

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE MECÂNICA – CÂMPUS SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO PARA A
MODELAGEM EM REDES DE PETRI DE ALTO NÍVEL**

UANDERSON RODRIGUES COSTA MAZZONI

**ORIENTADOR: PROF. DR. FRANCISCO YASTAMI NAKAMOTO
COORIENTADOR: PROF. DR. OSVALDO LUIS ASATO**

São Paulo
2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE MECÂNICA – CÂMPUS SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO PARA A MODELAGEM EM REDES DE PETRI DE ALTO NÍVEL

UANDERSON RODRIGUES COSTA MAZZONI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo – Campus São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação (Automação e Integração da Manufatura).

Orientador: Prof. Dr. Francisco Yastami Nakamoto

Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo Luis Asato

São Paulo
2018

Catalogação na fonte
Biblioteca Francisco Montojos - IFSP Campus São Paulo
Dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M478p	Mazzoni, Uanderson Rodrigues Costa Proposta de sistematização para a modelagem em redes de petri de alto nível / Uanderson Rodrigues Costa Mazzoni, Mazzoni, Uanderson Rodrigues Costa. São Paulo: [s.n.], 2019. 80 f. Orientador: Francisco Yastami Nakamoto Co-orientador: Osvaldo Luis Asato Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2019. 1. Sistema Flexível de Manufatura. 2. Rede de Petri. 3. Unified Modeling Language. 4. Metodologia Pfs / E-mfg. I. Costa, Mazzoni, II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo III. Título. CDD 620.1
-------	--

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

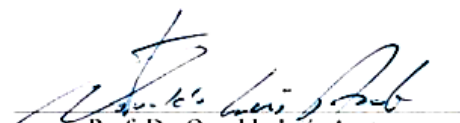
**“PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO PARA A MODELAGEM EM REDES DE PETRI
DE ALTO NÍVEL”**

Autor: Uanderson Rodrigues Costa Mazzoni

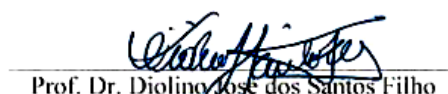
Orientador: Prof. Dr. Francisco Yastami Nakamoto

Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo Luis Asato

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou essa dissertação:


Prof. Dr. Osvaldo Luis Asato
IFSP - SZN


Prof. Dr. Dennis Lozano Toufen
IFSP - GRU


Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho
USP

São Paulo, 08 de janeiro de 2019

Dedico este trabalho à minha inspiração de cada dia, pequena Melissa; Ao meu amor Débora e todos meus familiares e amigos que contribuíram para mais uma conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao SENHOR e salvador Jesus Cristo, pela conclusão de mais uma etapa na minha caminhada pessoal e profissional, a ELE toda honra e glória.

Agradeço minha família pelo apoio e toda paciência nesse período árduo de muitas horas de estudos e dedicação ao trabalho acadêmico, muitas vezes deixando de dar devida atenção à família.

Agradeço meu orientador Prof. Dr. Francisco Yastami Nakamoto, figura de imensa importância, não apenas para o desenvolvimento do trabalho, mas para minha vida. Abriu-me a porta quando mais precisei e possibilitou que este momento chegasse. Ao professor minha eterna gratidão.

Agradeço meu coorientador Prof. Dr. Osvaldo Luis Asato, pelas diversas revisões e contribuições precisas.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Automação e Integração de Sistemas (LAIS) do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo (IFSP), campus São Paulo, pelo apoio e companhia durante o curso.

Agradeço aos professores integrantes do programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do IFSP, campus São Paulo, por compartilhar seus conhecimentos e experiências.

Agradeço ao departamento de mecânica do IFSP, campus São Paulo, pelo incentivo e apoio.

Agradeço minha linda esposa Débora e minha princesinha Melissa, que nasceu na primeira semana de aulas do curso, aumentando ainda mais minha responsabilidade e minha motivação, amor eterno.

