

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

**FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**O USO DO CONCEITO FÁBRICA DIGITAL E MANUFATURA ENXUTA
PARA ANALISAR ARRANJOS FÍSICOS DE PRODUÇÃO**

CLÁUDIO LOPES DA SILVA

ORIENTADOR: PROF. DR.-ING. KLAUS SCHÜTZER

Santa Bárbara d'Oeste, SP

2013

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**O USO DO CONCEITO FÁBRICA DIGITAL E MANUFATURA ENXUTA
PARA ANALISAR ARRANJOS FÍSICOS DE PRODUÇÃO**

CLÁUDIO LOPES DA SILVA

ORIENTADOR: PROF. DR.-ING. KLAUS SCHÜTZER

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, da Faculdade de
Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, da
Universidade Metodista de Piracicaba -
UNIMEP

Santa Bárbara d'Oeste, SP

2013

O USO DO CONCEITO FÁBRICA DIGITAL E MANUFATURA ENXUTA PARA ANALISAR ARRANJOS FÍSICOS DE PRODUÇÃO

CLÁUDIO LOPES DA SILVA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 31 de janeiro de 2013, pela
Banca Examinadora constituída pelos Professores:


Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima - UNIMEP
Presidente


Profa. Dra. Maria Rita Pontes Assumpção Alves
UNIMEP


Prof. Dr. Luiz Eduardo Galvão Martins
UNIFESP

Agradecimentos

Ao Prof. Dr.-Ing. Klaus Schützer pela orientação e incentivo para a conclusão deste trabalho.

Ao CNPQ e CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A empresa Siemens PLM *Software* do Brasil Ltda., em especial ao Sr. Rogério L. de Albuquerque, pelo suporte fornecido na implantação do Sistema Tecnomatix na UNIMEP e pelos cursos dos *softwares Process Designer, Process Simulate e Plant Simulation*.

A empresa Volkswagen do Brasil Ltda., em especial ao Sr. Olavo C. Vidal e Sra. Sandra C. Zimmermann, por me concederem tempo para discussões sobre o avanço do conceito Fábrica Digital no Brasil.

A toda equipe do SCPM, por proporcionar um agradável ambiente de trabalho e compartilhamento de conhecimento acadêmico.

A UNIMEP, por ter me recebido como pesquisador.

A minha Família, por toda colaboração nessa fase da minha vida.

“Este livro da lei (a bíblia) não se deve afastar da tua boca e tu o tens de ler em voz baixa dia e noite, para cuidar em fazer segundo tudo o que está escrito nele; pois então farás bem sucedido o teu caminho e então agirás sabiamente” (Bíblia - Trad. do novo mundo das escrit. sagradas, Josué 1:8)

Sumário

Lista de Figuras	VI
Lista de Tabelas.....	IX
Lista de Siglas	X
Resumo	XI
Abstract	XII
1 Introdução e motivação	1
1.1 Importância desse trabalho.....	4
1.2 Estrutura do Trabalho	6
2 Fábrica Digital e Manufatura Enxuta	7
2.1 Fábrica Digital – O Estado da Arte	7
2.1.1 Ferramentas da Fábrica Digital.....	9
2.1.2 Pesquisas sobre Fábrica Digital.....	12
2.1.3 Pré-requisitos para o uso da Fábrica Digital	14
2.1.4 Fornecedores da Tecnologia Fábrica Digital.....	16
2.1.5 Usuários da Fábrica Digital	18
2.1.6 Integração na Fábrica Digital	19
2.1.7 A utilização do XML na Fábrica Digital.....	21
2.1.8 Projeto de Arranjo Físico na Fábrica Digital.....	22
2.2 Manufatura Enxuta	26
2.2.1 Benefícios da Manufatura Enxuta	27
2.2.2 Definições	28
2.2.3 Desperdícios no Sistema de Manufatura	29
2.2.4 Princípios da Manufatura Enxuta	31
2.2.5 Técnicas da Manufatura Enxuta	33
3 Objetivos e Metodologia	42
3.1 Método de Pesquisa	42
3.1.1 Atividades de Preparação	43

3.1.2	Atividades de execução	43
4	Desenvolvimento do método proposto para a análise de Arranjos Físicos para Produção	45
4.1	Definição dos principais elementos do Arranjo Físico	47
4.1.1	Produto – definição para o Arranjo Físico	48
4.1.2	Processos - definição para o Arranjo Físico.....	50
4.1.3	Recursos - definição para o Arranjo Físico	53
4.1.4	Recursos – tipos de configurações para o Arranjo Físico	56
4.1.5	Recursos - propostas de configurações para o Arranjo Físico.....	57
4.2	Definição de metas para o Arranjo Físico	59
4.3	Escolha do Sistema Fábrica Digital	60
4.4	Levantamento de dados para o Arranjo Físico	61
4.4.1	Arranjo Físico modelo 1 - tempo das operações.....	63
4.4.2	Arranjo Físico modelo 2 - tempo das operações.....	64
4.5	Construção do modelo digital do processo.....	64
4.5.1	Fluxo de atividades p. construção do modelo digital do processo	67
4.6	Construção do modelo digital para simulação de operações	71
4.6.1	Ferramentas para simulação humana.....	72
4.6.2	Ferramentas para simulação robótica.....	73
4.6.3	Ferramentas para simulação de montagem.....	73
4.6.4	Ferramentas para comissionamento virtual	73
4.7	Construção do modelo digital para simulação do Arranjo Físico	74
4.7.1	Ferramentas do <i>Plant Simulation</i>	76
4.7.2	Atividades para construção do modelo de simulação	76
5	Simulação e análise dos resultados	82
5.5.1	Mapeamento do Fluxo de valor para o Arranjo Físico modelo 1..	91
5.5.2	Mapeamento do Fluxo de valor para o Arranjo Físico modelo 2..	95
6	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	104
7	Referências Bibliográficas	106

Lista de Figuras

Figura 1.1: Manufatura Convencional x Conceito Fábrica Digital (adaptado de [5]).....	3
Figura 1.2: Fábrica Digital - inovação para o planejamento da produção [8].....	4
Figura 2.1: Ciclo da Manufatura Digital (adaptado de [38]).....	9
Figura 2.2: Estrutura do Sistema Fábrica Digital (adaptado de [25]).....	11
Figura 2.3: Pré-requisitos da Fábrica Digital (adaptado de [23]).....	14
Figura 2.4: Campos de dificuldades da Fábrica Digital (adaptado de [26]).....	15
Figura 2.5: Software do Tecnomatix – Process Designer [13].	17
Figura 2.6: Sistema Delmia - módulo planejamento de montagem [14].	18
Figura 2.7: Integração micro na Fábrica Digital (adaptado de [20])	20
Figura 2.8: Integração macro na Fábrica Digital: CAD, DF e ERP (adaptado de [27])....	21
Figura 2.9: O XML para conexão de dados no sistema Tecnomatix.	22
Figura 2.10: Arranjo Físico na Fábrica Digital [5].	23
Figura 2.11: Planejamento de Processo Inicial (adaptado de [29]).	24
Figura 2.12: Classificação dos objetos na Fábrica Digital (adaptado de [25]).	24
Figura 2.13: Análise de Arranjo Físico Digital (adaptado de [29]).	25
Figura 2.14: cartão kanban (adaptado de [3]).....	34
Figura 2.15: Linha de montagem utilizando o Just-in-time (adaptado de [3]).....	35
Figura 2.16: Takt time x Tempo de ciclo das estações.	37
Figura 4.1: Etapas para análise de Arranjos Físicos de Produção (adaptado de [71])....	46
Figura 4.2: Cilindro Pneumático ISO 6431 (Fonte: PTW)	49
Figura 4.3: Montagem do conjunto êmbolo	51
Figura 4.4: Montagem do conjunto corpo	52
Figura 4.5: Montagem final do cilindro.....	52
Figura 4.6: Teste do cilindro	52
Figura 4.7: Empacotamento do cilindro	53
Figura 4.8: Meios para montagem do conjunto êmbolo	54
Figura 4.9: Meios para montagem do conjunto corpo.....	54
Figura 4.10: Meios para montagem final do cilindro	55
Figura 4.11: Meios para teste do cilindro.....	55
Figura 4.12: Meios para empacotamento do cilindro	56

Figura 4.13: Arranjo Físico modelo 1.....	57
Figura 4.14: Arranjo Físico modelo 2.....	58
Figura 4.15: Visualização gráfica do Process Designer.....	65
Figura 4.16: Process Designer – importação de modelos geométricos CAD.....	66
Figura 4.17: Process Designer – bibliotecas de objetos.	66
Figura 4.18: Process Designer - Estrutura do produto.....	67
Figura 4.19: Process Designer - Estrutura do processo.....	68
Figura 4.20: Process Designer - Estrutura de recursos.	68
Figura 4.21: Process Designer – Gráfico PERT.	69
Figura 4.22: Process Designer – Diagrama de Gannt.	70
Figura 4.23: Process Designer – Estruturas do modelo de processos.....	71
Figura 4.24: Visualização gráfica no Process Simulate.	72
Figura 4.25: Process Simulate - Áreas de simulação [13].....	72
Figura 4.26: Comissionamento Virtual [13].....	74
Figura 4.27: Visualização gráfica do Plant Simulation.	75
Figura 4.28: Plant Simulation – ferramentas para construção de modelos digitais	76
Figura 4.29: Fluxograma – construção do modelo de simulação do Arranjo Físico.	77
Figura 4.30: Plant Simulation – criação de objetos para o modelo.	78
Figura 4.31: Plant Simulation – organização de objetos do modelo 1.....	78
Figura 4.32: Plant Simulation – organização de objetos do modelo 2.....	78
Figura 4.33: Plant Simulation – configuração de eventos discretos.	79
Figura 4.34: Plant Simulation – recurso para análise estatística de objetos.....	80
Figura 4.35: Plant Simulation – customização do modelo 1.....	80
Figura 4.36: Plant Simulation – customização do modelo 2.....	81
Figura 4.37: Plant Simulation – criação de gráficos.....	81
Figura 4.38: Classificação das operações que agregam ou não agregam o valor.	82
Figura 5.1: Process Designer - Diagrama de Gannt para os processos do modelo 1.	84
Figura 5.2: Process Designer - Diagrama de Gannt para os processo do modelo 2.....	85
Figura 5.3: Process Simulate - cenário para simulação de operações.....	86
Figura 5.4: Process Simulate – visão humanoide na simulação de operações.....	87
Figura 5.5: Takt time x Tempo de ciclo das estações - modelo 1.	89

Figura 5.6: Takt time x Tempo de ciclo das estações – modelo 2.....	90
Figura 5.7: Valor agregado ao produto no processo A – modelo 1.....	92
Figura 5.8: Valor agregado ao produto no processo B – modelo 1.....	92
Figura 5.9: Valor agregado ao produto no processo C – modelo 1.....	93
Figura 5.10: Valor agregado ao produto no processo D – modelo 1.....	94
Figura 5.11: Valor agregado ao produto no processo E – modelo 1.....	95
Figura 5.12: Valor agregado ao produto – processo A – modelo 2.....	96
Figura 5.13: Valor agregado ao produto no processo B – modelo 2.....	96
Figura 5.14: Valor agregado ao produto – processo C – modelo 2.....	97
Figura 5.15: Quantidade de produtos armazenados - modelo 1.....	98
Figura 5.16: Quantidade de produtos armazenados – modelo 2.....	99
Figura 5.17: Dados estatísticos do fluxo de materiais - modelo 1.....	100
Figura 5.18: Dados estatísticos do fluxo de materiais - modelo 2.....	101

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Áreas envolvidas no planejamento do Arranjo Físico.....	48
Tabela 4.2: Recursos e operações para o Arranjo Físico modelo 1.....	58
Tabela 4.3: Recursos e operações para o Arranjo Físico modelo 2.....	59
Tabela 4.4: Tempo – processos do Arranjo Físico – modelo 1	63
Tabela 4.5: Tempo – processos do Arranjo Físico – modelo 2	64
Tabela 5.1: Princípio e técnicas da Manufatura Enxuta	83
Tabela 5.2: Comparação entre os modelos de Arranjos Físicos propostos	101

Lista de Siglas

AGV	Automated Guided Vehicle
AR	Augmented Reality
CAD	Computer Aided Design
DES	Events Discret Simulation
DF	Digital Factory
DFA	Design for Assembly
DFM	Design for Manufacturing
eBOP	Eletronic Bill of Proces
EBOM	Engineering Bill of Materials
ES	Ergonomic Simulation
ERP	Enterprise Resource Planning
FMS	Flexible Manufacturing System
IHM	Interface Homem/Máquina
IPA	In Process Assembly
IT	Information Technology
MBOM	Manufacturing bill of Materials
MES	Manufacturing Execution System
MRPII	Manufacturing Resource Planning
OEM	Original Equipment Manufacturer
SCM	Supply Chain Management
VR	Virtual Reality
XML	Extensible Markup Language

Resumo

SILVA, Cláudio Lopes. O uso da fábrica digital e manufatura enxuta para analisar arranjos físicos de produção. 2013. 112 p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

A competitividade no setor industrial está impulsionando muitas empresas a buscarem alternativas, tais como, os conceitos Manufatura Enxuta e Fábrica Digital para reduzir o tempo de lançamento de seus produtos e melhorar o desempenho do Arranjo Físico. Visto que poucos artigos abordam a conexão entre estes dois conceitos, quando se trata do assunto planejamento do Arranjo Físico, esse trabalho de pesquisa tem por objetivo apresentar um método para analisar o desempenho de Arranjos Físicos, antes de sua implantação na produção, por meio da Fábrica Digital e princípios da Manufatura Enxuta. Com este objetivo como foco central, apresenta-se o estado da arte do conceito Fábrica Digital e uma abordagem sobre Manufatura Enxuta, com foco em Arranjo Físico para produção.

Palavras-chave: Fábrica Digital, Lean Manufacturing, Manufatura Enxuta, Arranjo Físico, Layout, Método para análise de Arranjo Físico.

Abstract

SILVA, Cláudio Lopes. The use of digital factory and lean manufacturing to analyze layout. 2013. 112 p. Master's degree Dissertation - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

The competitiveness in the industrial sector is propelling many companies to search for alternatives such as Lean Manufacturing and Digital Factory concepts to reduce the time to market of their products and to improve the performance of the production layout. Whereas few papers approach the connection between these two concepts when it comes to subject of the layout factory planning, this research work intends to present a method to analyze the performance of layout factory, prior to its implementation in the production, through Digital Factory and principles of Lean Manufacturing. Through this goal as a central focus is presented the state of the art of Digital Factory and an approach on the topic Lean Manufacturing focusing on the topic layout factory.

Keywords: Digital Factory, Lean Manufacturing, Layout Factory, Method to analyze Layout Factory.

1 Introdução e motivação

O atual ambiente industrial é caracterizado por constantes e dinâmicas mudanças, num cenário altamente competitivo. O crescimento da competição global impulsiona as empresas a adotar e desenvolver novas estratégias e métodos a fim de reduzir o tempo de lançamento de seus produtos e simultaneamente oferecer preços atrativos [1], [2]. Antes do lançamento do produto, é necessário fazer o planejamento do processo que inclui a etapa de planejamento do Arranjo Físico, uma difícil etapa que tem forte influência nas outras atividades que antecipam o lançamento do produto e posterior desempenho na fase de execução da produção [3]. Por isso o planejamento do Arranjo Físico precisa incluir uma análise de desempenho produtivo antes de sua implementação.

A etapa de analisar o Arranjo Físico é realizada com o objetivo de garantir que o projeto definido para a localização dos meios de produção, do fluxo de materiais e da sequência de operações apresente resultados satisfatórios após sua implantação. Para fazer o lançamento do produto com rapidez a análise do Arranjo Físico precisa iniciar na fase de desenvolvimento do produto, de forma sincronizada com o projeto do produto, ou seja, precisa ser executada sem a utilização de protótipos físicos dos produtos e equipamentos que serão utilizados na produção [4]. Com a intenção de alcançar estes resultados, esse trabalho propõe um método de analisar Arranjos Físicos utilizando dois componentes:

- primeiro componente - ferramentas de simulação digital que permitem o estudo tanto do Arranjo Físico, como do produto, dos meios de produção e das operações contidas neste;
- segundo componente - princípios que descrevam como são as características mais relevantes de um arranjo físico para um sistema de produção com produtividade, alto valor agregado ao produto e baixo desperdício nas operações.

O conceito Fábrica Digital contém as ferramentas necessárias para o primeiro componente. Este conceito é mais do que um conjunto de ferramentas de simulação, pois oferece métodos e ferramentas digitais que permitem fazer o planejamento do Arranjo Físico e demais definições necessárias para o ciclo de

desenvolvimento de produto e planejamento da manufatura de forma simultânea. Assim, com as ferramentas disponíveis na Fábrica Digital, os profissionais principalmente da área de planejamento da manufatura podem trabalhar de forma simultânea e sincronizada para a realização de suas respectivas atividades. Por exemplo, enquanto o profissional responsável por definir os meios para produção planeja a possível utilização de um equipamento de transformação para fabricar o produto, outro profissional pode utilizar os dados dimensionais previstos para estes meios de produção na atividade de projetar o Arranjo Físico.

As ferramentas da Fábrica Digital possibilitam a realização de testes virtuais com o produto e com outros meios de produção como operadores e robôs no ambiente virtual. Portanto antes da instalação real do Arranjo Físico a atividade de análise realizada com a Fábrica Digital contribui com a redução de tempo no ciclo de desenvolvimento do produto e melhorias no planejamento do processo de produção. Este conceito favorece a utilização de outros conceitos como a engenharia concorrente, aumenta consideravelmente os benefícios na fase de otimização da produção e reduz os erros provocados por tentativas de melhorias de produtividade [5]. Estes benefícios são consequências de atividades que já podem ser realizadas por meio de métodos digitais na fase de planejamento da manufatura.

A simulação de operações e o comissionamento virtual (c.v) são dois destes métodos digitais. O comissionamento é uma atividade voltada para instalações que utilizam a automação industrial na produção. Esta atividade tem como função fazer os ajustes do sistema que controla as partes robotizadas, planejadas para a linha de produção. A Fábrica Digital tem ferramentas para fazer o comissionamento virtual, ou seja, fazer os ajustes por meio de testes práticos dos programas criados utilizando somente as simulações computadorizadas e o IHM. (Interface Homem e Máquina), equipamento que faz a interação entre o humano e a máquina.

Este método digital tem a vantagem de não necessitar de recursos como os robôs ou outras instalações integradas aos robôs, antecipando em muito algumas atividades de planejamento e otimização de operações automatizadas. A Figura 1.1 mostra um gráfico que compara o ciclo de desenvolvimento de produto por meio do método convencional versus o método que utiliza o conceito Fábrica

Digital. Com métodos digitais para o planejamento da produção (simulações e comissionamento virtual) equivalentes aos métodos já conceituados para o desenvolvimento do produto, o conceito Fábrica Digital consome menos recursos e gera mais benefícios quando se considera todo o ciclo de desenvolvimento de produto.

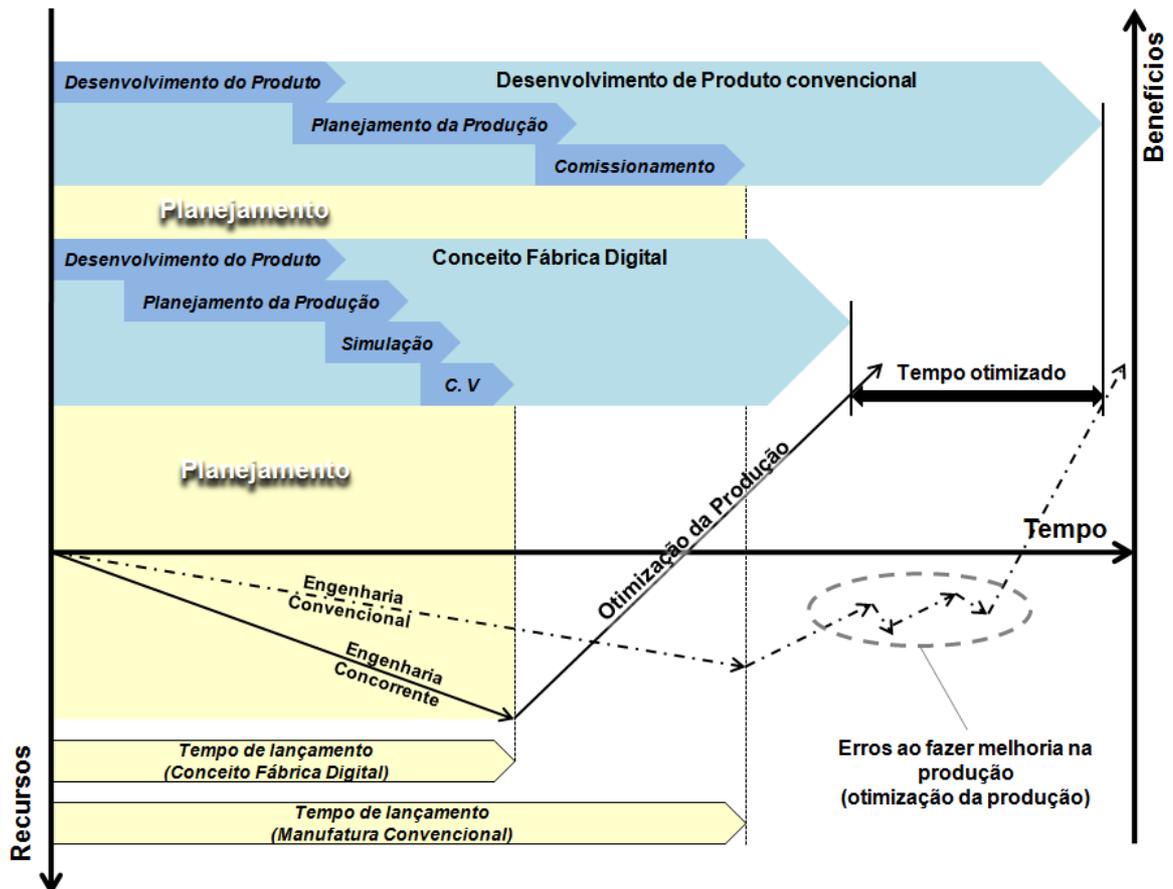


Figura 1.1: Manufatura Convencional x Conceito Fábrica Digital (adaptado de [5]).

Esse trabalho de pesquisa utiliza para o segundo componente necessário para analisar o Arranjo Físico, o conceito Manufatura Enxuta que discute princípios aplicáveis à maioria dos processos e objetivos estratégicos da produção e Arranjo Físico. A aplicação destes princípios no planejamento do Arranjo Físico traz benefícios como melhoria da produtividade, maior valor agregado aos produtos, redução de desperdícios e maior satisfação dos clientes [6].

1.1 Importância desse trabalho

Esse trabalho aborda o conceito Fábrica Digital aplicado à análise do Arranjo Físico para produção, uma atividade essencial para o planejamento de processos de fabricação. A revisão bibliográfica deste trabalho e o desenvolvimento do método de pesquisa apresentam uma visão geral sobre outras particularidades do conceito Fábrica Digital, com a intenção de trazer contribuições de forma generalizada sobre este conceito. Tais como, a capacidade da Fábrica Digital em dar apoio a função de negócio Planejamento da Produção em empresas manufatureiras e quais podem ser os métodos para se usar as ferramentas deste conceito na Engenharia de Produção.

Esse trabalho de pesquisa contribui com a discussão sobre métodos para analisar Arranjos Físicos de produção e o uso de ferramentas do conceito Fábrica Digital. O método utilizado neste trabalho de pesquisa para analisar Arranjos Físicos baseou-se num referencial bibliográfico de artigos indexados e livros que abordam o conceito Manufatura Enxuta.

Nos últimos anos, o conceito Fábrica Digital trouxe um avanço extraordinário para engenharia de produção que pode fazer as atividades de planejamento da produção por meio de métodos digitais. Como as atividades de desenvolvimento de produto e execução da produção são realizadas por meio de ferramentas computacionais, tais como o projeto auxiliado por computador (CAD - *Computer Aided Design*) e o planejamento de meios de produção para manufatura (MRP II - *Manufacturing Resource Planning*), a Fábrica Digital contribui para a conexão entre as três fases do ciclo de desenvolvimento de produto ilustrados na Figura 1.2 [7].

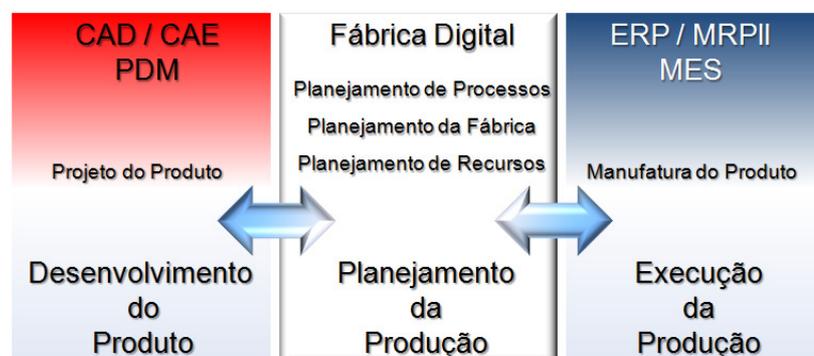


Figura 1.2: Fábrica Digital - inovação para o planejamento da produção [8].

O planejamento do Arranjo Físico é uma das atividades que pode ser realizada por meio da Fábrica Digital. Como o comportamento estático e dinâmico de um sistema de manufatura são influenciados pelo Arranjo Físico, a Fábrica Digital provê ferramentas para analisar este comportamento em um ambiente virtual em 3D [9]. Isto está motivando empresas como a Volkswagen, General Motors, Toyota e outras a investirem na criação de modelos para Fábrica Digital [7], [10], [11]. Os modelos digitais construídos por meio da Fábrica Digital representam todos os meios de produção de uma fábrica. A Figura 1.3 mostra que estes modelos são compartilhados por um servidor de banco de dados que tem o papel de armazenar e fazer a integração.

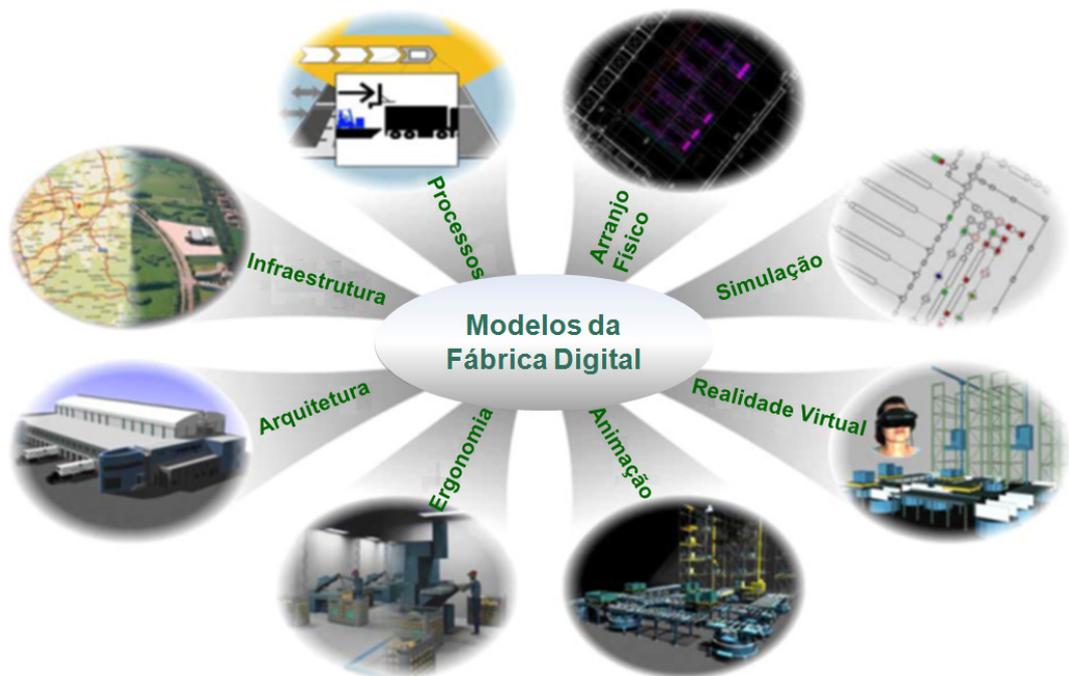


Figura 1.3: Tipos de modelos da Fábrica Digital (adaptado de [12]).

Os modelos construídos na Fábrica Digital são classificados em descritivos e experimentais dinâmicos. Por exemplo, os aspectos físicos da fábrica incluindo as especificações do produto, processos e logística são modelos descritivos e a simulação, análise de ergonomia entre outros, são exemplos de modelo experimental dinâmico [12]. A Fábrica Digital tem ferramentas para as atividades de construção de modelos que representam os meios de produção real e permitem a conexão entre estes modelos [13] [14], contribuindo para a integração de todos os grupos de usuários envolvidos no planejamento do Arranjo Físico e execução da produção [15].

1.2 Estrutura do Trabalho

Esse trabalho foi estruturado em sete capítulos, sendo estes:

Capítulo 1: Introdução.

Capítulo 2: Fábrica Digital e Manufatura Enxuta - Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o Estado da Arte do conceito Fábrica Digital, focalizando os principais tópicos deste conceito que contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho. Em seguida, apresenta uma revisão bibliográfica sobre o conceito Manufatura Enxuta.

Capítulo 3: Objetivos e Metodologia – Este capítulo apresenta os objetivos e o método utilizado para alcançar o propósito deste trabalho.

Capítulo 4: Desenvolvimento do método proposto para a análise de Arranjos Físicos de Produção – Este capítulo descreve execução do método proposto e como foi aplicado.

Capítulo 5: Simulação e análise dos resultados – Esse capítulo apresenta a etapa de simulação e análise dos resultados obtidos.

Capítulo 6: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros – Apresenta as conclusões obtidas por intermédio de pesquisas e método adotado para análise de Arranjos Físicos FMS, bem como sugestões para a continuidade deste trabalho.

Capítulo 7: Referências Bibliográficas – Lista de referências utilizadas no desenvolvimento desse trabalho.

2 Fábrica Digital e Manufatura Enxuta

O aumento da competição tem forçado as empresas de manufatura a buscar melhorias para seu processo de fabricação como uma alternativa para reduzir o custo operacional [16]. Os princípios e técnicas do conceito Manufatura Enxuta tem sido utilizado há quatro décadas para contribuir com estas melhorias [17]. Desde 1970, pesquisadores tem se engajado em pesquisar este conceito para melhorar o entendimento e a predição de resultados das transformações na indústria em função da Manufatura Enxuta. Enquanto isso, a indústria tem feito intensa busca por desenvolver métodos de operação e aplicação dos princípios deste conceito para melhorar tanto os processos, como o desempenho da empresa como um todo [17].

Este novo cenário industrial necessita de tecnologias que permite a integração dos modelos digitais [18] que podem representar o produto, o processo e a produção. Assim é possível adaptar o sistema de manufatura à demanda do mercado e acelerar o planejamento da fábrica que é seguido pela otimização da produção [18]. Neste cenário, a Fábrica Digital é vista como o instrumento do futuro [19], pois por meio desta tecnologia é possível fazer uma rede de trabalho utilizando os *softwares* que auxiliam na avaliação dos produtos, processos e meios de produção [15].

2.1 Fábrica Digital – O Estado da Arte

As empresas, em especial dos setores automobilístico e aeroespacial, estão investindo muito em soluções de tecnologia de informação. As empresas em geral estão se esforçando ainda mais para aumentar a utilização destas tecnologias no seu sistema de manufatura. Entre as atuais tecnologias de informação, a Fábrica Digital é destaque, pois traz ferramentas para integração e simulação que possibilita a reconfiguração e otimização dos sistemas produtivos [2].

A intensa utilização da tecnologia CAD na área de desenvolvimento de produto trouxe a seguinte situação para as empresas: muitas atividades e decisões que antes eram feitas por meio de modelos ou protótipos, hoje são complementadas ou substituídas totalmente por modelos digitais e isto tem um impacto positivo no desempenho da fábrica [20]. Portanto a abordagem sobre o conceito Fábrica Digital não é opcional, mas necessário [21].

O termo Fábrica Digital, está sendo muito utilizado na indústria como palavra chave para apontar várias soluções em campos relacionados à fábrica e a manufatura, mas com diferentes significados e interpretações [22], isto gera conflito de informações. Por isso a literatura acadêmica apresenta a definição clara deste termo.

A Fábrica Digital significa o modelamento de uma fábrica com o uso de uma rede de *softwares* que contempla vários modelos, métodos e ferramentas digitais, que inclui a simulação e visualização 3D de atividades como: planejamento de processos de fabricação e montagem [23], [24], planejamento e otimização da produção [5], [20], [25], [26], [27]; projeto do arranjo físico [22], [28], [29], [30] análise da ergonomia [31], [32], [33] e robotização de estações de trabalho [34], [8], [35], como também é utilizada para pesquisa e desenvolvimento [26]. E todos os modelos digitais construídos são integrados por um servidor de banco de dados [15], [30], [36].

Os principais focos da Fábrica Digital para o ciclo de desenvolvimento do produto podem ser classificados em três categorias: redução de tempo, aumento da qualidade e redução de custos. Para conseguir isto é necessário melhorar o grau de maturidade na fase de planejamento da Produção [15], ou seja, conseguir mais precisão dos dados gerados nas atividades de planejamento mesmo antes da implantação dos meios de produção. Para auxiliar neste aspecto a Fábrica Digital auxilia na realização dos seguintes métodos avançados:

- realização das fases de planejamento e desenvolvimento do produto de forma simultânea [5];
- tomada rápida de decisões sobre investimento, baseando-se em dados seguros do planejamento [15];
- melhoria na transparência e visualização dos processos [19], [15];
- redução do custo de implementação de um produto, por meio da redução de experimentos reais [21], [15].

Portanto a Fábrica Digital auxilia o planejamento da produção em garantir uma boa eficiência na implementação e fabricação de um novo produto, fazendo isto de forma antecipada e com informações seguras [20].

2.1.1 Ferramentas da Fábrica Digital

As ferramentas presentes na Fábrica Digital são úteis para a simulação de muitas atividades do planejamento da produção. No entanto é necessário construir os modelos digitais com ferramentas de simulação para toda a cadeia de processos, desde o desenvolvimento de um novo produto até o planejamento dos meios de produção e otimização da produção [15] [36] [37].

O conceito Fábrica Digital intensifica a comunicação entre os departamentos responsáveis pelo projeto do produto e os departamentos responsáveis pelo planejamento da produção. Os colaboradores responsáveis pelo planejamento de processo, planejamento de meios de produção e execução da fábrica, necessitam trocar informações durante todo o ciclo da manufatura [18], conforme ilustrado na Figura 2.1.

