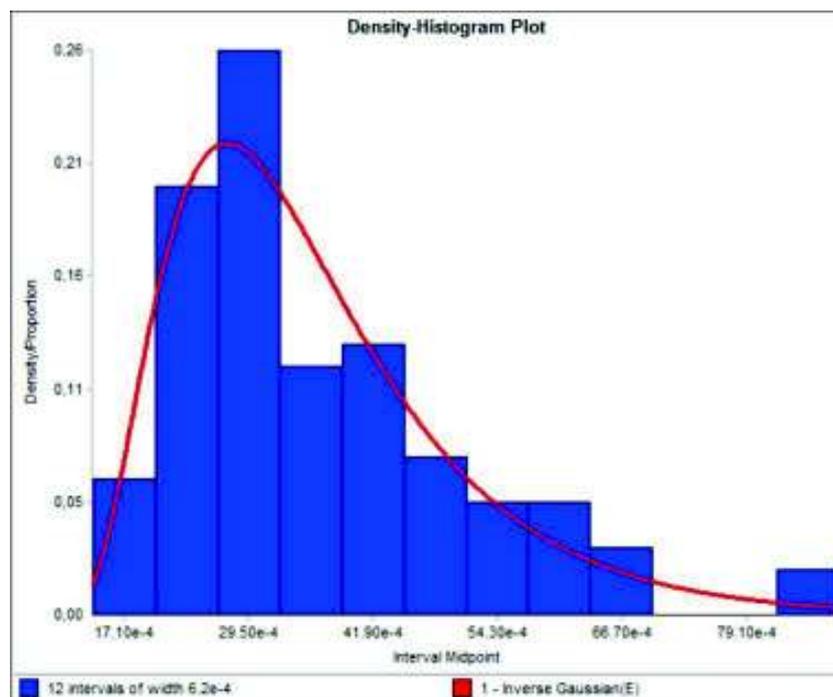


Figura 14: Forma gráfica dos dados de entrada de insumos da ponta da asa.

Na Figura 14 foi representado o histograma dos dados da amostra coletada para a inserção de insumos da ponta da asa, assumindo uma média de  $3,63 \text{ E}^{-3}$  e um desvio padrão de  $1,43 \text{ E}^{-4}$ . A curva em vermelho representou a forma gráfica da distribuição Gaussiana Inversa, com localização de 0.000627, escala de 0.003002 e forma de 0.012588. A forma gráfica dos dados referentes à armazenagem do meio da asa foi apresentada na Figura 15.

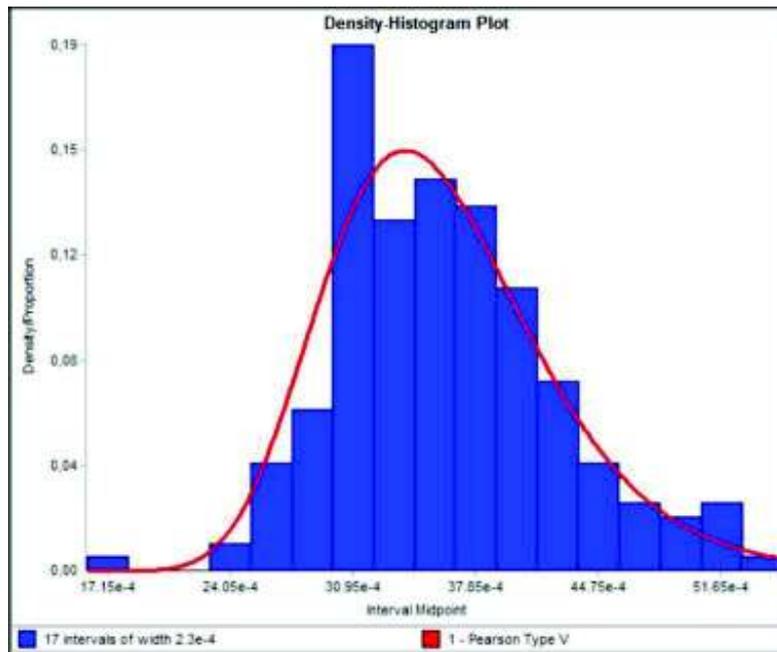


Figura 15: Forma gráfica dos dados de armazenagem do meio da asa.

O histograma dos dados da armazenagem do meio da asa foi representado na Figura 15, com média de  $3,60 \text{ E}^{-3}$  e um desvio padrão de  $6,18 \text{ E}^{-4}$ . A curva em vermelho representou a forma gráfica da distribuição Pearson V, com localização de 0.000000, escala de 0.117827 e forma de 33.738197. A forma gráfica dos dados referentes à armazenagem da ponta da asa é a Figura 16.

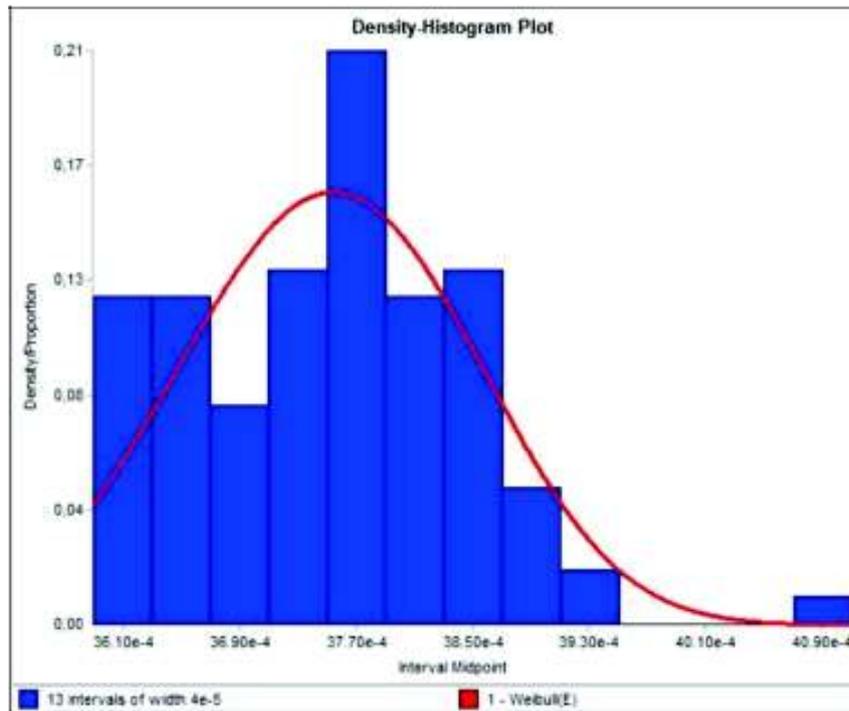


Figura 16: Forma gráfica dos dados de armazenagem da ponta da asa.

Os dados de armazenagem da ponta da asa possuíram média de  $3,75 \text{ E}^{-3}$  e desvio padrão de  $9,34 \text{ E}^{-5}$  resultando no histograma da Figura 16. A curva em vermelho representou a forma gráfica da distribuição Weibull, com localização de 0.003454, escala de 0.000332 e forma de 3.445365. A forma gráfica dos dados referentes à embalagem primária do meio é representado na Figura 17.

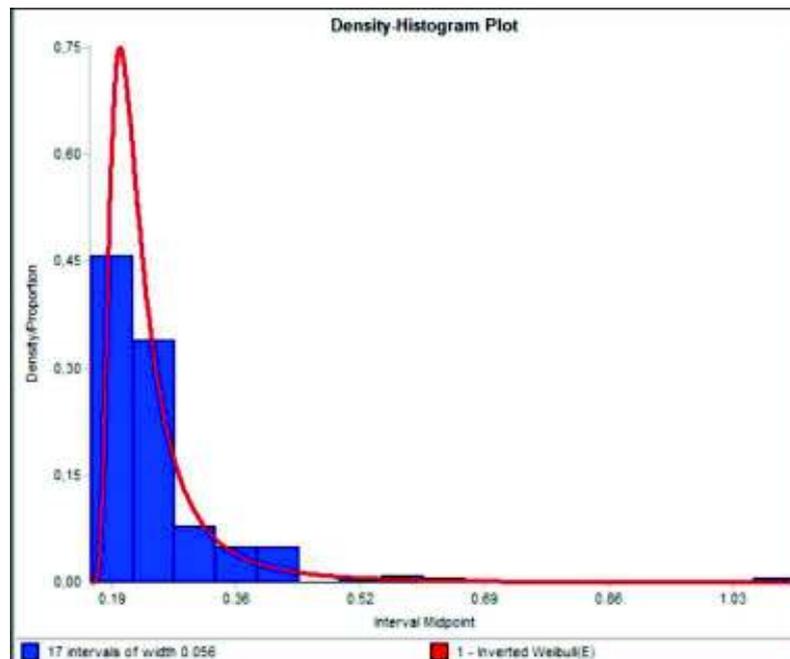


Figura 17: Forma gráfica dos dados da embalagem primária do meio da asa. A Figura 17 representou o histograma da amostra da embalagem primária do meio da asa com média de 0,25 e desvio padrão de 0,09. A distribuição identificada

foi a Weibull Invertida representada pela curva em vermelho, com localização de 0.142343, escala de 0.066171 e forma de 2.206408. A forma gráfica dos dados referentes à embalagem primária da ponta é a Figura 18.

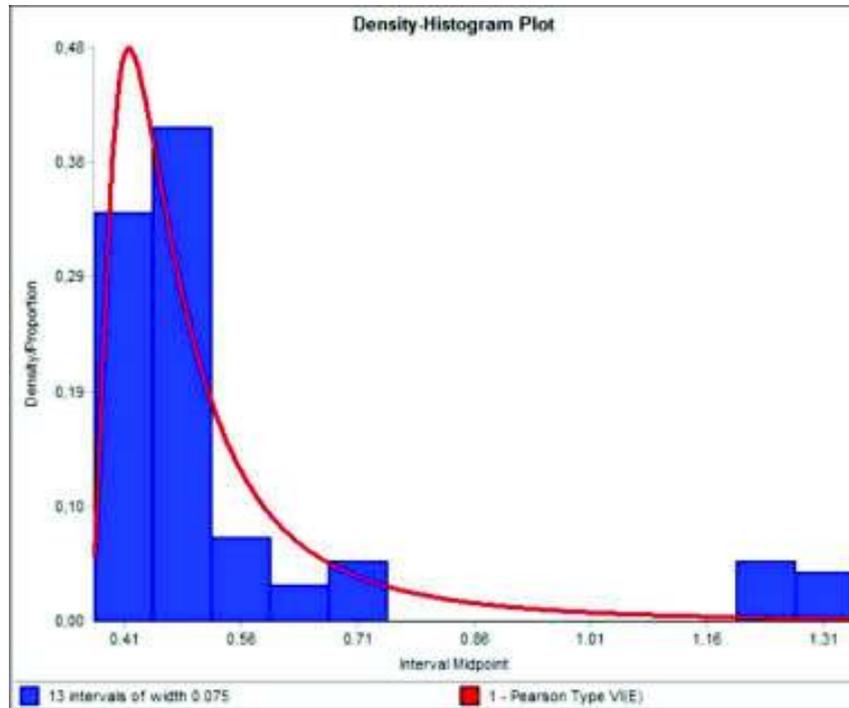


Figura 18: Forma gráfica dos dados da embalagem primária da ponta da asa.

A Figura 18 representou o histograma da amostra da embalagem primária da ponta da asa com média de 0,55 e desvio padrão de 0,24. A distribuição identificada foi a Pearson VI representada pela curva em vermelho, com localização de 0.352741, escala de 0.020717 e forma de 10.155203 e 2.071659. A forma gráfica dos dados referentes à embalagem secundária do meio é a Figura 19.

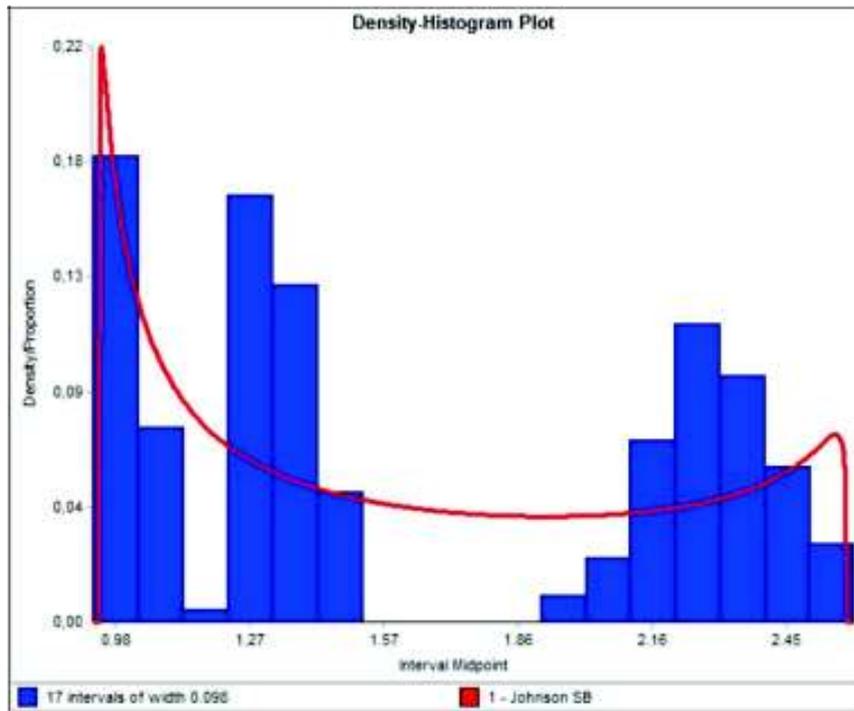


Figura 19: Forma gráfica dos dados da embalagem secundária do meio da asa.