Agradecimento especial a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da Bolsa do Programa de Demanda Social para o programa de Pós- graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Mecânica do IFSP – Campus São Paulo.

RESUMO

Os avanços tecnológicos e o aumento da complexidade dos processos nas plantas industriais influenciado principalmente pelo crescente aumento de equipamentos inteligentes empregados nos processos de manufatura têm exigido cada vez mais a proposição de novas técnicas de modelagem dos Sistemas Flexíveis de Manufatura (SFM). As ferramentas derivadas de rede de Petri (RdP) se mostram eficientes para a modelagem e projeto de sistemas de controle para SFM. Neste contexto, RdP interpretadas permitem representar elementos físicos para realização do controle associado a alto poder de abstração, promovendo a modelagem efetiva do sistema de controle para SFM. Na classe de RdP interpretada, destaca-se a rede *Enhanced Mark Flow Graph* (E-MFG) que é caracterizada pela individualização das marcas. Desta forma, o objetivo do presente trabalho é apresentar uma proposta de sistemática para geração de modelos de controle para SFM utilizando uma metodologia consagrada de modelagem *top-down* para Sistemas Dinâmicos a Eventos Discretos, com o emprego dos diagramas da *Unified Modeling Language* (UML) para a geração do sistema de controle em E-MFG.

Palavras-chave: Sistema Flexível de Manufatura, Rede de Petri, *Unified Modeling Language*, Metodologia PFS/E-MFG.

ABSTRACT

Technological advances and increasing process complexity in industrial plant influenced mainly by the increasing increase of intelligent equipment used in the manufacturing processes have increasingly required the proposal of new Flexible Manufacturing Systems (FMS) modeling techniques. The tools derived from Petri net (RdP) are efficient for the modelling and design of control systems for FMS. In this context, interpreted Petri Net represent physical elements to perform control with a high level of abstraction, allows effective modeling of FMS control. In the interpreted Petri Net class, we highlight the Enhanced Mark Flow Graph (E-MFG) network, derived from Petri Net and characterized by the individualization of the marks. In this way, the objective of this work is to present a systematic proposal for the generation of control models for FMS using a methodology of top-down modelling for Dynamic System to Discrete Events, using the Unified Modeling Language diagrams (UML) for the generation of the control system in E-MFG.

Keywords— Flexible Manufacturing Systems, Petri Nets, Unified Modeling Language, PFS/E-MFG Methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Modelo sistema de manufatura com entrada/saída	22
Figura 2- As quatro revoluções Industriais	24
Figura 3- Correlação entre volume e variedade em diferentes tipos de sistemas produtivos.....	26
Figura 4- Gráfico dos níveis de automação.....	28
Figura 5- Sistema Dinâmico a Eventos Discretos	33
Figura 6- (a) Representação gráfica dos elementos da RdP, (b) Exemplo de disparo da transição T.....	36
Figura 7- Elementos básicos do MFG	40
Figura 8- Elementos básicos E-MFG	42
Figura 9- Manipulação de atributos da marca (a) alterações condicionais, (b) Filtragem seletiva	43
Figura 10-(a) Interface de transmissão, (b) Interface de recepção.....	44
Figura 11- Elementos estruturais do PFS	45
Figura 12- Refinamento sucessivo dos elementos atividade e distribuidor	45
Figura 13- Refinamento sucessivo das atividades em PFS/MFG	47
Figura 14- Refinamento sucessivo das atividades em <i>PFS/E-MFG</i>	48
Figura 15- Diagrama de Classe representando todos os diagramas UML	49
Figura 16- Ciclo de vida do Sistema de Controle	53
Figura 17- Ciclo de prototipagem de sistema de controle	53
Figura 18- Exemplo de Diagrama de classe de um sistema de manufatura	57
Figura 19- Atributos da marca E-MFG	59
Figura 20- Informações relacionadas com gerenciamento da produção.....	60
Figura 21 - Modelagem da estrutura de dados da marca individual com Diagrama de objetos UML	61
Figura 22- Refinamento sucessivo da sub-rede da marca E-MFG.....	61
Figura 23- Macro rede representando o processo	62
Figura 24- Refinamento da macro rede de processo	63
Figura 25- Layout de exemplo do SFM	65
Figura 26- Diagrama de classe <i>UML</i> do SFM	67
Figura 27- PFS do sequenciamento das funcionalidades dos produtos.....	68
Figura 28- Refinamento do PFS inicial.....	69