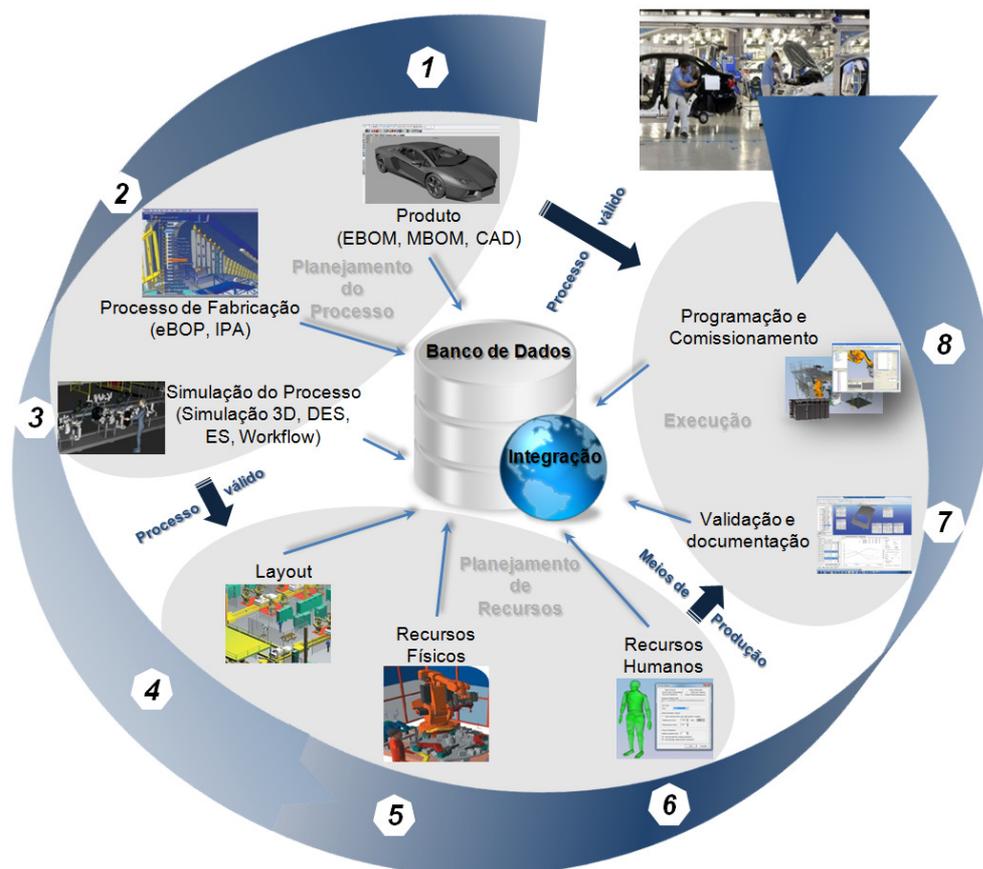


Figura 2.1: Ciclo da Manufatura Digital (adaptado de [38]).

O ciclo da manufatura digital apresenta as etapas sequenciadas de um a oito, descritas abaixo:

- na primeira etapa, o ciclo tem início a partir das informações do produto, estas são geradas pela engenharia de produto por meio de métodos digitais como EBOM (*Engineering Bill of Materials*), MBOM (*Manufacturing Bill of Materials*) e CAD [24] [39];
- na segunda etapa, utiliza-se os dados do produto e processos primários como solda ou usinagem, para dar início à elaboração de estudos sobre as definições dos processos, isto resulta em informações que podem ser transmitidas por meio da lista eletrônica de processos (eBOP - *Electronic Bill of Process*) e com uso do método digital denominado em processo de montagem (IPA - *In Process Assembly*) [40] [41];
- nas etapas de três a seis define-se o projeto de Arranjo Físico e o planejamento de recursos físicos e humanos. Estes representam os meios de produção e são planejados com auxílio de ferramentas como simulação com eventos discretos (DES - *Events Discret Simulation*), simulação ergonômica (ES - *Ergonomic Simulation*) e simulação do fluxo de trabalho (*workflow*) [23] [13] [14],
- a sétima etapa é responsável pela validação dos resultados de produtividade eficiente do produto no sistema de produção que foi planejado, isto muitas vezes requer além das simulações, testes reais. Após a validação, é possível gerar documentos como relatórios e gráficos, utilizados nos departamentos administrativos e chão de fábrica [20];
- a oitava etapa é responsável pelo comissionamento, que constitui a configuração inicial dos recursos robotizados, esta atividade é realizada com os programas construídos para controlar os equipamentos robotizados, o IHM (Interface Homem e Máquina) e a simulação robótica feita na Fábrica Digital [15] [42].

Para auxiliar em todas as etapas mencionadas, o conceito Fábrica Digital tem aplicativos de simulação que focalizam as seguintes operações [8]:

- projeto e validação do Arranjo Físico;
- estudos de ergonomia e de recursos humanos;
- estudos do manuseio de materiais;
- estudo de manufatura de peças complexas;
- estudo da logística na produção;
- planejamento de processos de montagem e balanceamento da produção;

- comissionamento virtual;
- controle e operação da produção.

Estas atividades de simulação são realizadas com a utilização de modelos que são construídos e disponibilizados para toda a rede de trabalho [43] [44] para que o processo de planejamento da produção ocorra de forma eficiente. A estrutura da Fábrica Digital é dividida em quatro níveis: aplicação, ferramentas, dados e sistemas, conforme mostra a Figura 2.2.

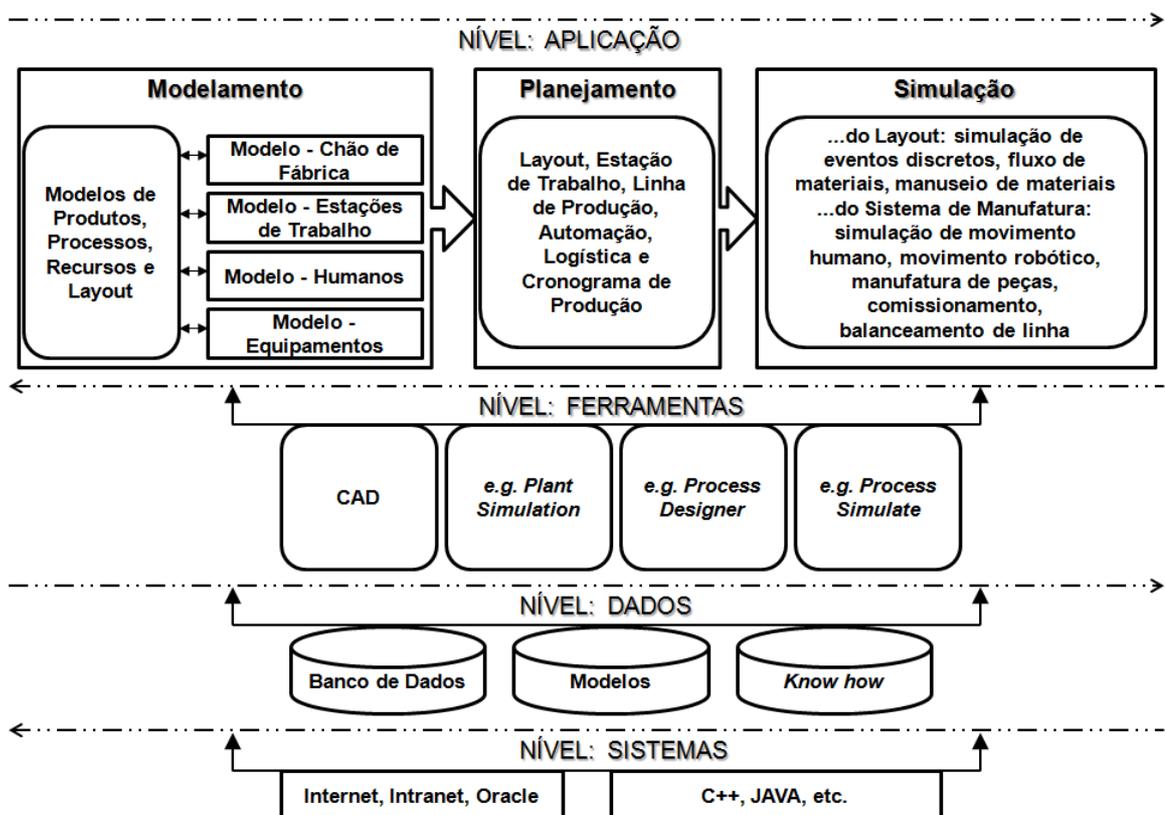


Figura 2.2: Estrutura do Sistema Fábrica Digital (adaptado de [25]).

- O nível de aplicação se refere ao modelamento, planejamento e simulação, que é o fluxo de trabalho realizado na Fábrica Digital para auxiliar a engenharia de manufatura nas atividades de planejamento. No entanto a criação de alguns modelos de produtos e meios de produção pode ser realizada pela engenharia de produto e posteriormente convertidos em formatos compatíveis com o sistema Fábrica Digital utilizado pela engenharia de manufatura. Estes modelos vão gradualmente recebendo informações para serem avaliados dinamicamente com simulações [25] [29].

- O nível de ferramentas auxilia na construção de modelos geométricos, plantas, processos e simulações [25].
- O nível de dados auxilia na disponibilização das informações de manufatura e simulação, como também é utilizado para o armazenamento destas informações no banco de dados [25].
- O nível de sistema é um ambiente de rede de trabalho que auxilia na integração das ferramentas e integração entre os usuários, ou seja, cria um trabalho cooperativo para o desenvolvimento do produto e planejamento da produção [25].

O ambiente provido pelo conceito Fábrica Digital também é propício para o aprendizado baseado no conhecimento da manufatura [18] [45] [44]. Isto pode ser feito por meio de simulação de processos, análises digitais das melhores práticas, metodologias científicas aplicadas em modelos digitais e simulação de máquinas [18].

2.1.2 Pesquisas sobre Fábrica Digital

Atualmente, existem alguns projetos de pesquisa sobre o tema Fábrica Digital que complementam os sistemas comerciais e suas respectivas ferramentas [40]. Alguns projetos são: Nexus [22]; Difac [46]; VFM [40]; VDI 4499 [15] e IMAB [26].

O Nexus tem como objetivo, desenvolver uma plataforma que ofereça suporte móvel de informações, ou seja, um espaço virtual utilizado na locação de dados para a Fábrica Digital. O projeto trabalha com modelos de diferentes níveis de detalhamento para atender seu público alvo em escala mundial por meio de suas aplicações. Uma das aplicações é resolver problemas relacionados aos dados e formatos de informações que as pequenas fábricas utilizam, estas podem acessar facilmente as informações que necessitam com o uso da plataforma Nexus. Isto é necessário quando tais empresas precisam acessar arquivos na extensão de um sistema Fábrica Digital que foram gerados por seus clientes e estes não têm condições de adquirir ferramentas digitais compatíveis para trabalhar ou acessar tais arquivos [47] [22].

O Difac tem como objetivo integrar vários sistemas como a Fábrica Digital, sistemas integrados de gestão empresarial (ERP - *Enterprise Resource Planning*), realidade virtual (VR - *Virtual Reality*) e modelamento de recursos humanos e

estudo de ergonomia (*Human Modeling and Ergonomics*). Estes sistemas são integrados por meio de um servidor denominado IMS DiFac Hub que é baseado em três pilares: treinamento, desenvolvimento de produto e projeto e avaliação da fábrica. Estes são relacionados com os fatores humanos presença, colaboração e ergonomia [46].

O VFM tem como objetivo, desenvolver uma rede de trabalho que dá suporte aos processos da fábrica abrangendo todas as fases do ciclo de vida do produto. Isto é desenvolvido num ambiente colaborativo virtual e integrado, que visa facilitar o compartilhamento de modelos, informações e conhecimento sobre a fabricação por meio da Fábrica Digital. O projeto utiliza como ferramenta uma plataforma para exportar informações de um sistema repositório de dados [40].

O VDI 4499 [15], desenvolvida pela Associação de Engenheiros Alemães tem como objetivo, definir os termos utilizados na Fábrica Digital e explicar o foco deste conceito. Isto foi feito com um guia de definições sobre a Fábrica Digital, que foi escrito em alemão e inglês. Este guia foi denominado VDI 4499 e também fornece uma visão geral dos objetivos, aplicações e benefícios do conceito Fábrica Digital. Tem uma explicação detalhada sobre os processos observados neste conceito e seus respectivos modelos, métodos e ferramentas [15].

O IMAB utiliza o conceito Fábrica Digital no contexto do desenvolvimento de uma nova tecnologia de manufatura, a soldagem com alta frequência nas indústrias que trabalham com chapa de metal. O conceito Fábrica Digital permite o estudo de requisitos para planta de produção que foi associada ao projeto. O estudo de requisitos logísticos é um exemplo da aplicação da Fábrica Digital na fase inicial deste projeto [26].

Além das pesquisas citadas, existem muitas outras em desenvolvimento sobre o conceito Fábrica Digital. Desta forma, muitos métodos têm sido testados ou desenvolvidos para se conectarem a Fábrica Digital. Eles são usados em conjunto com diversas ferramentas aplicativos para facilitar a comunicação com dados e informações [22].

2.1.3 Pré-requisitos para o uso da Fábrica Digital

Assim como qualquer outra tecnologia, o uso do conceito Fábrica Digital tem seus pré-requisitos. Por exemplo, é importante considerar que para ter o ambiente exigido por este conceito, o fluxo de todas as atividades na planta precisa de padronização. Pois todos os dados que são utilizados ou gerados com a tecnologia presente na Fábrica Digital são armazenados em um banco de dados da fábrica que posteriormente pode ser utilizado em escala mundial pela empresa e seus parceiros [36].

Assim, a aplicação do conceito Fábrica Digital envolve muito mais do que ferramentas de simulação, é necessário um novo tipo de organização para a fábrica, como também, uma intensiva colaboração entre os responsáveis pela manufatura e seus subcontratados [36]. As maiores dificuldades para o uso da Fábrica Digital estão na fase de implementação [26]. Os pré-requisitos para implementação deste conceito são classificados em dois grupos, métodos e *softwares*. Estes pré-requisitos são ilustrados na Figura 2.3.

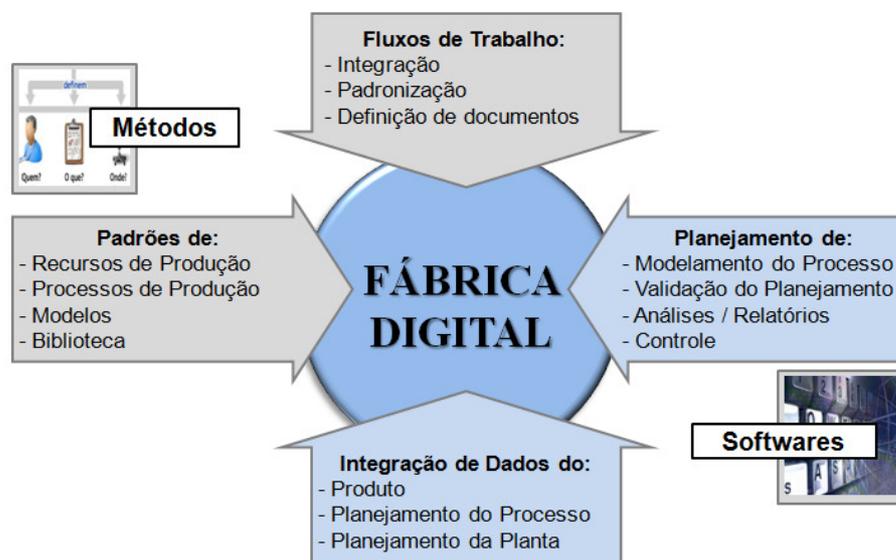


Figura 2.3: Pré-requisitos da Fábrica Digital (adaptado de [23]).

Os métodos se referem às seguintes características no fluxo de trabalho realizado pelo departamento de Planejamento de Processos: trabalho em grupo, padronização e elaboração de documentos pré-definidos [23]. Estas características são exigidas para a utilização eficiente deste conceito e o esforço para adquiri-las precisa ser iniciativa da empresa. Um exemplo de esforço exigido

é a criação de bibliotecas com modelos padronizados que posteriormente serão utilizados nas atividades de planejamento.

Os *softwares* precisam ter a capacidade de suportar atividades adicionais do planejamento como a construção do modelo do processo, validação do planejamento, elaboração de análises, elaboração de relatórios e a realização do controle destas atividades. Visto que muitas destas atividades precisam ser realizadas em rede de trabalho [23], a tecnologia apresentada pelos fornecedores da Fábrica Digital faz uma integração automática de dados somente no ambiente interno do sistema fornecido, quando se refere à integração externa, por exemplo, a inserção de modelos construídos no CAD, então é necessária a conversão dos dados para extensões aceitas pelo sistema [26].

A fase de implantação da Fábrica Digital também exige a preparação para alguns tipos de pré-requisitos. Estes são agrupados em quatro campos conforme ilustrado na Figura 2.4. Os campos são: rede de trabalho; processos e estruturas; versão, conhecimento e gestão dos dados; comprometimento.

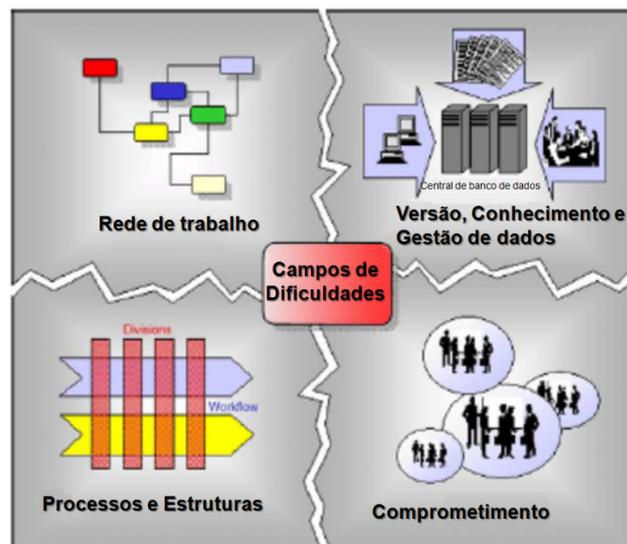


Figura 2.4: Campos de dificuldades da Fábrica Digital (adaptado de [26]).

A rede de trabalho é necessária para a conexão entre todas as ferramentas do *software* que são utilizadas nos processos de planejamento da produção e operação da fábrica. Para que isto ocorra, pode ser necessária à conversão de dados, uma atividade de altíssimo custo, por isso, muitas empresas acham esta atividade inviável [26].

Os dados utilizados ou gerados nos processos e operações realizados na Fábrica Digital são armazenados em um grande número de versões para assegurar sua disponibilidade de forma contínua, caso seja necessário uma posterior consulta destes, mas todo este processo exige gestão. A eficiência com o uso da Fábrica Digital e a gestão dos dados gerados exige um profundo conhecimento dos processos [26].

Outro importante fator é considerar que a Fábrica Digital é inicialmente um projeto que atinge principalmente as grandes empresas OEMs (*Original Equipment Manufacturer*), como montadoras de automóveis. Portanto este conceito não traz mudanças apenas para a estrutura interna da empresa que adotá-la, pois as empresas que cooperam com este projeto também necessitarão de adaptação. Este fator precisa ser considerado até pela segunda camada de fornecedores da Gestão da Cadeia de Suprimentos (SCM - *Supply Chain Management*) [26]. No entanto este comprometimento pode gerar dificuldades para as pequenas empresas do SCM, visto que estas empresas geralmente não têm seus próprios departamentos de planejamento para lidar com os requisitos de produção, nem condições suficientes para pagar os respectivos *softwares* e ferramentas [26].

2.1.4 Fornecedores da Tecnologia Fábrica Digital

Um requisito para utilização do conceito Fábrica Digital é a escolha de um sistema adequado [23]. Avançados sistemas da Fábrica Digital são oferecidos por dois concorrentes, a empresa francesa Dassault Systems e a empresa alemã Siemens PLM [48].

Para ter o conceito Fábrica Digital, o sistema precisa ter todas as ferramentas e *softwares* conectados por meio de um respectivo servidor de banco de dados. O servidor é responsável pela gestão dos dados, aspecto que constitui a principal característica do produto de qualquer fornecedor do sistema Fábrica Digital [48].

A Dassault Systems oferece o sistema Delmia, para atender o público da tecnologia Fábrica Digital [14]. A Siemens PLM possui o sistema Tecnomatix, composto principalmente pelos *softwares Plant Simulation, Process Designer e Process Simulate*, os dois últimos permitem a integração com outros *softwares* desenvolvidos pela própria Siemens PLM e por concorrentes [13]. Algumas

soluções parciais de Fábrica Digital também são oferecidas por outras empresas que compõe este mercado [48].

O sistema Tecnomatix é um conjunto de *softwares* para o planejamento digital da manufatura e pode ser utilizado para criar o planejamento do processo, Arranjo Físico, como também fazer simulação, execução e otimização da produção. Este Sistema apresenta em seu portfólio, tecnologias para as atividades de planejamento de processos de fabricação e montagem. Os *softwares* do sistema Tecnomatix tem uma visualização gráfica interativa para a realização de atividades de planejamento e simulações. Para ilustrar isto a Figura 2.5 apresenta a visualização gráfica do *software Process Designer* [13].

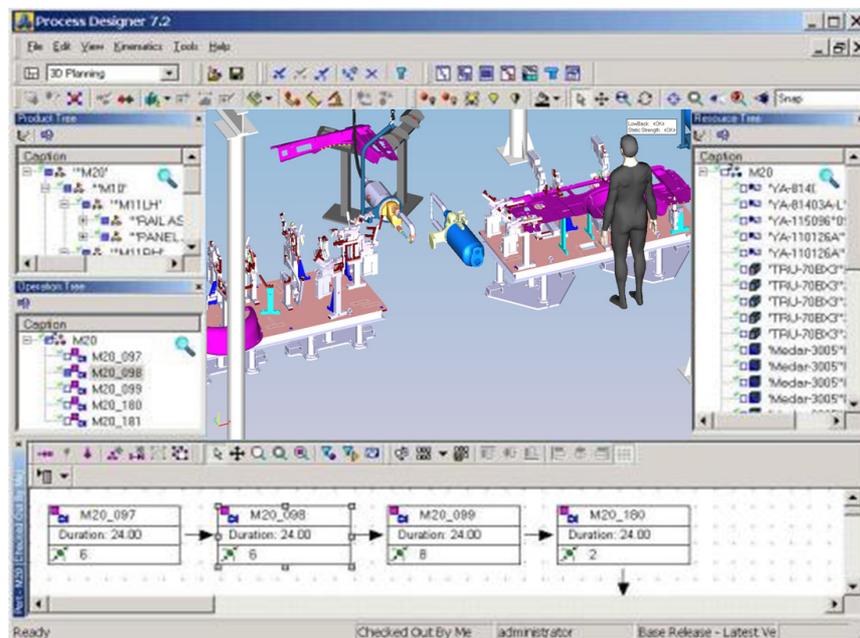


Figura 2.5: Software do Tecnomatix – Process Designer [13].

As ferramentas do sistema Tecnomatix também oferecem ferramentas para simulação robótica e planejamento de automatização que tem por objetivo desenvolver, simular e preparar os processos de produção que utiliza a robótica. As ferramentas para fazer o planejamento e otimização da Fábrica visa projetar a fábrica já com otimização de forma rápida e eficiente. O tecnomatix também oferece a simulação de processos humanos que tem por objetivo melhorar a eficiência, segurança e conforto no ambiente de trabalho por meio de simulações de operações humanas [13].

No caso do sistema Delmia, este é organizado em cinco diferentes módulos, com diferentes aplicações. Os módulos são para o planejamento de meios de produção, robotização, controle da produção, ergonomia no trabalho humano e processos de montagem. Para todos os módulos, o sistema disponibiliza bibliotecas de ferramentas que são específicas para cada módulo e é ativada quando se abre o módulo que se deseja trabalhar. A Figura 2.6 mostra a interface gráfica que aparece para o usuário quando é ativado o módulo para planejamento de processos de montagem [14].

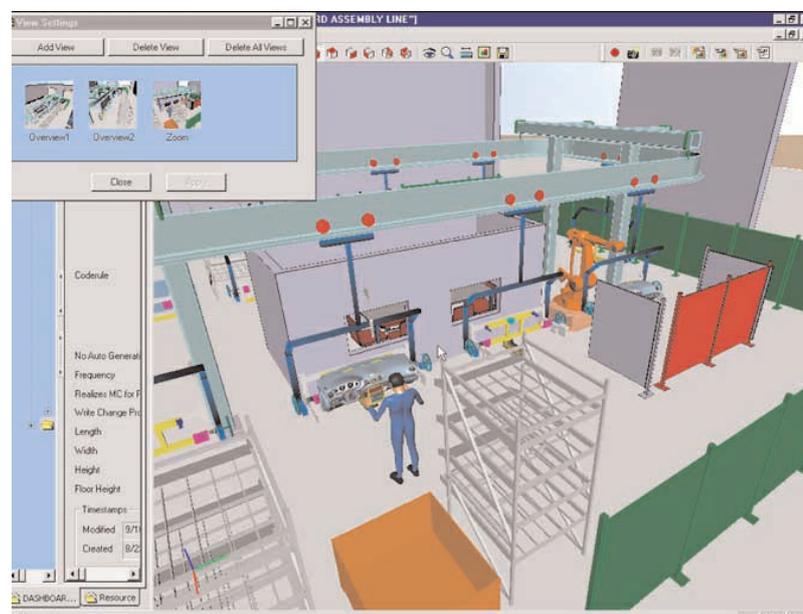


Figura 2.6: Sistema Delmia - módulo planejamento de montagem [14].

O sistema Delmia oferece em seu portfólio ferramentas para a validação e detalhamento do processo a fim de verificar os métodos utilizados no processo utilizando a geometria real do produto em um ambiente 3D. Neste sistema as ferramentas para simulação e construção de modelos, possibilitam criar diagramas de processos completos. As ferramentas de planejamento e simulação de processos contendo robôs permitem simular e programar as células de trabalho em um ambiente digital 3D [14].

2.1.5 Usuários da Fábrica Digital

A utilização da Fábrica Digital ocorre em algumas empresas, principalmente nos setores automotivo e aeroespacial.

Este conceito tem se desenvolvido entre tais empresas e ganhado maior importância e aceitação internacional. Alguns exemplos de empresas que vêm utilizando a Fábrica Digital são:

- a Daimler AG., que produziu três modelos de veículos recentemente usando a Fábrica Digital para fazer as atividades de planejamento da produção [49]
- a General Motors Co. e Toyota Motor Corp., utilizaram o conceito Fábrica Digital para determinar antecipadamente detalhes do processo de fabricação, como pontos de solda [10].
- a Volkswagen AG. em Wolfsburg, que iniciou o projeto de pesquisa HoSeKo em conjunto com a *Chemnitz University of Technology*, tendo por objetivo analisar o papel dos processos de comunicação interpessoal no ambiente Fábrica Digital [10];
- a John Deere, que também tem usado a Fábrica Digital no desenvolvimento de seus produtos [10];
- outras empresas como a BMW AG., Rolls Royce, Aeroengines and Associates, Embraer S.A. e a Ford Motor Co. que tem investido muito em soluções com a Fábrica Digital [7].

Os usuários da tecnologia presente na Fábrica Digital são na maioria dos casos funcionários da indústria, responsáveis pelo planejamento de processo e são constituídos, principalmente por engenheiros. Estes precisam de boas ferramentas para fazer um trabalho eficiente que auxilia na utilização de conceitos como a engenharia concorrente. Portanto a Fábrica Digital auxilia fornecendo o suporte necessário para estes profissionais tanto neste, como para o futuro ambiente de trabalho na indústria manufatureira [48].

2.1.6 Integração na Fábrica Digital

Um desafio para a engenharia de manufatura é a integração dos dados relacionados ao produto, ao processo e à fábrica [37]. A fábrica Digital é o elemento chave para contribuir com esta integração [43], por conectar os dados gerados pelo desenvolvimento do produto, planejamento da produção e planejamento da fábrica [20].

A integração na Fábrica Digital pode ser descrita de um ponto de vista geral por meio do seguinte processo: o modelo do processo é criado no *software* da Fábrica Digital utilizado para fazer o planejamento, este *software* permite exportar modelos geométricos criados no CAD, após serem convertidos para uma extensão aceita pelo sistema utilizado, estes e outros tipos de dados são integrados ao modelo para atribuir informações ao modelo do processo que é então armazenado no servidor de banco de dados. Assim é possível o compartilhamento do modelo para os demais *softwares* da Fábrica Digital que são utilizados para fazer as simulações [13] [26] [27]. A simulação também pode ser executada em conexão com alguns tipos de equipamentos como o IHM que é utilizado para fazer o comissionamento virtual [26], [42].

A integração mencionada, também pode ser vista de duas formas, uma integração micro e macro do sistema. A primeira forma de integração é descrita como uma conexão entre os departamentos de Desenvolvimento do Produto, Planejamento da Produção e Planejamento da Fábrica como mostra a Figura 2.7 [20].

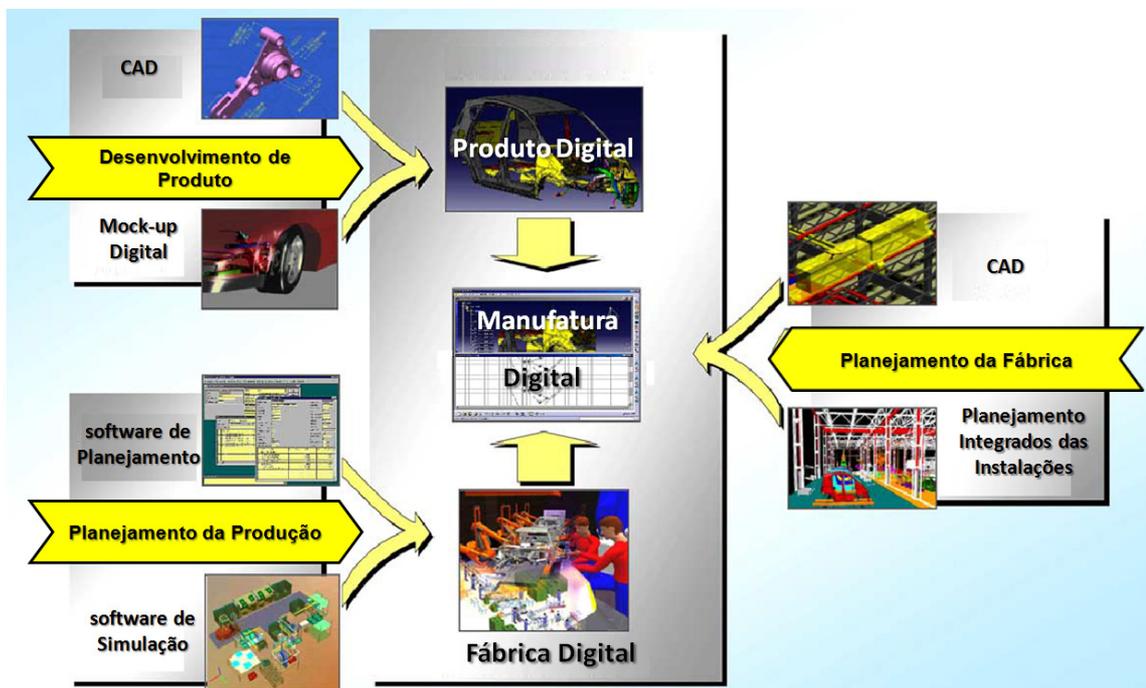


Figura 2.7: Integração micro na Fábrica Digital (adaptado de [20])

Esta integração permite que o ciclo de desenvolvimento do produto seja orientado à produção já na fase inicial do processo de criação do produto. E os modelos

digitais criados pelo desenvolvimento do produto são posteriormente utilizados no planejamento da produção e planejamento da fábrica. Isto é feito com as ferramentas e *softwares* da própria Fábrica Digital [20].

A integração macro do sistema é a integração do sistema Fábrica Digital entre a cadeia de sistemas CAD e os Sistemas Integrados de Gestão Empresarial (ERP - *Enterprise Resource Planning*) como mostra a Figura 2.8. Esta descreve a característica chave da Fábrica Digital, que é o auxílio em algumas atividades do desenvolvimento do produto e planejamento de processo com dados comuns, assim é possível administrá-los por meio de um único controle [27].



Figura 2.8: Integração macro na Fábrica Digital: CAD, DF e ERP (adaptado de [27]).

Esta figura mostra que a Fábrica Digital tem um importante papel na integração de dados do desenvolvimento de produto que tem origem em sistemas CAD e a integração de dados relacionados a fabricação com os *softwares* que compõe o sistema ERP [27]. É importante considerar que a tecnologia apresentada pelos fornecedores da Fábrica Digital faz uma integração automática de dados somente no ambiente interno do sistema fornecido, quando se refere a integração externa, como por exemplo a utilização de modelos construídos em sistemas CAD, então é necessário a conversão de dados para extensões aceitas pelo sistema [26].

2.1.7 A utilização do XML na Fábrica Digital

No ambiente de planejamento, os responsáveis pela definição do Arranjo Físico e fornecedores de equipamentos estão interessados no compartilhamento de dados do equipamento, tais como, custos efetivos de processos e outros que são consistentes e podem ser utilizados pelos clientes na fase de planejamento por meio de métodos digitais. Estes dados só podem ser compartilhados dentro da arquitetura de um sistema específico dum determinado fabricante. E mesmo assim, este método só pode ser usado apenas para as peças de uma cadeia de processos ou família de produtos. Ele não é aberto, padronizado e nem

universalmente aceito para permitir o compartilhamento de dados em formatos intermediários [50].

O conceito Fábrica Digital tem uma visão futurista da manufatura, com relação a este assunto, pois utiliza como conexão, a plataforma XML, que interliga os dados relacionados com o modelo geométrico (Figura 2.9) [39], [13]. O uso do XML tem garantido uma estrutura sintática pré-definida para os dados que posteriormente são validados [40].

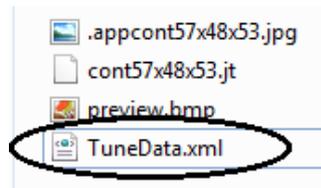


Figura 2.9: O XML para conexão de dados no sistema Tecnomatix.

Atualmente existem projetos de empresas com universidades, que tem por objetivo o compartilhamento de dados, feito entre a engenharia e um comunicador universal conectado aos equipamentos de produção. Eles têm como meta, criar uma linguagem comum baseada em XML para descrever os movimentos com interação a geometrias 3D [50].

2.1.8 Projeto de Arranjo Físico na Fábrica Digital

A Fábrica Digital provê para o projeto do Arranjo Físico, mais do que um espaço para desenho em 2D, ela oferece um ambiente de projeto digital com módulos pré-definidos para criações detalhadas [29], [5]. A Fábrica digital oferece ferramentas para construção de uma planta digital em 2D ou 3D, assim o Arranjo Físico pode ser construído de acordo com o projeto arquitetônico [29].

O projeto de Arranjo Físico na Fábrica Digital, como ilustrado na Figura 2.10, tem como foco a otimização do fluxo de materiais e utilização eficiente dos meios de produção planejados. Isto contribui para redução no tempo de lançamento de novos produtos (*time to market*) e tempo para alcançar a produção em alto volume (*time to volume*); melhoria no Arranjo Físico com pouco investimento; localização correta dos equipamentos; manuseio correto e suficiente de materiais; dimensionamento correto dos pulmões (*buffer*) e redução da movimentação do produto [8].



Figura 2.10: Arranjo Físico na Fábrica Digital [5].

A tecnologia para fazer o projeto do Arranjo Físico na Fábrica Digital conta com objetos em 2D ou 3D pré-definidos, que representam os meios de produção de uma planta de forma detalhada e podem ser implementados rapidamente e eficientemente [5].

O projeto de Arranjo Físico Digital é dividido em quatro etapas principais: planejamento do processo digital, planejamento do processo inicial, modelamento do Arranjo Físico Digital, análise e validação do Arranjo Físico Digital [29]. O planejamento do processo digital é elaborado de acordo com os dados do produto, meios de produção, processos de produção e as características da manufatura. Estas informações permitem a construção do modelo de processo digital e serve como base para o planejamento do processo digital, composto pela estrutura do produto (*product tree*), estrutura de operações (*operations Tree*), estrutura de recursos (*resource tree*) e o relacionamento entre estes [24].

O planejamento de processo inicial conforme mostra a Figura 2.11, define a estrutura do processo de produção que é composta por operações de montagem ou de fabricação e a sequencia de operações utilizadas nas estações de trabalho. Isto define como serão as estações de trabalho e as ferramentas que serão utilizadas em cada estação. Em seguida, é possível determinar antecipadamente informações sobre a capacidade de produção [24].