A Figura 19 representou o histograma da amostra da embalagem secundária do meio da asa com média de 1,63 e desvio padrão de 0,56. A distribuição identificada foi a Johnson SB representada pela curva em vermelho, com localização de 0.937947, escala de 2.585926 e forma de 0.257211 e 0.452430. A forma gráfica dos dados referentes à embalagem secundária da ponta é a Figura 20.

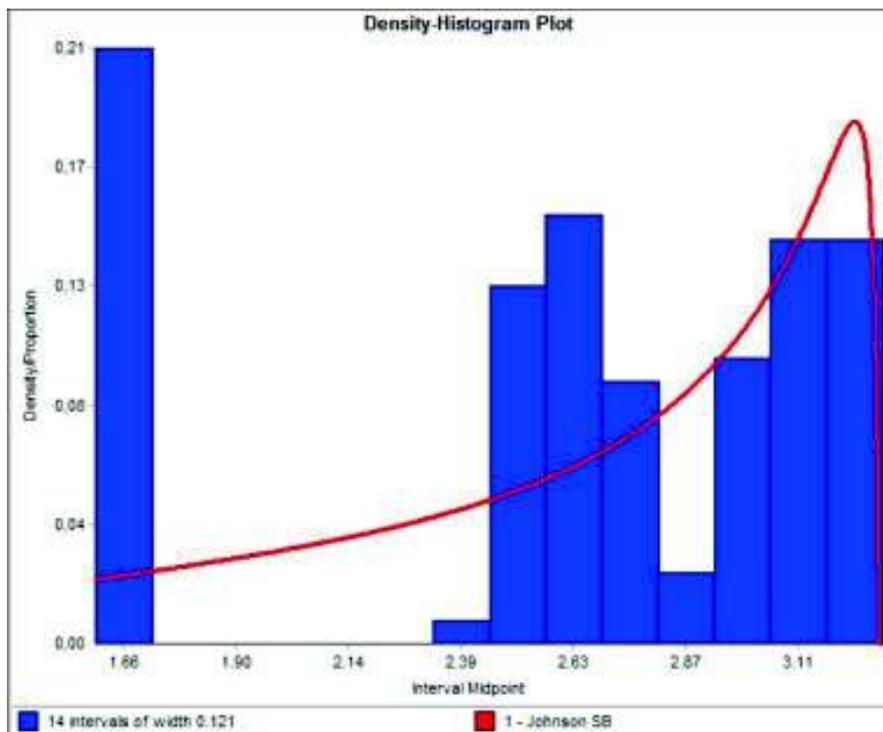


Figura 20: Forma gráfica dos dados da embalagem secundária da ponta da asa.

Os dados da embalagem secundária da ponta da asa possuíam uma média de 2,63 e desvio padrão de 0,55 resultando no histograma da Figura 20. A curva em vermelho representou a forma gráfica da distribuição Johnson SB com localização de 1.024472, escala de 3.289752 e forma de -0.825991 e 0.628967.

#### **4.4 Modelo computacional**

O modelo computacional consistiu na inserção das características dos dados coletados ao modelo conceitual, resultando em um modelo com linguagem de programação para simulação computacional. O objetivo da pesquisa foi comparar os resultados de dois modelos: o primeiro foi a adequação da modelagem do processo produtivo real com o modelo probabilístico dos dados coletados, correspondendo ao modelo computacional real; o segundo foi a inserção do CONWIP sobre o modelo computacional real, correspondendo ao modelo computacional CONWIP.

Os objetivos foram atingidos utilizando o *software* de simulação FlexSim, Neste *software* o *script* de programação computacional dos modelos foi escrito automaticamente por meio da movimentação física e conexões de suas entidades.

##### **4.4.1 Modelo computacional real**

Todos os dados apresentados na seção 4.3 foram considerados para estruturação do modelo computacional real. As entidades de inserção de matérias primas foram configuradas pela entidade *Source* porque possuía a configuração de criar objetos. A distribuição estatística foi alocada no comando *inter-arrivaltime* porque o tempo entre as chegadas de cada item corresponde à distribuição estatística identificada na coleta de dados. Os silos de armazenagem de matéria prima foram representados pela entidade *Queue* devido à semelhança de uma fila, sendo configurados pelo *maximum contente* para determinar a capacidade máxima de itens que os silos suportam, sendo compatível com a capacidade máxima real. A saída das unidades foi configurada pelo *send to port by expression* porque as entidades saíam dos silos no ritmo determinado pela distribuição estatística identificada pela coleta de dados.

O freezer foi representado por um *Processor* porque se caracteriza por uma etapa de processamento, sendo configurado pelos comandos *maximum content* para a

quantidade máxima de itens que a entidade suportava e pelo *process time* para apresentar o mesmo tempo de processamento da empresa. As embalagens primárias e secundárias possuíam a função de combinar uma determinada quantidade de itens correspondente ao peso das embalagens desejadas, assim foram representadas por *Combiner*. O ritmo de operação dos *combiners* foi determinado pelo *process time statistical distribution*, obedecendo à distribuição estatística identificada. O comando *combiner* também foi utilizado para determinar a quantidade unitária a ser armazenada em cada embalagem.

A paletização também tem como característica a combinação de unidades, sendo assim, foi representada e configurada da mesma forma que as embalagens primárias e secundárias. Mas seu ritmo de processamento foi configurado pelo *execute sub flow*, de modo que, seu ritmo de operação correspondesse ao ritmo de funcionamento do sistema. O mesmo ritmo de operação foi determinado para o acionamento da empilhadeira, mas esta operou com velocidade de 150 metros/minuto. O estoque de PA observado não estava completamente vazio quando a produção começava no processo produtivo real porque a empresa mantinha em estoque a quantidade referente a um dia e meio de demanda do respectivo item.

Os estoques foram representados por prateleiras na horizontal, determinando a posição que cada *pallet* seria armazenado. A quantidade referente a um dia e meio de demanda foi inserida nos estoques no primeiro segundo simulado através de um *Source*, correspondendo a nove *pallets* do meio e três *pallets* da ponta. Cada unidade de meio foi removida do estoque a cada 151 minutos e para a ponta foi considerado 456 minutos. Este tempo foi considerado de acordo com a distribuição uniforme da demanda diária pelas 15 horas e 12 minutos trabalhados por dia.

O tempo de aquecimento foi definido pelo tempo que o primeiro *pallet* de ponta da asa necessitou para chegar até o estoque de PA, sendo 280 minutos. Foi considerado o *pallet* da ponta da asa porque ele era o que demandava maior tempo total de produção, comparado ao *pallet* de meio da asa. A validação do modelo computacional real ocorreu por meio da comparação entre o modelo computacional e os dados representativos do processo produtivo real. Sendo considerado como parâmetro os valores médios unitários que cada EP apresentou em um determinado tempo médio de operação.

O tempo e as quantidades considerados como parâmetros foram resultados da média das amostras apresentadas no Apêndice I. O mesmo intervalo foi observado dez vezes no modelo de simulação e a média foi considerada como parâmetro. Para as médias dos valores apresentados pelas replicações foi desconsiderado o tempo de aquecimento, com exceção da saída de PA do estoque porque não havia tempo de aquecimento para esta atividade.

Tabela 2: Parâmetros de validação do modelo computacional real.

EP	Tempo (minuto)	Qtd. real (unidades)	Qtd. simulada (unidades)	IC (unidades)	Variação (percentual)
<b>Meio da asa</b>					
Entrada de insumos	1	336	317	316 a 318	-0,06
Armazenagem de insumos	1	287	315	*	+0,10
Embalagem Primária	1	4	4	3,7 a 3,8	0
Embalagem Secundária	2	1	1	0,9 a 1,7	0
Saída de PA	152	1	1	*	0
<b>Ponta da asa</b>					
Entrada de MP	1	308	276	273 a 279	-0,10
Armazenagem de MP	1	266	263	262 a 263	-0,01
Embalagem Primária	1	2	2	1 a 2	0
Embalagem Secundária	3	1	1	0,7 a 1,1	0
Saída de PA	456	1	1	*	0

\* desvio padrão igual à zero.

A quantidade real considerada como parâmetro resultou da quantidade média das amostras coletadas, apresentadas no Apêndice I. No modelo de simulação foi considerado a quantidade de *outputs* que cada entidade apresentou no intervalo de tempo considerado como parâmetro, sendo o resultado final a média dos valores apresentados em dez replicações do modelo. A variabilidade entre os dados foi positiva

quando maior do que o valor apresentado pela quantidade real do processo, utilizado como parâmetro de validação. Mas também foi negativa quando o valor foi abaixo do valor considerado como parâmetro.

A entrada de insumos para ambos os produtos foi menor do que a quantidade real do processo, assim sua variabilidade foi negativa. A armazenagem de insumos para o meio apresentou um valor maior do que o esperado, assim sua variabilidade foi positiva, sendo contrária a armazenagem de insumos da ponta que apresentou um valor menor do que o esperado. A variabilidade de todas as variáveis consideradas foi pequena porque os dados amostrais também apresentaram pouca variabilidade. O maior percentual apresentado pelos dados foi de 0,10 para mais e menos, sendo aceitável porque a pesquisa permitiu um erro amostral de 10%, indicando que o modelo de simulação representou o processo produtivo da Empresa A.

Após a validação do modelo, resultando no modelo operacional, foi realizado o cálculo das replicações necessárias para o nível de precisão de dez minutos, a variável considerada como parâmetro foi o tempo CT. Nas dez observações realizadas como amostra piloto o desvio padrão foi de 3,46 para o CT do meio e 7,57 para o CT da ponta. Adotando 90% de confiança e um  $\alpha$  de 10%, obteve-se uma precisão (h) de 2 minutos para o meio e 4,38 minutos para a ponta, assim de acordo com a Equação 27 a quantidade de replicações necessárias para o meio foram 4:

$$r^* = \left[ 10 \left( \frac{2}{10} \right)^2 \right] = 4,01$$

E para a ponta foram 20:

$$r^* = \left[ 10 \left( \frac{4,38}{10} \right)^2 \right] = 19,19$$

Considerou-se a quantidade de replicações necessárias para a ponta da asa porque a sua quantidade foi superior à demanda do meio da asa. Todos os resultados apresentados para os modelos operacionais real e Conwip são as médias resultantes das 20 replicações das respectivas variáveis, desconsiderando o tempo de aquecimento.

#### 4.4.2 Modelo computacional CONWIP

A estrutura do modelo computacional real foi mantida porque o objetivo da pesquisa era manter a mesma estrutura entre os dois modelos, as velocidades e os ritmos

de processamento das entidades também foram mantidos. Mas no início do modelo, entre a criação de matéria prima e a esteira, foi inserida uma entidade que permitiu a formação de lotes, assim foi inserido no modelo um lote de cada por vez, correspondendo a um cartão conwip. A quantidade de cartões conwips necessários foi determinada pela Equação 03 da seção 2.2.1. As variáveis foram obtidas com base nos resultados apresentados pelo modelo operacional real e considerou 5% de segurança por ser o mesmo fator considerado no PCP da Empresa A.

A demanda diária do meio da asa resultou em 6 *pallets*, sendo necessário 136080 unidades de meio para atender a respectiva demanda. O CT do meio foi de 294,15 minutos representando 0,47 do tempo simulado. O cálculo dos cartões necessários para a produção do meio resultou em 3 cartões, cada cartão comportava 45360 unidades de insumos:

$$NI = \left( \frac{6 \times 0,47}{0,05} \right) + 0,05 = 2,87$$

A demanda diária da ponta da asa resultou em 2 *pallets*, equivalentes a 90000 unidades de ponta da asa utilizadas como insumo. O CT apresentado foi de 370,86 minutos representando 0,59 do tempo simulado. A quantidade de cartões necessários a produção foi de 2 cartões, para cada cartão 45000 unidades de ponta da asa deveriam ser considerados:

$$NI = \left( \frac{2 \times 0,59}{0,05} \right) + 0,05 = 1,23$$

No chão de fábrica não foi possível produzir quantidades fracionadas de um lote ou cartão porque, no final do processo, se não houvesse a quantidade exata de unidades necessárias, o PA não era finalizado. Portanto para os dois cálculos de cartões as quantidades foram arredondadas para o próximo valor inteiro.

O fluxo empurrado manteve-se no chão de fábrica, portanto nenhuma alteração quanto ao fluxo do processo simulado foi realizada. O parâmetro de validação do modelo CONWIP foi à proximidade com os dados simulados no modelo computacional real, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de validação do modelo computacional Conwip.

EP	Tempo (minuto)	Qtd. Modelo simulado real	Qtd. Modelo simulado Conwip	IC (unidades)	Variação (%)
----	-------------------	------------------------------------	--------------------------------------	------------------	-----------------

		(unidades)	(unidades)		
<b>Meio da asa</b>					
Entrada de insumos	1	317	314	311 a 316	-0,01
Armazenagem de insumos	1	315	316	*	0,003
Embalagem Primária	1	4	4	3 a 4	0
Embalagem Secundária	2	1	1	*	0
Saída de PA	152	1	1	*	0
<b>Ponta da asa</b>					
Entrada de insumos	1	276	269	268 a 270	-0,03
Armazenagem de insumos	1	263	263	262 a 263	0
Embalagem Primária	1	2	2	1,9 a 2	0
Embalagem Secundária	3	1	1	*	0
Saída de PA	456	1	1	*	0

\* desvio padrão igual à zero.

Em ambos os modelos de simulação foi considerado a quantidade de *outputs* que cada entidade apresentou no intervalo de tempo considerado como parâmetro. Foram realizadas dez replicações e o padrão de pouca variabilidade entre os dados permaneceu. A baixa variabilidade entre os dados foi reflexo da baixa variabilidade do processo considerado como estudo empírico para modelagem. A maior porcentagem de variação foi de apenas 3% para menos na inserção de insumos do item ponta da asa. Ressaltando que o ritmo de entrada de insumos no modelo foi alterado para atender a produção da quantidade referente aos cartões conwips.