Figura 29- Diagrama de objetos UML	69
Figura 30- Sub-rede do processo PFS.....	70
Figura 31- Rede E-MFG com a marca individual	71
Figura 32- Sub-redes na hierarquia da Indústria 4.0	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tipos de flexibilidade em Sistemas Produtivos	23
Tabela 2- Técnicas de modelagem de SDED	35
Tabela 3- Descrição das funcionalidades dos recursos de transformação	64
Tabela 4- Descrição dos processos dos produtos.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CPS	<i>Cyber Physical System</i>
E-MFG	<i>Enhanced-Mark Flow Graph</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
I4.0	Indústria 4.0
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IoS	<i>Internet of Service</i>
ISA	<i>International Society of Automation</i>
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
MFG	<i>Mark Flow Graph</i>
OMG	<i>Object Management Group</i>
OO	<i>Object Oriented</i>
PFS	<i>Production Flow Schema</i>
RdP	Rede de Petri
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SDED	Sistema Dinâmicos a Eventos Discretos
SED	Sistema a Eventos Discretos
SFM	Sistema Flexível de Manufatura
SFC	<i>Sequential Function Chart</i>
SM	Sistema de Manufatura
SP	Sistema Produtivo
ST	<i>Structured Text</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 MOTIVAÇÃO	17
1.2 OBJETIVO GERAL	18
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3 METODOLOGIA DO PROJETO DE PESQUISA.....	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 SISTEMA DE MANUFATURA	22
2.1.1 CONTEXTO HISTÓRICO	24
2.1.2 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	25
2.1.3 AUTOMAÇÃO FIXA	26
2.1.4 AUTOMAÇÃO PROGRAMÁVEL	26
2.1.5 AUTOMAÇÃO FLEXÍVEL	27
2.2 INDÚSTRIA 4.0.....	28
2.2.1 PILARES DA INDÚSTRIA 4.0	29
2.3 MODELAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE	32
2.4 CONTROLE DE SFM	32
2.5 SISTEMAS DINÂMICOS A EVENTOS DISCRETOS	33
2.5.1 TÉCNICAS DE MODELAGEM DOS SDED	34
2.6 REDE DE PETRI	35
2.7 <i>MARK FLOW GRAPH (MFG)</i>	39
2.8 <i>ENHANCED MARK FLOW GRAPH – E-MFG</i>	41
2.9 <i>PRODUCTION FLOW SCHEMA – PFS</i>	44
2.10 METODOLOGIA <i>PFS/MFG</i>	45
2.11 METODOLOGIA <i>PFS/E-MFG</i>	47
2.12 <i>UNIFIED MODELING LANGUAGE – UML</i>	48
2.13 METODOLOGIA DE PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE.....	52
2.13.1 ANÁLISE DE NECESSIDADES	54
2.13.2 DEFINIÇÃO DAS NECESSIDADES	54
2.13.3 PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE	54

2.13.4	PROJETO DO SOFTWARE DE CONTROLE	54
2.13.5	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE CONTROLE E TESTES	54
3	PROPOSTA DO TRABALHO.....	56
3.2	DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE CONTROLE.....	57
3.3	DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS DA MARCA E-MFG.....	59
3.4	SISTEMÁTICA PARA MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE	61
4	APLICAÇÃO DA PROPOSTA.....	64
4.1	1º PASSO: IDENTIFICAÇÃO DOS PRODUTOS A SEREM FABRICADOS	66
4.2	2º PASSO: DETALHAMENTO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DESCREVENDO AS FUNCIONALIDADES	67
4.3	3º PASSO: DEFINIÇÃO DO CONJUNTO DE ATRIBUTOS E SUB-REDES DA MARCA E-MFG	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
6	CONCLUSÃO	74
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos e o aumento da complexidade nas plantas industriais e dos equipamentos empregados nos processos de manufatura têm exigido cada vez mais a proposição de novas técnicas de modelagem dos processos produtivos.