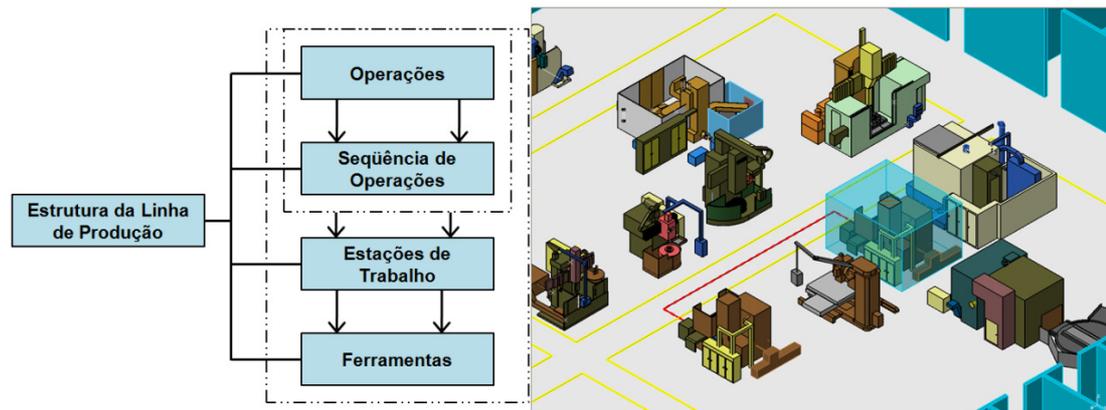


Figura 2.11: Planejamento de Processo Inicial (adaptado de [29]).

O modelamento do Arranjo Físico digital inicia-se com a utilização de modelos construídos no CAD para representar os objetos do Arranjo Físico. As ferramentas da Fábrica Digital permitem trabalhar com objetos pré-definidos para representar virtualmente os meios de produção usados em uma fábrica, do piso aos transportadores, mezaninos e dispositivos para movimentação de unitizadores de carga [5]. Os objetos que podem ser modelados na Fábrica Digital são classificados em cinco grupos (Figura 2.12): físico, controle, resultado, informacional e análise [25].

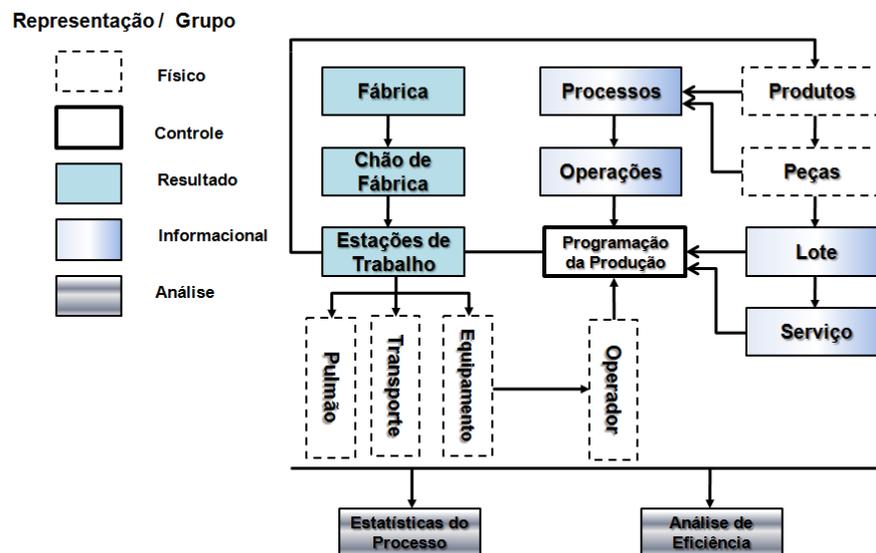


Figura 2.12: Classificação dos objetos na Fábrica Digital (adaptado de [25]).

A classe de cada objeto é definida conforme sua representação real e digital segundo a descrição de cada classe que são mostradas a seguir:

- A classe de objetos físicos representa os meios de produção que tem o sistema de manufatura como equipamentos de usinagem e transporte, robôs, grampos fixadores, pulmões, bancadas de trabalho, peças e operadores, etc. [25];
- a classe de funções de controle tem como função controlar os processos operacionais da produção e logística, e é também utilizada para o monitoramento de falhas, atividades de programação, planejamento de recursos humanos e controle de processos [25];
- a classe de gerenciador de resultados tem a função de representar os resultados de análises das simulações dinâmicas como a linha de produção e suas respectivas estações de trabalho que podem ser mostradas em gráficos [25];
- a classe de objetos informacionais representa as especificações de processos e o planejamento da produção [25];
- a classe gerenciador de análises são os meios utilizados para o balanceamento de linha, como gráficos, análises de tempo, análises ergonômicas, etc [25].

Estes objetos fornecem para o projeto de Arranjo Físico, a possibilidade de visualização, medição e inspeção por meio de um modelo digital que representa a fábrica em 2D ou 3D [5]. A análise e validação do Arranjo Físico digital possibilita percorrer toda a fábrica, inspecionar e visualizar movimentos animados em um ambiente virtual [5]. As ferramentas da Fábrica Digital possibilitam a realização de uma avaliação e análise do Arranjo Físico em aspectos quantitativos, qualitativos e ergonômicos (Figura 2.13).

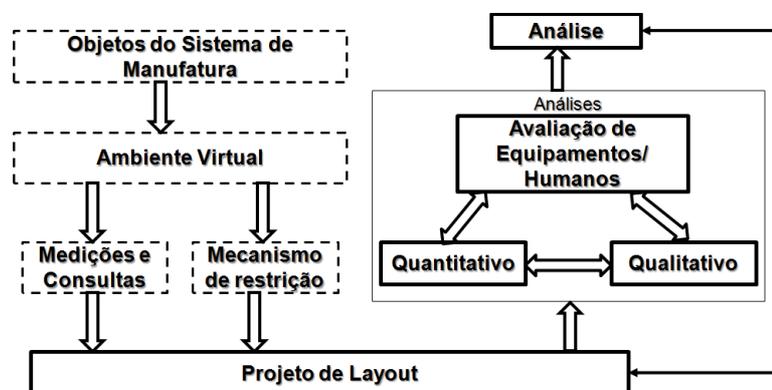


Figura 2.13: Análise de Arranjo Físico Digital (adaptado de [29]).

O tipo de cada análise é definido conforme sua função no contexto geral da produção segundo a descrição mostrada a seguir:

- a análise quantitativa focaliza a relação de interatividade entre os equipamentos ou unidades [29];
- a análise qualitativa: é feita com a simulação de operações realizadas pelos equipamentos, considerando o movimento percorrido pelos materiais e observando a existência de colisões entre os objetos [29];
- a análise ergonômica é feita com a simulação de operações e focaliza a ergonomia dos operadores. Os fatores como o espaço no local de trabalho, as operação humanas nos equipamentos e o ambiente, são considerados para conseguir maior segurança e adequação ergonômica nas operações [29].

Portanto o conceito Fábrica Digital é composto por uma variedade de ferramentas que contribuem com o fator competitividade para as empresas, quando se trata da realização de atividades de planejamento de produção.

2.2 Manufatura Enxuta

A indústria manufatureira tem feito intensa busca por desenvolver métodos de operação e aplicação de princípios do conceito Manufatura Enxuta para melhorar desde os processos até a empresa como um todo [17]. Este conceito, também conhecido como Sistema Toyota de Produção, utiliza métodos para melhorar a produtividade no Arranjo Físico, como por exemplo, o método de aumentar o fluxo no processo de manufatura ou usar a multifuncionalidade de operários. Ao invés de ter um operário por máquina, várias máquinas são supervisionadas por um operário, ou seja, um operário é responsável por vários processos, o que melhora a produtividade. Outros métodos são realizados através de ferramentas operacionais como *just-in-time* de produção *integrado ao kanban*, que é um cartão que tem a função de informar a remoção e transporte de materiais, ou seja, é um pedido por transferência ou entrega. Estas ferramentas asseguram que as peças corretas estejam disponíveis no momento e quantidade corretos [51].

No livro “A máquina que mudou o mundo”, Womack [52] apresentou métodos e ferramentas para organizar e gerenciar as operações da produção, desenvolvimento do produto, formas de relacionamento com os clientes e cadeia

de fornecedores. Esta abordagem foi consequência de um estudo realizado em diversas organizações ao redor do mundo, com foco no processo de produção utilizado. Este trabalho teve cinco anos de duração e foi exposto com o termo Manufatura Enxuta (*Lean Manufacturing*). Com isto, despertaram a atenção do mundo para esta forma de fazer cada vez mais com cada vez menos [52]. Depois estes mesmos autores buscaram complementar o trabalho anterior, provendo um melhor esclarecimento sobre os princípios do pensamento enxuto (*lean thinking*), mostrando como aplicar o pensamento, as técnicas e a organização enxuta [53].

O *Lean Institute* Brasil define o conceito Manufatura Enxuta por meio de J. Womack, D. Jones e Daniel Ross para denominar uma filosofia de negócios baseada no Sistema Toyota de Produção, que olha detalhadamente para as atividades básicas envolvidas no negócio classificando-as em desperdício ou valor, a partir da ótica dos clientes e usuários. Este instituto tem representado desde 1988 o pensamento enxuto no Brasil [53]

2.2.1 Benefícios da Manufatura Enxuta

O conceito Manufatura Enxuta contém princípios que são simples, em sua compreensão, mas que determinam os alicerces de um sistema de manufatura bem sucedido, quando estes são aplicados no sistema produtivo como um todo. Algumas das técnicas deste conceito, como o sistema puxado, hoje são típicas no sistema produtivo de muitas empresas e outras técnicas como a troca rápida de ferramentas são objetos de estudo tanto no Brasil como em outros países. Tanto estas técnicas citadas como as demais técnicas do conceito Manufatura Enxuta resultam nos benefícios listados abaixo:

- Redução de tempo do ciclo de desenvolvimento produto [54];
- Enfoque na transparência de dados como a capacidade do sistema de produção [52];
- Aumento da produtividade e variedade de produtos [52];
- Redução dos estoques intermediários e de produtos acabados nos depósitos [55];
- Melhoria na distribuição do espaço para estocagem de produtos [56];
- Melhoria na comunicação entre os responsáveis pela produção e a área comercial [52];

- Melhoria no empenho da empresa por produtos com qualidade [57];
- Aumento do valor agregado ao produto entregue aos clientes [58], [59];
- Redução do *lead time* [60].

2.2.2 Definições

Takt time: o termo *takt* é uma palavra alemã que serve para designar o compasso de uma composição musical e foi introduzida no Japão nos anos 30 com o sentido de ritmo de produção (SHOOK, 1998 Apud [61]). Assim o termo *takt time* se refere ao ritmo de produção que é calculado por meio das grandezas de tempo de produção e demanda do mercado. Portanto é o compasso necessário para a produção atender a demanda do mercado. Por exemplo, para uma linha de montagem de cilindros pneumáticos com demanda diária de 1440 unidades e tempo disponível para produção de 8 horas ou 480 minutos, o cálculo do *takt time* fornece o tempo de 3 minutos para fabricação de cada produto, ou seja, para atender a demanda, a cada 3 minutos é necessário produzir um cilindro pneumático na linha de produção [3].

Tempo de ciclo: é o termo utilizado para representar a grandeza tempo de um processo, que é o período transcorrido entre a repetição de uma mesma operação, ou seja, indica o início e o fim de uma operação. O tempo de ciclo tem uma forte relação com os meios de produção e as variáveis definidas para o posto de trabalho, tais como o tempo utilizado na fabricação de 1 peça e a quantidade de recursos que são utilizados para a mesma operação [52].

Como para cada máquina ou equipamento, o planejador do processo define um tempo para cada operação a ser executada. Deste modo, o tempo de ciclo é o tempo transcorrido desde a primeira operação até a última operação planejada para um processo, ou seja, é o tempo que define o ritmo real da produção. Este ritmo é definido pelas características dos equipamentos, dos produtos e da configuração do Arranjo Físico [3].

Lead time: o termo *lead time* representa o tempo total necessário para produzir um produto, desde o instante que a matéria-prima chega à fábrica até a saída da fábrica pelo produto, tendo como destino o cliente, ou seja, o cálculo é feito pela somatória dos tempos de ciclo de cada processo executado para fabricar o

produto, mais o acréscimo de tempos de espera e demais perdas. Num Arranjo Físico perfeito, em sintonia com a demanda do mercado, o *lead time* seria igual ao tempo utilizado para agregar valor ao produto [3].

Fluxo de materiais (*material flow*): o fluxo de materiais é definido como o movimento progressivo de um produto através dos meios de produção desde o recebimento dos materiais brutos até a expedição do produto acabado, sem paradas, tais como a quebra de máquinas, espera ou outros atrasos imprevistos da produção [62], [63], [64].

2.2.3 Desperdícios no Sistema de Manufatura

O pensamento enxuto tem como foco identificar e eliminar todos os desperdícios existentes no sistema produtivo, concentrando esforços nas atividades que agregam valor ao produto. Por definição, desperdício é “qualquer atividade humana que absorve recursos, mas não cria valor” [65], ou seja, é o ato ou efeito de desperdiçar, gastar sem proveito [65]. No entanto desperdício também pode se referir a todos os elementos da produção que aumentam os custos e não agregam valor ao produto, por exemplo, recursos humanos, estoques e de equipamentos desnecessários [51].

Alguns dos desperdícios mais comuns em um sistema de manufatura são:

- Produção em excesso, gerando um estoque demasiado de produtos [51]: a perda por superprodução é considerada a mais danosa de todas, uma vez que esconde os outros tipos de perdas e é a mais difícil de ser eliminada. A perda por superprodução por quantidade é a perda por produzir além daquilo que é necessário. Já a perda por superprodução por antecipação é a perda decorrente de uma produção realizada antes do momento necessário, fazendo com que as peças fiquem esperando o momento de serem processadas por etapas posteriores.
- Fila de espera, aguardando a liberação das máquinas para o processamento, tanto de materiais como também de operadores e processos posteriores que ocorrerão com atraso [65]: esta perda é gerada quando um lote está à espera da liberação de um recurso para ser processado; também ocorre quando as peças já trabalhadas de um lote esperam pelo processamento das restantes para que possam avançar para a etapa seguinte ou no momento em que um operário acaba o seu ciclo de

produção e fica à espera do término da operação restante feita por outro operário.

- Tempo de transporte de matéria prima, produto semi-acabado e produto final dentro dos processos [63]: visto que o transporte dentro das instalações industriais é uma atividade que não agrega valor, passa a ser interpretado como uma perda e deve ser reduzido ao mínimo possível ou até mesmo eliminado. As melhorias mais significativas, em termos de redução das perdas, são aquelas aplicadas ao processo de transporte, obtidas através de alterações do Arranjo Físico que dispensem ou eliminem as movimentações de material.
- Tempo de processamento excessivo devido a perdas de tempo no processo. Alguns exemplos são a demora no aquecimento de máquinas ou a execução de processos desnecessários [65]: esta perda é gerada ao longo do processo produtivo ou devido à deficiência no desempenho de equipamentos, causado por quebra e falhas. Este desperdício também ocorre devido à falta de otimização da produtividade no sistema de manufatura que resulta em maior tempo de execução em operações nos processos de fabricação.
- Estoque disponível em excesso [65]: a perda por estoque em excesso é causada por produtos acabados ou produtos semi-acabados que são armazenados com quantidade acima do necessário. Embora a eliminação desta perda deixe o sistema mais exposto aos riscos de falta de insumos e de quebra de máquinas, a redução dos estoques é considerada benéfica, pois além de reduzir os custos a ele relacionados, também permite que os problemas escondidos se tornem mais evidentes que antes.
- Movimentação excessiva, tanto de materiais como de operadores [51]: esta perda é causada pelos movimentos dos operários e materiais em função de operações que não agregam valor. Este tipo de perda pode ser eliminado através de melhorias baseadas no estudo de tempos, movimentos e micromovimentos ou alteração do sistema de transporte utilizado.
- Produtos defeituosos, que resulta em correção de falhas de produção devido à má qualidade ou não atendimento aos requisitos do cliente [51]: o desperdício consequente da fabricação de produtos defeituosos é consequência da falta de melhoria, não só do setor de qualidade, mas como de toda a fábrica. A sua erradicação é conseguida após a eliminação da causa raiz.

A eliminação do máximo de desperdício existente nos processos da empresa gera maior eficiência. Portanto a implantação da Manufatura Enxuta envolve analisar todas as fontes de desperdícios que são identificadas, o que resulta em resultados positivos para o sistema de manufatura.

2.2.4 Princípios da Manufatura Enxuta

Os princípios do conceito Manufatura Enxuta são resumidos em cinco: sistema de manufatura que permite ao cliente Puxar a produção; determinação precisa do valor atribuído ao produto; identificação do fluxo de valor para cada produto; utilização de técnicas para fazer o valor fluir no sistema de manufatura e buscar continuamente a perfeição [65].

Sistema Puxado: no sistema puxado, a informação do fluxo de materiais inicia no processo final que retira as quantidades necessárias do processo precedente este procedimento é repetido na ordem inversa passando por todos os processos anteriores. Já no sistema empurrado, o fluxo de materiais é feito com base na previsão de demanda e nos estoques disponíveis, produzindo muitas vezes, mais do que o necessário para atender a demanda total [51]. Este conceito pode ser aplicado no sistema produtivo através de uma reorganização interna de processos ou Arranjo Físico,

Valor: o princípio valor, parte do pressuposto da real necessidade do cliente na utilização do produto, ou seja, para uma operação ser considerada como valor, esta precisa agregar valor ao produto. A implantação deste princípio exige ter uma perspectiva voltada para o que o cliente entende como valor, ou seja, a sua real necessidade e um preço que leva em conta dois fatores, o valor de produtos similares e o seu poder de compra.

Portanto é preciso considerar os custos decorrentes de encargos financeiros dos estoques excessivos e de remanufatura de produtos inadequados, resultantes de mão de obra não qualificada ou mesmo equipamentos inadequados. A ausência deste princípio enxuto pode elevar o preço do produto a um nível não competitivo [65].

Fluxo de valor: depois de Identificar o valor do produto, conforme o ponto de vista do cliente final, o próximo passo em direção a Manufatura Enxuta é

identificar o fluxo de valor. Isso envolve fazer o mapeamento do processo atual, comparado com o necessário para se criar mais valor, o que normalmente expõe os desperdícios.

O fluxo de valor é o conjunto de todas as ações específicas necessárias para o ciclo, que tem início na concepção do produto e vai até o seu lançamento, ou seja, passa pelo projeto detalhado do produto e seu planejamento de fabricação. Este fluxo tem ações adicionais na tarefa do gerenciamento da informação, que vai do recebimento do pedido até a entrega, seguindo o mesmo fluxo da fabricação do produto, desde a matéria-prima ao produto acabado nas mãos do cliente. Portanto a manufatura enxuta tenta otimizar todo este fluxo de valor conforme o ponto de vista do cliente final [65], [4].

Após a identificação das atividades que realmente agregam valor, pode-se definir o custo do produto que é o montante de custos de cada uma das operações, com base nos meios de produção e tempo de processamento. Assim a reorganização dos processos, permite alcançar um custo de produção mais enxuto, aumentando a competitividade, as vendas e utilização dos recursos com maior produtividade.

Fluxo contínuo: ter um fluxo contínuo significa fazer com que as etapas que agregam valor ao produto fluam, ou seja, desenvolver o processo em forma de etapa por etapa sem interrupções e que vai agregando valor ao produto. É preciso eliminar todos os desperdícios existentes entre as etapas [65]. Tomando como exemplo, uma linha de montagem com fluxo contínuo, seria executado sem paradas, com inspeções avançadas, sem a necessidade de parar numa estação específica para esta operação, com a quantidade necessária de recursos para fazer a expedição do produto. Isto é considerado possível para a tecnologia disponível em nossos dias.

A Manufatura Enxuta tem como objetivo final um sistema em que tudo esteja ligado em fluxo contínuo de peças unitárias. Este princípio reduz a necessidade de inventários excessivos que se tornam desperdícios, pois a criação de lotes ou inventários intermediários, normalmente se concentram em pontos de espera de peças para o processamento [66].

Perfeição: o princípio perfeição se refere à busca continua pela melhoria dos processos, sempre procurando as melhores formas para criar valor. Assim a

aplicação dos conceitos e técnicas da manufatura enxuta, mesmo tendo um foco no curto prazo, precisa considerar o avanço da melhoria continuamente, para o alcance da perfeição. Pois a conversão de um sistema de manufatura convencional para um sistema que aplica os princípios e técnicas do conceito Manufatura Enxuta precisa ser aplicada em todas as empresas da cadeia de suprimentos [51].

A busca pela perfeição é um processo contínuo, sem prazo final, visto que a busca por ter um processo perfeito, ou seja, ter todas as operações que agregam 100% de valor ao produto não existe na prática, mas é uma frequente busca por melhorias para se aproximar da perfeição. Para que este objetivo seja alcançado OHNO (1997) cita dois importantes elementos do princípio perfeição: o aumento da eficiência por meio da redução de custos relacionados com pensamentos enxutos e eficácia na aplicação do conceito Manufatura Enxuta, visando ganhar a confiança dos gerentes, supervisores e diretores da empresa [51].

2.2.5 Técnicas da Manufatura Enxuta

O mapeamento do fluxo de valor permite identificar muitos pontos críticos nos processos de produção e para minimizar ou até mesmo eliminar estes pontos críticos, foram desenvolvidas muitas técnicas que contemplam o conceito Manufatura Enxuta.

Algumas das técnicas aplicadas ao conceito Manufatura Enxuta são: o sistema *Just-in-Time*, Sistema *Kanban*, sistema puxado, balanceamento de linha de produção, eliminação de gargalos, fluxo de uma peça só, manufatura celular, métodos a prova de falha, trabalhadores com múltiplas habilidades, mapeamento do fluxo de valor, *kaizen*, autonomia e melhoria do Arranjo Físico e sistemas de transporte.

Com a intenção de fornecer conhecimento sobre as técnicas citadas, elas são apresentadas nesse subcapítulo, visto que para a implantação do conceito Manufatura Enxuta é importante conhecê-las e aplicar as técnicas que mais atendem aos objetivos estratégicos da produção numa empresa específica.

Kanban: o *Kanban* é a ferramenta de administração da Manufatura Enxuta que utiliza informações colocadas no cartão para comunicar de forma clara e direta,

dados de estoques intermediários, chamados de pulmão. Algumas destas informações como mostra a Figura 2.14 são; quantidade estocada, quantidade processada, localização do pulmão, número do item e estoque mínimo.

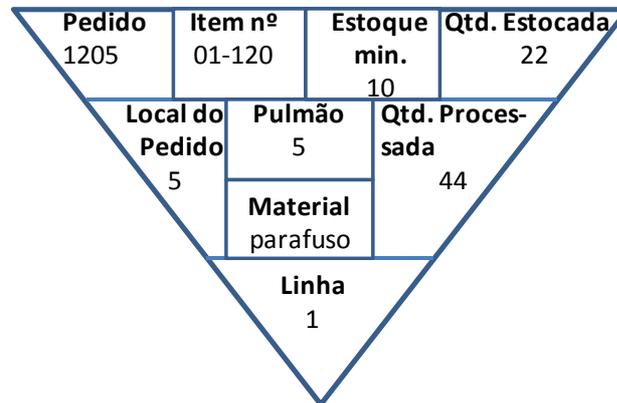


Figura 2.14: cartão kanban (adaptado de [3])

O *Kanban* foi criado por Taiichi Ohno após observar os supermercados americanos em suas viagens para conhecer fábricas nos Estados Unidos. Ele observou que no supermercado o cliente pode encontrar o que ele precisa, no momento que ele precisa, na quantidade necessária, portanto tem uma relação direta com o *just-in-time*. Esta ferramenta foi criada para aumentar a eficiência global e melhorar o ambiente de trabalho através do conceito do processo subsequente ir para o precedente buscar os produtos que precisa [51]

Just-In-Time: (JIT) é a técnica mais relevante do conceito Manufatura Enxuta, pois focaliza o fluxo de peças, no momento, posto de trabalho e quantidade adequados para a operação, mantendo a qualidade das operações, impedindo a formação de estoques intermediários [67].

Em outras palavras JIT significa produzir bens e serviços exatamente no momento em que são necessários, sem antecipação para evitar estoques e sem demora, como o objetivo de evitar inesperadas esperas pelos clientes, com a adição das necessidades de qualidade e eficiência [3]. O JIT traz benefícios como a redução da complexidade do planejamento de materiais, da necessidade de rastreamento no chão de fábrica, dos estoques em processos e da logística de suprimentos [68].

As funcionalidades desta técnica são exemplificadas na Figura 2.15, no qual o operário B da estação 9 utiliza as informações do cartão *kanban* para saber o

modelo das rodas que serão montadas no carro da estação de montagem 10. Ele então inspeciona e posiciona quantidade de rodas informadas no cartão kanban sobre o palete de rodas da estação de montagem 10, no momento necessário. O operário A confirma o modelo da roda e monta as rodas no veículo. O rack de rodas funciona como um supermercado, onde as informações sobre o ressuprimento indicadas irá determinar o momento de emissão do *kanban de movimentação*.

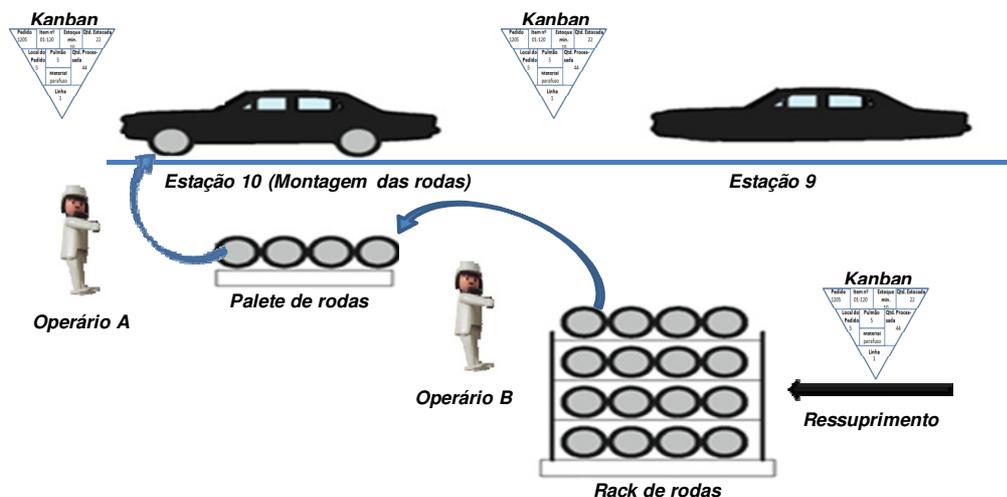


Figura 2.15: Linha de montagem utilizando o Just-in-time (adaptado de [3]).

Automação (Jidoka): visando garantir que os produtos sejam fabricados livres de defeitos, dispositivos de parada automáticos devem ser instalados nas linhas de produção. Assim, se um processo estiver gerando defeitos, ele para automaticamente. E visto que os estoques estão baixos, o processo subsequente também para e todos ficarão sabendo que existe um problema de qualidade. Na linha de produção tradicional, os estoques intermediários impedem que se enxerguem estes problemas. A fábrica precisa se igualar ao corpo humano, que com seu sistema nervoso autônomo alerta sobre alguma disfunção, mesmo quando a pessoa está dormindo.

A automação é a automação com um toque humano, uma relevante técnica do conceito Manufatura Enxuta. Esta técnica precisa estar presente numa fábrica, que deve possuir sistemas para responder automaticamente quando ocorrem problemas [51].

A automação é conseguida através de dispositivos instalados nas máquinas que irão impedir a produção de produtos com defeitos, por exemplo, os dispositivos de parada automática, dispositivos de segurança e dispositivos a prova de erros. Estes dispositivos permitem que a máquina trabalhe sem a supervisão direta do operador, que passa a supervisionar a produção de diversos equipamentos ao mesmo tempo, permitindo também que o operador se afaste da máquina em produção normal [67].

Sistema Puxado: o sistema puxado pode ser exemplificado por meio do conceito que o supermercado utiliza para atender a demanda de produtos que os clientes requerem sem manter estoques assombrosos para cada produto. Em cada prateleira é mantida uma quantidade de mercadoria, para a venda diária, seguindo uma distribuição de probabilidade de vendas, baseada em vendas passadas. As mercadorias retiradas pelos clientes são repostas diariamente pelo repositor. Para o armazém do supermercado, local onde são armazenados os estoques de reposição das prateleiras, são mantidos estoques mínimos, calculados considerando o custo do pedido, o *lead de time* de entrega e o custo unitário dos produtos [51].

No sistema empurrado, o planejamento da produção é feito com base na previsão de demanda e nos estoques disponíveis. Já no sistema *puxado*, o processo final retira as quantidades necessárias do processo precedente num determinado momento e este procedimento é repetido na ordem inversa passando por todos os processos anteriores. O Sistema Toyota de Produção é um sistema puxado, onde o processo subsequente busca os produtos no processo precedente, não sendo este dedicado a apenas um tipo de produto, evitando as trocas de ferramentas com maior frequência [51]. Segundo SHINGO (1996), “A programação baseada no pedido da Toyota tem relação com a demanda real. Quando a demanda aumenta, o mercado da empresa amplia-se. Durante esses períodos, a produção antecipada pode acompanhar a demanda real sem perdas. Mas em condições normais de mercado, a demanda real deve determinar a produção” [67].

Balanceamento das Linhas de Produção: é o ajuste necessário para que a linha de produção e de todo o sistema de manufatura possa produzir o mesmo número de peças em uma determinada unidade de tempo. Por exemplo: uma

linha de produção que monta cilindros pneumáticos consegue fazer a montagem de 1000 cilindros a cada hora e o centro de usinagem contém a mesma capacidade de produção. O balanceamento da linha de produção se refere a técnica utilizada para sincronizar a linha de produção com os seus pares, fornecedores e clientes. [3].

Para fazer o balanceamento da linha de produção, se compara o *takt time* com o tempo de ciclo de cada estação de trabalho. O desbalanceamento ocorre em uma linha de montagem quando se observa uma diferença muitas vezes acentuada entre os tempos de cada processo ou quando se observa uma diferença acentuada entre o *takt time* e o tempo de ciclo de um processo específico [69].

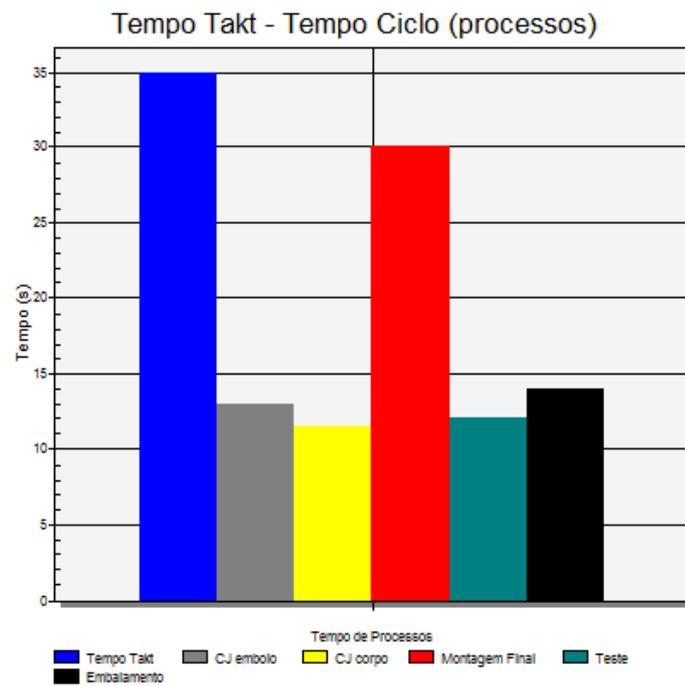


Figura 2.16: Takt time x Tempo de ciclo das estações.

Na Figura 2.16 a coluna azul representa no gráfico o tempo de *takt time* que é comparado com os tempos de ciclos dos processos utilizados para a montagem de um cilindro pneumático. Este gráfico revela muitas diferenças quando se compara os tempos de ciclos dos processos e revela também muita diferença entre o tempo *takt time* e muitos dos tempos de ciclo. Estas observações revelam a necessidade de realizar o balanceamento desta linha de produção.

Um estudo do uso da técnica de balanceamento de linhas de produção na Toyota revelou que a quantidade a ser produzida tem forte influência com o número de pedidos. Assim quando as operações com gargalo não conseguem produzir o necessário para atendimento dos pedidos, é preciso melhorar a capacidade de produção. No entanto é preciso concentrar maiores esforços no balanceamento dos tempos de ciclos para atingir a capacidade de produção do processo como um todo e manter o conceito enxuto [67].

Eliminação de gargalos: a eliminação de gargalos na linha de produção é essencial para o balanceamento dos tempos de ciclo. Assim a Teoria das Restrições (TOC - *Theory of Constraints*) é uma ferramenta apropriada. O método utilizado nesta ferramenta idealiza que existem apenas poucos recursos com restrição de capacidade ou gargalos. Para a eliminação dos gargalos, cria-se na frente dele um pulmão que o protegerá contra as principais interrupções que possam ocorrer dentro de um intervalo predeterminado de tempo, mas o material é liberado para o pulmão no mesmo ritmo com que o recurso com gargalo o consome, mantendo também uma defasagem no tempo equivalente ao planejado para o pulmão. Tudo isto é feito com o objetivo de impedir uma quantidade excessiva de estoque [70].

Fluxo de uma Peça só: o sistema de manufatura que trabalha com produção em lotes tem o seguinte aspecto, as peças a serem processadas ficam aguardando o término da produção do lote precedente. No entanto no fluxo de uma peça só (*One Piece Flow*), as operações são projetadas de forma a possibilitar a transferência de uma peça, em vez de um lote, entre todas as operações. Por exemplo, a substituição do sistema de transporte utilizado em montadoras que faz o transporte de 5 motores, do setor de usinagem para a linha de montagem, por um sistema de transporte rápido, com apenas 1 motor por vez; e assim continuamente com todas as peças, até o final da linha de montagem final [67].

Esta técnica do conceito Manufatura Enxuta tem como objetivo final conseguir um sistema ideal que todos os processos e operações estejam encadeados e sincronizados desde a manufatura da matéria-prima até a montagem final.

Manufatura Celular: a técnica de manufatura celular utiliza uma célula de produção que executa processos de produção agrupados por meio de família de produtos ou operações que seguem a sequência do processo de fabricação.

Estas células têm características como distâncias mínimas entre as estações de trabalho e tempos de ciclos balanceados para formar um processo sincronizado [3].

O planejamento de células de manufatura é uma das principais etapas do projeto de sistemas de manufatura celular, e deve ser planejado de forma que os operadores operem diversas máquinas, tornando o sistema tanto mais flexível como ágil [68]. A manufatura celular tem em destaque vantagens, tais como o uso de vários meios de produção por um único operador, trabalho em equipe nas estações sequenciadas, redução de movimentações e maior utilização de equipamentos [3].

No entanto o uso desta técnica precisa estar em conjunto com algumas melhorias de operações tais como: a clara separação e disposição das peças; alinhamento mais uniforme das peças; e localização definida para as peças, de modo que fiquem ao alcance uma de cada vez [67].

Método anti-falhas: esta técnica do conceito Manufatura Enxuta visa à inspeção tanto de todos os processos executados para fabricar o produto, como em todos os produtos feitos na fábrica, ou seja, tem como objetivo proporcionar ao sistema de manufatura um sistema a prova de falhas garantindo a qualidade de todos os produtos destinados aos clientes e ao setor de inspeção por amostragem aleatória, que por sua vez terá menor esforço e conseqüente menor custo, mas com uma qualidade aceitável [67].

O método anti-falhas é composto por processos denominados de auto-inspeção reforçada, que utiliza dispositivos de detecção física (*poka-yoke*) que executa uma inspeção identificando a existência de defeitos, podendo ser de interrupção ou parada da máquina e processo ou somente de alarme de sinalização da existência dos defeitos [67]. O método similar ao *poka-yoke* é o método *baka-yoke*, que utiliza inovações nos instrumentos e equipamentos a fim de se ter em todas as operações, dispositivos para a prevenção de defeitos, de forma a evitar ou mesmo eliminar a geração de produtos defeituosos [51]:

Segundo SHINGO (1996), “O primeiro passo na escolha e adoção de métodos a prova de falhas é identificar o sistema de inspeção que melhor satisfaz as necessidades de um determinado processo. O passo seguinte é identificar um

dispositivo poka-yoke, de controle ou advertência, que seja capaz de satisfazer a função de inspeção desejada” [67].