No intuito de manter a igualdade entre os parâmetros dos resultados operacionais de ambos os modelos de simulação, foram realizadas vinte replicações para o modelo computacional CONWIP. Os primeiros 280 minutos, referente ao tempo de aquecimento, foram desconsiderados para todos os resultados. Os valores

apresentados como resultados do processo de simulação do modelo computacional CONWIP são provenientes da média entre as 20 replicações.

## Capítulo 5 - RESULTADOS

### 5.1 Resultados do modelo operacional real

O tempo de simulação foi determinado com base no tempo hábil que a empresa possuía para atender uma OP, sendo um dia útil com 912 minutos trabalhados. Na simulação o tempo de aquecimento, correspondente ao tempo que o primeiro *pallet* de ponta da asa necessitou para ser formado, foi desconsiderado. Os dados apresentados a seguir são referentes a estatísticas disponibilizadas pelo FlexSim do período de 280 a 912 minutos.

Foram inseridos no modelo 201304 unidades do meio da asa e 174000 unidades da ponta asa. Os silos que armazenam os insumos reservaram em média 1787 unidades de meio e 7580 unidades de ponta, mas atingiram respectivamente no ápice da simulação como capacidade máxima 2645 e 11618 unidades. O CT dos silos foi de 5,61 minutos para o meio e 27,54 minutos para a ponta. O freezer reconhecido pela empresa como recurso gargalo deveria apresentar um CT de 47 minutos para o meio e 43 minutos para a ponta, porém apresentou respectivamente 193,24 e 176,67 minutos. O aumento do CT não foi decorrente das unidades processadas porque o freezer meio suportava até 255814 unidades e processou em média 61124 unidades, atingindo um nível máximo de 88342. O freezer ponta suportava até 1222222 unidades, mas processou em média 46328 unidades e atingiu um ápice de 65710 unidades.

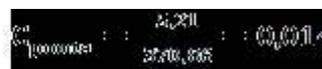
Durante a simulação das replicações foi possível verificar que a embalagem primária do meio e da ponta não conseguiu atender a demanda das unidades que saiam do freezer. Assim as esteiras que transportaram as unidades congeladas do freezer operaram abaixo da velocidade desejada porque as unidades se acumulavam gerando filas. As filas das esteiras de saída do freezer bloquearam a saída do freezer fazendo as unidades permanecerem por um tempo maior do que o necessário no freezer.

A EP de embalagem primária apresentou um CT de 0,27 minutos para o meio e 0,62 minutos para a ponta, resultando em 2313 sacos de 2,5Kg de meio da asa e 1015 sacos de 2Kg de ponta da asa. Apesar do ritmo simulado das etapas de embalagens primárias ter aumentado o CT do freezer, ressalva-se que conforme apresentado na seção anterior, ambas funcionaram de maneira semelhante à realidade industrial observada. A embalagem secundária apresentou um CT de 1,4 minutos para o meio e 3,2 minutos para a ponta da asa, resultando em 386 caixas de 15Kg para o meio da asa e 169 caixas de 12Kg para a ponta da asa.

A paletização resultou aproximadamente em 6 *pallets* de meio da asa e 3 *pallets* de ponta da asa, com CT respectivo de 90,63 e 158,24 minutos. Os maiores CT foram apresentados pelos estoques porque os produtos permaneciam pelo tempo referente a um giro de demanda de três dias e meio. No estoque do meio da asa em média 11 posições foram ocupadas, sendo 12 posições a quantidade máxima atingida. Os valores correspondentes ao estoque de ponta da asa foram 4 e 5.

O CT total para cada produto considerou todo o processo produtivo de cada produto e desconsiderou o tempo de permanência do PA no estoque final, apresentado para o meio foi de 294,15 minutos e para a ponta foi de 370,86. O estado de funcionamento do processo produtivo de acordo com o tempo simulado foi: 22,5% de ociosidade, apresentados pelas esteiras alocadas após o freezer e os estoques de PA; 9,2% coletando unidades para compor embalagens; 13% processando o congelamento das unidades e inserindo insumos no sistema, sendo que o freezer permaneceu bloqueado 3,1% de seu estado; e 52,3% realizando o transporte dos produtos pelas esteiras.

A classificação do cenário produtivo foi determinada pelas variáveis da Ciência da Fábrica, sendo elas: CT, TH, WIP, utilização (U), nível crítico de wip ( $W_0$ ), Lei do melhor e pior desempenho. O CT médio de cada EP foi dimensionado pelo FlexSim, sendo o CT da linha o resultado da soma dos valores médios apresentados pelo *software*, conforme já informado anteriormente. O CT foi considerado como critério para dimensionar a variabilidade do processo de acordo com a Equação 15, apresentando os seguintes valores:



A TH foi resultado do número médio de *pallets* formados, multiplicado pela quantidade unitária que cada *pallet* possuía, dividido pelo tempo de produção, assumindo os seguintes valores:

$$TH_{\text{meio}} = \frac{14416996,302}{6302} : 2303,23 \text{ unidades/dias/rotacionadas}$$

$$TH_{\text{ponta}} = \frac{12219777,4}{6302} : 1959,33 \text{ unidades/dias/rotacionadas}$$

O nível de WIP também foi disponibilizado pelo Flexsim, entretanto ele apresenta o valor acumulado para os dois produtos, assim foram desconsiderados os valores apresentados até os 280 minutos de simulação. Para separar a quantidade correspondente para cada produto, foi considerado o volume de insumos que entrou no processo para cada produto. O nível médio de WIP para o meio foi de 45211,25 unidades e para a ponta foi de 39079,15 unidades.

A utilização das EP foi calculada apenas para as etapas que possuíam um limite de capacidade conhecido, sendo os silos, o freezer e os estoques. Os limites de capacidade e os valores máximos processados e armazenados já foram informados, assim os valores U foram:  $U_{\text{silomeio}}=0,09$ ;  $U_{\text{siloponta}}=0,08$ ;  $U_{\text{freezermio}}=0,35$ ;  $U_{\text{freezerponta}}=0,05$ ;  $U_{\text{estoquemeio}}=0,57$ ;  $U_{\text{estoqueponta}}=0,71$ . O  $W_0$  foi resultado da multiplicação do tempo bruto de processamento, nesta pesquisa equivalente ao CT, pelo maior tempo de U, os valores apresentados foram:  $W_{0\text{meio}}=168$  unidades e  $W_{0\text{ponta}}=264$  unidades.

Considerando os valores apresentados como resultados para todo o processo, o melhor desempenho definido pelas Equações 06 e 07 apresentaram os seguintes resultados:

$$CT_{\text{meio}} = 168$$

$$TH_{\text{meio}} = 0,57$$

$$CT_{\text{ponta}} = 264$$

$$TH_{\text{ponta}} = 0,71$$

O pior desempenho do processo apresentaria, de acordo com as Equações 08 e 09, os seguintes valores:

$$WIP_{\text{meio}} = 45211,25 \times 2303,23 : 104098881,64$$

$$WIP_{\text{ponta}} = 39079,15 \times 1959,33 : 76492883,38$$



As considerações sobre os resultados são apresentadas no Capítulo 6 através da análise comparativa com os resultados do modelo computacional CONWIP.

## 5.2 Resultados do modelo computacional CONWIP

Todos os valores foram resultantes da média das vinte replicações realizadas. Foram inseridos no processo 137026 unidades do meio da asa e 124157 unidades da ponta asa. Os silos de armazenagem reservaram em média 8214 unidades de meio e 7425 unidades de ponta, mas em um determinado pico de processamento da simulação, alcançaram como capacidade máxima 24099 e 20850 unidades. O CT dos silos foi de 38,36 minutos para o meio e 48,55 minutos para a ponta. O freezer continuou tendo as suas saídas prejudicadas pelas filas geradas nas esteiras que antecedem a embalagem primária, resultando em um CT para o meio de 355,33 minutos e para a ponta 517,33 minutos. A quantidade máxima unitária processada no freezer meio foi de 24153 unidades com média para todo o processo de 16079 unidades. O freezer ponta processou no máximo 20850 com média de 13720. Ressaltando que a capacidade máxima do freezer permaneceu inalterada para ambos os produtos.

Novamente a embalagem primária do meio e da ponta não conseguiu atender a demanda das unidades que saem do freezer. Assim as esteiras que transportaram as unidades congeladas do freezer operaram abaixo da velocidade desejada porque as unidades se acumularam gerando filas. As filas das esteiras de saída do freezer bloquearam a saída do freezer fazendo as unidades permanecerem por um tempo maior do que o necessário no freezer. Mas esta limitação não foi identificada visualmente no processo de produção real porque a capacidade máxima do freezer não foi atingida, assim a entrada de insumos não foi prejudicada. A fila de produtos nas esteiras que antecedem a embalagem primária foi caracterizada pela sobreposição das unidades do meio e da ponta, característica comum mesmo nas esteiras que não apresentaram filas.

A EP de embalagem primária apresentou um CT de 0,29 minutos para o meio e 0,66 minutos para a ponta, resultando em 2154 sacos de 2,5Kg de meio da asa e 946 sacos de 2Kg de ponta da asa. A embalagem secundária apresentou um CT de 1,51 minutos para o meio e 3,43 minutos para a ponta da asa, resultando em 359 caixas de

15Kg para o meio da asa e 158 caixas de 12Kg para a ponta da asa. A paletização resultou aproximadamente em 6 *pallets* de meio da asa e 3 *pallets* de ponta da asa, com CT respectivo de 133,18 e 260,05 minutos. No estoque de PA para o meio da asa em média 9 posições foram ocupadas, sendo 10 posições a quantidade máxima atingida. Os valores correspondentes ao estoque de PA para ponta da asa foram 3 e 4.

O CT total para cada produto, considerando todo o processo produtivo de cada produto e desconsiderando o tempo de permanência do PA no estoque final, apresentado para o meio foi de 355,33 minutos e para a ponta foi de 517,03. O estado de funcionamento do processo de acordo com o tempo simulado foi: 39,8% de ociosidade apresentados pelos estoques de PA; 14,5% coletando unidades para compor embalagens; 9,3% processando o congelamento das unidades e inserindo insumos no processo, sendo que o freezer permaneceu bloqueado 3,7% de seu estado; e 32,7% realizando o transporte dos produtos pelas esteiras.

A classificação do cenário produtivo foi determinada pelas variáveis da Ciência da Fábrica, sendo elas: CT, TH, WIP, utilização (U), nível crítico de wip ( $W_0$ ), Lei do melhor e pior desempenho. O CT médio de cada EP foi dimensionado pelo FlexSim, sendo o CT da linha o resultado da soma dos valores médios apresentados pelo *software*, conforme já informado anteriormente. O CT foi considerado como critério para dimensionar a variabilidade do processo de acordo com a Equação 15, apresentando os seguintes valores:



A TH foi resultado do número médio de *pallets* formados, multiplicado pela quantidade unitária que cada *pallet* possui, dividido pelo tempo de produção, assumindo os seguintes valores:

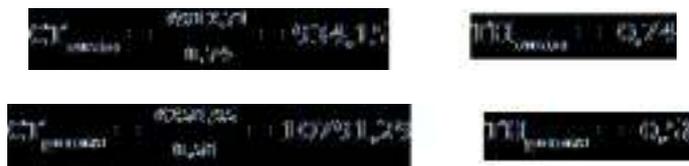


O nível de WIP foi determinado na mesma maneira como foi calculado para o modelo computacional real, resultando em 6912,71 unidades para o meio 6258,95 unidades para a ponta. A utilização das EP foi calculada para os silos, o freezer e estoques, sendo os limites de capacidade e os valores máximos processados e

armazenados já informados. Os valores  $U$  foram:  $U_{\text{silomeio}}=0,74$ ;  
 $U_{\text{siloponta}}=0,16$ ;

$U_{\text{freezemeio}}=0,09$ ;  $U_{\text{freezerponta}}=0,02$ ;  $U_{\text{estoquemeio}}=0,48$ ;  $U_{\text{estoqueponta}}=0,58$ . O  $W_0$  foi resultado da multiplicação do tempo bruto de processamento, nesta pesquisa equivalente ao CT, pelo maior tempo de  $U$ , os valores apresentados foram:  $W_{0\text{meio}}=263$  unidades e  $W_{0\text{ponta}}=300$  unidades.

Considerando os valores apresentados como resultados para todo o processo, o melhor desempenho definido pelas Equações 06 e 07 apresentaram os seguintes resultados:



O pior desempenho do processo apresentaria, de acordo com as Equações 08 e 09, os seguintes valores:



As considerações sobre os resultados são apresentadas no Capítulo 6 através da análise comparativa entre os modelos computacionais real e CONWIP.

### 5.3 Considerações parciais

A Ciência da Fábrica foi desenvolvida para aprimorar o funcionamento do CONWIP. Através da aplicação de suas leis foi possível analisar quais são as variáveis que precisavam de ajustes e o quanto essas variáveis precisavam ser alteradas (HOPP; SPEARMAN, 2013). Apesar de todas as leis serem aplicáveis ao CONWIP, apenas aquelas que estavam diretamente vinculadas com o funcionamento do CONWIP foram consideradas, sendo: lei do melhor desempenho, lei do pior desempenho, lei da variabilidade, lei da utilização, lei da eficiência e da robustez do sistema CONWIP.

O rigor metodológico para a modelagem e simulação computacional foi complexo, mas através de um bom método e a aplicação de procedimentos adequados foi possível desenvolver modelos de simulação próximos à realidade industrial. O nível

de acesso da pesquisadora e os recursos utilizados como forma de gerenciamento da Empresa A permitiram que a coleta de dados fosse bem estruturada, refletindo na baixa variabilidade entre os resultados de validação dos modelos.

As variáveis apresentadas como resultados operacionais do processamento dos modelos computacionais real e CONWIP foram necessárias para a aplicação das leis da Ciência da Fábrica. Os resultados referentes ao desempenho dos modelos e sua comparação estruturaram a Tabela 4, sendo estes os valores considerados para classificar os cenários produtivos.