Os desafios impostos aos Sistemas Flexíveis de Manufatura (SFM), em face às demandas de um mercado dinâmico e competitivo, instigam o desenvolvimento de novas tecnologias para promover a redução de custos de produção, aumentar a produtividade e garantir o nível de qualidade estabelecido pela empresa. Tais tecnologias quando aplicadas aos sistemas produtivos (SPs) geram demandas que se fazem necessárias à revisão de conceitos tecnológicos, como a indústria 4.0, e a elaboração de novos paradigmas, principalmente em relação à integração dos sistemas automatizados.

Considerando o comportamento dinâmico imposto pela mudança nos valores sociais, adição de novas tecnologias e políticas de mercado globalizado, a flexibilidade dos processos produtivos é requerida ao extremo, ou seja, demandas por produtos e serviços com gradativa redução do ciclo de vida, o uso racional de recursos e insumos por questão da sustentabilidade dos processos industriais, a garantia da qualidade e confiabilidade como diferencial de mercado (NAKAMOTO et al., 2009; SANTOS FILHO et al., 2011), além de aspectos tecnológicos que adicionam mais autonomia aos componentes e equipamentos inteligentes (SHROUF, 2014). Tais exigências aumentaram a dificuldade em representar o comportamento da integração dos diversos elementos dos SFM, com isso é necessário desenvolver modelos que permitam avaliar e analisar as propriedades do sistema.

Levando em consideração a dinâmica imposta pelo mercado globalizado, um tipo de sistema de manufatura ganhou destaque nas pesquisas acadêmicas: o sistema flexível de manufatura (SFM). Os SFM são compostos por grupos de estações de processamento interligados por um sistema automatizado de manuseio e armazenamento de materiais, os veículos autoguiados, ou os *Automated Guided Vehicle* (AGVs) são responsáveis pelo transporte, tudo isso controlado a partir de um sistema distribuído de computação. Os SFM possuem a característica de

produzir diferentes produtos na linha de produção e possui equipamentos que realizam mais de uma operação no sistema de manufatura. O equipamento deve ser dotado de dispositivos que possam alterar suas operações proporcionando a execução de processos distintos no mesmo equipamento (PEIXOTO, 2016).

Além da flexibilidade de operação citada anteriormente, outro fator importante na denominação do sistema como flexível está na capacidade de produção de quantidades variadas. Os tipos de peças e as quantidades podem ser ajustados em resposta às mudanças de demanda. Outro aspecto associado à flexibilidade refere-se à capacidade de executar diferentes rotas de movimentação e rotas de produção dentro do layout da fábrica (GROOVER, 2011).

Neste contexto os SFM se diferenciam por considerar a diversidade dos produtos, as características adaptativas das máquinas e as propriedades de similaridade dos processos (CAVALCANTE et al., 2010; PEIXOTO, 2016). As principais vantagens apresentadas em um SFM são: a melhora da qualidade do produto, a redução de custos, o rastreamento dos produtos ao longo da produção e menor dependência de mão de obra de baixa qualificação (SAVORY et al., 1991; GROOVER, 2011). O desempenho dos SFM é dependente da correta alocação dos recursos aos múltiplos processos existentes e da programação da sequência das atividades.

Segundo, Santos Filho (2000), a complexidade de modelar o comportamento dinâmico de um SFM é derivada de diferentes tipos de indeterminismos seja ele com relação ao tempo, que é a impossibilidade de prever o exato momento que ocorrerá o evento, ou em relação ao sequenciamento dos eventos devido ao processamento simultâneo.