Trabalhadores com Múltiplas Habilidades (Multifuncionais): o uso da técnica manufatura celular induz o sistema de manufatura à mudanças tais como, melhorias no *takt time*, tempo de ciclo e a uma quantidade superior de máquinas utilizadas por operador. Portanto a aplicação do conceito Manufatura Enxuta traz mudanças apropriadas aos colaboradores funcionais da empresa, mudanças tais como a necessidade de obter habilidades para supervisionar e operar mais de uma máquina ou ferramenta da produção. Isto exige trabalhadores com múltiplas habilidades para atuar no sistema de manufatura [51].

Com relação a esta técnica SHINGO (1996) menciona que “desde os anos 40, os trabalhadores da Toyota, empresa que deu origem ao Sistema Toyota de produção, não estão vinculados a uma única máquina, mas são responsáveis por 5 ou mais máquinas, alimentando uma, enquanto as outras trabalham automaticamente. E como o Sistema Toyota de Produção não permite a formação de estoques entre os postos de trabalho, irá requerer que os operadores também saibam operar as estações anteriores e posteriores, de forma a ajudar os companheiros quando um colega, por qualquer motivo, ficar atrasando a produção” [67].

Mapeamento do Fluxo de Valor: a técnica mapeamento do fluxo de valor (VSM - *Value Stream Mapping*) permite auxilia na análise de todo o fluxo de produção, desde a demanda do consumidor até a matéria-prima, focando nos processos como um todo e não somente nos processos individuais. Isto possibilitará a eliminação dos desperdícios, com conseqüente criação de valor. Isto contribui com a identificação do tempo gasto ou mesmo meios de produção alocados nas operações que se traduzem em desperdícios, sem criar valor para o cliente [55].

Kaizen: Segundo WOMACK (1992), “*Kaizen* é termo japonês que significa melhoria incremental contínua” [52]. Portanto a técnica *kaizen* promove a melhoria contínua envolvendo toda a estrutura hierárquica da empresa, tais como gerentes e operadores. Esta técnica é envolve o trabalho em equipe formada por colaboradores da empresa com o objetivo de sempre eliminar os desperdícios ou

problemas de produção identificados nos processos executados na empresa. [65].

Melhoria de Arranjo Físico e Sistemas de Transporte: as indústrias de manufatura convivem num ambiente muito competitivo. Portanto é crucial ter a capacidade de oferecer um bom atendimento à demanda de mercado, assim tais empresas passam a necessitar de um aumento na capacidade de produção, e de projetos de expansão. Estes projetos se referem à ampliação de plantas de produção através da aquisição de novos equipamentos ou mesmo ampliação da capacidade das plantas existentes. Portanto, muitas vezes o Arranjo Físico inicial não prevê um aumento de mercado; porém, mesmo fazendo o investimento necessário para a expansão do mesmo, nem sempre isto acontece conforme o previsto anteriormente. Assim o Arranjo Físico não atende devidamente ao propósito ao qual foi planejado para as máquinas, equipamentos e produtos atuais da linha de produção, dificultando a movimentação de produtos acabados ou semi acabados.

E muitos dos aspectos que geram desperdícios no Arranjo Físico, se concentram na movimentação desnecessária de materiais. O fluxo de materiais compõe 45% do custo geral utilizado no ciclo de manufatura e visto que não é uma atividade que agrega valor ao produto, é essencial a otimização do sistema de transporte que faz o fluxo de materiais e das demais áreas do Arranjo Físico. Isto é conseguido por fazer melhorias do Arranjo Físico, reduzindo as distancias entre as operações e por utilizar equipamentos de movimentação adequados, como esteiras, empilhadeiras e pontes rolantes, que irão melhorar o trabalho de transporte [67].

Para garantir a eficiência no planejamento do Arranjo Físico, é necessário um estudo minucioso dos processos de produção, operações, distancias entre elas, fluxo de materiais, equipamentos utilizados, aliado a um bom estudo de viabilidade técnica e econômica e posteriormente um estudo de simulação avaliando as alternativas propostas [3].

3 Objetivos e Metodologia

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo executar um método para analisar o desempenho de Arranjos Físicos para produção por meio da Fábrica Digital e consideração de princípios da Manufatura Enxuta. O método utilizado neste trabalho de pesquisa considerou os requisitos para fazer a análise do Arranjo Físico na fase de planejamento da manufatura, ou seja, sem a possibilidade de utilizar os meios de produção em testes e estudos. Para suprir esta lacuna foram utilizadas as ferramentas da Fábrica Digital e atributos da Manufatura Enxuta para simular virtualmente o comportamento do Arranjo Físico e os meios de produção. Portanto, com a execução deste método, pretende-se avaliar como a Fábrica Digital pode auxiliar na análise de Arranjos Físicos para produção.

Uma visão geral do ciclo de desenvolvimento do produto mostra que a análise do Arranjo Físico é uma atividade realizada na fase de planejamento da produção. Isto indica que esta atividade é realizada antes da planta adquirir meios de produção na manufatura do produto. De modo que a ausência destes meios para a realização de testes pode ser suprida com eficiência pela Fábrica Digital que fornece ferramentas digitais necessárias para analisar os resultados da produção e de possíveis otimizações. Portanto os resultados deste trabalho de pesquisa podem contribuir com o ganho de agilidade e maturidade na atividade de planejamento e validação de um Arranjo Físico.

Para alcançar o objetivo proposto, foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Determinar quais os princípios e técnicas do conceito Manufatura Enxuta que tem uma relevante correlação com o Arranjo Físico para produção.
- Determinar quais as ferramentas do sistema Fábrica Digital escolhido para o método proposto, auxiliarão nos objetivos deste trabalho de pesquisa.
- Elaborar um fluxo para o processo de análise de Arranjos Físicos para produção por meio da Fábrica Digital e Manufatura Enxuta.

3.1 Método de Pesquisa

Para atingir os objetivos citados, foi necessário definir um método para a execução do trabalho de pesquisa. Visando o uso correto dos conceitos aplicados

neste trabalho de pesquisa, este método foi composto por atividades de preparação e atividades de execução. Estas atividades são apresentadas na sequência.

3.1.1 Atividades de Preparação

- realização de uma pesquisa bibliográfica sobre o assunto Fábrica Digital para o aprofundamento no tema e conhecimento do estado da arte da tecnologia presente neste conceito;
- realização de treinamentos específicos nas ferramentas do sistema Fábrica Digital escolhido para obter capacitação necessária para utilização e análise dos *softwares* deste sistema para seu uso na análise de Arranjo Físico;
- realização de uma pesquisa bibliográfica sobre o conceito Manufatura Enxuta com foco no subtema Arranjo Físico visando o aprofundamento no tema e obtenção de conhecimento suficiente para fazer a correlação entre os conceitos Arranjos Físicos de Manufatura Enxuta e Fábrica Digital.

3.1.2 Atividades de execução

A execução do trabalho de pesquisa foi realizada em três fases chamadas de fase de planejamento, fase de construção dos modelos e por último, fase de simulação e análise dos resultados.

A etapa de Planejamento foi composta por meio das seguintes atividades:

- definição dos objetivos e plano geral do Arranjo Físico para produção;
- definição do sistema Fábrica Digital necessário para a construção do modelo de simulação para representação do Arranjo Físico;
- definição dos elementos mais relevantes do Arranjo Físico, tais como; produto, variáveis do processo e meios de produção;

A etapa construção de modelos foi composta por meio das seguintes atividades:

- construção do modelo que representa o processo de produção;
- construção do modelo para simulação e análise de operações;
- construção do modelo para simulação do Arranjo Físico.

A etapa de Simulação e análise de resultados foi composta por meio das seguintes atividades:

- simulações de operações e do comportamento dinâmico de todo o Arranjo Físico para a análise da compatibilidade do Arranjo Físico em relação ao conceito Manufatura Enxuta;
- modificações nos modelos que representam o processo, as operações e o Arranjo Físico. Estas modificações são realizadas até que se obtenha um resultado considerado satisfatório;

4 Desenvolvimento do método proposto para a análise de Arranjos Físicos para Produção

O primeiro passo para o desenvolvimento do método proposto no capítulo anterior foi elaborar o fluxograma chamado Análise de Arranjos Físicos para Produção contendo atividades de execução, tais como, a escolha de um sistema baseado no conceito Fábrica Digital e análise baseado em princípios e técnicas do conceito Manufatura Enxuta.

Num âmbito geral, a execução do método proposto seguiu o fluxograma apresentado na Figura 4.1. Segue abaixo a descrição das atividades deste fluxograma:

1. Definição dos principais elementos do Arranjo Físico, tais como produto, processo de fabricação e recursos de produção utilizados na execução das operações.
2. Definição de metas para o Arranjo Físico a partir das expectativas do mercado alvo do produto selecionado para o trabalho de pesquisa. As expectativas do mercado alvo determinam os valores para volume de produção, custo para manutenção e qualidade do produto e contribui para a seleção de variáveis importantes para o Arranjo Físico, tais como, custo do processo, tempo das operações e a qualidade desejada.
3. Escolha do Sistema Fábrica Digital: escolha baseada no portfólio de ferramentas digitais oferecidas pelos sistemas disponíveis no mercado que atendem aos objetivos do método.
4. Levantamento de dados para o Arranjo Físico: obtenção de dados por meio de uma pesquisa operacional, acadêmica e correlação entre os valores variáveis e invariáveis do Arranjo Físico.
5. Construção do modelo digital do processo: atividade auxiliada por meio das ferramentas do *software* Fábrica Digital escolhido para construir o modelo digital que representa o processo para a fabricação do produto no Arranjo Físico.
6. Construção do modelo digital para simulação das operações: atividade auxiliada por meio dos *softwares* da Fábrica Digital escolhido. As

operações são subclasses do processo descrito na etapa seis e tem como principal função representar por meio de simulações, as operações reais executadas no Arranjo Físico, necessárias para a fabricação do produto.

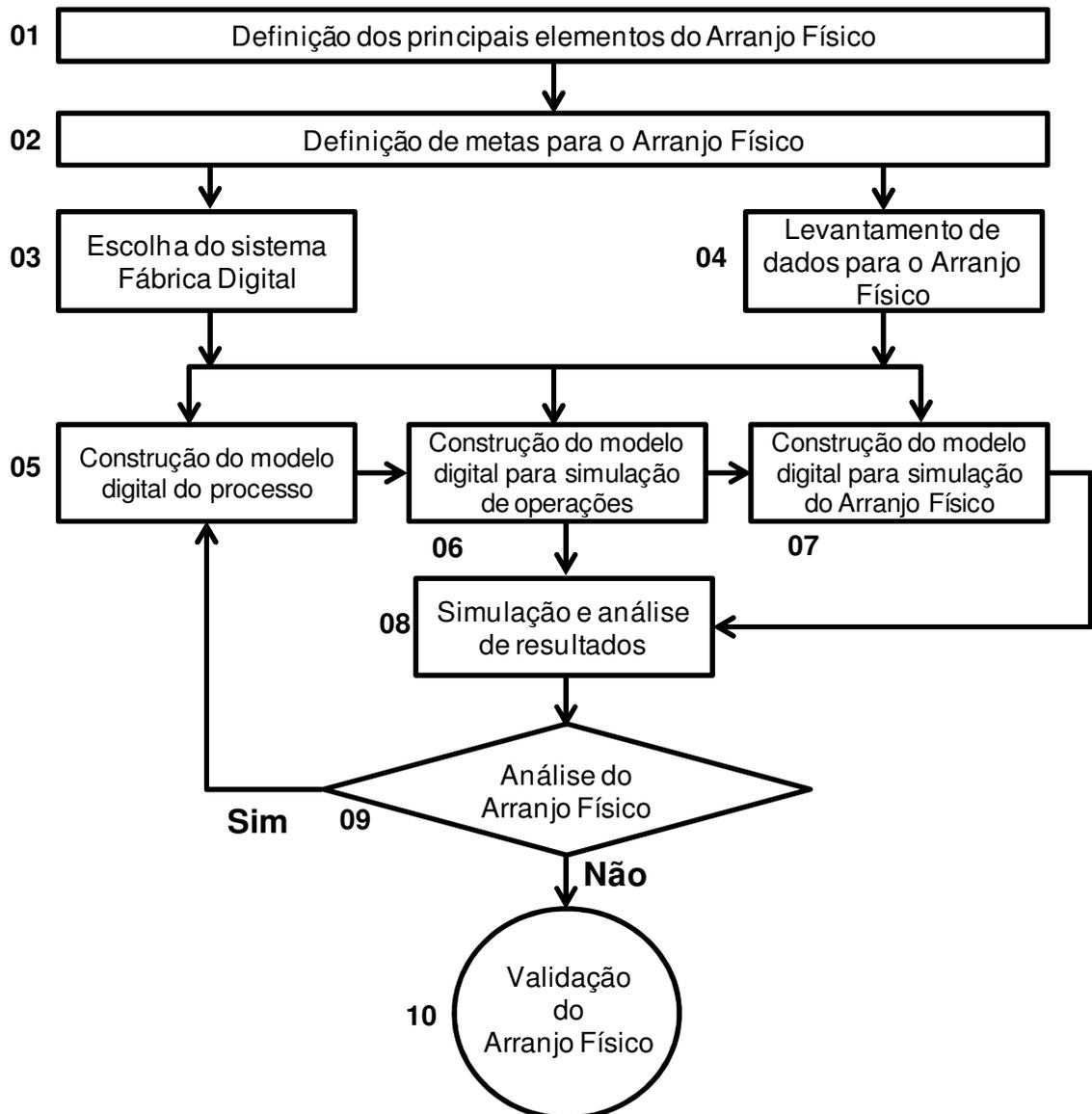


Figura 4.1: Etapas para análise de Arranjos Físicos de Produção (adaptado de [71]).

7. Construção do modelo digital para simulação do Arranjo Físico: atividade auxiliada por meio das ferramentas do *software* Fábrica Digital escolhido. O modelo digital do Arranjo Físico utiliza variáveis do tipo eventos contínuos e do tipo eventos discretos. Este modelo simula o comportamento dinâmico do Arranjo Físico.

8. Simulação e análise de resultados: atividade auxiliada por meio da Fábrica Digital para análise do comportamento dinâmico do Arranjo Físico, o que inclui o fluxo de materiais, utilização dos meios de produção e produtividade.
9. Análise do Arranjo Físico: análise da compatibilidade do Arranjo Físico com relação ao conceito Manufatura Enxuta. Nesta atividade serão utilizados os resultados obtidos nas simulações para fazer a comparação com os princípios enxutos. Enquanto o modelo que representa o Arranjo Físico não apresentar um resultado aceitável, será necessário reconfigurar o modelo e repetir as etapas de cinco a nove até que se obtenha um resultado considerado satisfatório.
10. Validação do Arranjo Físico: confirmar se os resultados do modelo que representa o Arranjo Físico por meio de testes reais. Isto envolve comparar os dados mais recentes entre um Arranjo Físico que foi implantando fisicamente e o modelo construído na Fábrica Digital. Caso seja necessário, acrescentar valores para variáveis de turbulências como eficiência, desgaste e outros eventos discretos de modo que o modelo digital represente o Arranjo Físico real a um nível aceitável de acuracidade para futuros estudos.

4.1 Definição dos principais elementos do Arranjo Físico

A definição de alguns elementos específicos para o Arranjo Físico é um passo fundamental para a concepção sua concepção. Portanto é importante que todas as áreas envolvidas no planejamento do Arranjo Físico estejam cientes de sua responsabilidade e que cada de elemento específico seja gerida pelo departamento mais atuante na área envolvida no planejamento e definição desses elementos.

Para contribuir com a gestão e definição dos principais elementos do Arranjo Físico, a Tabela 4.1 mostra a classificação e as áreas envolvidas na definição de sete destes elementos. A engenharia de produção é a área com maior envolvimento nas decisões tomadas para a definição de todos os elementos, visto que é a responsável pelo planejamento e execução do Arranjo Físico.

Tabela 4.1: Áreas envolvidas no planejamento do Arranjo Físico.

Elementos específicos do Arranjo Físico	Classificação do elemento	Áreas envolvidas
produtos, materiais	produto	engenharia de produto, engenharia de produção, etc..
meios de produção	recursos	engenharia de produção, ergonomia, logística, ergonomia, etc..
processo de fabricação	processos	engenharia de produção, engenharia de produto, logística, ergonomia, planejamento e controle da produção (PCP), etc..
estoques, inventário	produto	engenharia de produção logística, PCP, etc..
sistemas de movimentação	recursos	engenharia de produção, PCP, logística, ergonomia, etc..
fluxo de produção	processos	engenharia de produção, PCP, logística, etc..
espaço físico	recursos	engenharia de produção, ergonomia, arquitetura, etc..

Os elementos específicos citados na tabela foram classificados na segunda coluna em três classes; produto, recursos e processos. A classe produto se refere a tudo que é entregue ao cliente final, ou seja, o valor produzido para o cliente. A classe recursos se refere a tudo que é utilizado para produzir valor para o cliente final. Estes recursos podem ser bens físicos como, por exemplo, uma estação de trabalho utilizada na produção ou não necessariamente físico como, por exemplo, um *software* utilizado no projeto digital do produto. A classe processos se refere às atividades ou serviços executados com os meios especificados para a construção do produto.

4.1.1 Produto – definição para o Arranjo Físico

O produto é o elemento mais importante do Arranjo Físico, pois nele estão concentrados todos os esforços presente em um sistema produtivo. Na literatura acadêmica o produto é definido como tudo que pode ser oferecido ao mercado para satisfazer uma necessidade ou um desejo. Os produtos comercializados podem ser do tipo físico, serviços, propriedades territoriais ou informações [65].

Para manter o foco deste trabalho de pesquisa no objetivo proposto no capítulo anterior, foi escolhido um produto que utiliza um processo de fabricação simples e que apresenta características que satisfaz as necessidades do método proposto.

Assim o produto escolhido para este trabalho de pesquisa foi o cilindro pneumático que atende a norma ISO 6431.

Os dados do produto escolhido foram definidos com o apoio do *Center for industrial Productivity (CiP)* do *Institute of Production Management, Technology and Machine Tools (PTW)*, que pertence a Universidade Técnica de Darmstadt (*Technische Universität Darmstadt*) na Alemanha e são apresentados na Figura 4.2.

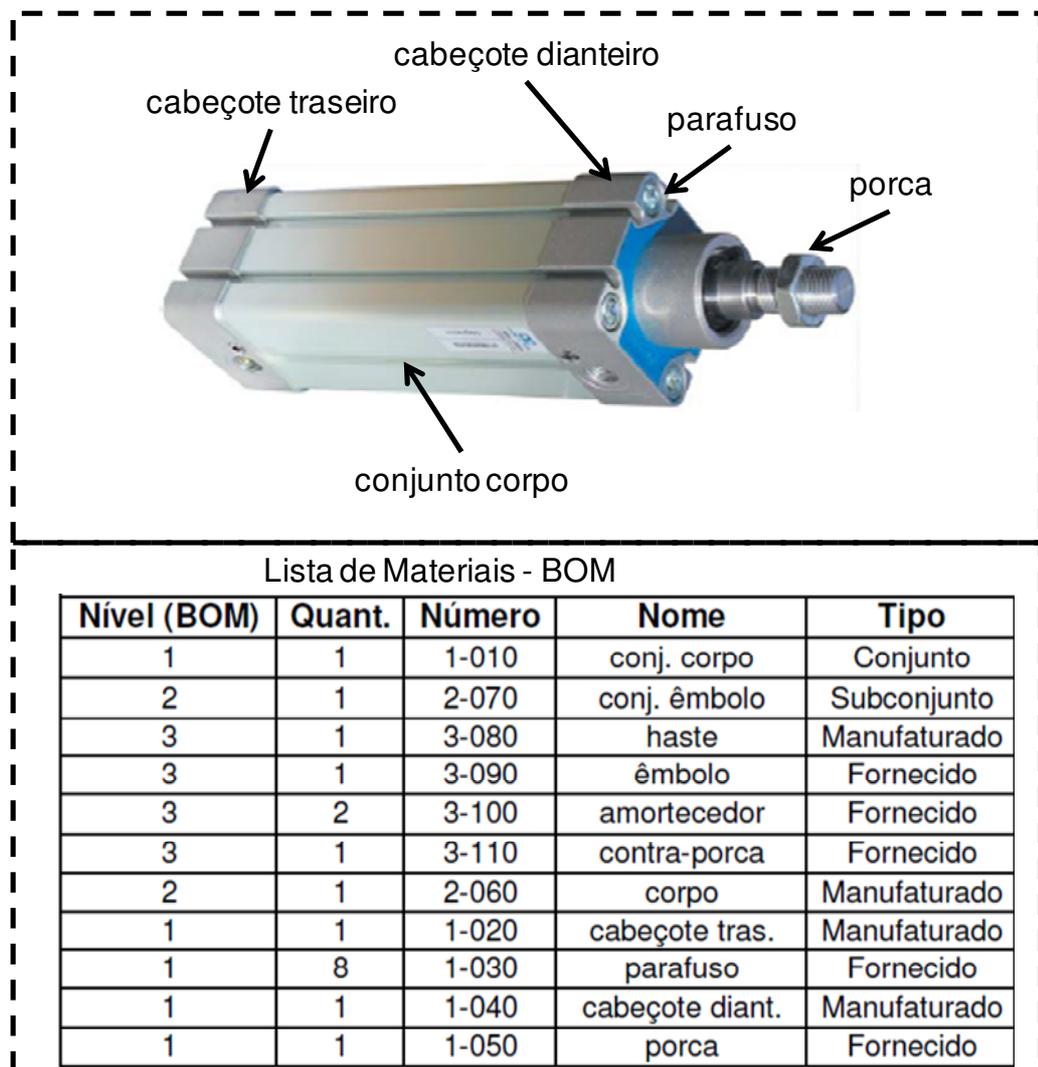


Figura 4.2: Cilindro Pneumático ISO 6431 (Fonte: PTW).

Os componentes que compõe este produto são distribuídos em três níveis na lista de materiais (BOM – *Bill of Materials*): o primeiro nível é composto de componentes do tipo conjunto, manufaturado e fornecido, são utilizados na

montagem final do cilindro pneumático, o segundo nível composto de componentes do tipo subconjunto e manufaturado são utilizados na montagem do conjunto para o primeiro nível, o terceiro nível composto de componentes do tipo manufaturado e fornecido, são utilizados na montagem do subconjunto para o segundo nível.

A montagem final do cilindro pneumático é composta por cinco componentes denominados cabeçote traseiro, parafuso, cabeçote dianteiro, porca e conjunto corpo. Este último é um conjunto composto por dois componentes denominados corpo e conjunto êmbolo. Este último é um conjunto composto por quatro componentes denominados haste, êmbolo, amortecedor e contra-porca.

Portanto o Arranjo Físico para a montagem do produto escolhido precisa contemplar em seu espaço, os locais diferentes para estocar nove peças e dois conjuntos definidos neste subtópico. Os tamanhos destes locais são estipulados conforme as dimensões das peças ou conjuntos e suas respectivas quantidades utilizadas no processo de montagem conforme mostra a coluna quantidade.

4.1.2 Processos - definição para o Arranjo Físico

A correta definição do processo de fabricação, assim como os demais elementos do Arranjo Físico permite a redução dos custos de movimentação e a simplificação do processo. Como resultado é possível minimizar o tamanho do fluxo de material. O pensamento enxuto define que a melhor movimentação de material é quando o material não tem a necessidade de ser movimentado, mas para conseguir o melhor fluxo de material o Arranjo Físico precisa ter as seguintes características [70]:

- menor distância possível no fluxo de material de uma estação de trabalho para outra ou durante a execução das operações;
- fluxo unidirecional com um mínimo de retorno ou cruzamento de dois fluxos em uma mesma estação de trabalho;
- fluxo de material dentro do Arranjo Físico com perfil mais simplificado possível.

O Processo de fabricação para o cilindro pneumático foi disponibilizado pelo *Center for industrial Productivity (CiP)* do *Institute of Production Management*,

Technology and Machine Tools (PTW), que pertence a Universidade Técnica de Darmstadt (*Technische Universität Darmstadt*), Alemanha e são apresentados a seguir as operações necessárias para a montagem do produto.

A fabricação do cilindro é composta por três processos de montagem denominados: montagem do conjunto êmbolo, montagem do conjunto corpo e montagem do cilindro. Após a montagem final o cilindro passa por mais dois processos o teste e por último o empacotamento. Os cinco processos citados são compostos por quinze operações de montagem, cinco operações de teste, duas operações de empacotamento e nove atividades de carregamento e descarregamento entre as estações de trabalho. A fim de detalhar o planejamento de processo de fabricação, segue em sequência a descrição de todos os processos.

O processo para montagem do conjunto êmbolo é composto de seis operações conforme mostra a Figura 4.3. Este conjunto de operações leva um tempo aproximado de 13 segundos, quando executado na sequência convencional e com o apoio de um dispositivo convencional.

Nº	Operação	Operações (imagens ilustrativas)
Processo:	Montagem do conjunto êmbolo	
Op.010	Fixar haste	
op.020	Posicionar amortecedor tras.	
Op.030	Posicionar êmbolo	
Op.040	Montar contra-porca e amortecedor diant	
Op.050	Posicionar Cj na haste	
Op.060	Rosquear contra-porca Descarregar conjunto	

Figura 4.3: Montagem do conjunto êmbolo

O processo para montagem do conjunto corpo é composto de duas operações conforme mostra a Figura 4.4. Este conjunto de operações leva um tempo aproximado de 11,5 segundos, quando executado na sequência convencional e com o apoio de um dispositivo convencional.

Processo:	Montagem do conjunto corpo	
	Carregar conjunto	
Op.070	Fixar Cj êmbolo	
Op.080	Montar Cj êmbolo e corpo	
	Descarregar conjunto	

Figura 4.4: Montagem do conjunto corpo

O processo para montagem final do cilindro é composto de sete operações conforme mostra a Figura 4.5. Este conjunto de operações leva um tempo aproximado de 90 segundos, quando executado na sequência convencional e com o apoio de um dispositivo convencional.

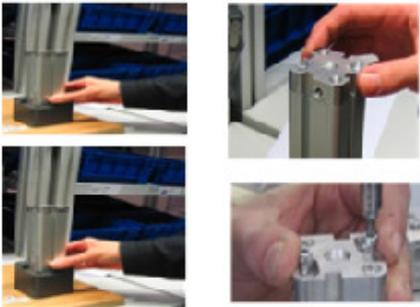
Processo:	Montagem do cilindro	
	Carregar conjunto	
Op.090	Fixar o Cj Corpo	
op.100	Posicionar o cabe cote tras.	
Op.110	Rosquear parafusos	
Op.120	Fixar Cj no Dispositivo 2	
Op.130	Posicionar cabecote diant.	
Op.140	Rosquear parafusos	
Op.150	Rosquear porca na Haste	
	Descarregar cilindro	

Figura 4.5: Montagem final do cilindro

O processo para o teste cilindro é composto de seis operações conforme mostra a Figura 4.6. Este conjunto de operações leva um tempo aproximado de 12 segundos, quando executado na sequência convencional e com o apoio de um dispositivo convencional.

Processo:	Teste do cilindro	
	Carregar cilindro	
Op.160	Posicionar cilindro	
op.170	Conectar plugues	
Op.180	Realizar teste	
Op.190	Desconectar plugues	
	Descarregar cilindro	

Figura 4.6: Teste do cilindro

O processo para empacotamento cilindro é composto de duas operações conforme mostra a Figura 4.7. Este conjunto de operações leva um tempo

aproximado de 14 segundos, quando executado na sequência convencional e com o apoio de um dispositivo convencional.

Processo:	Empacotamento	
	Carregar cilindro	
Op.200	Posicionar cilindro	
op.210	Fechar embalagem	
	Descarregar cilindro	

Figura 4.7: Empacotamento do cilindro

4.1.3 Recursos - definição para o Arranjo Físico

Visto que o planejamento do Arranjo Físico visa definir a localização de todos os meios de produção necessários para fabricar o produto com os valores exigidos pelo cliente, a definição dos recursos de produção está diretamente relacionada com o planejamento do Arranjo Físico.

Portanto a configuração do espaço físico e a definição dos meios de produção para o Arranjo Físico precisam de cuidadosa atenção pelos responsáveis envolvidos, antes da implantação física destes, pois existem muitas razões para que o Arranjo Físico não seja alterado constantemente. Entre algumas destas razões estão às dificuldades de tempo de parada para mudanças, perda de produção e custos. Para reduzir a necessidade de constantes alterações é necessário fazer a definição correta da configuração do espaço físico e dos meios de produção que serão alocados no Arranjo Físico [3].

Os meios de produção são definidos para atender todas as necessidades das operações necessárias para fabricar o produto. Conforme descrito no anteriormente, para a fabricação do cilindro pneumático, estas operações foram agrupadas em três processos de montagem, um processo de teste e um processo de empacotamento. Os principais meios de produção definidos para estes processos são descritos a seguir.

Os meios de produção definidos para o processo de montagem do conjunto êmbolo foram: estação de trabalho, parafusadeira, caixa para armazenar os componentes e o dispositivo para fixação e montagem do êmbolo com a haste (Figura 4.8).

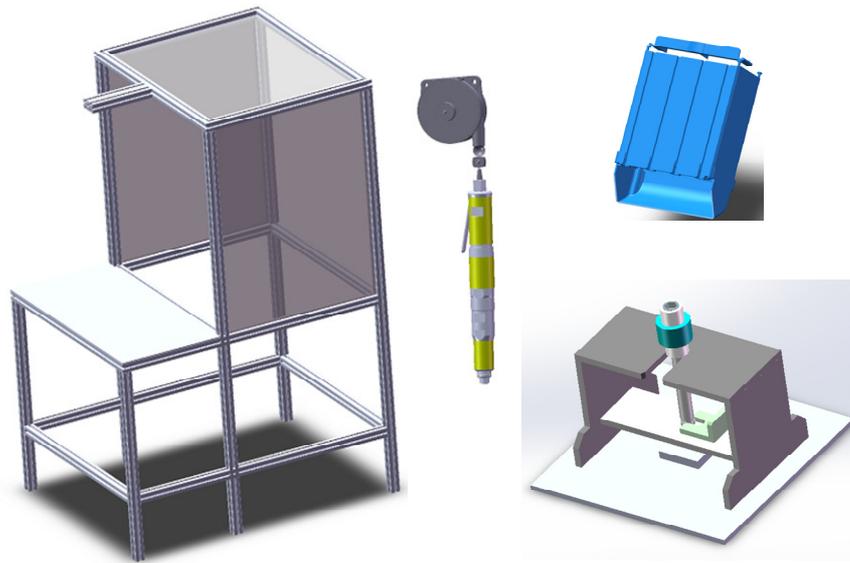


Figura 4.8: Meios para montagem do conjunto êmbolo

Os meios de produção definidos para o processo de montagem do conjunto corpo foram: estação de trabalho, parafusadeira, caixa para armazenar os componentes e o dispositivo para fixação e corpo com o conjunto êmbolo (Figura 4.9).

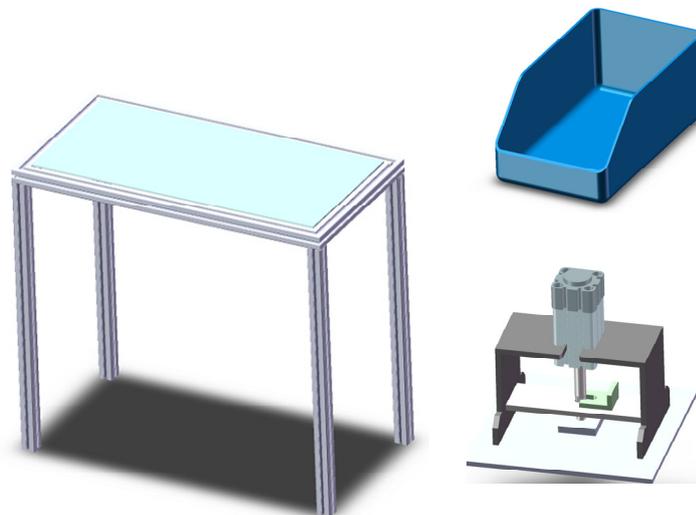


Figura 4.9: Meios para montagem do conjunto corpo

Os meios de produção definidos para o processo de montagem final do cilindro foram: estação de trabalho, parafusadeira, caixa para armazenar os componentes e o dispositivo para fixação conjunto corpo com os demais componentes (Figura 4.10).

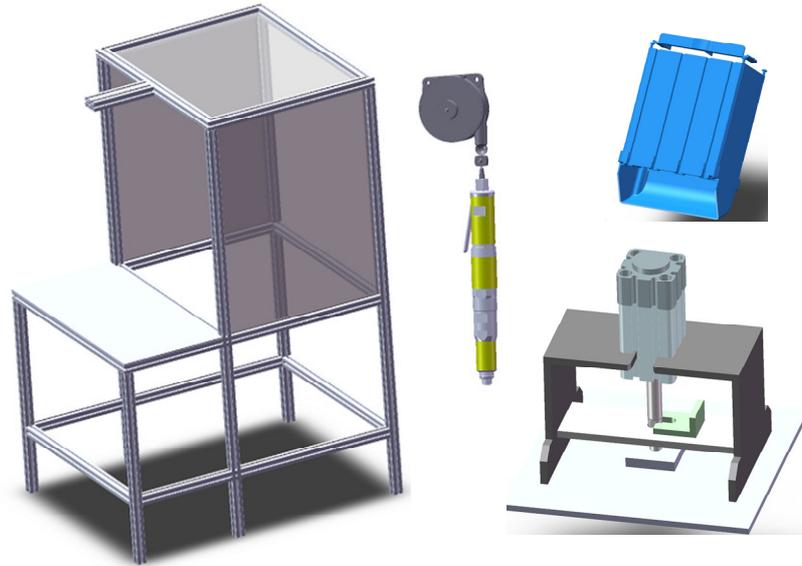


Figura 4.10: Meios para montagem final do cilindro

Os meios de produção definidos para o processo de teste do cilindro foram: estação de trabalho, equipamento de teste e dispositivo para fixação do cilindro (Figura 4.11).

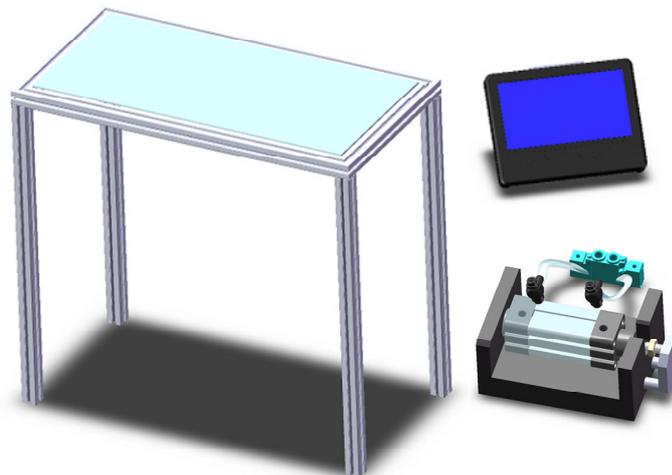


Figura 4.11: Meios para teste do cilindro

Os meios de produção definidos para o processo de teste do cilindro foram: estação de trabalho, equipamento de empacotamento e impressora zebra (Figura 4.12).