Tabela 4: Resultados dos modelos computacionais.

Variável	Meio da asa		Ponta da asa	
	SP real	CONWIP	SP real	CONWIP
Total de pallets produzidos	6*	6*	3*	2,63*
TH (unidades/minuto)	230,53	215,32	199,33	145,97
CT (minuto)	294,15	355,33	370,86	517,03
C	0,009	0,001	0,014	0,03
WIP (unidades)	45211	6913	39079	6259
U (maior valor)	0,57	0,74	0,71	0,58
W <sub>0</sub> (unidade)	168	263	264	300
CT para o Melhor desempenho (minuto)	79317,54	934	55041	10791
TH para o Melhor desempenho (unidades/minuto)	0,57	0,74	0,71	0,58
CT para o pior desempenho (minuto)	13298815,65	2456293,2	144928,38	3236064,9
TH para o pior desempenho (unidades/minuto)	0,0034	0,0028	0,0027	0,0019

\* valores arredondados.

As considerações sobre os valores apresentados na Tabela 4 e suas respectivas conclusões são apresentadas na seção seguinte.

# Capítulo 6 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando a princípio a quantidade de insumos que cada um dos modelos gerou para o processo produtivo, observou-se que o modelo computacional CONWIP apresentou menos 68% de insumos para o meio da asa e 71% menos para a ponta da asa. Inserir uma quantidade menor de matéria prima no processo influenciou positivamente na produção final do processo porque foram produzidos 6 *pallets* para o meio e 2,63 *pallets* para a ponta.

A redução de matéria prima no processo influenciou positivamente os níveis de WIP que foram reduzidos de 45211 unidades de meio da asa para 6913 unidades, os mesmos valores para a ponta da asa foram de 39079 para 6259. Considerando medidas proporcionais, o WIP do meio foi reduzido em 85% e para a ponta a redução foi de 84%, seguindo a Lei da eficiência do CONWIP. Os níveis de redução foram superiores aos 25% apresentados pelos autores Hopp e Spearman (2013), reafirmando que o CONWIP reduz consideravelmente o nível de estoque em processo comparado a processo com métodos puramente empurrados.

Entretanto houve um aumento na quantidade de unidades armazenadas na etapa dos silos, este aumento foi vinculado ao aumento do CT desta EP conforme previsto pela Lei da utilização da Ciência da Fábrica, que aumentou para o meio em 32,75 minutos e para a ponta o aumento foi de 21,01 minutos. Este aumento repercutiu de maneira positiva para os silos porque aumentou o nível de utilização dos mesmos em aproximadamente 925% para o silo de meio e em 200% para a ponta. Mas ainda assim os silos apresentaram para o modelo CONWIP um excesso de capacidade de 74% para o meio e de 14% para a ponta.

O freezer reconhecido erroneamente pela Empresa A como recurso gargalo teve a sua utilização reduzida em 74% para o meio e 60% para a ponta, aumentando ainda mais o excesso de capacidade desta EP. Este excesso de capacidade resultou em

prejuízo para a Empresa A que investiu na capacidade deste recurso, mas não obteve retorno no período observado pela pesquisa.

As etapas seguintes, embalagem primária e secundária, tiveram seus CT aumentados em aproximadamente 8%, acarretando na diminuição de sua produção. A redução da produção destas EP foi positiva se analisada considerando como parâmetro o nível de WIP. Mas considerando que o gargalo do processo estava na embalagem primária, que não conseguiu atender a demanda do freezer, o aumento do CT foi prejudicial ao processo. O aumento do CT destas etapas provocou um aumento de 84% para o CT do freezer meio e o aumento para o CT do freezer ponta foi de 193%. Estes aumentos também repercutiram na porcentagem de bloqueio do processo, que subiu de 3,1% para 3,7%.

A redução das quantidades inseridas no processo também diminuiu os níveis de estoques finais do processo, piorando o nível de utilização dos estoques devido ao excesso de capacidade. A TH foi reduzida para o modelo CONWIP porque menos insumos entraram no processo, de modo que no final da simulação do modelo real foram produzidos 6,42 *pallets* para o meio e 2,8 *pallets* para a ponta. E para a simulação do modelo CONWIP foram produzidos 6 e 2,05 *pallets* respectivamente. Outro fator que contribuiu para a redução da TH foi o aumento do CT porque menos unidades entraram no processo, mas permaneceram por mais tempo, reduzindo o excesso de produção.

O modelo computacional real apresentou níveis exorbitantes para o  $W_0$  determinado pela Ciência da Fábrica. O modelo CONWIP também apresentou níveis superiores de  $W_0$ , porém a variação entre os valores foi menor. A mesma interpretação foi apresentada pela Lei do melhor e pior desempenho, apesar do CT ter sido abaixo do cenário de melhor desempenho proposto. Indicando que o modelo CONWIP de acordo com o cenário da Ciência da Fábrica não apresentou um processo produtivo ideal, mas estava mais próximo do cenário desejado.

A variabilidade do modelo real foi maior que a do modelo CONWIP, condizendo com a Lei da variabilidade da Ciência da Fábrica, pois o desempenho do processo produtivo CONWIP, como um todo, foi melhor do que o modelo real. Sendo ruim apenas na análise do recurso gargalo do processo. Considerando a Lei da robustez do CONWIP o nível de WIP reduziu de maneira considerável, diminuindo os

desperdícios do processo, contribuindo para melhorar o lucro do processo. Entretanto a TH ainda estava fora do cenário ideal, portanto, não foi possível determinar o quão robusto o modelo CONWIP foi perante o modelo real.

### **6.1 Conclusão e recomendações futuras**

Diante do desafio de desenvolver métodos de produção mais flexíveis, mantendo o padrão de qualidade que o consumidor deseja e a rentabilidade que as indústrias necessitam (ELMOSELHY, 2013). Analisou-se o CONWIP apontado como o melhor método híbrido de produção pela literatura porque possuía poucos estudos referentes aos resultados que este método apresenta no chão de fábrica compatível com a realidade industrial (GARTERMANN *et al.*, 2014, MHADA *et al.*, 2016). As conclusões foram pertinentes a comparação do desempenho de um processo produtivo com produção para estoques com o desempenho do mesmo processo gerenciado pelo CONWIP, utilizando a simulação computacional como cenário de estudo e a Ciência da Fábrica como parâmetro de classificação entre os cenários.

A modelagem científica e a simulação do modelo real permitiram a identificação correta do recurso gargalo do processo. A simulação do modelo real apresentou resultados compatíveis com o fluxo de gerenciamento adotado, a produção para estoques de fato produziu em excesso, tendo todo este impacto absorvido pelos estoques. Mesmo com este perfil o modelo apresentou os menores índices de tempo total de produção comparados ao modelo de simulação CONWIP. Entretanto o CONWIP teve por objetivo atender a demanda reduzindo os estoques em processo. O modelo CONWIP simulado satisfaz o principal objetivo do CONWIP.

O desempenho do processo produtivo de maneira geral foi melhor para o modelo CONWIP porque suas variáveis de tempo total de produção, produtividade, estoque em processo, utilização e variabilidade, de acordo com as leis do melhor e pior desempenho, utilização, variabilidade e eficiência do CONWIP foram mais próximas de um cenário ideal. Ressaltando que o nível de WIP foi reduzido em 85% comparado ao modelo real, a produção em excesso foi eliminada para o item meio da asa e quase eliminada para a ponta da asa. A Lei da robustez do CONWIP foi parcialmente comprovada porque a produtividade do modelo CONWIP ainda estava longe de um cenário ideal.

Conforme apresentado nas limitações da pesquisa, todas as leis da Ciência da Fábrica eram aplicáveis ao CONWIP, mas a pesquisa concentrou-se nas leis diretamente relacionadas ao chão de fábrica. Mesmo assim os resultados ainda mostraram-se condizentes com a Lei dos lotes de processamento porque a adoção de cartões conwips como limitador de um lote de processamento, reduziu os desperdícios do processo. A relação entre a quantidade de matéria prima inserida no processo e a quantidade de PA mostrou-se semelhante ao raciocínio da Lei da capacidade.

Este trabalho contribuiu para diminuir a ausência de estudos na literatura com análises do desempenho do CONWIP em processos produtivos reais com fluxo com produção para estoques através da modelagem e simulação computacional. Também diminuiu a ausência de trabalhos com a aplicação do CONWIP e a Ciência da Fábrica. Contribuiu de maneira prática para a Empresa A, pois possibilitou uma análise mais completa quanto à utilização dos seus recursos, a identificação do recurso gargalo e a redução de desperdícios. Ainda corrobora com os autores Xanthopoulos, Koulouriotis e Gasteratos (2017) e Pergher e Almeida (2017) por confirmar que o CONWIP não é um MHP ideal, portanto precisa de aprimoramento. Sugere-se que mais pesquisas com a aplicação prática do CONWIP e Ciência da Fábrica sejam desenvolvidas porque teoricamente esta combinação possui resultados promissores.

## Bibliografia

- AQLAN, F., LAM, S., & RAMAKRISHNAN, S. (2014). An integrated simulation–optimization study for consolidating production lines in a configure-to-order production environment. *International Journal Production Economics*, v. 148, pp. 51–61.
- BENTON, W. C., & SHIN, S. (1998). Manufacturing planning and control: The evolution of MRP and JIT integration. *European Journal of Operational Research*, pp. 411-140.
- BOONLERTVANICH, K. (2005). EXTENDED-CONWIP-KANBAN SYSTEM:CONTROL AND PERFORMANCE ANALYSIS. *Tese apresentada a Faculdade de Engenharia Industrial e Sistemas do Instituto de Tecnologia da Georgia, para obtenção ao título de Doutor em Filosofia* (p. pp. 260). Atlanta: Georgia Institute of Technology.
- CHEN, H., CHANG, K.-H., & CHENG, L. (2004). Estimation of means and covariances of inverse-Gaussian order statistics. *European Journal of Operational Research*, v. 155, pp. 154–169.
- CHEN, Z., & TAN, K. H. (2013). The impact of organization ownership structure on JIT implementation and production operations performance. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 33, n. 9, pp. 1202-1229.
- CHIANG, W.-C., URBAN, T. L., HU, J., LI, H., XU, Y., & LI, S. (2014). Interdisciplinary research in operations management. *International Journal Production Economics*, v. 147, pp. 571–572.
- CHWIF, L., & MEDINA, A. (2010). *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e aplicações*. São Paulo: 3ª ed .
- CORRÊA, H., GIANESI, I., & CAON, M. (2001). *Planejamento, programação e controle da produção: MRPII/ERP*. São Paulo: 4ª ed. Atlas.
- D'ADDERIO, L., CUGERONE, K., PORCÙ, F., MICHELE, C., & TOKAY, A. (2016). Capabilities of the Johnson SB distribution in estimating rain variables. *Advances in Water Resources*, v.97, pp. 241-250.
- DRESCH, A. (2013). Design Science e Design Science Research como Artefatos Metodológicos para Engenharia de Produção. *Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos* (p. 184). São Leopoldo - RS: UNISINOS.
- ELMOSELHY, S. (2013). Hybrid lean–agile manufacturing system technical facet, in automotive sector. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 32, pp. 598–619.
- ESMAEILIAN, B., BEHDAD, S., & WANG, B. (2016). The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 39, pp. 79–100.
- FEI, X., & JIN, Y. (2013). Reduce Cycle Time at Semiconductor Assembly Test Manufacturing with Factory Physics Methodology. *Advanced Materials Research*, v. 753-755, pp. 3166-3168.
- FREITAS FILHO, P. J. (2008). *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena*. Florianópolis: 2ª ed. Visual Books.

- GANSTERER, M. (2015). Aggregate Planning and Forecasting in Make-to-Order Production Systems. *International Journal of Production Economics*, pp. 01-16.
- GASTERMANN, B., & STOPPER, M. (2012). Conceptual Prototype of a Planning Software for the CONWIP Production Control System. *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, pp. 1334-1339.
- GASTERMANN, B., STOPPER, M., LUFTENSTEINER, F., & KATALINIC, B. (2014). Implementation of a Software Prototype with ConWIP Characteristics for Production Planning and Stock Management. *Procedia Engineering*, v. 69, pp. 423–432.
- GELENBE, E., & GUENNOUNI, H. (1991). FLEXSIM: A flexible manufacturing system simulator. *European Journal of Operational Research*, v. 53, pp. 149-165.
- GHOSH, B. C., & SONG, L. K. (1994). Total Quality Management in Manufacturing: A Study in the Singapore Context. *Systems Practice Vol. 7, No. 3*, 255 - 280.
- GLAVAN, M., GRADIŠAR, D., ATANASIJEVIĆ-KUNC, M., STRMČNIK, S., & MUŠIČ, G. (2013). Input variable selection for model-based production control and optimisation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 68, n. 9, pp. 2743 -2759.
- GODINHO FILHO, M., & UTIYAMA, M. (2015). Comparing different strategies for the allocation of improvement programmes in a flow shop environment. *International Journal, Advanced Manufacturing Technology*, v. 77, pp.1365–1385.
- GODINHO FILHO, M., & UZSOY, R. (2011). The effect of shop floor continuous improvement programs on the lot size–cycle time relationship in a multi-product single-machine environment. *International Journal, Advanced Manufacturing Technology*, v. 52, pp. 669–681.
- GODINHO FILHO, M., GUIMARÃES, A., & OPRIME, P. (2013). Guiding improvement programs towards lead time reduction in a single-machine environment. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, v. 66, pp.1987–1998.
- GOLMOHAMMADI, D. (2015). A study of scheduling under the theory of constraints. *International Journal Production Economics*, v. 165, pp. 38–50.
- GONG, Q., YANG, Y., & WANG, S. (2014). Information and decision-making delays in MRP, KANBAN and CONWIP. *International Journal Production Economics*, v. 156, pp. 208–213.
- GREENWOOD, A., & BEAVERSTOCK, M. (2011). SIMULATION EDUCATION – SEVEN REASONS FOR CHANGE. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, pp. 20-28.
- HARROD, S., & KANET, J. (2013). Applying work flow control in make-to-order job shops. *International Journal Production Economics*, v. 143, pp. 620–626.
- HASSAN, A., A, M., ZAHER, H., & ELSHERPIENY, E. (2014). Comparison of Estimators for Exponentiated Inverted Weibull Distribution Based on Grouped Data. *Journal of Engineering Research and Applications*, v. 4, n. 4, pp.77-90.
- HENDRY, L., HUANG, Y., & STEVENSON, M. (2013). Workload control: successful implementation taking a contingency-based view of production planning and control. *International Journal of Operations & Production Management v. 33, n.1*, 69-103.