Os SFM avançados possuem aderência para integrar os novos elementos no conceito tecnológico Indústria 4.0, que se apresenta como a quarta revolução industrial ou manufatura avançada. O novo conceito tecnológico permite aos SFM interoperabilidade, monitoramento, virtualização em tempo real e principalmente à comunicação vertical e horizontal, estreitando as lacunas deixadas pelos outros SP com relação ao aproveitamento inteligente de recursos finitos (KAGERMANN, et al., 2013).

1.1 MOTIVAÇÃO

Considerando as necessidades apresentadas pelos SFM e as condições imposta pelo mercado globalizado, o presente trabalho de pesquisa pretende contribuir para diminuir as dificuldades encontradas na fase de modelagem, propondo uma sistemática para modelagem de sistema de controle da manufatura utilizando extensões da ferramenta Rede de Petri (RdP), como a metodologia de desenvolvimento de modelos *PFS/E-MFG* para os SFM.

Os atuais SFM são dotados de máquinas modernas que realizam mais de uma função (Máquinas Ferramentas Multifuncionais, Centro de Usinagem, Robôs autônomos, etc.), além de possuir sistemas responsáveis pela integração da gestão de dados com o objetivo de agilizar a tomada de decisão nos níveis de *Enterprise Resource Planning* (ERP), *Computer Integrated Manufacturing* (CIM), *Manufacturing Execution System* (MES) e entre os demais níveis de gerenciamento, planejamento, controle e execução da manufatura.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias e a modernização inerente dos parques industriais é necessário desenvolver novos modelos e metodologias para adequar e garantir que o sistema de manufatura funcione de maneira eficaz para produzir com eficiência.

Os avanços tecnológicos proporcionam um aumento no desempenho e confiabilidade dos sistemas de manufatura, segundo da Silva (2016) o uso adequado desta tecnologia depende da aplicação de técnicas de modelagem de sistema de controle considerando os requisitos da manufatura.

A evolução dos paradigmas de projeto de sistemas de controle para SFM é gradativa e sensível à absorção das novas tecnologias nas áreas de informação, eletrônica embarcada, de automação e de integração dos sistemas de manufatura. Neste sentido, Miyagi (1996) propôs inicialmente a metodologia *Production Flow Schema/Mark Flow Graph* (*PFS/MFG*) para projeto de sistema de controle do SFM. O PFS é uma ferramenta gráfica para modelar o sequenciamento das atividades de processo produtivo, enquanto que o *MFG* (HASEGAWA, 1988) é uma rede interpretada da Rede de Petri (RdP) (MURATA, 1989; CASSANDRAS e LAFORTUNE, 2008). A RdP é uma ferramenta gráfica e matemática, proposto por *Carl Adam Petri* (MURATA, 1989) que permite modelar SDED.

Santos Filho (1993) apresentou o *Enhanced Mark Flow Graph (E-MFG)*, uma extensão do *MFG* com a individualização das marcas, elevando o grau de abstração dos modelos. Matsusaki (2004) contribuiu incorporando ao *E-MFG* os elementos de comunicação entre as redes, denominado de *E-MFG* com comunicadores.

Por outro lado, a aplicação da metodologia *PFS/MFG* foi apresentada inicialmente por Cavalheiro (2004) no projeto de sistemas de controle modulares e distribuídos. Nakamoto (2008) abordou a tratativa de *deadlock*¹ nos sistemas de alocação de recursos utilizando o *E-MFG* com comunicadores. Seguindo a mesma abordagem, Asato (2015) considerou a utilização das máquinas multifuncionais em SFM propondo um paradigma de alocação de funcionalidades.