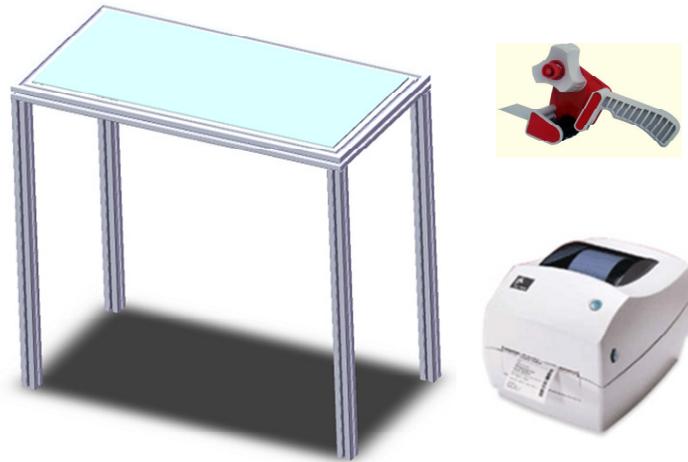


Figura 4.12: Meios para empacotamento do cilindro

4.1.4 Recursos – tipos de configurações para o Arranjo Físico

Todos os meios de produção descritos são organizados por meio da Configuração do Espaço Físico, que deriva-se de um tipo básico de configuração, muitas vezes chamado pela literatura de forma básica de Arranjo Físico. Este tipo básico de configuração visa organizar os meios de produção seguindo métodos de organização aplicados com sucesso em casos reais. Estes tipos básicos de configuração podem ser resumidos nos quatro tipos, citados a seguir [3]:

- por processo, este tipo de configuração também é conhecido por *job shop* e funcional. Os meios de produção ficam agrupados funcionalmente, de acordo com o tipo geral de processo de manufatura, como tornos em um departamento, furadeiras em outro e assim por diante;
- por produto, este tipo de configuração também é conhecido como *flow shop*, os meios de produção são organizados de acordo com a sequência de operações do produto;
- celular, nesta configuração o Arranjo Físico é composto por células de manufatura e/ou de montagem numa sequência que minimiza a movimentação de materiais;
- posição fixa, se trata de caso especial onde o produto permanece numa posição fixa devido o seu formato ou peso.

Entre as configurações citadas, a mais utilizada para processos de montagem, como é o caso deste trabalho de pesquisa é a configuração celular. No entanto,

num ambiente com um número muito grande e variado de peças, a aplicação da configuração celular torna-se praticamente inviável. Outro fator que inviabiliza a utilização do conceito de configuração celular é o ambiente que tem a necessidade de duplicação ou multiplicação dos meios de produção.

Quando é necessária a duplicação ou multiplicação de uma estação de trabalho se torna mais viável utilizar uma configuração híbrida, ou seja, um Arranjo Físico que utiliza dois ou mais tipos de configurações básicas para definir a formato de seu Espaço Físico de modo que os problemas sejam minimizados, pois não existem padrões sobre a aplicação exclusiva de uma configuração para uma linha de produto ou tipos de processos.

4.1.5 Recursos - propostas de configurações para o Arranjo Físico

Neste trabalho de pesquisa foi elaborado dois Arranjos Físicos para executar a fabricação do produto cilindro pneumático ISO 6431 e realizar a análise com uso conceito Fábrica Digital e Manufatura Enxuta. O formato destes Arranjos Físicos foi definido a partir de duas configurações de Espaço Físico e foram identificados como Arranjo Físico modelo 1 e Arranjo Físico modelo 2. A Figura 4.13 mostra o modelo 1, que foi modelado com o auxílio do sistema CAD e Ferramentas do Sistema Fábrica Digital.

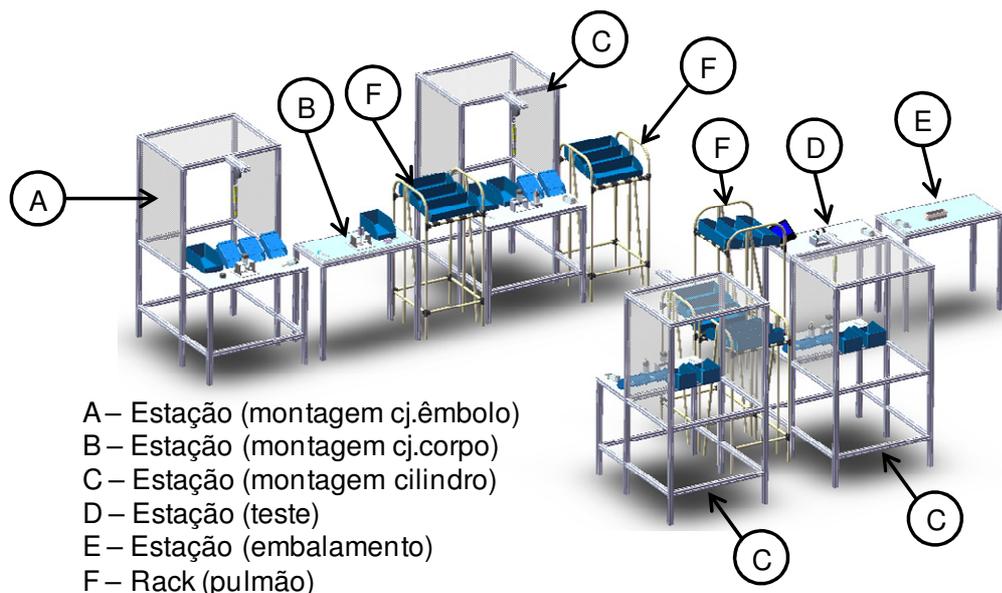


Figura 4.13: Arranjo Físico modelo 1.

A proposta de Arranjo Físico modelo 1 contém 7 estações de trabalho, identificadas com as letras A, B, C, D e E. Esta proposta também contém 5 inventários identificados com a letra F e tem a capacidade de produzir o cilindro pneumático ISO 6431 com a colaboração de 7 operadores.

Tabela 4.2: Recursos e operações para o Arranjo Físico modelo 1

Recurso	Processo	Recurso	Processo
A	Montagem êmbolo	C	Montagem cilindro3
B	Montagem corpo	C	Armazenagem4
F	Armazenagem1	F	Armazenagem5
F	Armazenagem2	D	Teste
C	Montagem cilindro1	E	Empacotamento
F	Armazenagem3		
C	Montagem cilindro2		

A Figura 4.14 mostra o modelo 2, que também foi modelado com o auxílio do sistema CAD e Ferramentas do Sistema Fábrica Digital.

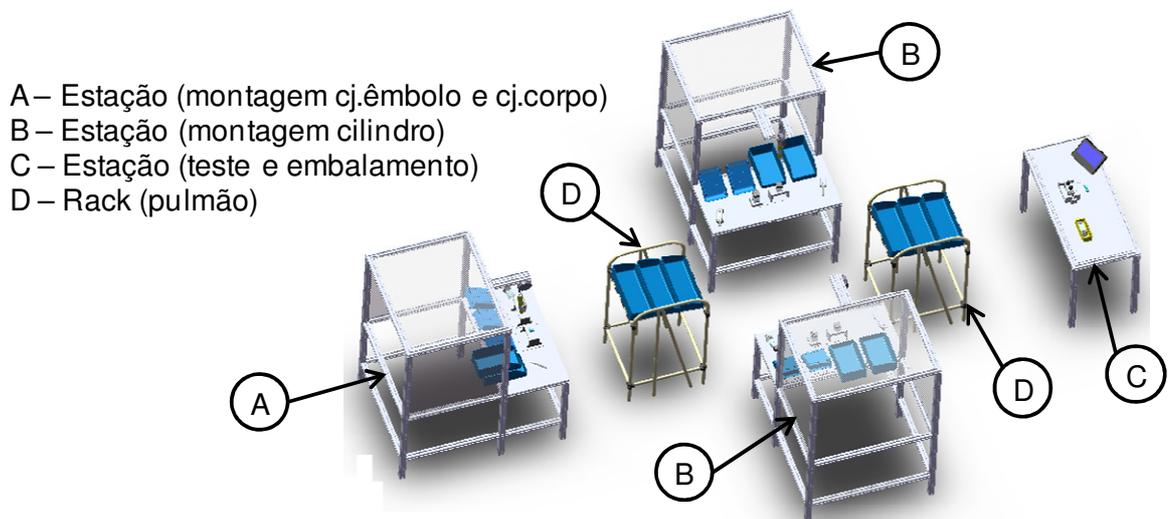


Figura 4.14: Arranjo Físico modelo 2.

A proposta de Arranjo Físico modelo 2 contém 4 estações de trabalho, identificadas com as letras A, B e C. Esta proposta também contém 2 inventários identificados com a letra D e tem a capacidade de produzir o cilindro pneumático ISO 6431 com a colaboração de 4 operadores.

A relação criada entre os principais elementos do Arranjo Físico, tais como produto, processo, meios de produção e o fluxo de material presente entre estes, serão debatidos detalhadamente nos próximos tópicos deste trabalho de pesquisa que descreve o fluxo das atividades de construção dos modelos digitais do Arranjo Físico.

Tabela 4.3: Recursos e operações para o Arranjo Físico modelo 2

Recurso	Processo		Recurso	Processo
A	Montagem êmbolo+corpo		D	Armazenagem2
D	Armazenagem1		C	Teste+empacotamento
B	Montagem cilindro1			
B	Montagem cilindro2			

4.2 Definição de metas para o Arranjo Físico

O Arranjo Físico assim como todo o Sistema de Manufatura, têm como principal função fazer produtos que atendam as expectativas do cliente com o menor custo possível. Portanto, as metas do Arranjo Físico precisam ter uma forte ligação com as metas do Sistema de Manufatura no que tange ao produto, ao processo e aos meios de produção.

Os fabricantes de produto ou portfólio de produtos do mesmo setor manufatureiro que o cilindro pneumático ISO 6431 tem um Sistema de Manufatura com as seguintes características; pertencem ao setor de mercado secundário, ou seja, seus clientes produzem para o setor terciário os chamados consumidores finais de bens e serviços; seu portfólio de produtos é composto em grande escala por produtos padronizados, o que permite terem preços atrativos, processos de manufatura eficazes o suficiente para atender a demanda e a uma considerável redução de desperdícios por meio um Sistema de Manufatura puxada por ordens de produção.

Portanto o Arranjo Físico planejado para a Fabricação do produto cilindro pneumático que atende a norma ISO 6431 precisa atingir as seguintes metas:

- Nível de qualidade compatível com a exigência do cliente classificado como cliente do mercado secundário.

- Flexibilidade necessária para atender a um mix de produtos classificado como padronizados.
- Produção com mínimo de desperdício para atender ao custo de produção necessário na fabricação de produtos classificado como produto com preço atrativo.
- Eficácia no balanceamento de produção. Neste trabalho de pesquisa o sistema de produção foi classificado como Sistema de Manufatura puxada por ordens de produção.

4.3 Escolha do Sistema Fábrica Digital

A Fábrica Digital é um conceito baseado em inovações tecnológicas da área de tecnologia de simulação computacional. É uma ferramenta que auxilia no planejamento de processo de fabricação e tem ampla aplicação no ciclo de desenvolvimento de produtos de indústrias dos setores automobilístico, aeroespacial, eletrônico e outros setores que consideram de grande importância a otimização da produtividade na fase do planejamento de processos de fabricação.

Conforme discutido no capítulo 2, a tecnologia presente no conceito Fábrica Digital é disponibilizada no mercado por dois fornecedores, a Dassault Systèmes que possui o sistema Delmia V5 e a Siemens PLM que possui o sistema Tecnomatix. O sistema Tecnomatix, da Siemens PLM oferece aos usuários tecnologias que auxiliam tanto na gestão como nas atividades presentes no ciclo de desenvolvimento de produto, desde as atividades do projeto de produto até as atividades de planejamento e otimização da produção, seja esta planejada com recursos humanos, mecânicos ou meios de produção robotizados e sincronizados.

O sistema Tecnomatix permite analisar o comportamento dinâmico do Arranjo Físico digital por meio de uma representação gráfica em 3D. A tecnologia presente neste sistema auxilia na integração entre as entidades e modelos que representam as informações reais dos meios de produção, produtos e processos presentes no Arranjo que se deseja analisar. A partir das informações citadas, optou-se por utilizar o Tecnomatix como sistema e tecnologia para o conceito Fábrica Digital deste trabalho de pesquisa.

Sendo assim, o sistema Tecnomatix proporcionou à este trabalho de pesquisa ferramentas para auxiliar de forma ampla as atividades de planejamento e análise do Arranjo Físico. Entre os *softwares* que compõe o sistema Tecnomatix, optou-se por utilizar nesse trabalho de pesquisa os *softwares Process Designer, Process Simulate e Plant Simulation*. Estes *softwares* disponibilizam ferramentas individuais e integradas que auxiliaram em todo o fluxo de atividades propostas nesse trabalho de pesquisa.

4.4 Levantamento de dados para o Arranjo Físico

Como são definidos os valores exatos para a quantidade de máquinas, recursos humanos e tempo necessário para fabricação de um produto no Arranjo Físico? Estes valores exatos são calculados por meio das variáveis que compõe os dados para o Arranjo Físico. As variáveis são Jornada de trabalho (J_t , horas); Tempo de intervalo (T_i ; horas) e Demanda de produtos (D_p , unidades de produtos por dia).

A variável Jornada de trabalho para empresas que não utilizam o regimento de turnos é de 44 horas semanais sem somar o intervalo para refeição de 1 hora por dia conforme leis trabalhistas, ou seja, 9 horas e 48 minutos por dia para a condição de 5 dias de trabalho por semana. Neste caso o Horário de início para o Arranjo Físico é as 07:00 [h:min.] e Horário de término é as 16:48 [h:min.] nos 5 dias da semana. Assim a variável jornada de trabalho é calculada conforme mostra a Equação 1.

$$1) \text{ Jornada de trabalho } (J_t) = (th)\text{Horário de Término} - (ih)\text{Horário de Início } [h]$$

$$(ih) : 07:00 [h:min.]; (th): 16:48 [h:min.]$$

$$\therefore J_t = 16:48 [h] - 7:00 [h] = 9:48 [h]$$

O tempo de intervalo por dia conforme Lei Trabalhista é de 1 hora para refeição, 15 minutos para café da manhã e 15 minutos para café da tarde. Assim a variável Intervalo é calculada conforme mostra a Equação 2.

$$2) \text{ Intervalos } (i) = \sum_{i=n} \dot{i}$$

$$n1 = 1:00 [h], n2 = 0:15 [h], n3 = 0:15$$

$$.: i = 0:15 [h:min.] + 1:00 [h:min.] + 0:15 [h:min.] = 1:30 [h:min.]$$

Portanto a somatória de todos os tempos de intervalos totalizam o valor de intervalo por dia (Ti) igual a 1:30 [h:min.].

A variável Tempo de trabalho por dia (Td) é o resultado do cálculo que utiliza o valor atribuído para a Jornada de trabalho subtraindo o valor atribuído para a somatória de Intervalos. Assim a variável Tempo de trabalho é calculada conforme mostra a Equação 3.

$$3) \text{ Tempo de trabalho por dia } (Td) = Jt - i [s]$$

$$.: Td = 9:48 [h:min.] - 1:30 [h:min.] = 8:33 [h:min.]$$

$$.: 8:33 [h:min.] = 8 [h] * 60 * 60 + 33 [min] * 60$$

$$.: 28800 [s] + 1980 [s]$$

$$.: Td = 30780 [s]$$

A variável Demanda de produtos por semana (Dps) atribuída para o Arranjo Físico é de 4400 unidades. Assim a Demanda de produtos por dia (Dp) é a distribuição da Demanda de produtos por semana entre os 5 dias trabalhados no Arranjo Físico por semana conforme mostra a Equação 4.

$$4) \text{ Demanda de produtos por dia } (Dp) = Dps / ds [unid./dia]$$

$$.: Dp = 4400 [unid.] / 5 [dias]$$

$$.: 880 = [unid./dia]$$

Conforme descrito no capítulo 2, *takt time* é o ritmo de produção necessário para o Arranjo Físico atender a demanda do mercado [3]. Esta variável é atribuída por meio da variável Tempo de trabalho por dia (Td) e variável Demanda de produtos por dia (Dp) conforme mostra a Equação 5.

$$5) \text{ Takt time} = Td [s] / Dp [un.]$$

$$.: \text{ Takt time} = 30780 [s] / 880 [unid.]$$

$$.: 34,98 [s/unid.]$$

4.4.1 Arranjo Físico modelo 1 - tempo das operações

Conforme descrito no capítulo 2, o tempo de ciclo é o termo utilizado para representar a grandeza que define a o tempo de duração de uma operação, ou seja, o período transcorrido durante a repetição de uma mesma operação, indicando o tempo de início e do fim de uma operação [52].

Com o valor atribuído anteriormente ao *takt time* é possível analisar o tempo de ciclo das operações. Quando existe mais de uma estação de trabalho para realizar a mesma operação, a análise do *takt time* pode ser feita por meio do tempo de ciclo médio (T_c médio). O T_c médio é o tempo médio das operações que são realizadas com 2 ou mais recursos. Em todos os casos a análise do *takt time* é feita por considerar que o tempo de ciclo e quando é o caso, o tempo de ciclo médio tem que ser próximos do *takt time* atribuído para o produto, conforme mostra a Equação 6.

$$6) \text{ Takt time} \cong T_c \cong T_c \cong T_c \text{ médio}$$

A Tabela 4.4 mostra o T_c e T_c médio para os processos organizados no Arranjo Físico modelo 1. Assim esta tabela fornece os dados necessários para analisar o *takt time* e calcular o *Lead time* para o Arranjo Físico modelo 1

Tabela 4.4: Tempo – processos do Arranjo Físico – modelo 1

Sequência	Quant. de estações	Processo	T_c [s]	T_c médio [s]
A	1	Montagem do êmbolo	13	
B	1	Montagem do conj. corpo	11,5	
		Armazenagem do conj. corpo	2	
C	3	Montagem cilindro	90,2	30,07
		Armazenagem do cilindro	2	
D	1	Teste	12	
E	1	Empacotamento	14	

Conforme descrito no capítulo 2 o *Lead time* representa o tempo total necessário para produzir um produto. Esta variável é calculada com a somatória dos tempos de ciclo, ou seja, é o tempo contado a partir do momento em que a matéria-prima

chega à fábrica até o momento em que o respectivo produto final sai da fábrica [3]. Este cálculo é mostrado na Equação 7.

$$7) \text{ Lead time} = \sum_{Tc=Tc} \dot{i} \text{ [s]}$$

$$\therefore \text{ Lead time} = 13 + 11,5 + 2 + 90,2 + 2 + 12 + 14$$

$$\therefore = 144,7 \text{ [s]}$$

4.4.2 Arranjo Físico modelo 2 - tempo das operações

A Tabela 4.5 mostra o Tc e Tc médio para os processos organizados no Arranjo Físico modelo 2. Esta tabela fornece os dados necessários para analisar o *takt time* e calcular o *Lead time* para o Arranjo Físico modelo 1

Tabela 4.5: Tempo – processos do Arranjo Físico – modelo 2

Sequência	Quant. de estações	Processo	Tc [s]	Tc médio [s]
A	1	Montagem do êmbolo+corpo	34,5	
		Armazenagem do conj. Êmbolo+corpo	2	
B	2	Montagem cilindro	70	36
		Armazenagem do cilindro	2	
C	1	Teste+Empacotamento	23	

O *Lead time* do Arranjo Físico modelo 2 foi calculado com a somatória dos tempos de ciclo conforme mostrado na Equação 7 e descrito abaixo.

$$\therefore \text{ Lead time} = 34,5 + 2 + 70 + 2 + 23$$

$$\therefore = 131,5 \text{ [s]}$$

4.5 Construção do modelo digital do processo

O *Process Designer* é um *software* apropriado para realizar a construção de modelos digitais do processo de fabricação. As atividades de planejamento do processo de fabricação podem ser feitas com auxílio do *Process Designer*, por meio de uma visualização gráfica que pode ser reconfigurada para cada etapa de criação do modelo digital. Os principais elementos da *visualização gráfica* deste

software são denominados menus, janela de estruturas, janela de propriedades e visualização gráfica, como mostra a Figura 4.15.

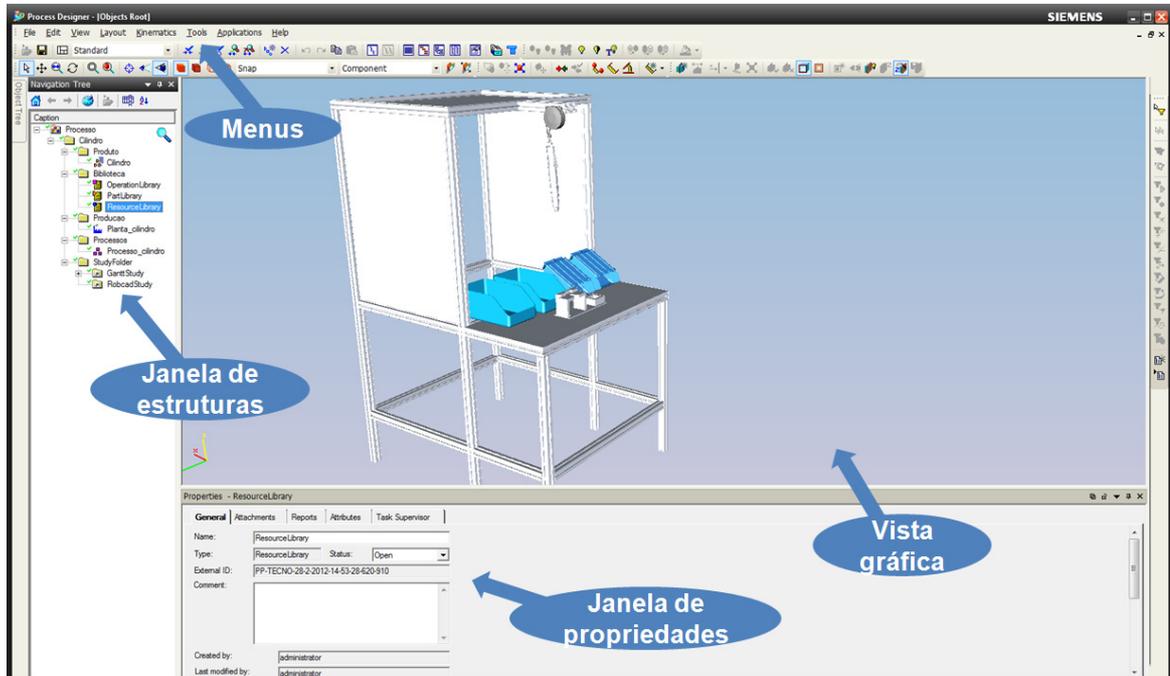


Figura 4.15: Visualização gráfica do Process Designer.

O *Process Designer* auxilia na construção do cenário digital do processo de fabricação, este cenário é utilizado para fazer o planejamento e análise do Arranjo Físico. No entanto a construção dos modelos geométricos 3D para representar os respectivos objetos no *Process Designer* é feito com o auxílio do sistema CAD NX versão 7.5.

Com os modelos geométricos 3D prontos, é possível fazer a conversão dos arquivos que contém estes modelos de um formato nativo do sistema CAD para a extensão *.jt. Esta extensão pode ser importada para o modelo digital do processo de fabricação no *Process Designer* para fornecer uma representação gráfica em 3D dos objetos que representam os produtos e meios de produção conforme mostra a Figura 4.16.

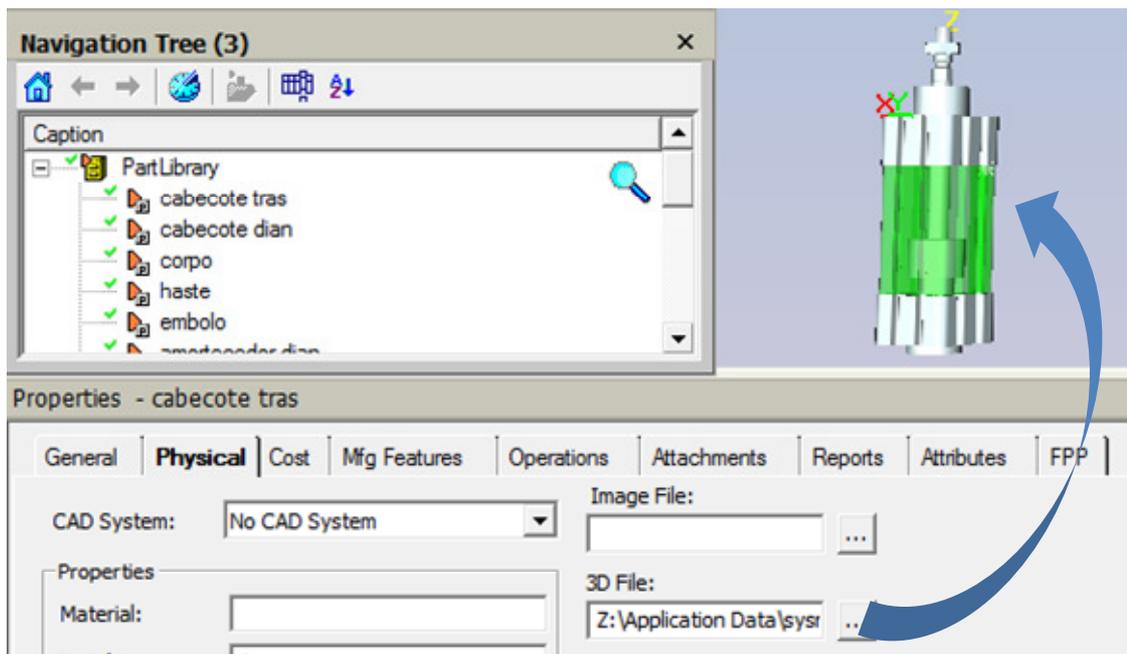


Figura 4.16: Process Designer – importação de modelos geométricos CAD.

Depois de importar os respectivos modelos geométricos é preciso referenciá-los aos tipos de objetos correspondentes a sua representação. Alguns dos objetos referenciados foram os produtos e seus componentes, as operações e os meios de produção.

No *Process Designer* estes objetos são organizados e armazenados em bibliotecas de produtos, bibliotecas de operações e bibliotecas de meios de produção a fim de facilitar a construção de futuros modelos com auxílio de bibliotecas (Figura 4.17).

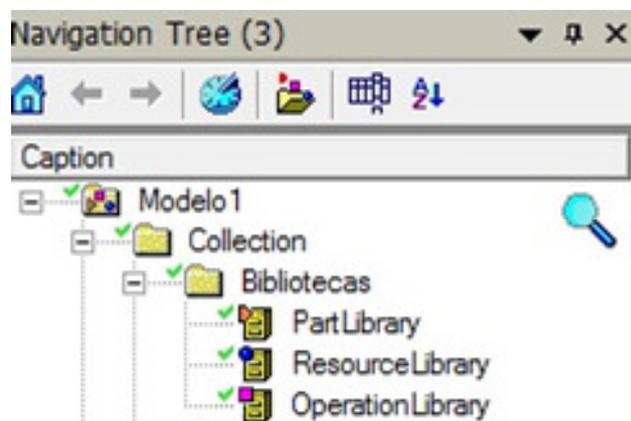


Figura 4.17: Process Designer – bibliotecas de objetos.

Portanto, embora seja necessário construir o modelo geométrico com o auxílio de sistemas CAD, as ferramentas presentes no *Process Designer* auxiliam na criação destas bibliotecas.

4.5.1 Fluxo de atividades para construção do modelo digital do processo

A construção do modelo digital do processo de fabricação no *Process Designer* segue o seguinte fluxo:

- Construção da estrutura ou árvore de componentes que formam o produto, também chamada de EBOM (Figura 4.18).

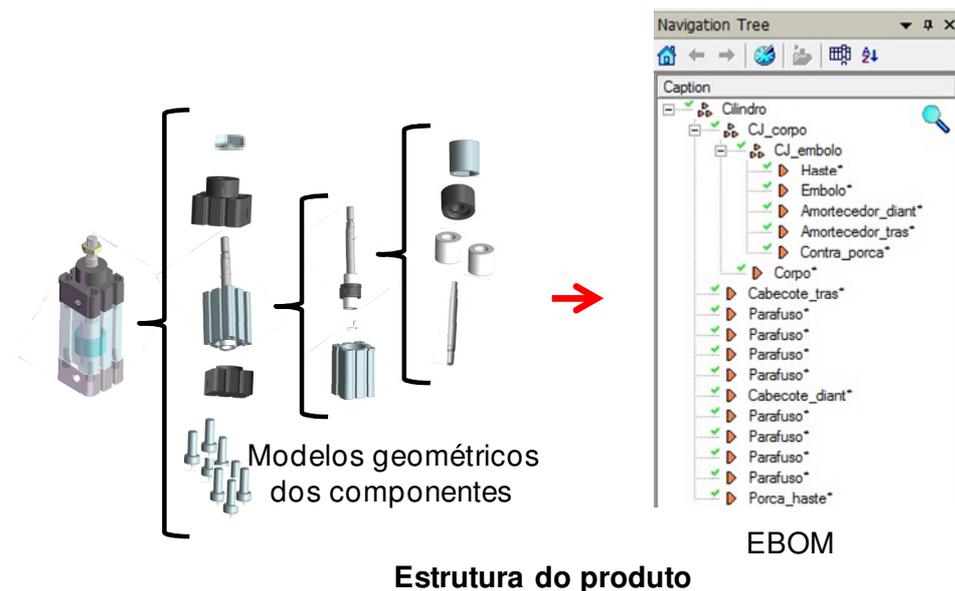


Figura 4.18: *Process Designer* - Estrutura do produto.

Os componentes do produto podem ser obtidos na biblioteca de produtos, este recurso é prático para empresas que trabalham com família de produtos, visto que alguns dos componentes destes produtos são similares para vários conjuntos de produtos.

- Construção das operações que compõem os processos de fabricação do produto para formar a estrutura de operações (eBOP) (Figura 4.19).

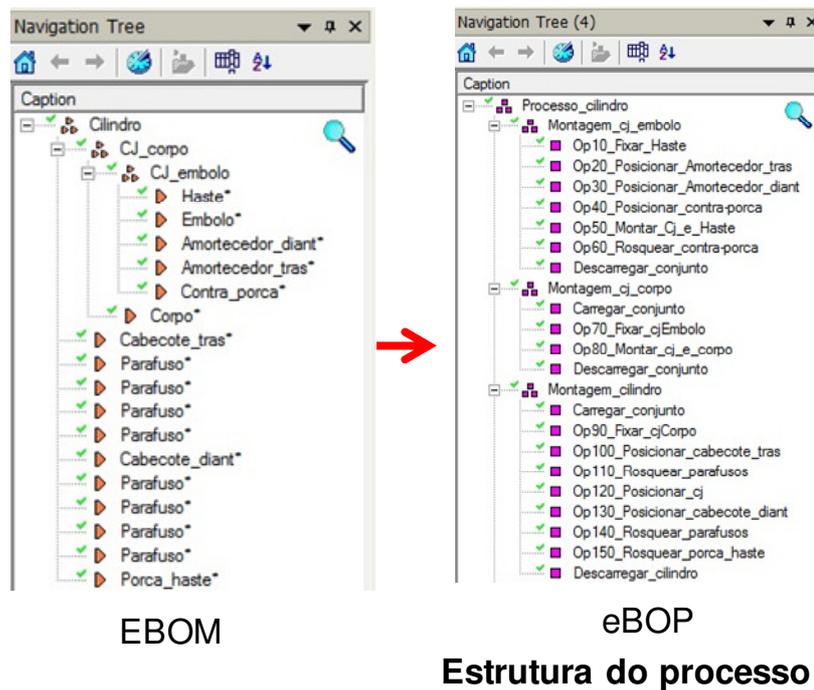


Figura 4.19: Process Designer - Estrutura do processo.

A sequência e ordem da eBOP têm características semelhantes à estrutura da EBOM, ambos são representados por uma lista hierárquica com vários níveis de respectivos conjuntos, subconjuntos, itens e subitens. Esta organização é importante para a relação que precisa ser criada entre a estrutura do produto e a estrutura de recursos.

- Construção e definição dos meios de produção para formar a estrutura de recursos que podem ser humanos ou robóticos MBOM (Figura 4.20).

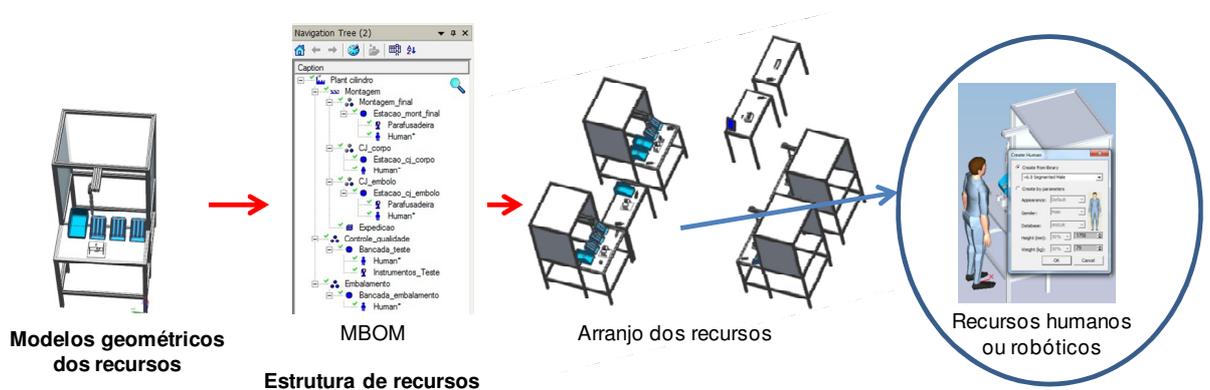


Figura 4.20: Process Designer - Estrutura de recursos.

A definição dos processos de fabricação exigiu também ordenar os processos, atribuindo à eles operações e sub-operações, definir a sequência, subsequência e

tempos. O gráfico PERT é a ferramenta do *Process Designer* apropriada para estas atividades, que utiliza o conceito de rede. Esta ferramenta auxilia no planejamento de processos de fabricação de produto. Conforme mostra a Figura 4.21, com o gráfico PERT é possível visualizar a sequência de operações e seus respectivos tempos e assim dar atenção especial para as operações que ultrapassam o tempo de ciclo do processo.

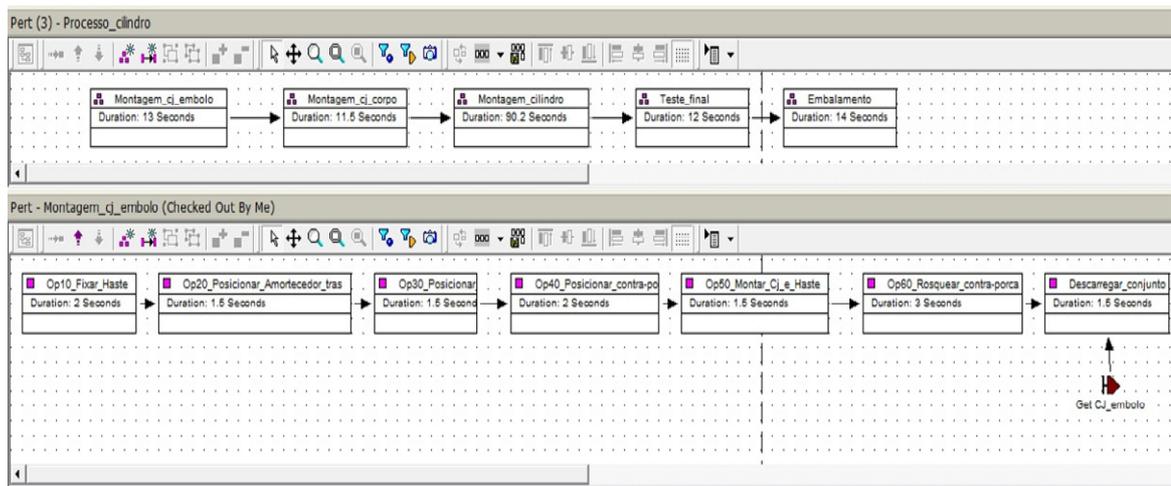


Figura 4.21: *Process Designer* – Gráfico PERT.

A ferramenta do *Process Designer* Gráfico PERT também auxilia na visualização do nível e relacionamento entre operações específicas do Arranjo Físico. Assim, é possível analisar a influência e desempenho de cada operação.

O *Process Designer* provê ferramentas que auxiliam em atividades de otimização de operações e processos antes mesmo de fazer simulações. Após a criação dos objetos que representam os principais elementos do Arranjo Físico é possível gerar o Diagrama de Gantt. Este recurso ajuda a visualizar o processo de um ponto de vista lógico com relação aos tempos, sequência e hierarquia adotada nas operações. O Diagrama de Gantt, conforme mostra a Figura 4.22 é um gráfico usado para analisar o tempo, hierarquia e relacionamento de diferentes operações de um processo.