- HOPP, W. J., & SPEARMAN, M. L. (2013). *A Ciência da Fábrica. Tradução de Paulo Norberto Migliavacca*. Porto Alegre: 3ª ed. Bookman.
- HSIEH, P.-N., & CHANG, P.-L. (2009). An assessment of world-wide research productivity in production and operations management. *International Journal Production Economics*, v. 120, pp. 540–551.
- HUANG, H.-H., PEI, W., WU, H.-H., & May, M.-D. (2013). A research on problems of mixed-line production and the re-scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 29, pp. 64-72.
- IUCKSCH, A. (2005). Simulação de Sistemas de Gestão de Produção em Manufatura Sazonal. *Dissertação de mestrado profissionalizante apresentada como requisito parcial para o título de Mestre em Engenharia com ênfase em Gerência da Produção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul* (p. pp. 89). Porto Alegre: UFRGS.
- JAEGLER, Y., BURLAT, P., & LAMOURE, S. (2016). The ConWip Production Control System: a Literature Review. *6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, pp. 1-10.
- JAIN, S., & FOLEY, W. J. (2016). Dispatching strategies for managing uncertainties in automated manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, v. 248, pp. 328–341.
- JIANG, T., AN, X., MINCHIN JR, E., & LI, S. (2016). Application of Discrete-Event Simulation in the Quantitative Evaluation of Information Systems in Infrastructure Maintenance Management Processes. *Journal Management Engineering*, v.32, n.2, pp. 050150081-0501500813.
- JINHWAN, J., BYUNGHWA, K., NAMKUK, C., & NAMCHUL, B. (2011). Analysis of Time Headway Distribution on koean Multilane Highway Using Loop Event Data. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v.9, pp. 1447-1457.
- JOHNES, J. (2015). Operational Research in education. *European Journal of Operational Research*, v. 243, pp. 683–696.
- JUNG, C. F. (2004). *Metodologia para pesquisa & desenvolvimento: aplicada a novas tecnologias, produtos e processos*. Rio de Janeiro: Axcel Books, 311 p.
- KEIZER, M., HAIJEMA, R., CLOEMHOF, J., & VORST, J. (2015). Hybrid optimization and simulation to design a logistics network for distributing perishable products. *Computers & Industrial Engineering*, v. 88, pp. 26–38.
- KORUGAN, A., & GUPTA, S. (2014). An adaptive CONWIP mechanism for hybrid production systems. *International Journal, Advanced Manufacturing Technology*, v. 74, pp. 715-727.
- KRAUSE, D., YOUNGDAHL, W., & RAMASWAMY, K. (2014). Manufacturing – Still a missing link? *Journal of Operations Management*, Editorial article, v. 32, pp. 1-4.
- LAW, A., & KELTON, D. (1991). *Simulation: Modeling and Analysis*. XXX: McGraw-Hill.
- LAZARIS, A., KOUTSAKIS, P., & PATERAKIS, M. (2008). A new model for video traffic originating from multiplexed MPEG-4 videoconference streams. *Performance Evaluation*, v.65, n.1, pp.51-70.

- LIM, L., ALPAN, G., & PENZ, B. (2014). Reconciling sales and operations management with distant suppliers in the automotive industry: A simulation approach. *International Journal of Production Economics*, v. 151, pp. 20–36.
- LIN, F.-J., & CHEN, Y.-M. (2012). A simulation model with synchronization manufacturing stations. *Management Decision*, v. 50, n. 7, pp. 1308-1325.
- MARCONI, M., & LAKATOS, E. (2010). *Fundamentos de metodologia científica*. São Paulo: 7 ed. Atlas.
- MARQUES, D. M. (2008). Implantação de um Sistema MRP em ambiente de Produção Enxuta com alta diversidade de componentes e sazonalidade. *Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção* (p. 101). São Carlos - SP: USP.
- MELOUK, S., FREEMAN, N., MILLER, D., & DUNNING, M. (2013). Simulation optimization-based decision support tool for steel manufacturing. *International Journal of Production Economics*, v. 141, pp. 269–276.
- MERODE, G., GROOTHUIS, S., & GOLDSCHMIDT, H. (1999). Workflow management: changing your organization through simulation. *Accreditation and Quality Assurance*, v. 4, pp. 438–442.
- MEYER, M., APOSTU, M.-V., & WINDT, K. (2013). Analyzing the influence of capacity adjustments on performance. *Procedia CIRP* 7 , pp. 449 – 454.
- MHADA, F., OUZINEB, M., PELLERIN, R., & HALLAOUI, I. (2016). Multilevel hybrid method for optimal buffer sizing and inspection stations positioning. *SpringerPlus*, v.5, pp.2045-2066.
- MIGUEL, P. A. (2012.). *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações* . Rio de Janeiro: 2ªed. Elsevier: ABEPRO.
- MILNE, J., MAHAPATRA, S., & WANG, C.-T. (2015). Optimizing Planned Lead Times for Enhancing Performance of MRP Systems. *International Journal of Production Economics*, v. 167, pp.220–231.
- NEGAHBAN, A., & SMITH, J. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 33, pp. 241–261.
- OHNO, K. (2011). The optimal control of just-in-time-based production and distribution systems and performance comparisons with optimized pull systems. *European Journal of Operational Research*, v. 213, pp. 124–133.
- OHNO, T. (1997). *O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala*. Porto Alegre: Bookman, pp. 149.
- ONYEOCHA, C., WANG, J., KHOURY, J., & GERAGHTY, J. (2015). A comparison of HK-CONWIP and BK-CONWIP control strategies in a multi-product manufacturing system. *Operations Research Perspectives*, v. 2, pp. 137–149.
- PAN, J., SHIH, P.-H., & WU, M.-H. (2015). Order batching in a pick-and-pass warehousing system with group genetic algorithm. *Omega*, v.57, pp. 238–248.
- PAWLEWSKI, P., REJMICZ, K., STASIAK, K., & PIEPRZ, M. (2012). JUST IN SEQUENCE DELIVERY IMPROVEMENT BASED ON FLEXSIM SIMULATION EXPERIMENT. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, pp. 1-12.

- PEHRSSON, L., NG, A., & BERNEDIXEN, J. (2016). Automatic identification of constraints and improvement actions in production systems using multi-objective optimization and post-optimality analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 39, pp. 24–37.
- PERGHER, I., & ALMEIDA, A. (2017). A multi-attribute decision model for setting production planning parameters. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 42, pp. 224–232.
- PERGHER, I., SILVA, L., PACHECO, D., & VACCARO, G. (2014). ANÁLISE DO IMPACTO DA VARIABILIDADE DE FLUXO NO DIMENSIONAMENTO DE KANBANS. *Produção Online*, v.14, n. 1, pp. 115-142.
- RIFAI, A., DAWAL, S., ZUHDI, A., AOYAMA, H., & CASO, K. (2016). Reentrant FMS scheduling in loop layout with consideration of multi loading-unloading stations and shortcuts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 82, pp.1527–1545.
- ROMAGNOLI, G. (2015). Design and simulation of CONWIP in the complex flexible job shop of a Make-To-Order manufacturing firm. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, v.6, pp. 117–134.
- ROSSI FILHO, T., PACHECO, D. A., PERGHER, I., VACCARO, R., & ANTUNES JR, J. A. (2014). Análise das implicações da estratégia de modularidade de produtos na manufatura de eletrônicos à luz da Factory Physics e da Teoria das Restrições. *Espacios*, vol. 35, nº 7.
- SATYAM, K., & KRISHNAMURTHY, A. (2013). Performance analysis of CONWIP systems with batch size constraints. *Annals of Operations Research*, v. 209, pp. 85–114.
- SCHUBERT, J., MORADI, F., ASADI, H., LUOTSINEN, L., SJOBERG, E., HORLING, P., et al. (2015). Simulation-based decision support for evaluating operational plans. *Operations Research Perspectives*, v. 2, pp. 36–56.
- SLACK, N., CHAMBERS, S., & JOHNSTON, R. (2009). *Administração da Produção*. São Paulo: Atlas. 3ª edição, 728 p.
- SPEARMAN, M. (2014). Of Physics and Factory Physics. *Production and Operations Management*, v. 23, n. 11, pp. 1875–1885.
- SPEARMAN, M., WOODRUFF, D., & HOPP, W. (1990). CONWIP: a pull alternative to kanban. *International Journal of Production Research*, v. 28, n.5, pp. 879-894.
- STANDRIDG, C. (2004). HOW FACTORY PHYSICS HELPS SIMULATION. *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, pp. 1103-1108.
- STERMAN, J., OLIVA, R., LINDERMAN, K., & BENDOLY, E. (2015). System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management. *Journal of Operations Management*, Editorial article, v. 39-40, pp.1-5.
- STEVENSON, W. J. (2001). *Estatística aplicada à administração*. São Paulo: Harbra 495 p.
- TAYLOR, S., TURNER, S., STRASSBURGER, S., & MUSTAFEE, N. (2012). Bridging The Gap: A Standards-Based Approach to OR/MS Distributed Simulation. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, v. 22, n. 4, pp. 18:1-18:23.
- TENHIÄLÄ, A. (2011). Contingency theory of capacity planning: The link between process types and planning methods. *Journal of Operations Management*, v.29, pp. 65–77.

THÜRER, M., LAND, M., STEVENSON, M., & FREDENDALL, L. (2016). Card-based delivery date promising in high-variety manufacturing with order release control. *International Journal Production Economics*, v. 172, pp. 19–30.

VERMA, R. (1997). Management Science, Theory of Constraints/Optimized Production Technology and Local Optimization. *Omega*, v. 25, n° 2, pp. 189-200.

WALPOLE, R., MYERS, R., MYERS, S., & YE, K. (2009). *Probabilidade e Estatística para engenharia e ciências*. São Paulo: Pearson Prentice Hall; tradução de Luciane Vianna.

WANG, L., & SHIH, A. (2015). Editorial for JMS special issue on Advanced Manufacturing Research. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 37, pp. 457–458.

XANTHOPOULOS, A. S., KOULOURIOTIS, D. E., & GASTERATOS, A. (2017). Adaptive card-based production control policies. *Computers & Industrial Engineering*, v.103, pp.131–144.

ZHOU, J., ZHANG, Q., WANG, X., & XIAO, H. (2016). Lean System Design for Engineer-to-Order Manufacturing. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, v. 21, n.6, pp.702-712.

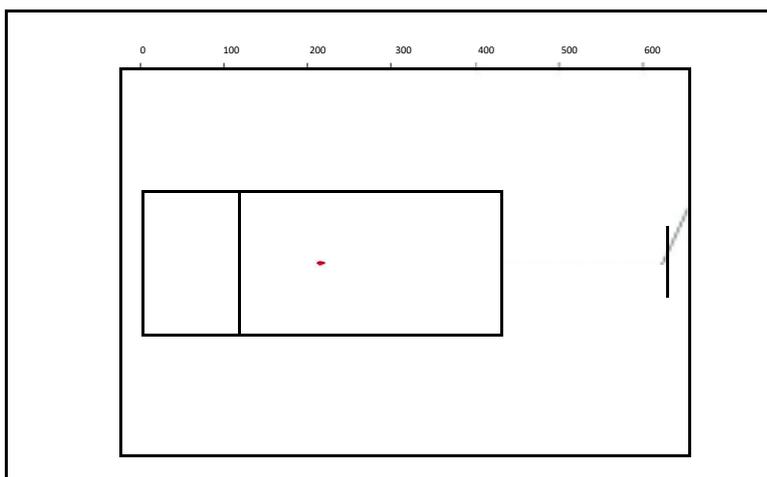
# APÊNDICES

**APÊNDICE I** – Dados coletados representando a quantidade de unidades por minuto do meio e da ponta da asa do frango.

Inserção de MP do meio da asa:

Tempo	QTD	00:01:05	545	00:01:15	556	00:01:15	467	00:01:24	312	00:01:22	423	00:01:05	611
00:01:14	439	00:01:29	522	00:01:11	249	00:01:17	424	00:01:10	429	00:01:13	348	00:01:23	511
00:01:33	583	00:01:09	426	00:01:12	540	00:01:15	453	00:01:16	352	00:01:17	383	00:01:31	597
00:01:12	420	00:01:26	523	00:01:14	507	00:01:15	562	00:01:15	456	00:01:12	312	00:01:09	360
00:01:28	428	00:01:06	408	00:01:15	533	00:01:14	447	00:01:15	230	00:01:18	388	00:01:20	398
00:01:08	420	00:01:23	580	00:01:15	506	00:01:18	503	00:01:14	547	00:01:10	441		
00:01:37	501	00:01:23	451	00:01:14	494	00:01:12	379	00:01:17	299	00:01:21	391		
00:01:10	405	00:01:23	398	00:01:15	499	00:01:22	350	00:01:11	309	00:01:06	418		
00:01:08	385	00:01:11	316	00:01:16	528	00:01:11	297	00:01:11	271	00:01:26	473		
00:01:05	578	00:01:26	422	00:01:11	275	00:01:17	594	00:01:48	532	00:01:21	420		
00:01:31	628	00:01:14	447	00:01:21	418	00:01:12	493	00:01:14	480	00:01:20	364		
00:01:07	447	00:01:23	471	00:01:12	335	00:01:14	485	00:01:18	388	00:01:25	357		
00:01:29	565	00:01:13	504	00:01:13	578	00:01:15	524	00:01:10	280	00:01:31	553		
00:01:07	389	00:01:22	492	00:01:11	337	00:01:15	480	00:01:16	378	00:01:09	429		
00:01:19	486	00:01:11	325	00:01:14	509	00:01:11	279	00:01:18	247	00:01:30	448		
00:01:10	380	00:01:31	480	00:01:15	558	00:01:18	234	00:01:21	403	00:01:09	468		
00:01:25	438	00:01:15	553	00:01:16	396	00:01:20	291	00:01:27	284	00:01:28	395		
00:01:09	432	00:01:18	513	00:01:12	448	00:01:10	371	00:01:22	404	00:01:05	481		
00:01:29	376	00:01:13	469	00:01:15	577	00:01:12	399	00:01:11	245	00:01:27	300		
00:01:06	400	00:01:15	492	00:01:14	564	00:01:18	308	00:01:24	418	00:01:07	354		
00:01:24	554	00:01:13	399	00:01:13	487	00:01:50	453	00:01:08	425	00:01:20	320		
00:01:05	489	00:01:14	586	00:01:15	512	00:01:12	378	00:01:23	502	00:01:09	422		
00:01:23	424	00:01:13	493	00:01:12	480	00:01:12	426	00:01:07	459	00:01:19	393		
00:01:05	503	00:01:14	439	00:01:14	523	00:01:20	264	00:01:22	468	00:01:27	293		
00:01:29	474	00:01:15	513	00:01:14	530	00:01:11	315	00:01:11	361	00:01:11	278		
00:01:10	433	00:01:14	550	00:01:14	465	00:01:14	374	00:01:18	388	00:01:27	257		
00:01:25	328	00:01:12	435	00:01:15	582	00:01:12	465	00:01:09	391	00:01:25	423		
00:01:07	414	00:01:15	467	00:01:11	367	00:01:27	274	00:01:26	528	00:01:17	487		
00:01:20	385	00:01:13	405	00:01:16	453	00:01:13	441	00:01:12	420	00:01:20	368		
00:01:06	434	00:01:17	507	00:01:20	335	00:01:17	290	00:01:28	443	00:01:18	355		
00:01:26	467	00:01:11	370	00:01:15	478	00:01:15	500	00:01:07	364	00:01:08	468		
00:01:09	412	00:01:14	514	00:01:15	489	00:01:19	370	00:01:18	388	00:01:23	483		
00:01:27	262	00:01:15	453	00:01:17	415	00:01:10	435	00:01:15	395	00:01:26	428		

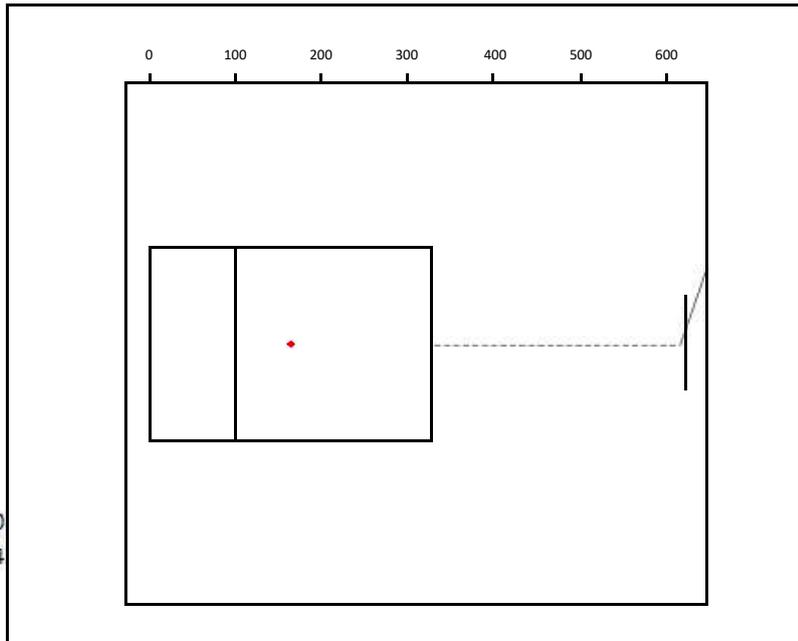
Tempo médio 00:01:17  
 Desvio padrão do tempo 00:00:07  
 Quantidade média 431  
 Desvio padrão da QTD 87



Armazenagem do meio da asa:

Tempo	QTD	00:01:02	622	00:01:12	360	00:01:09	299	00:01:12	394	00:01:16	325	00:01:18	318
00:01:09	437	00:01:15	410	00:01:07	292	00:01:12	354	00:01:10	380	00:01:18	320	00:01:12	402
00:01:07	318	00:01:13	326	00:01:10	259	00:01:15	332	00:01:05	307	00:01:06	362	00:01:14	274
00:01:19	361	00:01:10	336	00:01:16	300	00:01:12	308	00:01:08	314	00:01:15	367	00:01:06	335
00:01:14	254	00:01:15	310	00:01:11	310	00:01:09	380	00:01:08	284	00:01:03	321	00:01:03	309
00:01:11	394	00:01:12	360	00:01:10	378	00:01:10	405	00:01:08	402	00:01:05	327		
00:01:15	320	00:01:13	241	00:01:13	286	00:01:04	300	00:01:04	351	00:01:12	389		
00:01:12	342	00:01:07	293	00:01:09	261	00:01:05	357	00:01:10	293	00:01:03	337		
00:01:10	399	00:01:15	360	00:01:11	410	00:01:09	375	00:01:05	275	00:01:08	373		
00:01:13	259	00:01:10	434	00:01:13	225	00:01:03	300	00:01:10	384	00:01:09	382		
00:01:11	329	00:01:08	385	00:01:14	322	00:01:05	321	00:01:14	256	00:01:14	338		
00:01:13	376	00:01:16	299	00:01:14	280	00:01:08	373	00:01:10	427	00:01:13	294		
00:01:15	355	00:01:12	318	00:01:11	381	00:01:14	327	00:01:16	285	00:01:11	376		
00:01:01	265	00:01:14	301	00:01:08	308	00:01:10	319	00:01:04	297	00:01:16	314		
00:01:12	318	00:01:07	316	00:01:14	264	00:01:07	368	00:01:14	298	00:01:17	390		
00:01:12	390	00:01:06	396	00:01:01	264	00:01:14	348	00:01:12	352	00:01:13	302		
00:01:09	361	00:01:10	371	00:01:12	378	00:01:08	326	00:01:03	284	00:01:04	306		
00:01:07	241	00:01:08	442	00:01:09	391	00:01:03	346	00:01:15	314	00:01:05	357		
00:01:15	375	00:01:10	469	00:01:10	385	00:01:13	293	00:01:16	276	00:01:06	355		
00:01:10	364	00:01:09	429	00:01:11	365	00:01:09	379	00:01:16	301	00:01:15	378		
00:01:11	452	00:01:12	288	00:01:08	332	00:01:03	259	00:01:04	285	00:01:04	278		
00:01:16	304	00:01:12	420	00:01:09	376	00:01:03	251	00:01:08	349	00:01:03	296		
00:01:10	483	00:01:08	289	00:01:11	349	00:01:14	309	00:01:13	323	00:01:12	321		
00:01:12	410	00:01:11	379	00:01:13	247	00:01:16	336	00:01:07	279	00:01:10	364		
00:01:10	231	00:01:13	236	00:01:09	307	00:01:07	302	00:01:12	327	00:01:13	249		
00:01:05	373	00:01:14	354	00:01:10	336	00:01:03	302	00:01:14	303	00:01:11	390		
00:01:16	290	00:01:09	384	00:01:07	373	00:01:09	287	00:01:13	337	00:01:12	355		
00:01:10	357	00:01:11	336	00:01:19	253	00:01:18	390	00:01:05	319	00:01:19	390		
00:01:11	445	00:01:10	301	00:01:11	297	00:01:14	241	00:01:07	341	00:01:04	314		
00:01:07	374	00:01:13	331	00:01:14	312	00:01:08	387	00:01:14	327	00:01:12	376		
00:01:11	336	00:01:10	336	00:01:06	319	00:01:14	278	00:01:05	258	00:01:04	281		
00:01:14	312	00:01:12	282	00:01:15	371	00:01:16	315	00:01:11	455	00:01:03	243		
00:01:10	406	00:01:19	280	00:01:10	378	00:01:15	295	00:01:03	206	00:01:12	348		

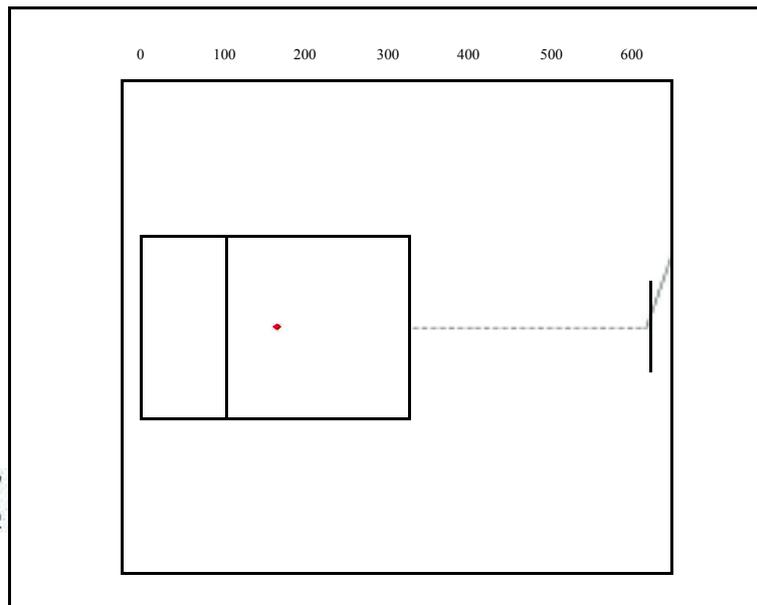
Tempo médio 00:01:10  
Desvio padrão do tempo 00:00:04  
Quantidade média 335  
Desvio padrão da QTD 56



Embalagem primária do meio da asa:

Tempo	SC	00:01:44	8	00:02:06	11	00:01:25	6	00:02:20	13	00:02:29	13	00:01:43	8
00:01:35	7	00:01:10	4	00:01:19	5	00:01:45	8	00:02:26	13	00:02:23	13	00:01:19	4
00:01:37	8	00:01:39	8	00:02:04	11	00:01:35	7	00:02:15	12	00:01:36	7	00:01:13	3
00:01:33	6	00:01:59	10	00:01:44	8	00:02:15	12	00:02:04	11	00:01:13	3	00:01:26	5
00:02:26	12	00:02:09	10	00:02:07	10	00:02:33	13	00:01:26	5	00:01:44	8	00:01:32	5
00:01:52	9	00:01:48	8	00:02:06	11	00:02:24	12	00:01:40	10	00:01:58	10	00:01:19	4
00:02:08	9	00:01:50	9	00:01:17	3	00:01:35	6	00:01:15	4	00:01:42	7		
00:01:24	5	00:01:31	6	00:01:48	8	00:01:31	7	00:01:35	7	00:01:23	4		
00:01:36	7	00:01:15	3	00:01:47	9	00:02:10	11	00:01:46	8	00:01:28	6		
00:01:24	5	00:01:20	5	00:02:21	12	00:01:32	6	00:01:21	4	00:01:13	3		
00:02:16	11	00:01:55	9	00:01:54	8	00:01:37	7	00:01:22	4	00:01:50	9		
00:01:49	9	00:01:42	8	00:02:00	10	00:02:23	11	00:01:26	5	00:02:08	10		
00:01:52	9	00:01:53	10	00:01:51	8	00:01:38	8	00:01:23	4	00:01:58	9		
00:01:31	6	00:01:09	2	00:01:56	8	00:01:51	8	00:01:28	6	00:01:37	7		
00:01:36	7	00:01:51	8	00:02:06	11	00:01:27	5	00:01:43	7	00:01:14	3		
00:01:58	9	00:01:12	3	00:02:03	10	00:01:32	6	00:01:53	8	00:01:05	2		
00:01:53	9	00:01:06	1	00:02:00	11	00:01:36	7	00:02:06	10	00:02:03	10		
00:02:09	11	00:02:03	9	00:02:19	12	00:01:26	5	00:01:40	8	00:01:31	5		
00:01:10	3	00:02:10	11	00:02:29	13	00:01:49	9	00:01:25	5	00:02:26	13		
00:01:19	3	00:01:44	7	00:02:12	11	00:01:26	4	00:01:33	7	00:01:39	8		
00:02:01	10	00:01:59	10	00:02:16	12	00:02:02	10	00:01:25	6	00:01:38	9		
00:01:59	9	00:01:53	8	00:02:29	13	00:01:41	7	00:01:35	7	00:01:31	7		
00:01:23	4	00:01:55	9	00:01:56	9	00:01:14	2	00:01:25	6	00:01:23	5		
00:01:46	8	00:01:16	3	00:01:57	9	00:01:27	6	00:02:16	12	00:01:30	7		
00:01:20	5	00:01:46	8	00:01:45	9	00:01:38	9	00:01:53	9	00:01:25	5		
00:01:24	6	00:01:38	8	00:01:52	8	00:01:36	7	00:02:18	11	00:01:35	7		
00:02:00	12	00:02:06	11	00:01:50	9	00:01:18	4	00:01:31	6	00:01:31	6		
00:02:03	10	00:02:11	11	00:01:44	8	00:01:40	8	00:01:38	9	00:01:21	4		
00:01:57	9	00:01:44	7	00:01:54	9	00:02:37	14	00:02:09	10	00:01:27	6		
00:01:19	4	00:02:23	12	00:02:00	10	00:02:00	10	00:02:24	13	00:01:23	5		
00:01:30	6	00:02:18	12	00:01:52	8	00:02:18	12	00:02:03	11	00:01:39	8		
00:01:55	9	00:01:48	8	00:02:09	11	00:02:04	10	00:02:45	14	00:01:28	6		
00:01:55	10	00:01:50	9	00:02:14	12	00:02:41	14	00:02:29	13	00:01:08	2		