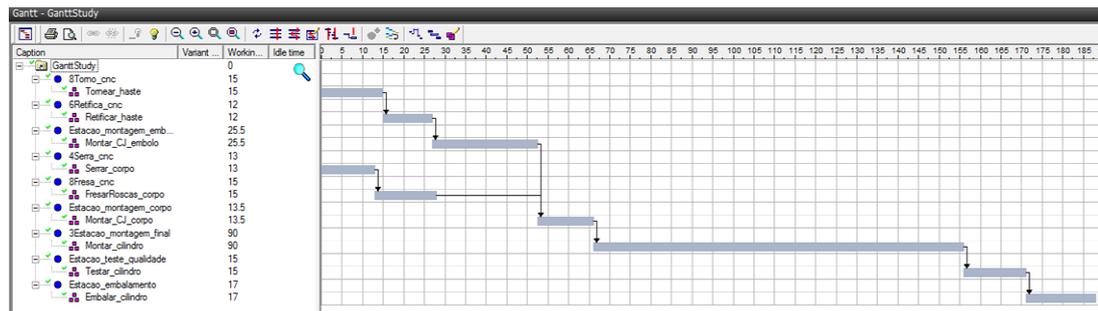


Figura 4.22: Process Designer – Diagrama de Gannt.

O intervalo de tempo, início e fim de cada operação aparecem como barras coloridas sobre o eixo horizontal do Diagrama de Gannt e o tempo total do processo, composto por várias operações é representado por uma linha horizontal preta.

A construção completa do modelo digital do processo no *Process Designer* resulta em várias estruturas conforme mostra a Figura 4.23. A estrutura de produtos, meios de produção e operações que são organizadas por meio de pastas chamadas de coleções. Os objetos que representam os produtos são conectados aos objetos que representam os processos que por sua vez, são atribuídos aos objetos que representam os meios de produção. Todos estes objetos podem ser conectados as pastas de estudos, que tem o papel de integrar o modelo para leitura e modificação tanto no *software Process Designer*, como no *software Process Simulate*.

Portanto o modelo do digital do processo de fabricação no *Process Designer* é composto por uma estrutura de produtos, uma estrutura de meios de produção e uma estrutura de operações que são representados graficamente por modelos geométricos construídos no CAD e posteriormente são integrados ao *software* que auxilia na execução de simulação de operações, o *Process Simulate*.

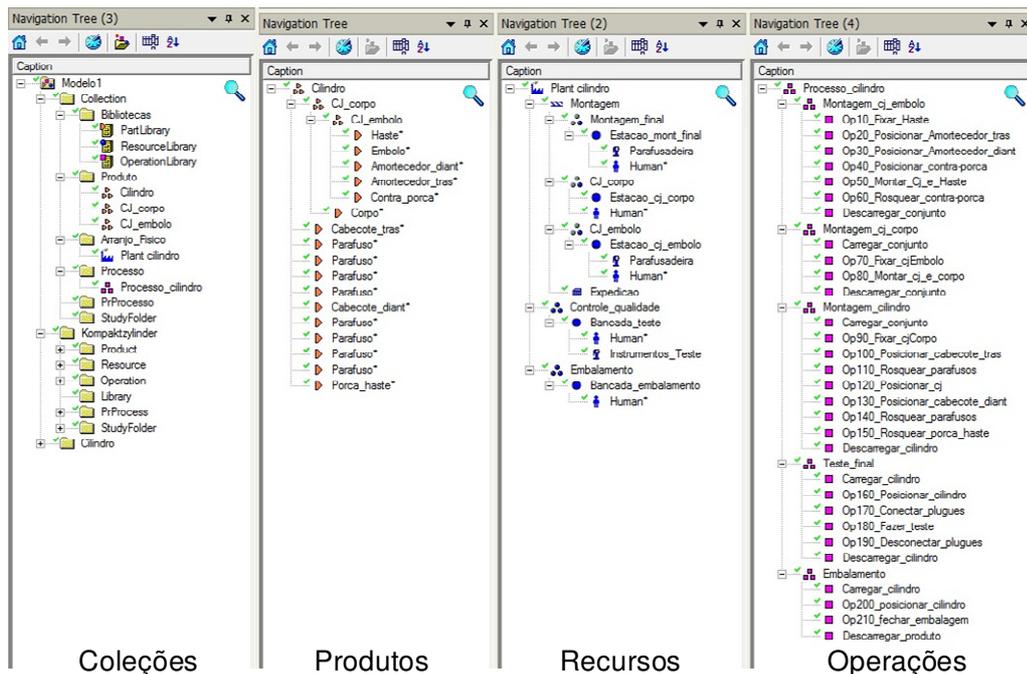


Figura 4.23: Process Designer – Estruturas do modelo de processos.

4.6 Construção do modelo digital para simulação de operações

O *Process Simulate* é o *software* do sistema Tecnomatix mais apropriado para fazer simulações de operações com humanos, com sistemas mecânicos ou com sistemas robotizados, ou seja, todo tipo de operação com movimentos em 3 dimensões. Este tipo de simulação na Fábrica Digital permite analisar as interações entre operadores, produtos e meios de produção do Arranjo Físico para garantir que o planejamento das operações do processo de fabricação seja realizado com maior precisão e atenda aos objetivos propostos para a produção do produto na fase de planejamento. Este *software* provê ferramentas para planejar e analisar os meios de produção, tais como, os sistemas para o manuseio de materiais.

Ao mesmo tempo em que se faz a atividade citada, também é possível analisar a existência de colisão no fluxo de materiais e a ergonomia dos operadores que realizam as tarefas manuais no Arranjo Físico. Estas atividades são realizadas na visualização gráfica do *Process simulate* apresentada na Figura 4.24.

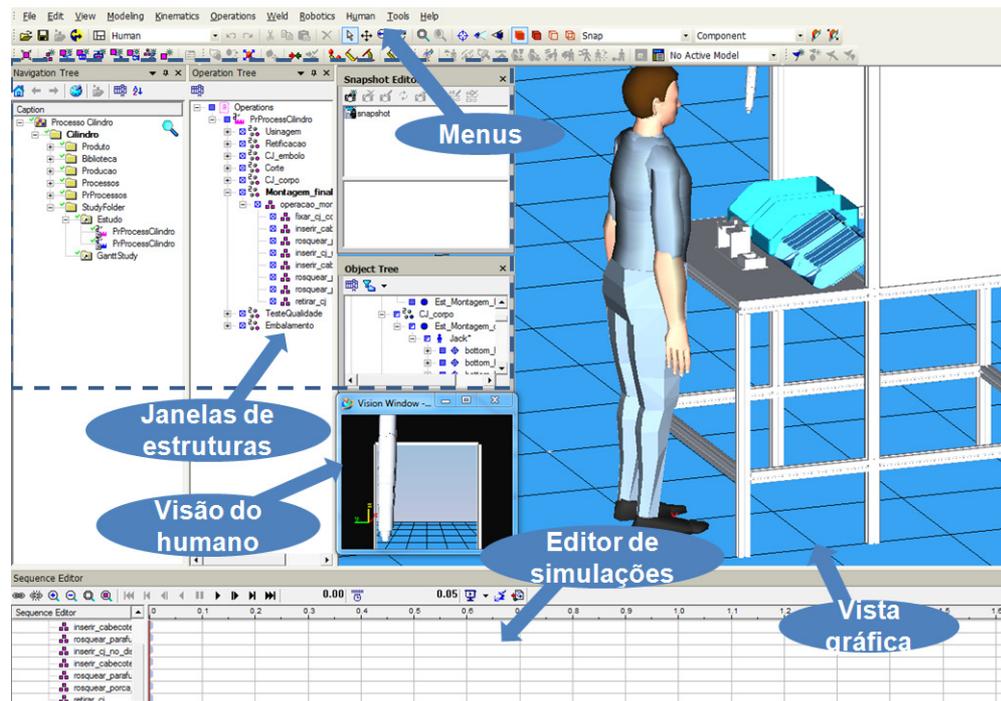


Figura 4.24: Visualização gráfica no Process Simulate.

Uma inovação muito bem destacada pelo fornecedor deste *software* é o ambiente de planejamento e de simulação oferecidos, visto que diversas profissionais ou até mesmo, diversas áreas podem trabalhar de forma simultânea com o mesmo modelo digital de processo de fabricação. Estas áreas são escolhidas de acordo com sua função no ciclo de desenvolvimento do produto ou tipo de planejamento que faz, tal como, o planejamento de recursos humanos, robótica, montagem ou comissionamento, conforme mostra a Figura 4.25.



Figura 4.25: Process Simulate - Áreas de simulação [13].

4.6.1 Ferramentas para simulação humana

O *Process Simulate* contém uma biblioteca de objetos para a simulação humana por meio de modelos que representam o humano em 3D, contendo a cinemática e biomecânica necessária para simular as operações de acordo com normas de

ergonômicas necessárias. A simulação pode conter análises de fatores de risco para maximizar o conforto humano, segurança e desempenho em operações humanas. Durante a simulação também é possível analisar as posturas, as restrições de visão e de acessibilidade do modelo digital humano.

4.6.2 Ferramentas para simulação robótica

As ferramentas do *software* permite simular operações robóticas ou até mesmo um ciclo completo de uma célula robotizada. Durante a simulação é possível analisar a existência de colisão, otimizar o tempo de ciclo, validar digitalmente todos os movimentos robóticos e criar os programas que serão utilizados nos robôs reais. Portanto, para a área de simulação robótica, o *Process Simulate* oferece um ambiente de programação e simulação que possibilita melhorar o desempenho de operações robóticas antes mesmo de ter os meios de produção instalados na fábrica.

4.6.3 Ferramentas para simulação de montagem

As ferramentas do *software* para a simulação de montagem oferecem aos planejadores e engenheiros ferramentas para simular e validar o processo de montagem seguindo a sequência de montagem planejada. Assim é possível simular e verificar a dinâmica dos processos de montagem, criar instrução de trabalho de forma automatizada com a possibilidade de atualizar de forma instantânea e automática após fazerem alterações no processo. Todas estas atividades podem ser realizadas no ambiente digital sem a necessidade de aguardar a construção de protótipos físicos do produto e equipamentos.

4.6.4 Ferramentas para comissionamento virtual

O comissionamento é uma atividade que tem como função fazer os ajustes finais dos programas que controlam os equipamentos robotizados que são planejados para a linha de produção. Assim o comissionamento convencional é executado assim que a parte física do equipamento robotizado está pronta. Mas com o comissionamento virtual oferecido pelo *Process Simulate* é possível fazer esta atividade somente com o IHM, (equipamento que executará o programa contendo comandos para fazer as operações com movimentos robóticos) e o modelo de

simulação construído no *Process Designer*, ou seja, antes mesmo das partes físicas estarem prontas.



Figura 4.26: Comissionamento Virtual [13].

Conforme mostra Figura 4.26, nesta atividade o IHM é conectado ao modelo digital do processo por meio do *Process Simulate*. Assim é possível simular, corrigir e otimizar todos os eventos robóticos realizados pelos meios de produção que ainda não foram instalados fisicamente no Arranjo Físico.

4.7 Construção do modelo digital para simulação do Arranjo Físico

A simulação do Arranjo Físico utiliza variáveis do tipo eventos discretos e do tipo eventos contínuos. A variável contínua é uma simples constante, mas a variável eventos discretos se baseia nos conceitos de fila e tempos de operações, observável em qualquer processo de manufatura. Este tipo de variável torna possível a construção de modelos de simulação que reage diante de eventos que são intencionalmente atribuídos. Por exemplo, a produtividade de um equipamento é alterada no momento que ocorre uma falha, atribuída ao objeto que representa o equipamento, isto é feito por meio de uma fórmula que indica o percentual de falhas que ocorrem durante o tempo de trabalho do equipamento.

A possibilidade de construção de modelos com eventos discretos e contínuos torna o *Plant Simulation* o *software* do sistema Tecnomatix mais apropriado para fazer simulações que representam o comportamento dinâmico de um Arranjo Físico. Por isso o uso correto desta ferramenta permite otimizar o fluxo de

materiais, a utilização dos equipamentos e a logística para todos os níveis da fábrica. A construção e simulação do Arranjo Físico neste *software* são feitos por meio de uma visualização gráfica que segue os padrões da *Microsoft Windows*, conforme mostra a Figura 4.27. Assim os menus, ferramentas e bibliotecas são posicionados de modo que facilita o trabalho do usuário.

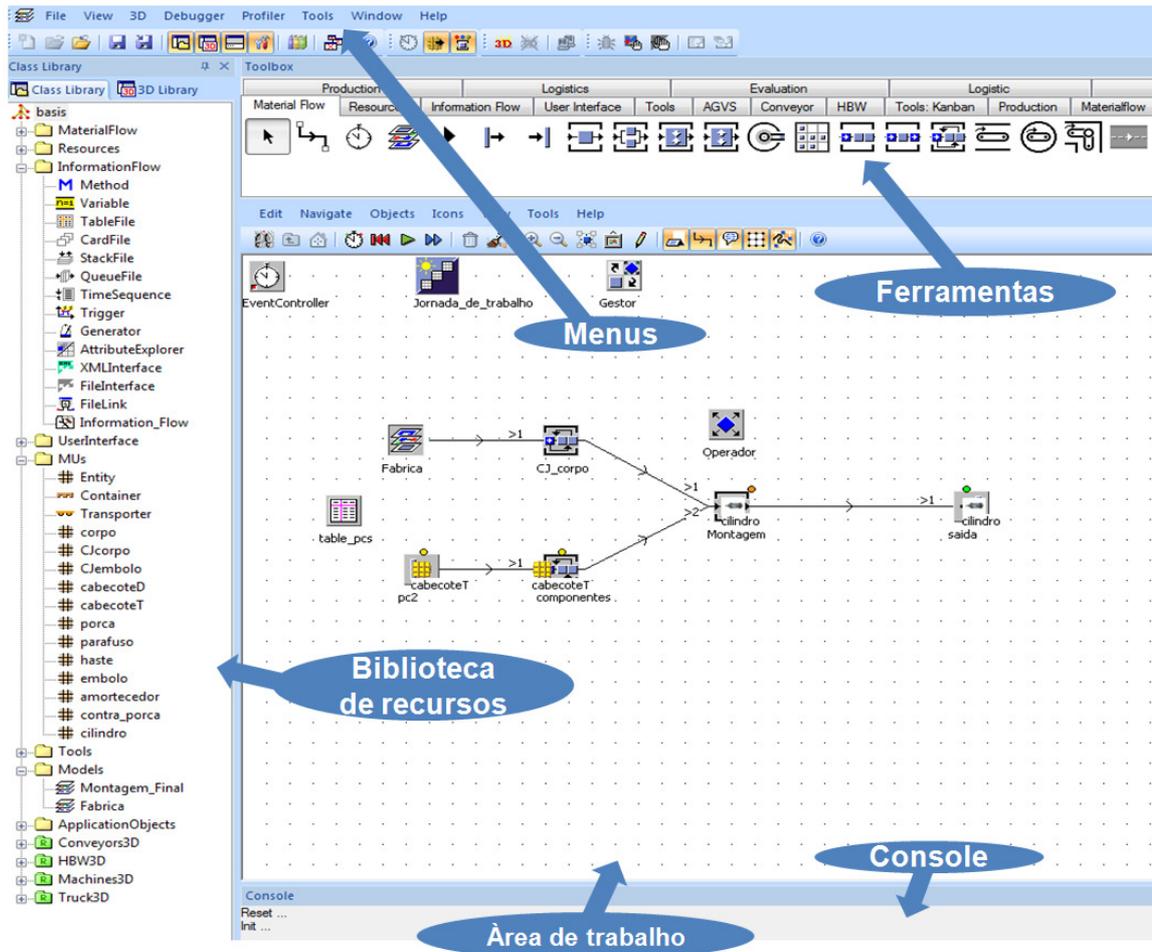


Figura 4.27: Visualização gráfica do Plant Simulation.

O *Plant Simulation* auxilia em simulações do Arranjo Físico para analisar a mudanças de variáveis, tais como demanda da produção, sem afetar os sistemas de produção existentes. Estas análises também são muito apropriadas para fazer o planejamento ou otimização do Arranjo físico, antes de sua instalação ou modificação real.

4.7.1 Ferramentas do *Plant Simulation*

Algumas das ferramentas do *Plant simulation*, essenciais para a construção dos modelos são mostradas na Figura 4.28, em seguida são descritos detalhadamente a função de cada uma destas ferramentas.



Figura 4.28: *Plant Simulation* – ferramentas para construção de modelos digitais

- *EventController*: utilizado para dar início a simulação e determinar o tempo estimado do processo.
- *Source*: este objeto é a fonte das peças, que se movem e são utilizadas para fazer algum processo de fabricação ou processo de montagem.
- *Drain*: este objeto é o recurso usado para peças deixam o sistema que se deseja analisar.
- *SingleProc*: é um objeto genérico que pode ser usado para qualquer estação ou máquina, contém algumas variáveis como tempo de processamento que são preenchidas com a precisão necessária para representar um equipamento ou processo real.
- *Frame*: este objeto é usado para criar outro cenário e simular parte de um processo separadamente sem afetar o processo como um todo.
- *Interface*: esse objeto é usado para definir conectar o fluxo de material entre vários Frames.
- *BottleneckAnalyser*: este objeto exibe as estatísticas normais dos objetos de fluxo material e classifica os dados em um ranking.

O uso destas e outras ferramentas do *Plant Simulation* foram necessárias para construir os modelos de simulação e fazer uma análise de desempenho de todo o Arranjo Físico.

4.7.2 Atividades para construção do modelo de simulação

O modelo de simulação que representa o Arranjo Físico foi construído com auxílio do *Plant Simulation* seguindo o fluxo de atividades descritas a seguir na Figura 4.29.

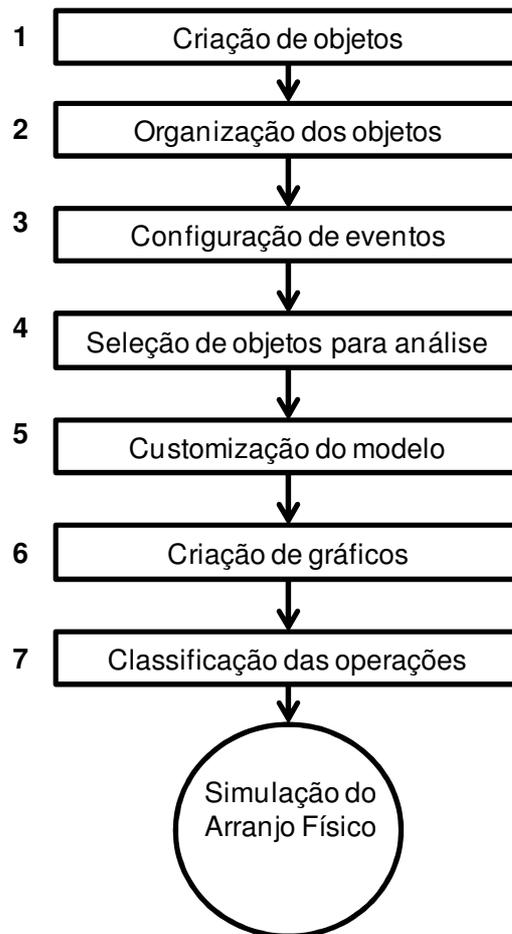


Figura 4.29: Fluxograma – construção do modelo de simulação do Arranjo Físico.

Conforme mostra a Figura 4.29, o fluxo para a construção do modelo é classificado em sete atividades organizadas em ordem cronológica. Na sequência apresenta-se uma descrição detalhada de todas estas atividades.

Atividade 1: criação de objetos abstratos, como os objetos que representam os componentes do produto, métodos de produção. A Figura 4.30. mostra objetos criados para representar os componentes do cilindro e a jornada de trabalho definida para o Arranjo Físico.

Atividade 2: seleção e organização de objetos. Os objetos padrões do *Plant Simulation* são entidades que já se apresentam disponíveis na biblioteca do *software*, ou seja, não precisam ser criados para cada modelo e em alguns casos, são apenas customizados ao modelo que está sendo criado. Em seguida é feita a organização destes objetos e dos que já foram criados anteriormente.

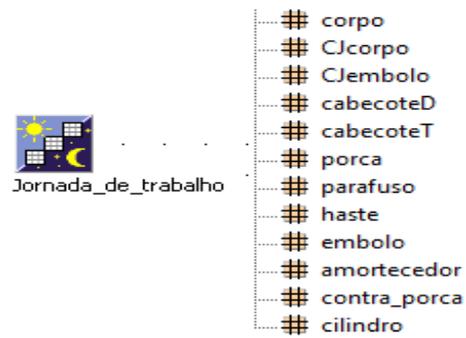


Figura 4.30: Plant Simulation – criação de objetos para o modelo.

A Figura 4.31 e Figura 4.32 mostram respectivamente os objetos organizados para as propostas de Arranjo Físico modelo 1 e modelo 2.

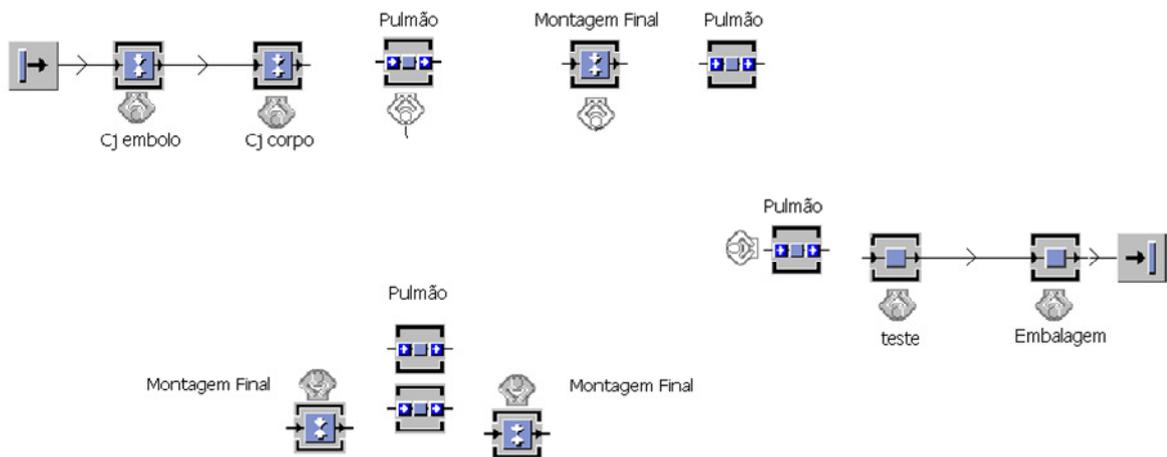


Figura 4.31: Plant Simulation – organização de objetos do modelo 1

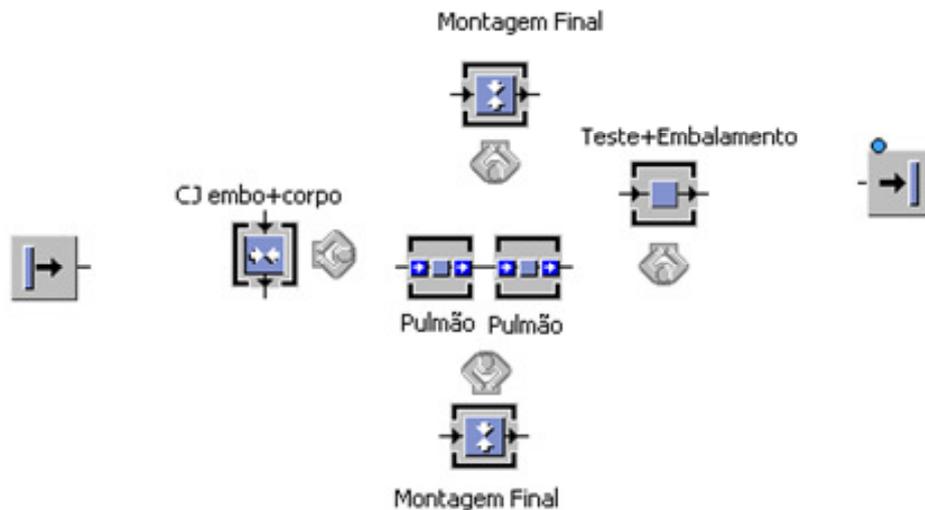


Figura 4.32: Plant Simulation – organização de objetos do modelo 2.

Atividade 3: configuração de eventos tais como o tempo das operações, quantidade de componentes para montagem e outros. Um exemplo de configuração foi a determinação da ordem e quantidade de componentes utilizados para a montagem do cilindro. Conforme mostra a Figura 4.33, esta e outras configurações de eventos discretos foram feitas com uso de referências estruturadas em tabelas construídas com o auxílio do Plant Simulation ou sistemas de planilhas eletrônicas convencionais.

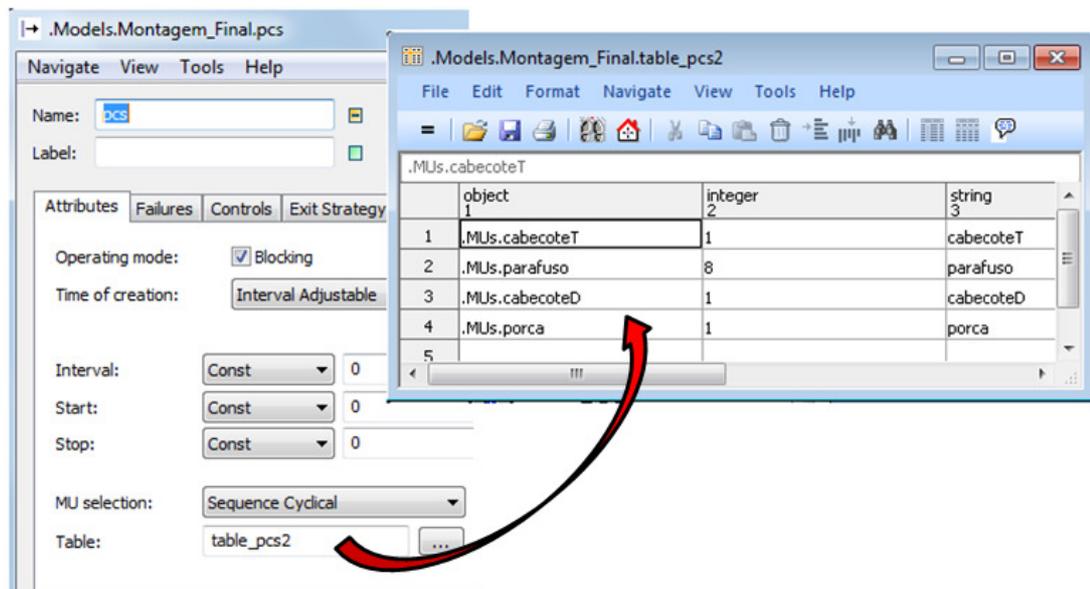


Figura 4.33: Plant Simulation – configuração de eventos discretos.

Atividade 4: seleção e configuração de objetos para análise de resultados. Na maioria dos casos, os objetos mais apropriados são gráficos com dados estatísticos, *Bottlenecks*, relatórios e janelas com dados estatísticos. A Figura 4.34 mostra a forma mais simples de analisar os resultados de um modelo de simulação no *Plant Simulation*, feito por meio da janela *type statistics* um objeto padronizado, esta janela mostra os dados estáticos durante ou após uma simulação. Com este recurso foi possível analisar dados estatísticos como a produção diária ou produção versus hora.

Atividade 5: customização do modelo que representa o Arranjo Físico, de modo que seus aspectos visuais e dados demonstrem com clareza a configuração e meios de produção planejados para o Arranjo Físico real.

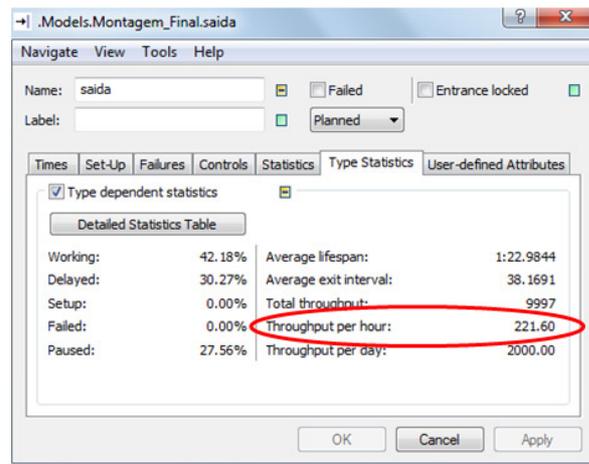


Figura 4.34: Plant Simulation – recurso para análise estatística de objetos.

A Figura 4.35 mostra o modelo 1 com seus aspectos visuais customizados.

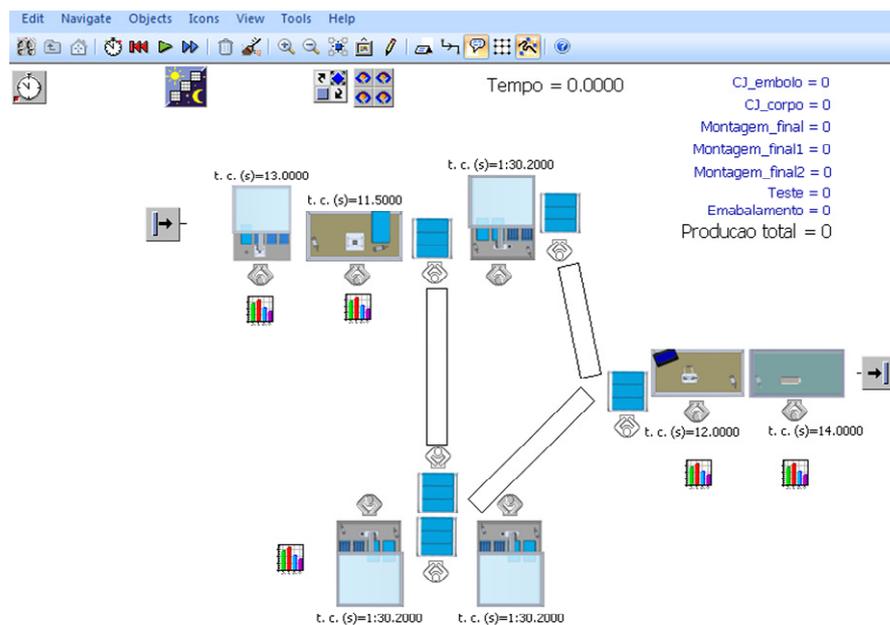


Figura 4.35: Plant Simulation – customização do modelo 1

A Figura 4.36 mostra o modelo 1 com seus aspectos visuais customizados.

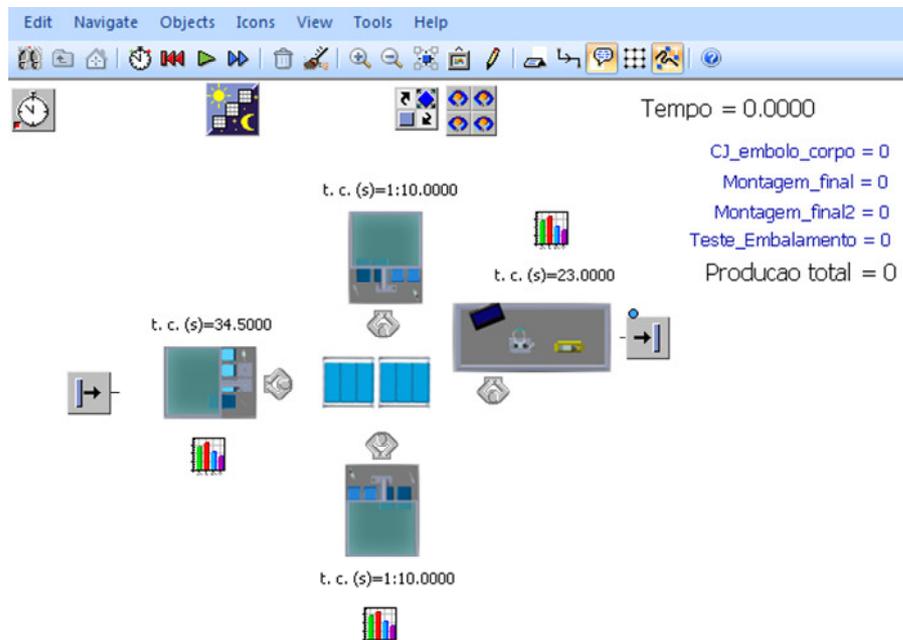


Figura 4.36: Plant Simulation – customização do modelo 2

Atividade 6: criação de gráficos. A Figura 4.37 mostra a sequencia de passos para a criação de um simples gráfico no *Plant Simulation*. Estes gráficos podem ser configurados até mesmo com uso de tabelas.

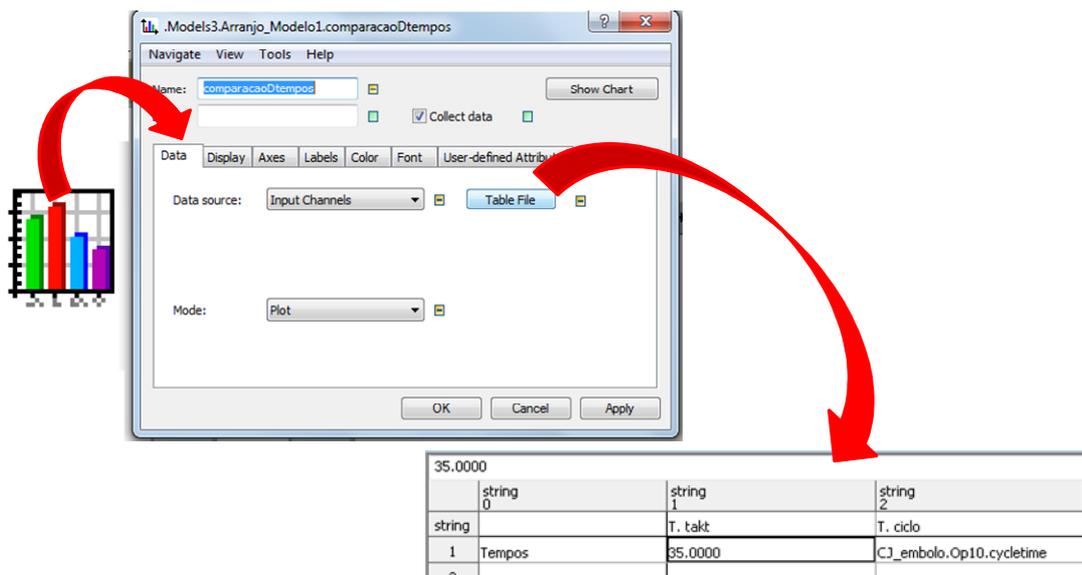


Figura 4.37: Plant Simulation – criação de gráficos.

Atividade 7: classificação das operações que agregam ou não agregam valor ao produto. Conforme mostra a Figura 4.38, esta atividade envolveu fazer a classificação de operação por operação com base no conceito de Manufatura Enxuta. Por definição foi considerado que as operações representadas com símbolos de cor azul agregam valor e as representadas com símbolos de cor vermelha, não agregam valor ao produto.

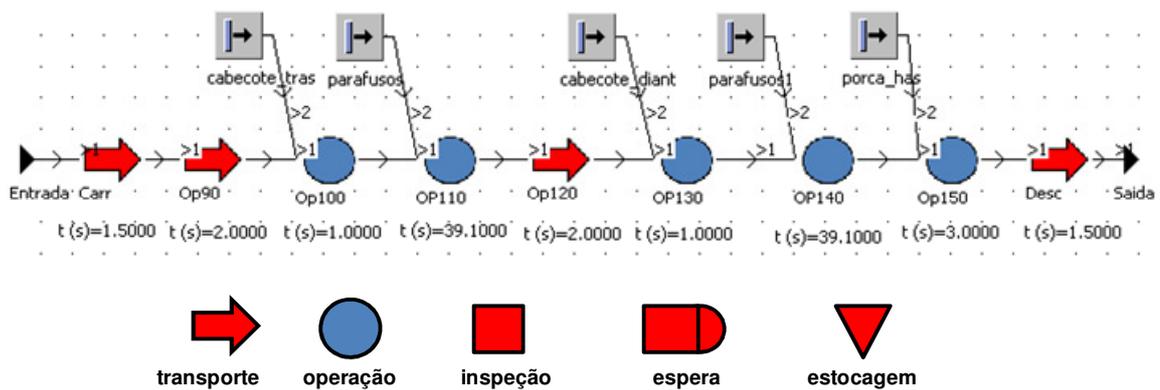


Figura 4.38: Classificação das operações que agregam ou não agregam o valor.

Os modelos construídos com auxílio do *Plant Simulation* compreenderam algumas áreas do Arranjo Físico, tais como processos de fabricação, processos de montagem, estação de teste, estação de empacotamento e pulmões para estoque de peças.

5 Simulação e análise dos resultados

A atividade prática descrita como simulação e análise de resultados foi realizada com o auxílio da Fábrica Digital e Manufatura Enxuta. Conforme mostrou o fluxograma contido na Figura 4.1, as ferramentas da Fábrica Digital auxiliaram na construção do modelo digital para simulação do processo, das operações e do Arranjo Físico. Na simulação e análise de resultados, a Fábrica Digital auxilia em atividades de execução, atividades de obtenção de dados gerados por meio da simulação e quando necessário auxilia também a execução de um ciclo que inclui a modificação de variáveis e análise dos resultados após as modificações apropriadas.

A análise dos resultados de ambos os modelos de Arranjos Físicos propostos neste trabalho de pesquisa utilizou como referência princípios do conceito Manufatura Enxuta conforme mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Princípio e técnicas da Manufatura Enxuta

Desperdícios	Princípios Manufatura Enxuta	Técnicas Manufatura Enxuta
Produção em excesso (superprodução)	Puxar	Sistema puxado
Tempo disponível (fila de espera)	Valor	Just-in-Time
Tempo de transporte (transporte)	Fluxo de valor	Kanban
Tempo de processo (processos sem otimização)	Fluir	Nivelamento da produção
Estoque disponível em excesso (estoque)	Perfeição	Balanceamento da produção
Movimentação (fluxo de produção sem otimização)		Sincronização
Produção de produtos defeituosos (alto índice de refugo na produção)		Fluxo de uma peça
		Multifuncionalidade

As técnicas de Manufatura Enxuta, tais como o balanceamento de produção, contribui para atingir os princípios fluxo de valor e fluir. O uso destes princípios no Arranjo Físico por sua vez, focaliza a eliminação dos desperdícios, tais como a superprodução, fila de espera, estoque, entre outros enumerados na Tabela 5.1.

As simulações executadas neste trabalho de pesquisa foram classificadas em 3 tipos, simulação de processo, simulação de operações e simulação do Arranjo Físico.

5.1 Simulação do processo

A atividade simulação do processo envolveu o uso dos respectivos modelos digitais construído no *Process Designer* para analisar os Arranjos Físicos modelo 1 e modelo 2 que foi proposto. A simulação do processo considerou os princípios do conceito Manufatura Enxuta aplicado ao processo de fabricação e ferramentas como Diagrama de *Gannt*, disponíveis por meio da Fábrica Digital. O *software* utilizado nesta atividade foi o *Process Designer* que mostrou de modo claro, os tempos distribuídos entre os processos utilizados no respectivo Arranjo Físico.

Conforme mostra a Figura 5.1, o Diagrama de *Gantt* possibilitou analisar o balanceamento dos processos utilizados em cada Arranjo Físico proposto.

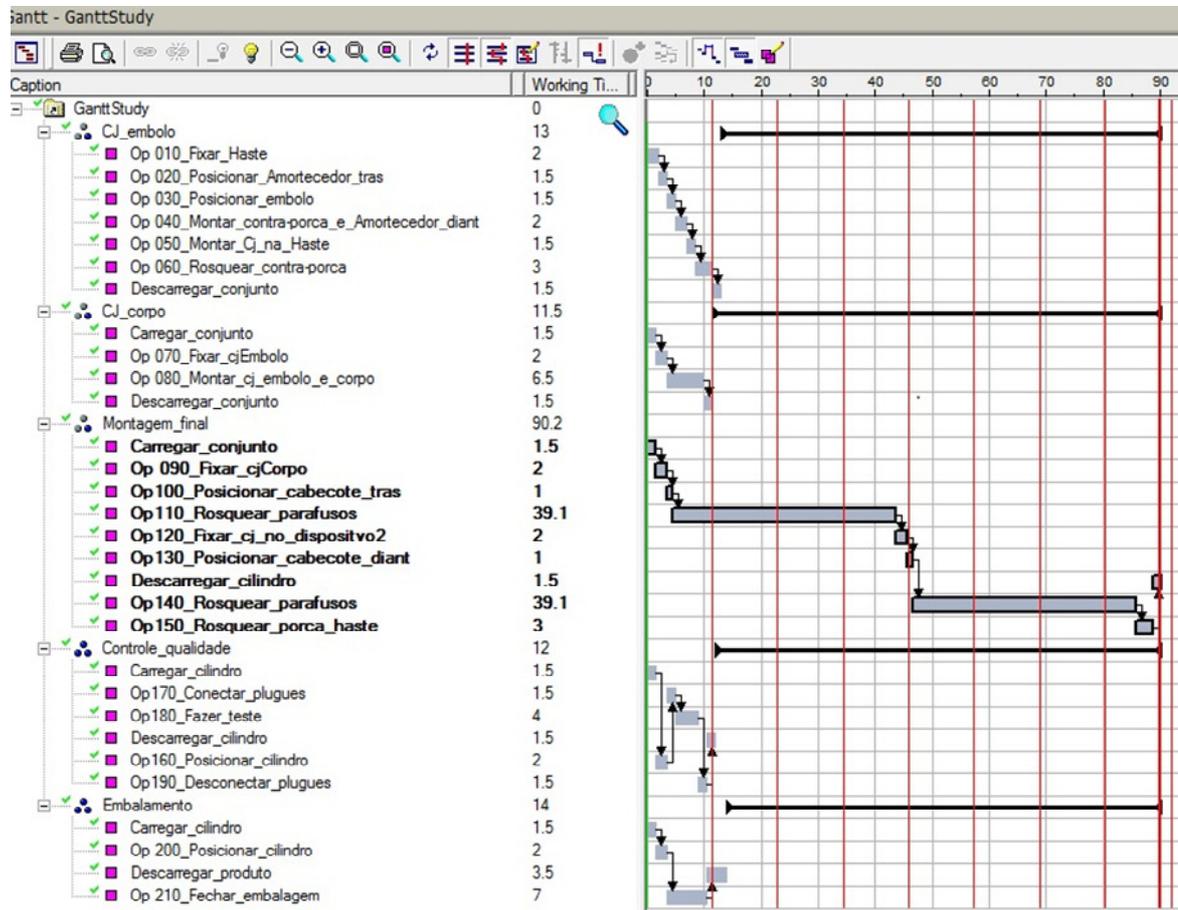


Figura 5.1: Process Designer - Diagrama de Gantt para os processos do modelo 1.

O Diagrama de Gantt mostrou com clareza as diferenças existentes entre os tempos de processos definidos para os Arranjos Físicos modelo 1. A maior diferença de tempo é destacada pelo processo de montagem final que atingiu o tempo de 90.2 s, enquanto que o processo montagem do corpo atingiu 11.5 s. Para minimizar esta grande diferença de tempo foi necessário adotar 3 estações de trabalho para o processo montagem final resultando em uma diferença de 18.6 s entre os processos com maior diferença de tempo.

O Arranjo Físico modelo 2 também apresentou grandes diferenças de tempo existentes entre os processos definidos para o Arranjo Físico, conforme mostra o Diagrama de *Gantt* contido na Figura 5.2.

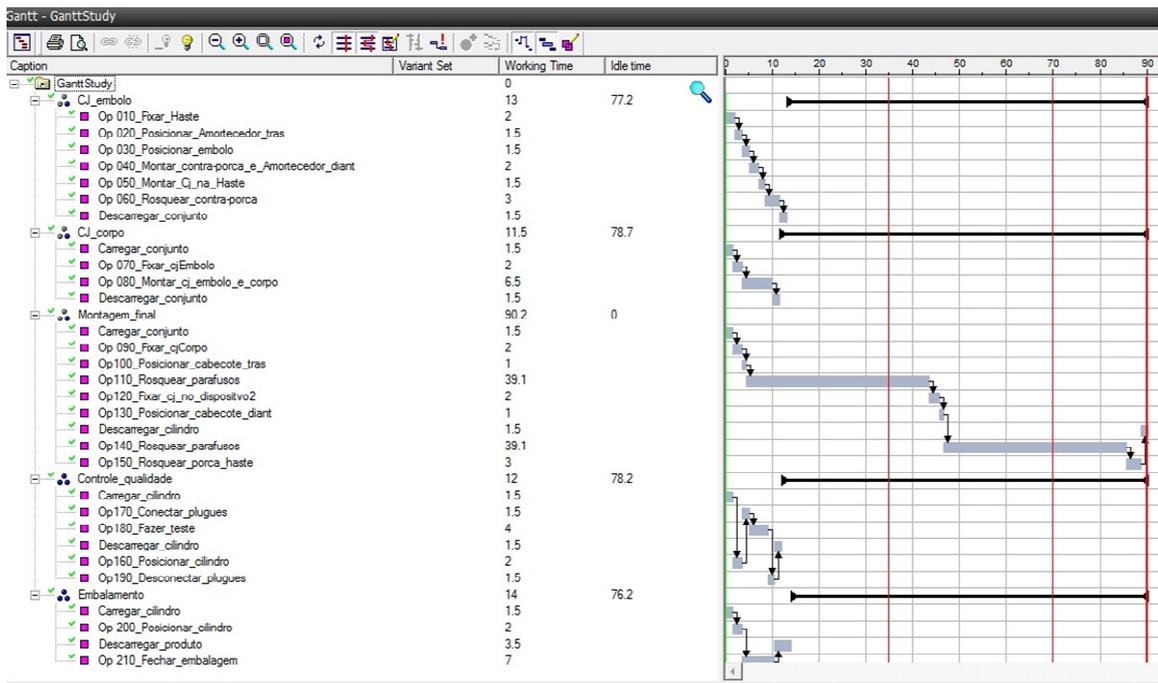


Figura 5.2: Process Designer - Diagrama de Gantt para os processo do modelo 2.

Neste caso o Diagrama de *Gantt* mostrou as diferenças de tempo contidas em dois processos. O processo montagem final atingiu o tempo de 70 s, enquanto que o processo teste+empacotamento atingiu o tempo de 23 s. Para minimizar esta grande diferença de tempo foi necessário adotar 2 estações de trabalho para o processo montagem final resultando em uma diferença de 12 s entre os processos com maior diferença de tempo.

5.2 Simulação das operações

O conjunto de micromovimentos necessários para realizar uma tarefa, tal como, fixar uma peça no dispositivo de montagem é denominada como uma operação. O conjunto de operações necessárias para realizar um procedimento, tal como a montagem do componente êmbolo no componente haste de um cilindro pneumático é denominado como processo. As definições descritas demonstram que até mesmo um entre os vários micromovimentos de uma operação afeta as variáveis de tempo e qualidade da operação que resulta no tempo do processo, isto indica que o um cuidadoso planejamento define a qualidade e o tempo da operação. A simulação das operações que são realizadas por meio da fábrica Digital auxilia para realizar este cuidadoso planejamento.

Para fazer um cuidadoso planejamento, as operações contidas nos Arranjos Físicos modelo 1 e modelo 2 deste trabalho de pesquisa foram definidas após a simulação por meio do modelo digital construído no *software Process Simulate*. Estas simulações permitiram verificar o uso prático dos meios de produção, fazer estudos do espaço necessário para estes com menor distância possível entre as estações de trabalho, mas com espaço suficiente para evitar colisões durante todo o fluxo dinâmico de materiais. A Figura 5.3 mostra o cenário utilizado para a simulação de processos contidos em ambos os modelos de Arranjos Físicos.

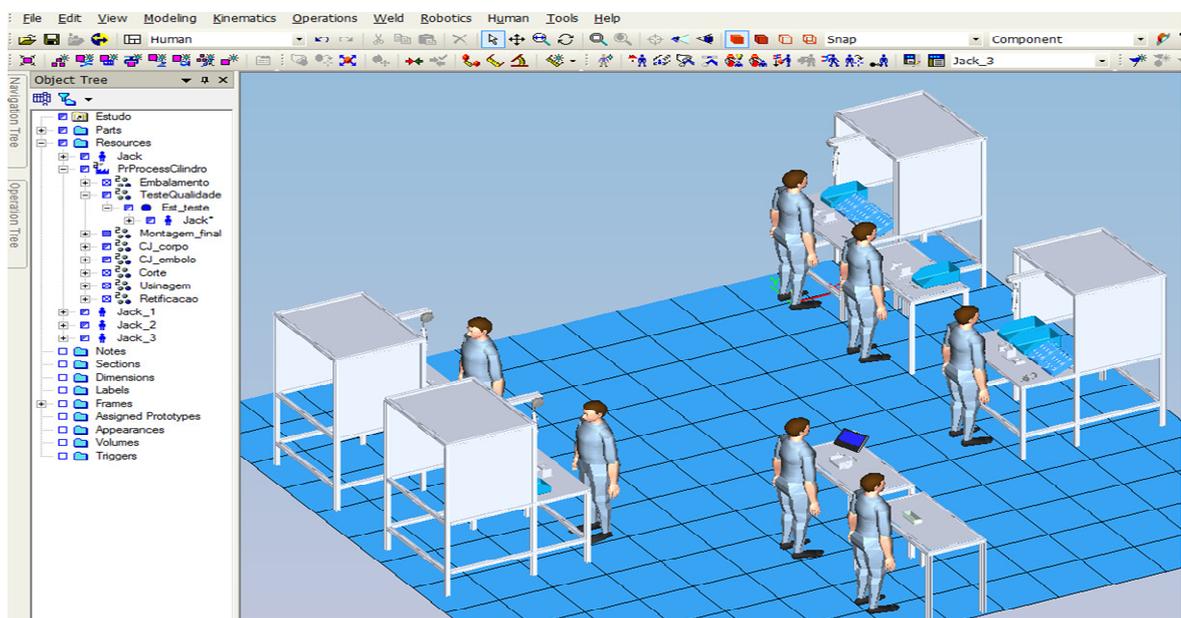


Figura 5.3: Process Simulate - cenário para simulação de operações

Algumas das operações das operações que formaram os processos contidos nos Arranjos Físicos modelo 1 e modelo 2 foram simuladas para validação de seus respectivos tempos. As simulações permitiram analisar tanto os meios de produção como aspectos da configuração utilizada para cada Arranjo Físico. Para ilustrar o uso prático das simulações realizadas a Figura 5.4 mostra a visão humanoide no canto inferior esquerdo no momento da execução de uma das operações contidas no processo montagem final do cilindro utilizada em ambos os modelos de Arranjos Físicos.



Figura 5.4: Process Simulate – visão humanoide na simulação de operações.

A simulação das operações foi muito importante para este trabalho de pesquisa, pois assim como os planejadores de novas instalações de diversas empresas que usam o conceito Fábrica Digital não tem acesso aos meios de produção físicos, ou seja, não tem possibilidades de fazer experimentos reais, assim também foi o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

5.3 Simulação do Arranjo Físico

A atividade simulação do Arranjo Físico envolveu o uso dos respectivos modelos digitais construído no *Plant Simulation*, que representam os Arranjos Físicos modelo 1 e modelo 2, construídos de acordo com os processos definidos para a fabricação do produto. As ferramentas do *Plant Simulation* auxiliam na representação de turbulências como, tempo de *setup*, eficiência de operadores, eficiência de equipamentos, percentual de refugos, etc.. No entanto para os modelos digitais que representam os Arranjos Físicos propostos, não foi considerado a representação de possíveis turbulências, visto que estes modelos representam alternativas de configuração para novos Arranjos Físicos. Neste caso, os dados de turbulência podem ser representados após a implantação real do Arranjo Físico, o que possibilita a coleta de dados e posterior ajuste fino dos modelos para novas simulações.

Nesta atividade de simulação foi possível coletar dados do desempenho de ambos os modelos de Arranjos Físicos propostos. Os dados gerados de ambos os modelos propostos considerou a execução da produção por um período determinado de 5 dias de produção. Os principais dados de desempenho gerados após a execução da produção nos Arranjos Físicos virtuais foram classificados em *takt time* versus tempo de ciclo, mapeamento do fluxo de valor, estoque nos pulmões e dados estatísticos gerais. Estes dados são mostrados nos subtópicos seguintes.

5.4 *Takt time* versus tempos de ciclo

O capítulo 2.2 deste trabalho de pesquisa mostrou que o *takt time* determina o ritmo da produção no Arranjo Físico. Na execução da produção real, assim como também na execução da produção digital, feita por meio dos modelos de simulação construídos para o Arranjo Físico modelo 1 e Arranjo Físico modelo 2, os tempos de ciclo coletados durante a execução destes modelos podem ser comparados com esta variável para fazer uma análise de balanceamento da produção. O balanceamento da produção consiste em ajustar os diferentes tempos de ciclo de cada estação de trabalho para um valor mais próximo possível do *takt time*, visto que na prática não é possível balancear com eficiência de 100%.

Com a meta de analisar o balanceamento da produção definida para os Arranjos Físicos propostos, o tempo de ciclo de cada estação de trabalho foi coletado e plotado graficamente. Estas informações são apresentadas detalhadamente a seguir.

A Figura 5.5 mostra o gráfico que compara os tempos de ciclos de todas as estações de trabalho no Arranjo Físico modelo 1.

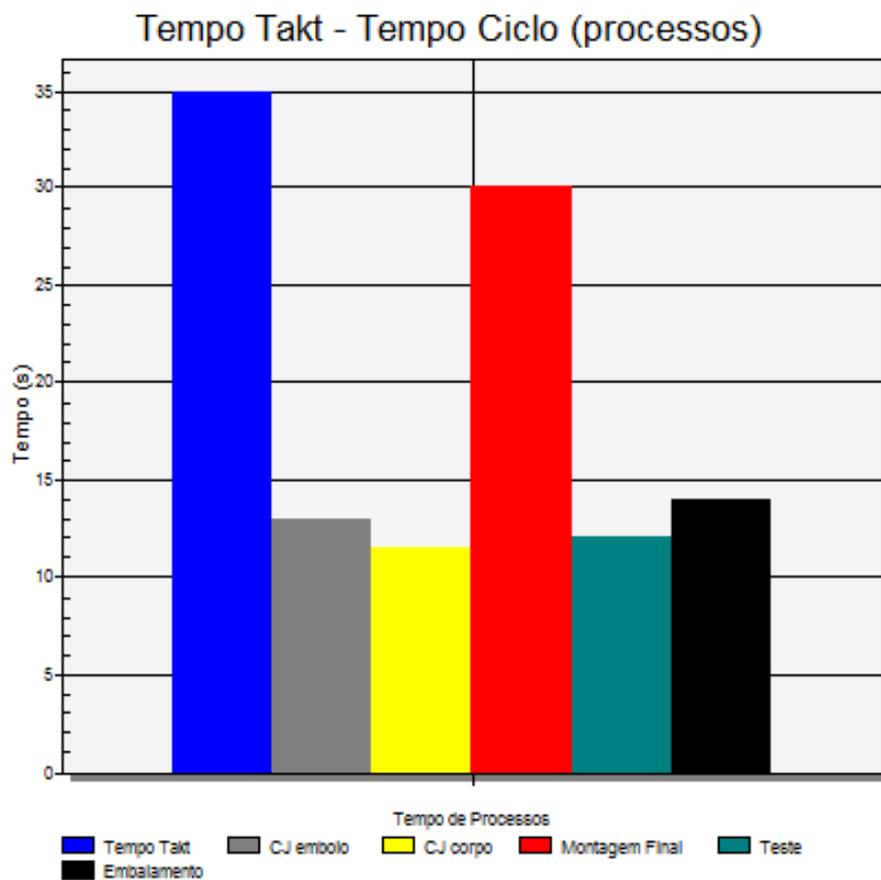


Figura 5.5: Takt time x Tempo de ciclo das estações - modelo 1.

Este gráfico de barras mostra a coluna em azul que representa o *takt time* definido para o Arranjo Físico modelo 1, a coluna em cinza representa o tempo de ciclo do processo responsável pela montagem do conjunto êmbolo (estação de trabalho A), a coluna em amarelo representa o tempo de ciclo do processo responsável pela montagem do conjunto corpo (estação de trabalho B), a coluna em vermelho representa o tempo de ciclo processo responsável pela montagem final do cilindro (estação de trabalho C), a coluna em verde representa o tempo de ciclo do processo responsável pelo teste do cilindro completo (estação de trabalho

D) e a coluna em preto representa o tempo de ciclo do processo responsável pelo empacotamento do cilindro completo (estação de trabalho E).

O Arranjo Físico modelo 2 tem a comparação de tempos de ciclos de todas as estações de trabalho apresentadas na Figura 5.6 que é mostrada a seguir.

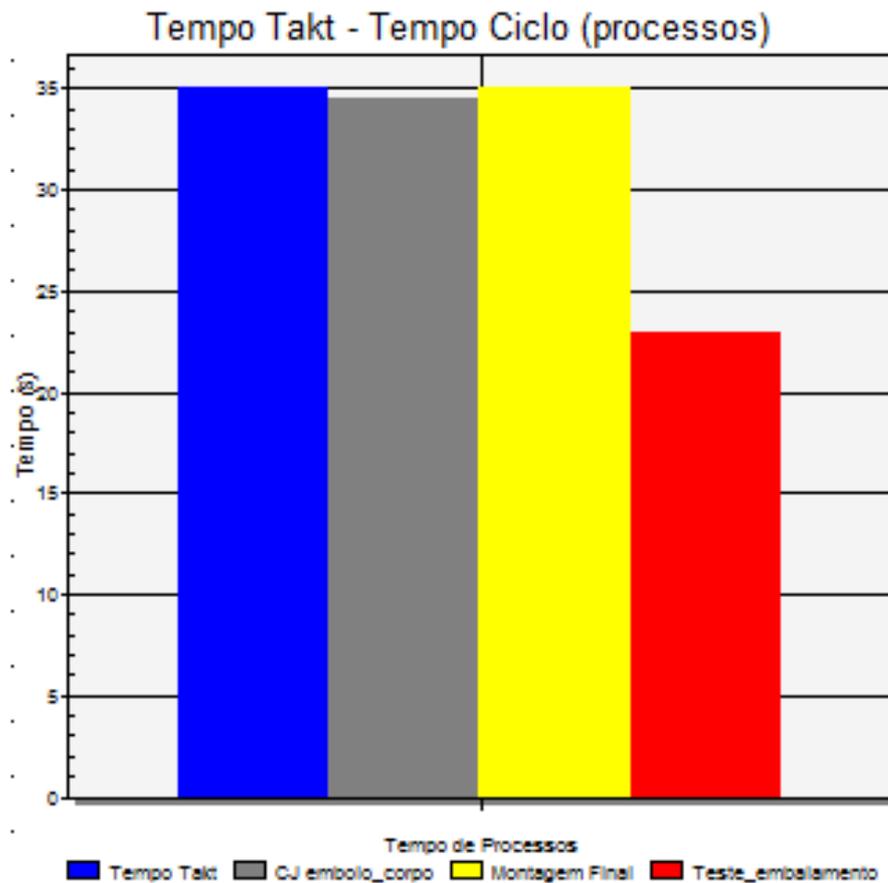


Figura 5.6: Takt time x Tempo de ciclo das estações – modelo 2.

Este gráfico de barras mostra a coluna em azul que representa o *takt time* definido para o Arranjo Físico modelo 2, a coluna em cinza representa o tempo de ciclo do processo responsável pela montagem do conjunto êmbolo + conjunto corpo (estação de trabalho A), a coluna em amarelo representa o tempo de ciclo do processo responsável pela montagem final do cilindro (estação de trabalho B), a coluna em vermelho representa o tempo de ciclo do processo responsável pelo teste + empacotamento do cilindro completo (estação de trabalho C).

5.5 Mapeamento do fluxo de valor por operação

O mapeamento do fluxo de valor conforme definição no capítulo 2.2 deste trabalho de pesquisa é uma atividade que identifica o valor agregado ao produto durante o fluxo do mesmo nas estações de trabalho organizadas no Arranjo Físico. Na execução da produção real, assim como também na execução da produção digital, feita por meio dos modelos de simulação construídos para o Arranjo Físico modelo 1 e Arranjo Físico modelo 2, todas as operações necessárias para fazer os processos são classificadas como operações que agregam valor ao produto ou operações que não agregam valor ao produto. Assim é possível enxergar e identificar os tempos utilizados em operações de valor, assim como os tempos gastos em operações consideradas como desperdício. No entanto, na prática não é possível chegar à perfeição que é resultado de ter 100 % do tempo gasto em operações que agregam valor.

5.5.1 Mapeamento do Fluxo de valor para o Arranjo Físico modelo 1

A Figura 5.7 mostra o gráfico de pizza que classifica os tempos das operações do processo A (Arranjo Físico modelo 1) em 2 categorias, a categoria que agrega valor representado por fatias em azul e a categoria que não agrega valor representado por fatias em vermelho.

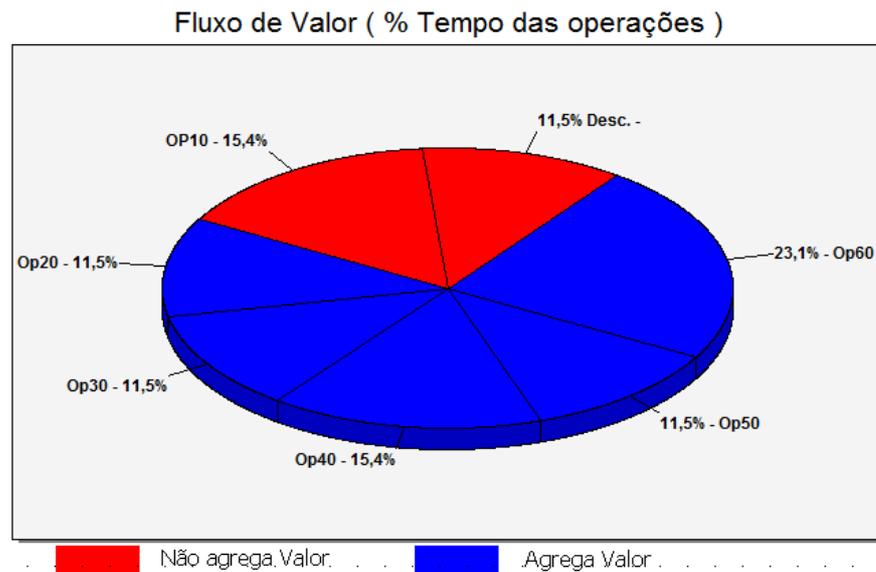


Figura 5.7: Valor agregado ao produto no processo A – modelo 1.

Portanto no processo A, 73,1 % de todo o tempo gasto nas operações agregam valor ao produto e 26,9 % são considerados como desperdício.

A Figura 5.8 mostra o gráfico de pizza que classifica os tempos das operações do processo B (Arranjo Físico modelo 1) em 2 categorias, a categoria que agrega valor representado por fatias em azul e a categoria que não agrega valor representado por fatias e vermelho.

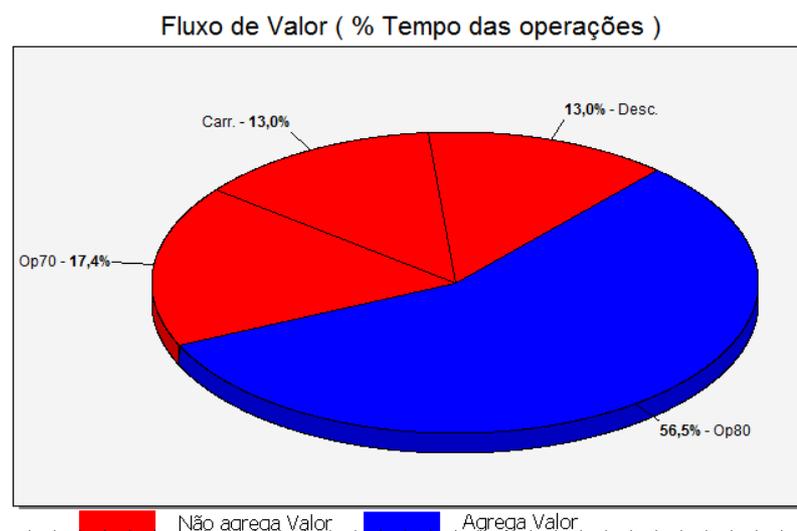


Figura 5.8: Valor agregado ao produto no processo B – modelo 1.

No processo B, verificou-se que 74 % de todo o tempo gasto nas operações agregam valor ao produto e 26 % são considerados como desperdício.

A Figura 5.9 mostra o gráfico de pizza que classifica os tempos das operações do processo C (Arranjo Físico modelo 1) em 2 categorias, a categoria que agrega valor representado por fatias em azul e a categoria que não agrega valor representado por fatias e vermelho.

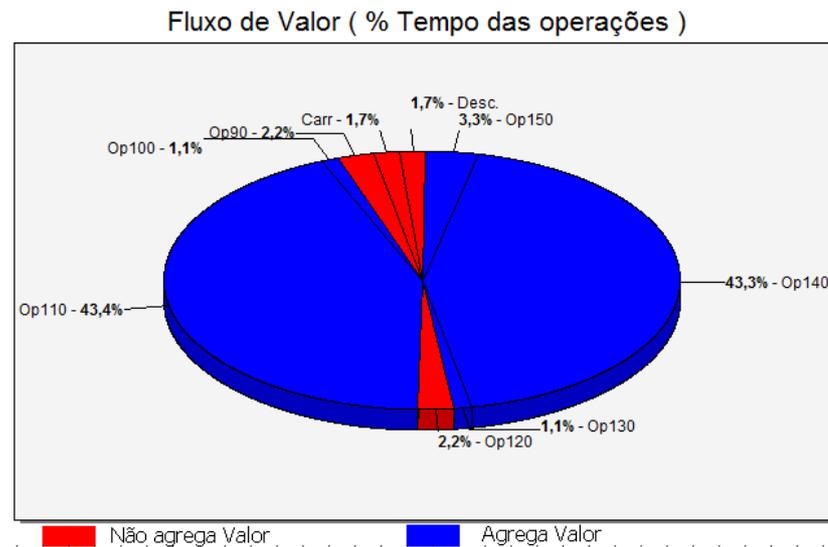


Figura 5.9: Valor agregado ao produto no processo C – modelo 1.

No processo C, verificou-se que 94,4 % de todo o tempo gasto nas operações agregam valor ao produto e 5,6 % são considerados como desperdício.

A Figura 5.10 mostra o gráfico de pizza que classifica os tempos das operações do processo D (Arranjo Físico modelo 1) em 2 categorias, a categoria que agrega valor representado por fatias em azul e a categoria que não agrega valor representado por fatias e vermelho.

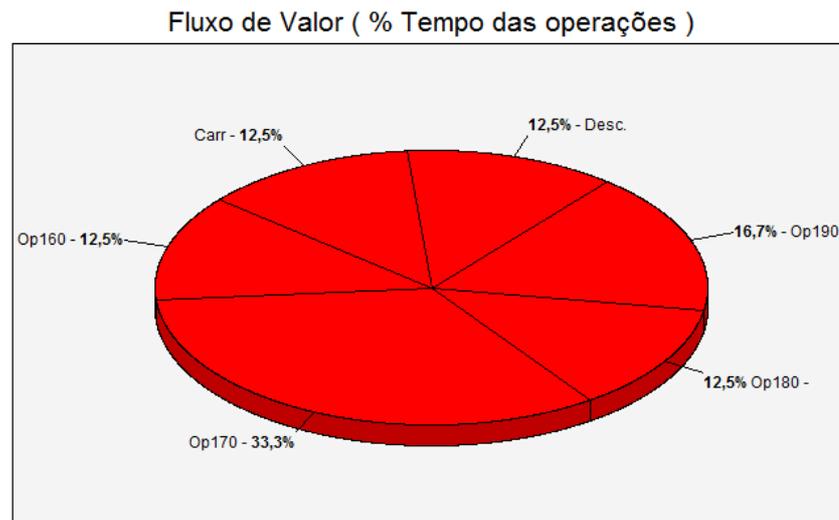


Figura 5.10: Valor agregado ao produto no processo D – modelo 1.

Portanto no processo D, 100 % de todo o tempo gasto nas operações não agregam valor ao produto, são consideradas como desperdício, ou seja, este processo não apresenta operação que agrega valor ao produto.

A Figura 5.11 mostra o gráfico de pizza que classifica os tempos das operações do processo E (Arranjo Físico modelo 1) em 2 categorias, a categoria que agrega valor representado por fatias em azul e a categoria que não agrega valor representado por fatias e vermelho.

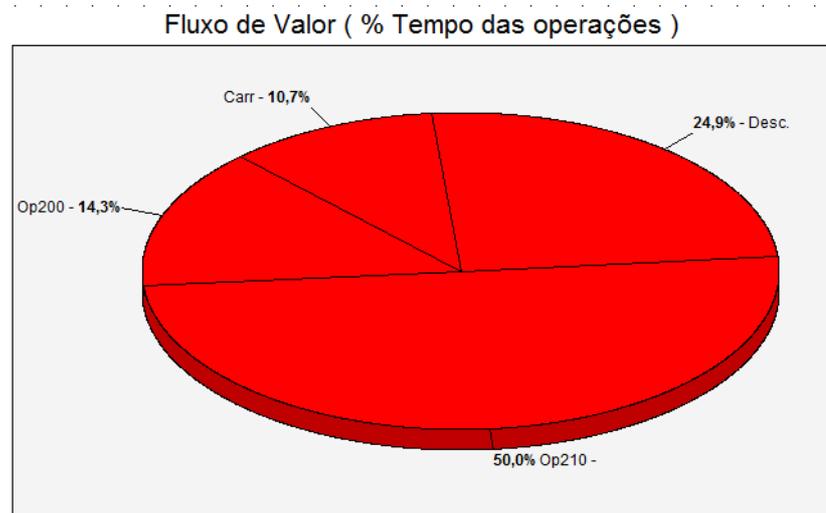


Figura 5.11: Valor agregado ao produto no processo E – modelo 1.

No processo E, verificou-se que 100 % de todo o tempo gasto nas operações não agregam valor ao produto, são consideradas como desperdício, ou seja, este processo não apresenta operação que agrega valor ao produto.

5.5.2 Mapeamento do Fluxo de valor para o Arranjo Físico modelo 2

A Figura 5.12 mostra o gráfico de pizza que classifica os tempos das operações do processo A (Arranjo Físico modelo 2) em 2 categorias, a categoria que agrega valor representado por fatias em azul e a categoria que não agrega valor representado por fatias e vermelho.

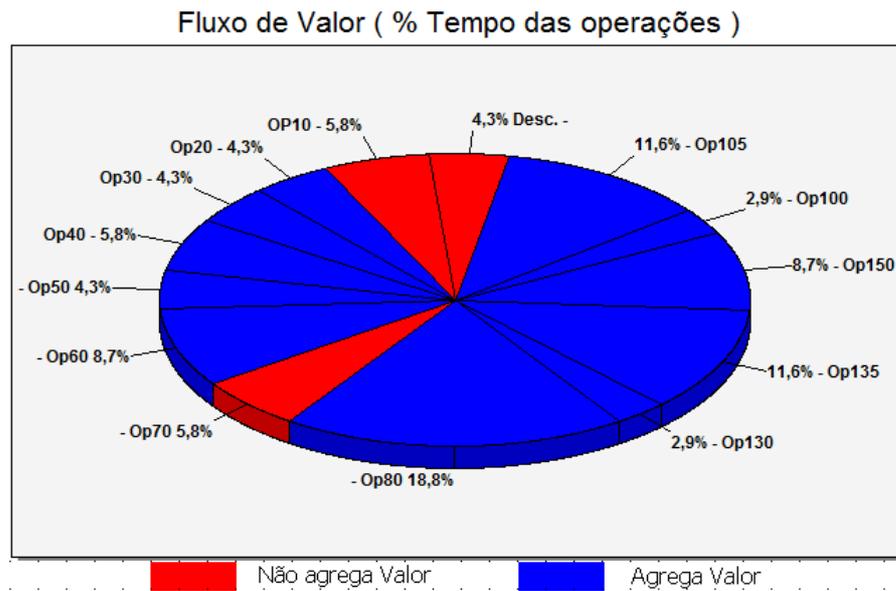


Figura 5.12: Valor agregado ao produto – processo A – modelo 2.