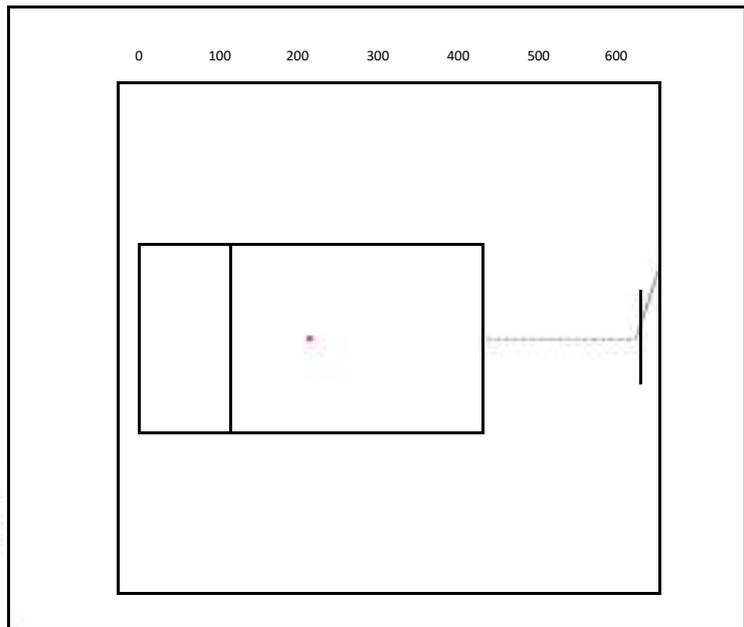
Tempo médio 00:01:47  
 Desvio padrão do tempo 00:00:22  
 Quantidade média 8  
 Desvio padrão da QTD 3



Embalagem secundária do meio da asa:

Tempo	CX	00:03:07	3	00:02:27	2	00:02:32	2	00:02:56	3	00:02:37	2	00:03:05	3
00:02:29	2	00:03:09	3	00:02:10	1	00:02:37	2	00:02:13	1	00:02:27	2	00:03:06	3
00:02:57	2	00:02:58	3	00:02:51	2	00:02:14	1	00:02:48	2	00:02:40	2	00:03:04	3
00:02:46	2	00:02:52	2	00:02:40	2	00:02:12	1	00:02:33	2	00:02:41	2	00:03:03	3
00:02:56	3	00:03:09	3	00:02:16	1	00:02:02	1	00:02:58	3	00:02:56	2	00:03:00	3
00:02:28	1	00:02:50	3	00:03:05	3	00:02:11	1	00:02:28	2	00:02:54	2		
00:02:52	3	00:03:00	3	00:03:03	3	00:02:19	1	00:02:29	2	00:02:35	1		
00:02:19	1	00:02:09	1	00:02:15	1	00:02:12	1	00:02:55	2	00:02:30	2		
00:02:37	2	00:03:04	3	00:02:29	1	00:02:18	1	00:02:39	2	00:02:19	1		
00:02:30	1	00:02:45	2	00:02:37	2	00:02:05	1	00:02:45	2	00:02:55	3		
00:02:36	2	00:02:13	1	00:02:15	1	00:02:32	2	00:02:15	1	00:02:53	3		
00:02:24	1	00:03:00	3	00:02:19	1	00:02:36	2	00:02:23	1	00:02:32	2		
00:02:29	2	00:02:36	2	00:02:22	1	00:03:07	3	00:03:12	3	00:02:43	2		
00:03:04	3	00:02:17	1	00:02:39	2	00:03:06	3	00:02:49	3	00:02:49	2		
00:02:13	1	00:02:30	2	00:02:21	1	00:02:08	1	00:02:35	2	00:02:33	2		
00:02:09	1	00:02:12	1	00:02:17	1	00:02:13	1	00:02:49	2	00:02:14	1		
00:02:35	2	00:02:09	1	00:02:27	2	00:03:08	3	00:02:51	2	00:02:27	1		
00:03:06	3	00:02:27	1	00:02:06	1	00:03:06	3	00:02:11	1	00:02:56	3		
00:03:00	3	00:02:25	1	00:02:35	1	00:02:14	1	00:02:30	1	00:02:53	3		
00:03:00	3	00:02:57	2	00:02:10	1	00:02:19	1	00:02:50	3	00:02:44	2		
00:02:55	3	00:02:15	1	00:03:00	3	00:03:08	3	00:02:21	1	00:02:40	2		
00:02:16	1	00:02:25	2	00:02:40	2	00:02:26	1	00:02:42	2	00:02:23	1		
00:02:16	1	00:02:36	2	00:02:28	2	00:02:27	2	00:02:34	1	00:02:47	2		
00:02:37	2	00:02:41	2	00:02:33	2	00:03:00	3	00:02:52	3	00:02:48	2		
00:02:18	1	00:03:08	3	00:02:03	1	00:02:19	1	00:02:23	1	00:02:45	2		
00:02:16	1	00:02:26	1	00:02:21	1	00:02:21	1	00:02:27	1	00:02:28	1		
00:02:41	2	00:02:23	1	00:03:13	3	00:02:08	1	00:02:34	2	00:02:44	2		
00:02:17	1	00:02:59	3	00:02:08	1	00:02:16	1	00:02:51	3	00:02:54	3		
00:02:54	3	00:02:11	1	00:02:42	2	00:02:00	1	00:02:45	2	00:03:04	3		
00:02:25	1	00:02:30	2	00:02:05	1	00:03:06	3	00:02:23	1	00:03:03	3		
00:02:38	2	00:02:16	1	00:02:25	1	00:02:54	2	00:02:22	1	00:02:54	2		
00:02:31	2	00:03:03	3	00:02:22	1	00:02:00	1	00:02:43	2	00:03:05	3		
00:02:30	1	00:02:50	2	00:03:17	3	00:02:14	1	00:02:36	2	00:02:21	1		

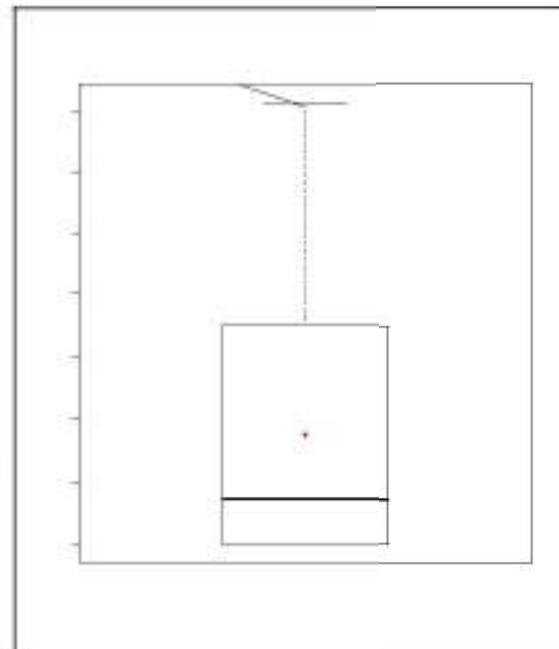
Tempo médio 00:02:36  
Desvio padrão do tempo 00:00:19  
Quantidade média 2  
Desvio padrão da QTD 1



Inserção de MP da ponta da asa:

Tempo	QTD.	00:01:05	260	00:01:04	368
00:01:18	204	00:01:08	315	00:01:05	234
00:01:19	245	00:01:09	337	00:01:05	247
00:01:23	245	00:01:07	373	00:01:09	360
00:01:28	229	00:01:07	373	00:01:06	528
00:01:20	224	00:01:05	351	00:01:05	273
00:01:22	212	00:01:07	335	00:01:06	407
00:01:21	154	00:01:06	242	00:01:07	278
00:01:27	251	00:01:03	441	00:01:03	378
00:01:27	238	00:01:04	256	00:01:04	400
00:01:21	251	00:01:08	298	00:01:05	286
00:01:20	228	00:01:05	442	00:01:07	364
00:01:11	142	00:01:06	627	00:01:06	264
00:01:08	230	00:01:01	671	00:01:08	247
00:01:06	231	00:01:02	713	00:01:03	294
00:01:10	196	00:01:05	364	00:01:06	429
00:01:11	213	00:01:03	378	00:01:08	332
00:01:12	240	00:01:05	455	00:01:04	336
00:01:06	209	00:01:07	479	00:01:05	429
00:01:08	264	00:01:06	440	00:01:06	308
00:01:11	232	00:01:04	416	00:01:01	610
00:01:07	287	00:01:02	465	00:01:03	357
00:01:04	272	00:01:03	609	00:01:04	448
00:01:06	363	00:01:04	464	00:01:06	396
00:01:05	442	00:01:06	385	00:01:02	403
00:01:08	349	00:01:07	354	00:01:04	416
00:01:09	406	00:01:06	484	00:01:03	504
00:01:10	273	00:01:07	325	00:01:08	374
00:01:05	364	00:01:05	403	00:01:03	357
00:01:05	429	00:01:01	549	00:01:05	390
00:01:07	297	00:01:04	320		
00:01:09	360	00:01:03	441		
00:01:05	247	00:01:05	260		

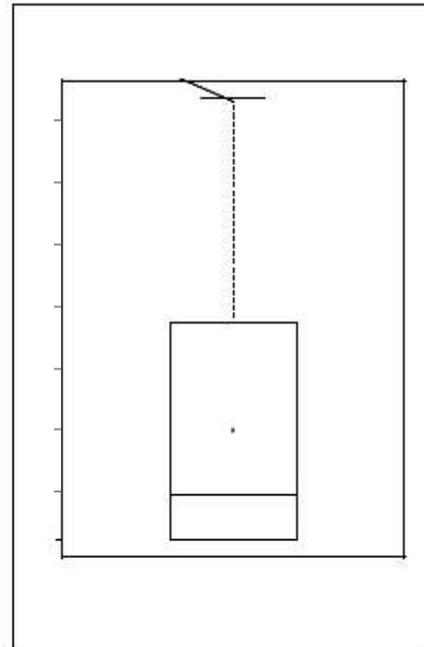
Tempo médio 00:01:08  
Desvio padrão do tempo 00:00:06  
Quantidade média 349  
Desvio padrão da QTD 113



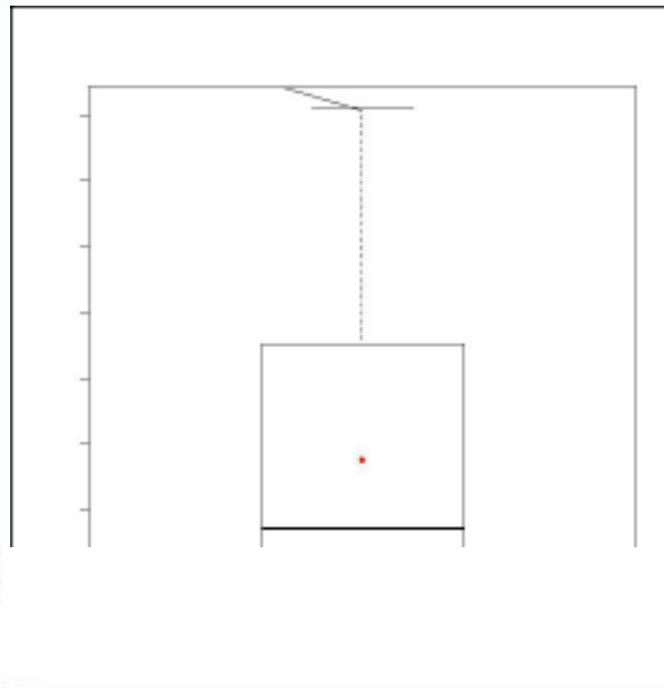
Armazenagem da ponta da asa:

Tempo médio 00:01:16  
Desvio padrão do tempo 00:00:08  
Quantidade média 337  
Desvio padrão da QTD 37

Tempo	QTD	00:01:18	339	00:01:16	345	00:01:21	351
00:01:09	298	00:01:27	373	00:01:22	375		
00:01:08	302	00:01:03	283	00:01:09	301		
00:01:14	321	00:01:27	384	00:01:16	333		
00:01:24	387	00:01:20	365	00:01:26	377		
00:01:20	353	00:01:17	334	00:01:17	351		
00:01:03	278	00:01:14	338	00:01:23	355		
00:01:13	322	00:01:09	318	00:01:06	283		
00:01:15	324	00:01:19	351	00:01:04	282		
00:01:09	311	00:01:22	362	00:01:07	291		
00:01:10	321	00:01:04	280	00:01:05	287		
00:01:05	285	00:01:27	392	00:01:26	395		
00:01:20	345	00:01:27	398	00:01:18	361		
00:01:03	256	00:01:09	309	00:01:19	348		
00:01:09	304	00:01:17	346	00:01:07	297		
00:01:24	368	00:01:07	295	00:01:04	287		
00:01:28	405	00:01:10	309	00:01:04	276		
00:01:20	341	00:01:12	317	00:01:25	378		
00:01:06	291	00:01:15	335	00:01:13	319		
00:01:14	329	00:01:12	323	00:01:23	376		
00:01:03	280	00:01:03	267	00:01:15	328		
00:01:17	341	00:01:07	309	00:01:27	381		
00:01:28	401	00:01:20	358	00:01:23	371		
00:01:17	357	00:01:21	358	00:01:05	289		
00:01:23	381	00:01:21	369	00:01:28	381		
00:01:10	305	00:01:25	371	00:01:19	360		
00:01:23	359	00:01:28	394	00:01:18	347		
00:01:15	343	00:01:24	376	00:01:17	332		