Portanto no processo A, 84,1 % de todo o tempo gasto nas operações agregam valor ao produto e 15,9 % são considerados como desperdício.

A Figura 5.13 mostra o gráfico de pizza que classifica os tempos das operações do processo B (Arranjo Físico modelo 2) em 2 categorias, a categoria que agrega valor representado por fatias em azul e a categoria que não agrega valor representado por fatias em vermelho.

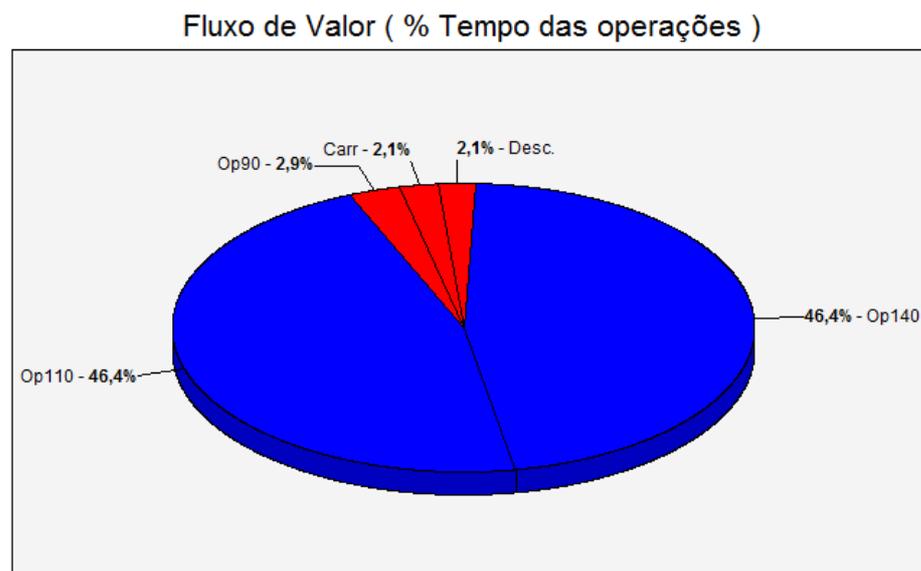


Figura 5.13: Valor agregado ao produto no processo B – modelo 2.

No processo B verificou-se que 84,1 % de todo o tempo gasto nas operações agregam valor ao produto e 15,9 % são considerados como desperdício.

A Figura 5.14 mostra o gráfico de pizza que classifica os tempos das operações do processo C (Arranjo Físico modelo 2) em 2 categorias, a categoria que agrega valor representado por fatias em azul e a categoria que não agrega valor representado por fatias e vermelho.

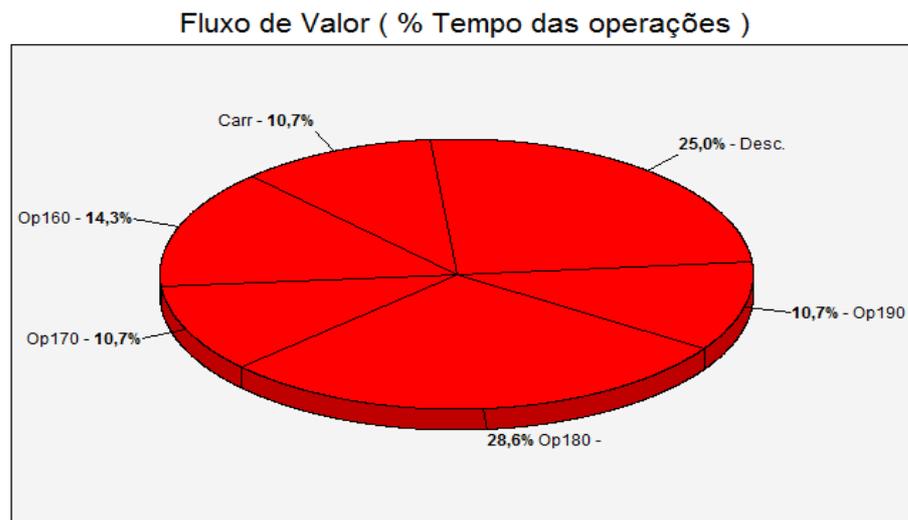


Figura 5.14: Valor agregado ao produto – processo C – modelo 2.

Portanto no processo C, 100 % de todo o tempo gasto nas operações não agregam valor ao produto, são consideradas como desperdício, ou seja, este processo não apresenta operação que agrega valor ao produto.

5.6 Estoque nos pulmões

O estoque em pulmões no Arranjo Físico é o sinônimo de inventário de produção, este termo é descrito no capítulo 2.2 deste trabalho de pesquisa como um tipo de desperdício, visto que a quantidade elevada de inventário causa na empresa maior necessidade de alocação de espaço físico, alocação de recursos humanos e capital para mantê-lo. Na execução da produção real, assim como também na execução da produção digital, feita por meio dos modelos de simulação construídos para o Arranjo Físico modelo 1 e Arranjo Físico modelo 2, a quantidade de itens estocados nos pulmões do Arranjo Físico é contabilizada para

fazer análise do inventário na produção. Esta análise é realizada com o alvo de atingir uma quantidade mínima de itens no inventário no Arranjo Físico.

O gráfico de barras da Figura 5.15 mostra a quantidade de componentes e produtos armazenados nos pulmões das estações organizadas no Arranjo Físico modelo 1.

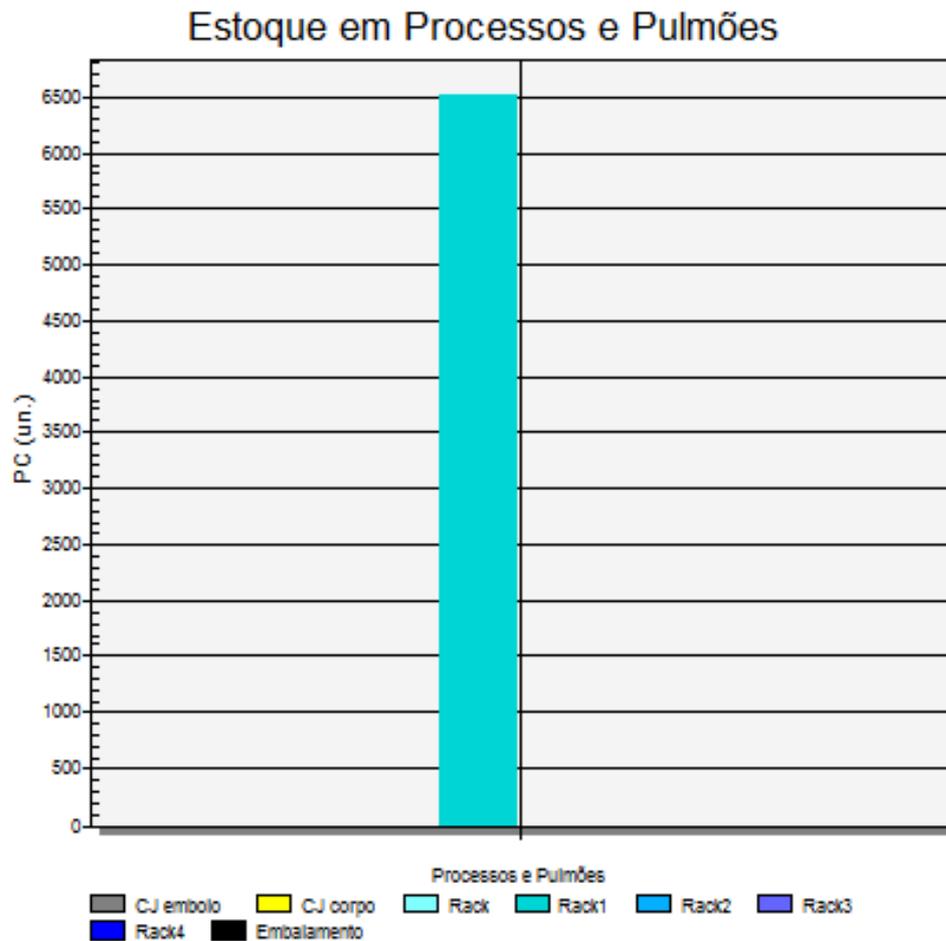


Figura 5.15: Quantidade de produtos armazenados - modelo 1.

Este gráfico de barras mostra a coluna em cinza que representa a quantidade de itens no pulmão do processo responsável pela montagem do conjunto êmbolo (estação de trabalho A), a coluna em amarelo representa a quantidade de itens no pulmão do processo responsável pela montagem do conjunto corpo (estação de trabalho B), a coluna em preto representa a quantidade de itens no pulmão do processo responsável pelo empacotamento do cilindro completo (estação de trabalho E). As colunas em tom de azul do Gráfico representam a quantidade de itens nos racks intermediários a outros processos no Arranjo Físico modelo 1

(recursos F). Portanto verificou-se que no Arranjo Físico modelo 1 o pulmão que apresenta significativa quantidade de estoque tem acima de 6500 itens de inventário. Na Tabela 4.2, este pulmão é identificado como Armazenagem1 (recurso F).

O gráfico de barras da Figura 5.16 mostra a quantidade de componentes e produtos armazenados nos pulmões das estações organizadas no Arranjo Físico modelo 2.

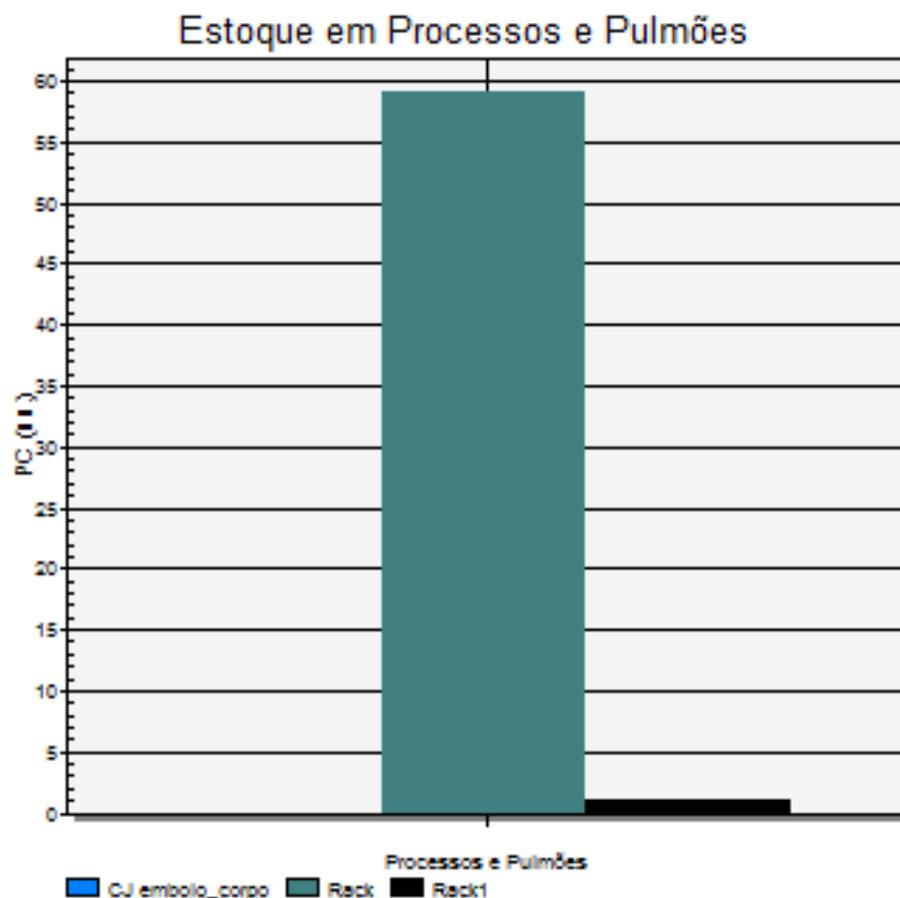


Figura 5.16: Quantidade de produtos armazenados – modelo 2.

Este gráfico de barras mostra a coluna em azul que representa a quantidade de itens no pulmão do processo responsável pela montagem do conjunto êmbolo + corpo (estação de trabalho A), as colunas em verde e em preto do Gráfico representam a quantidade de itens nos racks intermediários a outros processos no Arranjo Físico modelo 2 (recursos F). Portanto verificou-se que no Arranjo Físico modelo 1 o pulmão que apresenta significativa quantidade de estoque tem

abaixo de 60 itens de inventário. Na Tabela 4.3, este pulmão é identificado como Armazenagem1 (recurso D).

5.7 Dados estatísticos do fluxo de materiais no Arranjo Físico

O fluxo de materiais conforme definição no capítulo 2.2 deste trabalho de pesquisa é o caminho que o produto percorre através dos meios de produção desde o recebimento dos materiais brutos até a expedição do produto acabado. Na execução da produção real, o tempo, a distância e os recursos envolvidos no fluxo de materiais são classificados como desperdícios, visto que não agrega valor ao produto. Portanto a sequência de movimentação dos materiais através das operações e processos precisam utilizar o menor tempo, distância e recursos possíveis.

Na simulação dos modelos construídos para representar o Arranjo Físico modelo 1 e Arranjo Físico modelo 2, obteve-se dados estáticos durante a execução da produção por um período de 1 semana. O valor para o dado contagem ou inventário, ou seja, se refere à quantidade de inventário presente no Arranjo Físico no momento do encerramento da produção do último dia de simulação, é importante destacar que para este dado a simulação considera que a produção continuará o ciclo na semana seguinte, por este motivo as estações de trabalho não interrompem a produção quando se totaliza o tamanho do lote fabricado para o dia. O valor para o dado *lead time* médio, ou seja, o tempo referente à permanência do produto no Arranjo Físico durante o caminho percorrido nas estações de trabalho. O valor para o dado produção se refere a meta de produtos fabricados no dia. A Figura 5.17 mostra os dados estatísticos do fluxo de materiais no Arranjo Físico modelo 1.

Dados estatísticos do fluxo de material		
CONTAGEM	PRODUÇÃO	LEAD TIME MÉDIO
6728	5112	12:10:29 [h:min:s]

Figura 5.17: Dados estatísticos do fluxo de materiais - modelo 1

A Figura 5.18 mostra os dados estatísticos do fluxo de materiais no Arranjo Físico modelo 2.

Dados estatísticos do fluxo de material		
CONTAGEM	PRODUÇÃO	LEAD TIME MÉDIO
69	5002	00:21:40 [h:min:s]

Figura 5.18: Dados estatísticos do fluxo de materiais - modelo 2.

Por meio dos dados estatísticos coletados, foi possível elaborar a Tabela 5.2, que compara alguns valores de ambos os modelos. Estes valores tem correlação com o conceito Manufatura Enxuta e demonstram a eficiência do método proposto.

Tabela 5.2: Comparação entre os modelos de Arranjos Físicos propostos

Modelos	Enxuto ideal	Modelo1	Modelo2
Operações que agregam valor	100%	54,14%	66,51%
Tempo de ciclo médio [s]	35	16,1	30,8
<i>Lead Time</i> médio [s]	141	43 829	1 300
inventário [un.]	7	6 728	69

Os resultados obtidos por meio das simulações identificam com clareza o modelo que representa o Arranjo Físico mais apropriado para a implantação. Embora fosse possível identificar os aspectos positivos do Arranjo Físico modelo 2 apenas com o conhecimento de princípios do conceito Manufatura Enxuta, ou seja, sem a necessidade de métodos digitais, o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa atendeu ao objetivo proposto.

5.8 Discussão dos resultados

Os dados obtidos a partir da simulação identificam com perceptibilidade as vantagens do Arranjo Físico modelo 2 com relação aos princípios enxutos. Esta evidência foi bastante perceptível na comparação realizada pela Tabela 5.2 que mostra a proximidade dos valores coletados do Modelo 2 com relação ao Enxuto ideal. Por exemplo, o tempo de ciclo Enxuto Ideal é 35 [s] e verificou-se que o tempo de ciclo médio no Modelo 2 foi de 30,8 [s], enquanto que o tempo de ciclo médio no Modelo 1 foi de 16 [s]. Portanto o Modelo 2 mostrou um valor de tempo de ciclo médio mais próximo do Enxuto ideal que o Modelo1. Estes e outros aspectos do Modelo 2 também resultou em valores mais próximos do Enxuto ideal

com relação ao percentual de operações que agregam valor, *lead time* médio e inventário.

Visto que estes valores comparativos foram adquiridos com auxílio das ferramentas contidas no sistema que atende o conceito Fábrica Digital, por exemplo, em ferramentas do *Plant Simulation*, com várias opções de reconfiguração que permitiu atender aos objetivos de simulação deste trabalho de pesquisa. Portanto o sistema Tecnomatix mostrou ser uma ferramenta de extrema importância e eficácia para analisar Arranjos Físicos na fase de planejamento, onde ainda não é possível obter dados por meio de experimentos reais. No entanto, a validação destes dados não foi realizada, visto que esta etapa exige a implantação do Arranjo Físico real.

A execução deste método proposto possibilitou identificar as vantagens da simulação feita com a Fábrica Digital para analisar Arranjos Físicos de produção. Estas vantagens são citadas a seguir:

- melhor compreensão de pormenores do Arranjo Físico que será implantado;
- facilidade de detectar erros na construção do modelo de simulação enquanto o usuário assiste aos eventos do adicionados;
- reforça o conhecimento didático do Arranjo Físico, sistema de produção e ferramentas de controle por analisar ou simular o modelo de simulação;
- o conhecimento adquirido na análise e simulação do modelo digital frequentemente sugere melhorias no próprio Arranjo Físico a ser simulado;
- a identificação dos gargalos promove o entendimento de por que eles acontecem;
- flexibilidade para analisar opções para o Arranjo Físico, tanto as de caráter físico como as de caráter de gestão;
- o tempo de simulação pode ser controlado, isto é, pode ser expandido ou comprimido, permitindo aumentar ou diminuir a velocidade a fim de se estudar um fenômeno;
- novas mudanças de procedimentos operacionais, controle, estruturas organizacionais, fluxos de materiais, etc., podem ser analisadas após a implantação real do Arranjo Físico sem provocar distúrbios nos processos do Arranjo Físico real;

- permite ao usuário entender a evolução do modelo ao longo do tempo por salvar versões do modelo digital ao passo que faz melhorias em outras versões;
- possibilidade de analisar detalhes de operações específicas ou de analisar a influencia de variáveis do Arranjo Físico no comportamento de toda a planta fabril.

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

A pesquisa presente neste trabalho de pesquisa objetivou executar um método para analisar o desempenho de Arranjos Físicos para produção com a Fábrica Digital e princípios da Manufatura Enxuta. O uso da Manufatura Enxuta no planejamento de Arranjos Físicos não é recente nem duvidoso, mas a pergunta que este trabalho contribuiu para responder foi; como a Fábrica Digital em conjunto com a Manufatura Enxuta pode colaborar com a atividade de analisar Arranjos Físicos na Fase de Planejamento da Produção?

As simulações realizadas com as ferramentas da Fábrica Digital foram de extrema importância para analisar o Arranjo Físico, visto que possibilitou a mensuração da eficiência, por meio de métodos digitais, ou seja, sem a presença dos meios de produção reais. O ambiente virtual de trabalho propiciou a antecipação de informações que convencionalmente só são observadas após a implantação do Arranjo Físico, ou seja, isto permite tomar decisões com maior maturidade na fase de planejamento da produção, pois os participantes desta fase podem ter uma visão clara da interação existente entre todo o processo produtivo. Assim estes profissionais podem sugerir melhorias e acompanhar as mudanças que estas resultam, sem o risco de causar prejuízos reais, visto que se trata de simulações.

O método de pesquisa e o sistema Fábrica Digital escolhido nesse trabalho mostrou como o uso de relatórios com informações úteis contribuem para a tomada de decisões rápidas e confiáveis mesmo no início do planejamento do Arranjo Físico. As animações geradas pelos aplicativos facilitam a comunicação entre os especialistas de planejamento e os membros da alta hierarquia da empresa, pois apresenta de modo claro e objetivo o comportamento dinâmico do Arranjo Físico.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

A realização desse trabalho de pesquisa possibilitou ter ciência de que a Fábrica Digital precisa continuar avançando para atender aos anseios da função de negócio Planejamento de Manufatura e de todas as outras áreas da Engenharia de Produção. Portanto segue abaixo algumas sugestões para futuros trabalhos seguindo a mesma linha de pesquisa:

- Estudo de caso numa empresa de Manufatura com o título: O Uso do conceito Fábrica Digital e Manufatura Enxuta para analisar Arranjos Físicos para produção. Fazer o Estudo de Caso utilizando o método proposto nesse trabalho, isto possibilitará a medição da acuracidade do método com a comparação dos dados resultantes no Arranjo Físico real com os dados de simulações no Arranjo Físico virtual.
- Implantação do Arranjo Físico proposto nesse trabalho de pesquisa na universidade. Construir o Arranjo Físico real com as mesmas características presentes no Arranjo Físico virtual já modelado na Fábrica Digital para o desenvolvimento de uma Fábrica de Aprendizado que contemple meios de produção para realizar as mesmas operações de uma linha de produção tanto no ambiente digital como no ambiente real.
- Propor um método para utilização da Fábrica Digital na universidade integrada ao CAD, CAM e PDM, ou seja, conceitos que apoiam todo o ciclo de desenvolvimento de produto com a tecnologia da informação. Esse ambiente virtual na universidade promoverá o aprendizado e avanço de pesquisas que tem como foco fazer o desenvolvimento de produto ganhar mais maturidade no ambiente virtual antes de consumir tempo e recursos no mundo real.

7 Referências Bibliográficas

- [1] Kampker, A.; Burggräf, P.; Potente, C. W.; Petersohn, G., "Life Cycle Oriented Evaluation of Flexibility in investment decisions for Automated Assembly Systems," em *Proceedings of DET2011, 7th International Conference on Digital Enterprise Technology*, Athens, 2011.
- [2] Paula, M. A.B.; Santos, E. A.B., "A Methodological Approach to Automated and Integrated Manufacturing Systems Development," *Produção*, vol. 18, pp. 8-25, 2008.
- [3] Slack, N.; Chambers, S.; Johnston, R., *Administração da Produção*, São Paulo: Atlas S.A., 2002.
- [4] Rozenfeld, H.; Forcellini, F. A.; Amaral, D. C.; Toledo, J. T.; Silva, S. L.; Alliprandini, D. H.; Scalice, R. K., *Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo*, São Paulo: Saraiva, 2006.
- [5] Kühn, W., "Digital Factory - Simulation Enhancing the Product and Production Engineering Process," em *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, Monterey, 2006.
- [6] Ballard, G.; Koskela, L.; Howell, G.; Zabelle, T., "Production System Design: Work Structuring Revisited.," *LCI White Paper*, p. 14, 11 January 2001.
- [7] Porto, A. J.V.; Souza, M. C. F.; Ravelli, C. A.; Batocchio, A., "Virtual Manufacturing: Concepts and Challenges," *Gestão & Produção*, pp. 297-312, Dezembro 2002.
- [8] Kuehn, W., "Digital Factory - Integration of Simulation Enhancing the Product and Production Process Towards Operative Control and Optimisation," *Simulation*, pp. 27-39, 2006.
- [9] Yang, X.; Malak, R. C.; Lauer, C.; Weidig, C.; Hagen, H.; Hamann, B.; Aurich, J. C., "Virtual Reality Enhanced Manufacturing System Design," em *Proceedings of DET2011, 7th International Conference on Digital Enterprise Technology*, Athens, 2011.
- [10] Schütze, J.; Baum, H.; Laue, M.; Muller, E., "Analysis of Interpersonal Communication Processes in Digital Factory Environments," em *Leveraging Knowledge for Innovation in Collaborative Networks*, Boston, Springer, 2009, pp. 177-184.

-
- [11] Rohrlack, T., "The Digital Factory from concept to reality - a Bentley solution paper for automobile manufacturers," Bentley Systems Incorporated, 15 09 2008. [Online]. Available: <http://www.bentley.com>. [Acesso em 01 2012].
- [12] Wenzel, S.; Jessen, U.; Bernh, J., "Classifications and conventions structure the handling of models within the Digital Factory," *Computers in Industry - Special issue: The digital factory: an instrument of the present and the future*, pp. 334-346, Maio 2005.
- [13] Siemens, "Tecnomatix," Siemens, 10 01 2012. [Online]. Available: <http://www.plm.automation.siemens.com>. [Acesso em 08 02 2012].
- [14] Dassault, "Delmia," Dassault, 2002. [Online]. Available: <http://www.3ds.com/products/delmia>. [Acesso em 08 02 2012].
- [15] VDI, VDI4499, Blatt - Digital Factory - Fundamentals, Grundlagen ed., Vols. %1 de %2Verein Deutscher Ingenieuri - RICHTLINIEN, Berlin: VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 2008.
- [16] Garza-Reyes, J.A., "The development of a lean park homes production process using process flow and simulation methods," *Journal of Manufacturing Technology Management*, pp. 178-197, 2012.
- [17] Stone, K.B., "Four Decades of Lean: A Systematic Literature Review," *International Journal of Lean Six Sigma*, pp. 112-132, 2 Março 2012.
- [18] Azevedo, A.; Almeida, A., "Factory Templates for Digital Factories Framework," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 755-771, Agosto 2011.
- [19] Zülch, G.; Stowasser, S., "The Digital Factory: An instrument of the present and the future," *Computers in Industry - Special issue: The digital factory: an instrument of the present and the future*, pp. 323-324, Maio 2005.
- [20] Wohlke, G.; Schille, E., "Digital Planning Validation in automotive industry," *Computers in Industry*, pp. 393-405, 31 Janeiro 2005.
- [21] Volkmann, J. W.; Constantinescu, C. L., "Digital Factory Economics," em *Proceedings of DET2011, 7th International Conference on Digital Enterprise Technology*, Athens, 2011.
- [22] Chen, D.; Kjellberg, T.; Astrid, A., "Software Tools for the Digital Factory - An Evaluation and Discussion," em *Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology*, Proceedings of

- DET2009 ed., Berlin, Springer, 2009, pp. 803-812.
- [23] Haller, E.; Schiller, E. F.; Har, I., "Impact of the Digital Factory on the Production Planning Process," em *Integrating Human Aspects in Production Management*, Integrating Human Aspects in Production Management ed., Boston, Springer, 2005, pp. 73-84.
- [24] Chenhui, J.; Yanbin, L.; Xintao, X., "Research and Application of Digital Assembly Process Planning and Simulative Validation," em *Proceedings of the IEEE, International Conference on Measunring Technology and Machatronics Automation*, Luoyan, 2009.
- [25] Chenhui, J.; Yanbin, L.; Xintao, X., "Research on modeling and simulating optimization for Digital Factory," em *International Conference on Measunring Technology and Machatronics Automation*, Luoyan, 2010.
- [26] Bracht, U.; Masurat, T., "The Digital Factory between vision and reality," *Computers in Industry*, pp. 325-333, Maio 2005.
- [27] Gregor, M.; Medvecký, S., "Digital Factory – Theory and Practice," em *Engineering the Future*, Zilina, Sciyo, 2010, pp. 355-376.
- [28] Park, Y. H.; Jeong, S. H.; Noh, S. D., "Construction and Aplication of Digital Virtual Factory for Paint Shop," em *Proceedings of 2009, IEEE International Symposium on Assembly an Manufacturing*, Suwon, 2009.
- [29] Yang, T.; Zhang, B.; Chen, B.; Li, S., "Research on Plant Layout and Production Line running Simulation in Digital Factory Environment," em *Workshop on Computational Inteligence and Industrial Application*, Wuhan, 2008.
- [30] Gregor, M. Apud Caggiano, A.; Medvecký, S.; Matuszek, J.; Štefaník, A., "Digital Factory," *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, pp. 123-132, 2009.
- [31] Lawson, G.; D'Cruz, M., "Ergonomics Methods and The Digital Factory," em *Digital Factory for Human-oriented Production Systems*, London, Springer, 2011.
- [32] Chang, S.; Wang, M.J. J., "Digital Human Modeling and Workplace Evaluation: Using an Automobile Assembly Task as an Example," *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, pp. 445-455, 2007.
- [33] Rim, Y. H.; Moon, J. H.; Kim, G. Y.; Noh, S. D., "Ergonomic and Biomechanical

- Analysis of Automotive General Assembly using XML and Digital Human Models,” *International Journal of Automotive Technology*, pp. 719-728, 01 12 2008.
- [34] Caggiano, A.; Teti, R., “Digital Factory Simulation Tools for the Analysis of Robotic Manufacturing Cell,” em *Proceedings of DET2011, 7th International Conference on Digital Enterprise Technology*, Athens, 2011.
- [35] Yang, T.; Zhang, B.; Chen, B.; Li, S., “Research on Simulation and Evaluation of Production running in Digital Factory Environment,” em *International Symposium on computer Science and Computational Tachnology*, Shanghai, 2008.
- [36] Arndt, F. W., “The Digital Factory Planning and Simulation of Production in Automotive Industry,” *Informatics in Control - Automation and Robotics*, pp. 27-29, 2006.
- [37] Hints, R.; Vanca, M.; Terkaj, W.; Marra, E. D.; Temperini, S.; Benabic, D., “A virtual Factory Tool to Enhance the Design Products of Production Line,” em *Proceedings of DET2011, 7th International Conference on Digital Enterprise Technology*, Athens, 2011.
- [38] Menges, R., “Frühzeitige Produktbeeinflussung und Prozessabsicherung,” em *Internationaler Fachkongress Digitale Fabrik in der Auto-mobilindustrie*, Ludwigsburg, 2004.
- [39] Lee, C.; Seong, C. L.; Hwang, I., “PDM and ERP Integration methodology using Digital Manufacturing to support Global Manufacturing Technology,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 399-409, 2010.
- [40] Sacco, M.; Terkaj, W.; Maso, G. D.; Milella, F.; Pedrazzoli, P.; Rovere, D., “Virtual Factory Manager,” em *Virtual and Mixed Reality - Systems and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011 ed., Berlin, Springer, 2011, pp. 397-406.
- [41] Carli, P. C.; Delamaro, M. C.; Salomon, V. A. P., “Identification and prioritization of critical success factors in a digital factory implementation,” *Produção*, vol. 20, n. 4, 1 Maio 2010.
- [42] Schleipen, M.; Sauer, O.; Friess, N., “Production Monitoring and Control systems within the Digital Factory,” em *Proceedings of the 6th CIRP: Sponsored international Conference on Digital Enterprise Technology*, Berlin,

-
- Springer, 2010, pp. 711-724.
- [43] Bley, H.; Franke, C., "Integration of Product Design and Assembly Planning in the Digital Factory," em *CIRP Annals - Manufacturing Systems*, Saarbrucken, 2004.
- [44] Hasse, N.; Salminen, K.; Andersson, P., "Framework for Extended Digital Manufacturing Systems," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing - 6th CIRP-Sponsored International Conference of Digital Enterprise Technology (DET2009) - Enterprise Informatics*, pp. 446-456, Maio 2011.
- [45] Masood, T.; Roy, R.; Harrison, A.; Gregson, S.; Xu, Y.; Reeve, C., "Challenges in Digital Feedback of through-life Engineering Service Knowledge to Product Design and Manufacture," em *Proceedings of DET2011, 7th International Conference on Digital Enterprise Technology*, Athens, 2011.
- [46] Sacco, M.; Radaelli, C.; Lawson, G.; Cruz, Mirabelle D., "Difac: Digital Factory for Human oriented Production System," em *HumanComputer Interaction HCI Applications and Services*, Berlin, Springer, 2007, pp. 1140-1149.
- [47] Duffy, B. R.; Hare, G. M. P.; Campbell, A. G.; Stafford, J.; O'Grady, M. J., "NEXUS: Fusing the Real & the Virtual," em *Proceedings of EUROCON 2005 - The International Conference on Computer as a Tool*, IEEE ed., Belgrade, IEEE Computer Society, 2005, pp. 716-719.
- [48] Westkämper, E., "Digital Manufacturing in the Global Era," em *Digital Enterprise Technology: Perspectives and Future Challenges*, New York, Springer, 2007, pp. 3-14.
- [49] Eberhardta, U.; Rulhoffb, S.; Stjepandicc, J., "Integration of Time Management in the Digital Factory," *PROSTEP*, pp. 1-8, 2010.
- [50] Daniels, M., "Engineering & Technology - A Language for the Digital Factory," *Engineering & Technology*, vol. 4, pp. 68-69, 2009.
- [51] Ohno, T., *O sistema Toyota de produção – além da produção em larga escala*, Porto Alegre: Bookman, 1997.
- [52] Womack, J. P.; Jones, D. T., *A Máquina que Mudou o Mundo*, Rio de Janeiro: Campus, 1992.
- [53] Womack, J. P.; Jones, D. T., *A Mentalidade Enxuta nas Empresas*, Lean

Thinking, Rio de Janeiro: Campus, 2004.

- [54] Ferro, J. R., "Lean Institute Brasil," 1998. [Online]. Available: www.lean.org.br. [Acesso em 05 Novembro 2012].
- [55] Baines, T.; Lightfoot, H.; Williams, G. M.; Greenough, R., "State-of-the-art in lean design engineering: a literature review on white collar lean," *Proc. Imeche*, p. 220, 2006.
- [56] Shook, R., "Aprendendo a enxergar," *Lean Institute Brasil.*, n. 1, 1999.
- [57] BAUDIN, M., "Lean logistics: the nuts and bolts of delivering materials and goods.," *Kentucky: Productivity Press*, 2005.
- [58] Brown, S., "New evidence on quality in manufacturing plants: a challenge to lean production," *Production & Inventory Management Journal*, pp. 24-29, 1998.
- [59] Ndahi, H.B., "Lean manufacturing in a global and competitive market," *Technology Teacher*, pp. 14-18, 2006.
- [60] Lewis, M.A., "Lean production and sustainable competitive advantage," *International Journal of Operations & Production Management*, pp. 959-978, 2000.
- [61] Cua, K. O.; Mckone, K. E.; Schroeder, R. G., "Relationships between implementation of TQM, JIT, and TPM and manufacturing performance," *Journal of Operations Management*, pp. 675-694, 2001.
- [62] Alvarez, R. R., "Takt-time: conceitos e contextualização dentro do Sistema Toyota de Produção," *Gestão & Produção*, 2001.
- [63] Storch, R. L.; Lim, S., "Improving flow to achieve lean manufacturing in shipbuilding," *Production Planning & Control*, pp. 127-137, 1999.
- [64] Tompkins, J.A, "Facilities Planning," *Industrial Engineering*, pp. 34-42, 03 Março 1996.
- [65] Ballou, R. H., *Logística empresarial: transporte, administração de materiais e distribuição física*, Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [66] Neumann, W.P., "Production system design elements influencing productivity and ergonomics," *International Journal of Operations and Production Management*, pp. 904-923, 2006.

- [67] Shingo, S., Sistema de produção com estoque zero – o sistema Shingo para melhorias contínuas, Porto Alegre: Bookman, 1996.
- [68] Vollmann, T. E., Manufacturing Planning and Control Systems, Irwin McGraw-Hill, 1997.
- [69] Bamber, L.; Dale, B. G.;, “Lean production: a study of application in a traditional manufacturing environment,” *Production Planning & Control*, pp. 291-298, 2000.
- [70] Groover, M. P., Automation, Production Systems and Computer Aided Manufacturing, New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [71] Harrel, C. R., Simulação, otimizando os sistemas, São Paulo: IMAM, 2002.