Embalagem primária da ponta da asa:



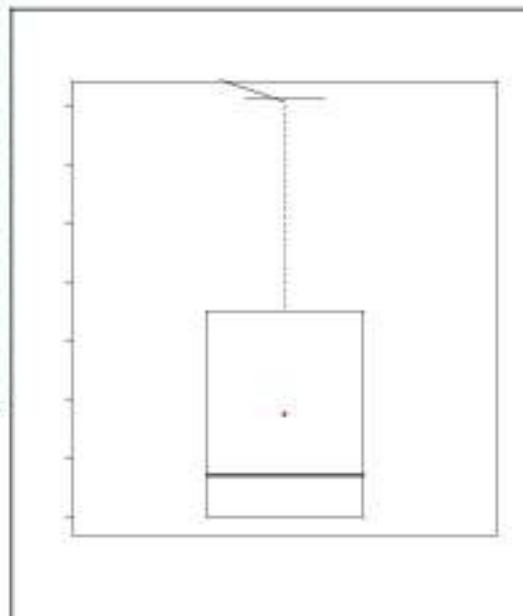
Tempo médio 00:01:55  
 Desvio padrão do tempo 00:00:31  
 Quantidade média 4  
 Desvio padrão da QTD 2

Tempo	QNT	00:02:23	5	00:01:24	2	00:01:31	3
00:01:29	3	00:01:43	4	00:01:58	4		
00:02:38	6	00:01:36	3	00:01:35	4		
00:01:33	3	00:02:34	6	00:02:41	6		
00:01:52	4	00:02:18	5	00:01:15	1		
00:02:26	5	00:01:32	3	00:02:33	6		
00:01:49	4	00:02:45	6	00:02:50	7		
00:01:58	4	00:01:50	4	00:02:37	6		
00:02:30	6	00:01:35	4	00:01:28	3		
00:01:25	2	00:01:35	3	00:02:49	7		
00:01:32	3	00:01:36	3	00:02:50	7		
00:01:48	4	00:02:25	5	00:01:20	1		
00:01:55	4	00:02:46	6	00:02:43	6		
00:01:26	3	00:01:12	1	00:02:37	6		
00:01:18	1	00:01:56	4	00:01:42	4		
00:01:23	3	00:01:20	2	00:01:23	2		
00:02:47	6	00:01:42	4	00:01:39	3		
00:02:30	4	00:02:18	5	00:01:16	1		
00:01:30	3	00:02:18	5	00:02:45	7		
00:02:13	5	00:01:30	3	00:01:19	1		
00:01:37	3	00:01:29	4	00:01:24	3		
00:01:42	4	00:02:00	5	00:02:20	5		
00:01:29	4	00:02:21	5	00:02:33	6		
00:01:38	4	00:01:25	3	00:02:41	6		
00:02:49	7	00:01:27	2	00:01:39	4		
00:02:25	5	00:02:20	5	00:02:30	6		
00:02:16	5	00:02:13	5	00:01:39	3		
00:01:12	1	00:01:15	1	00:01:30	3		

Embalagem secundária da ponta da asa:

Tempo	QTD	00:03:15	1	00:03:17	1	00:02:45	1
00:02:45	1	00:02:39	1	00:03:13	1	00:03:23	2
00:03:24	2	00:02:37	1	00:03:21	2	00:02:45	1
00:02:40	1	00:03:20	2	00:02:33	1	00:02:56	1
00:03:15	1	00:03:25	2	00:02:28	1	00:02:52	1
00:02:28	1	00:03:20	2	00:03:19	2	00:03:18	2
00:03:21	2	00:03:03	1	00:03:10	1	00:03:11	1
00:03:03	1	00:02:44	1	00:03:18	2	00:03:21	2
00:03:03	1	00:02:30	1	00:03:18	2	00:03:08	1
00:02:30	1	00:03:06	1	00:02:26	1	00:02:37	1
00:03:03	1	00:02:39	1	00:02:33	1	00:03:24	2
00:03:21	2	00:03:25	2	00:02:38	1	00:03:09	1
00:03:16	1	00:03:05	1	00:03:15	1	00:02:55	1
00:02:31	1	00:03:00	1	00:03:17	1	00:02:38	1
00:03:05	1	00:02:37	1	00:03:13	1	00:02:30	1
00:03:09	1	00:02:28	1	00:02:41	1	00:02:46	1
00:02:44	1	00:03:14	1	00:02:39	1	00:03:12	1
00:03:03	1	00:03:18	2	00:02:35	1	00:02:42	1
00:03:18	2	00:03:05	1	00:03:18	2	00:02:52	1
00:02:42	1	00:03:11	1	00:03:18	2	00:03:25	2
00:03:13	1	00:02:31	1	00:03:21	2	00:03:10	1
00:02:27	1	00:02:43	1	00:03:09	1		
00:03:03	1	00:02:44	1	00:03:06	1		
00:02:39	1	00:03:24	2	00:03:00	1		
00:03:04	1	00:03:10	1	00:03:21	2		
00:03:09	1	00:02:37	1	00:03:11	1		
00:03:03	1	00:02:37	1	00:02:39	1		
00:03:09	1	00:02:32	1	00:02:35	1		

Tempo médio 00:02:59  
 Desvio padrão do tempo 00:00:19  
 Quantidade média 1  
 Desvio padrão da QTD 0,41



**APÊNDICE II** – Valores dos Testes Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov para as distribuições estatísticas dos dados Taxa considerados no estudo empírico de um processo produtivo real MTS.

Referente aos dados do meio da asa:

<b>Anderson-Darling Test with Model 1 - Inverted Weibull</b>					
Sample size	202				
Test statistic	0.48584				
Note:	The following critical values are exact.				
Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)				
	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010
202	0.467	0.628	0.746	0.865	1.024
Reject?	Yes	No			

Teste de Anderson-Darling para a entrada de MP.

<b>Kolmogorov-Smirnov Test with Model 1 - Inverted Weibull</b>				
Sample size	202			
Normal test statistic	0.05186			
Modified test statistic	0.73705			
Note:	The following critical values are exact.			
Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)			
	0.100	0.050	0.025	0.010
50	0.790	0.856	0.922	0.988
infinity	0.803	0.874	0.939	1.007
Reject?	No			

Teste de Kolmogorov-Smirnov para a entrada de MP.

<b>Anderson-Darling Test with Model 1 - Pearson Type V</b>						
Sample size	202					
Test statistic	0.47735					
Note:	The following critical values are approximate.					
Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)					
	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
202	0.470	0.632	0.753	0.874	1.036	1.161
Reject?	Yes	No				

Teste de Anderson-Darling para a armazenagem de MP.

Kolmogorov-Smirnov Test with Model 1 - Pearson Type V					
Sample size	202				
Normal test statistic	0.04652				
Modified test statistic	0.66123				
Note:	No critical values exist for this special case. The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.				
	Critical Values for Level of Significance (alpha)				
Sample Size	0.150	0.100	0.050	0.025	0.010
202	1.128	1.213	1.346	1.467	1.613
Reject?	No				

Teste de Kolmogorov-Smirnov para a armazenagem de MP.

Anderson-Darling Test with Model 1 - Inverted Weibull(E)						
Sample size	203					
Test statistic	0.62072					
Note:	No critical values exist for this special case. The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.					
	Critical Values for Level of Significance (alpha)					
Sample Size	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
203	1.248	1.933	2.492	3.070	3.857	4.500
Reject?	No					

Teste de Anderson-Darling para a embalagem primária.

Kolmogorov-Smirnov Test with Model 1 - Inverted Weibull(E)					
Sample size	203				
Normal test statistic	0.04623				
Modified test statistic	0.65868				
Note:	No critical values exist for this special case. The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.				
	Critical Values for Level of Significance (alpha)				
Sample Size	0.150	0.100	0.050	0.025	0.010
203	1.128	1.213	1.346	1.467	1.614
Reject?	No				

Teste de Kolmogorov-Smirnov para a embalagem primária.

**Anderson-Darling Test with Model 1 - Johnson SB**

Sample size 202  
 Test statistic 3.52958

Note: No critical values exist for this special case.  
 The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)					
	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
202	1.248	1.933	2.492	3.070	3.857	4.500
Reject?	Yes				No	

Teste de Anderson-Darling para a embalagem secundária.

**Kolmogorov-Smirnov Test with Model 1 - Johnson SB**

Sample size 202  
 Normal test statistic 0.12757  
 Modified test statistic 1.81304

Note: No critical values exist for this special case.  
 The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)				
	0.150	0.100	0.050	0.025	0.010
202	1.128	1.213	1.346	1.467	1.613
Reject?	Yes				

Teste de Kolmogorov-Smirnov para a embalagem secundária.

Referente aos dados da ponta da asa:

**Anderson-Darling Test with Model 1 - Inverse Gaussian(E)**

Sample size 95  
 Test statistic 0.35008

Note: No critical values exist for this special case.  
 The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)					
	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
95	1.248	1.933	2.492	3.070	3.857	4.500
Reject?	No					

Teste de Anderson-Darling para a entrada de MP.

**Kolmogorov-Smirnov Test with Model 1 - Inverse Gaussian(E)**

Sample size 95  
Normal test statistic 0.05449  
Modified test statistic 0.53112

Note: No critical values exist for this special case.  
The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)				
	0.150	0.100	0.050	0.025	0.010
95	1.123	1.208	1.340	1.460	1.606
Reject?	No				

Teste de Kolmogorov-Smirnov para a entrada de MP.

**Anderson-Darling Test with Model 1 - Weibull(E)**

Sample size 99  
Test statistic 0.67831

Note: No critical values exist for this special case.  
The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)					
	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
99	1.248	1.933	2.492	3.070	3.857	4.500
Reject?	No					

Teste de Anderson-Darling para a armazenagem de MP.

**Kolmogorov-Smirnov Test with Model 1 - Weibull(E)**

Sample size 99  
Normal test statistic 0.07152  
Modified test statistic 0.71165

Note: No critical values exist for this special case.  
The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)				
	0.150	0.100	0.050	0.025	0.010
99	1.123	1.208	1.340	1.461	1.607
Reject?	No				

Teste de Kolmogorov-Smirnov para a armazenagem de MP.

**Anderson-Darling Test with Model 1 - Pearson Type VI(E)**

Sample size 99  
 Test statistic 1.30717

Note: No critical values exist for this special case.  
 The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)					
	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
99	1.248	1.933	2.492	3.070	3.857	4.500
Reject?	Yes		No			

Teste de Anderson-Darling para a embalagem primária.

**Kolmogorov-Smirnov Test with Model 1 - Pearson Type VI(E)**

Sample size 99  
 Normal test statistic 0.10322  
 Modified test statistic 1.02705

Note: No critical values exist for this special case.  
 The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)				
	0.150	0.100	0.050	0.025	0.010
99	1.123	1.208	1.340	1.461	1.607
Reject?	No				

Teste de Kolmogorov-Smirnov para a embalagem primária.

**Anderson-Darling Test with Model 1 - Johnson SB**

Sample size 119  
 Test statistic 2.04970

Note: No critical values exist for this special case.  
 The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)					
	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
119	1.248	1.933	2.492	3.070	3.857	4.500
Reject?	Yes		No			

Teste de Anderson-Darling para a embalagem secundária.

**Kolmogorov-Smirnov Test with Model 1 - Johnson SB**

Sample size                    119  
Normal test statistic        0.12210  
Modified test statistic      1.33194

Note:                    No critical values exist for this special case.  
                              The following critical values are for the case where  
                              all parameters are known, and are conservative.

Sample Size	Critical Values for Level of Significance (alpha)				
	0.150	0.100	0.050	0.025	0.010
119	1.125	1.210	1.342	1.463	1.609
Reject?	Yes		No		

Teste de Kolmogorov-Smirnov para a embalagem secundária.

**APÊNDICE III** – Dados da distribuição empírica adotada no lugar da distribuição Johnson SB para a programação da embalagem secundária do meio.

Porcentagem	Valor (x)
0.000	0.938889
0.995	0.944444
0.498	0.950000
0.995	0.955556
0.995	0.961111
0.995	0.966667
0.995	0.972222
1.493	0.977778
0.995	0.988889
0.498	0.994444
3.483	1.000000
1.990	1.016667
1.990	1.022222
1.493	1.027778
2.488	1.033333
0.995	1.038889
1.493	1.044444
0.995	1.050000
0.498	1.066667
0.498	1.072222
0.498	1.094444
0.498	1.208333
1.990	1.225000
0.995	1.233333
1.493	1.241667
1.493	1.250000
0.498	1.258333
1.493	1.266667
1.493	1.275000
0.498	1.283333
0.995	1.291667
2.488	1.300000
2.488	1.308333
0.498	1.316667
0.995	1.325000
1.990	1.333333
1.493	1.341667
0.995	1.350000
0.995	1.358333
0.995	1.366667
1.990	1.375000

0.498	1.383333
0.498	1.391667
0.995	1.400000
0.995	1.408333
0.498	1.416667
0.995	1.425000
0.498	1.433333
1.493	1.450000
0.498	1.458333
0.498	1.466667
0.995	1.475000
0.995	2.000000
0.498	2.033333
0.498	2.050000
0.995	2.083333
0.498	2.100000
1.493	2.133333
1.493	2.150000
0.995	2.166667
1.493	2.183333
1.493	2.200000
1.990	2.216667
1.990	2.233333
1.990	2.250000
2.985	2.266667
1.493	2.283333
0.995	2.300000
2.985	2.316667
2.488	2.350000
1.493	2.366667
2.488	2.383333
0.498	2.400000
1.493	2.416667
0.995	2.433333
1.493	2.450000
0.995	2.466667
0.498	2.483333
1.493	2.500000
0.498	2.566667
0.995	2.583333