Trabalhos mais recentes apresentados por Guirro (2017), que propôs um modelo em *E-MFG* com comunicadores para sistema de Programação e Controle da Produção (PCP) com base na norma *ANSI/ISA S95* (ISA, 2013), e de Kubo (2017), que desenvolveu novos modelos para a alocação de funcionalidades dos processos de manufatura com bases nos trabalhos de Asato (2015). Observa-se que nos trabalhos de Nakamoto (2008), Asato (2015), Guirro (2017) e Kubo (2017) há uma dificuldade na etapa da geração das marcas individuais *E-MFG*, que foram modeladas de acordo com a expertise de cada autor.

1.2 OBJETIVO GERAL

Propor uma nova sistemática aderente aos novos conceitos tecnológicos, para a modelagem estruturada do projeto de sistema de controle da manufatura utilizando a metodologia *PFS/E-MFG*.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para realizar a modelagem do sistema de controle da manufatura os seguintes procedimentos devem ser vistos:

¹ Estado do sistema caracterizado quando os fluxos dos processos são permanentemente impedidos, aguardando por um evento que somente outro processo poderia disparar, característico de sistemas que compartilham recursos finitos entre si.

- Modelagem do sistema de controle da manufatura.
 - Identificar quais ferramentas possuem formalismo para gerar um modelo estruturado;
 - Analisar as normas e padrões existentes.
- Metodologia de modelagem de sistema de controle.
 - Analisar os métodos de modelagem de sistema de controle utilizados em trabalhos anteriores;
 - Identificar um método que atenda as premissas do projeto;
- Modelagem orientada a objetos.
 - Analisar a modelagem orientada a objetos para aplicação da estrutura de dados.
 - Identificar as ferramentas orientadas a objetos para aplicação da estrutura de dados.
- Revisão da metodologia *PFS/E-MFG* para geração de modelos estruturados.

1.3 METODOLOGIA DO PROJETO DE PESQUISA

Nesta seção será apresentado o delineamento básico para identificar os métodos de pesquisas mais adequados ao objetivo proposto.

- ✓ Natureza da pesquisa;
- ✓ Objetivo do estudo;
- ✓ Procedimento técnico;
- ✓ Abordagem.

A natureza da pesquisa é do tipo aplicado à área da tecnologia, onde o objetivo é desenvolver raciocínio científico e produzir conhecimentos para aplicação prática, dirigida à solução de problemas específicos na área de engenharia.

Por se tratar de um assunto atual, o estudo exploratório se adequa ao tema, pois é necessária uma familiarização com as ferramentas e os métodos para modelagem de sistema de controle da manufatura no conceito indústria 4.0. O método dedutivo será utilizado, baseado em pesquisas bibliográficas concebidas a partir de artigos científicos, livros e materiais já publicados sobre o tema, além de um estudo de caso para gerar um modelo estruturado de um sistema de manufatura.

Para o tipo de abordagem quantitativa, serão adotados os seguintes procedimentos:

- Definição do problema;
 - Formulação da Hipótese;
 - Definição do método de investigação;
- **Definição e descrição do problema** – o problema a ser abordado consiste em propor uma maneira de adequar a metodologia PFS/E-MFG para modelagem do sistema de controle no conceito Indústria 4.0. Assim, é necessário observar os conceitos tecnológicos presentes no novo paradigma e propor uma nova sistemática para modelagem de sistemas de controle no conceito Indústria 4.0.
 - **Formulação da Hipótese** – A hipótese a ser considerada no trabalho de pesquisa é: A reformulação da metodologia PFS/E-MFG, adicionando novos componentes, pode se tornar um artefato para modelar sistemas de controle no conceito Indústria 4.0.
 - **Definição do método de investigação** - No tocante aos métodos de procedimentos e técnicas, serão utilizadas duas técnicas nesta pesquisa:
 - (i) documentação indireta: pesquisa bibliográfica e documental;
 - (ii) documentação direta: pesquisa quantitativa – descritiva e pesquisa exploratória.

O processo de revisão bibliográfica utilizado para o desenvolvimento deste trabalho constituiu-se de pesquisas em bancos de dados de produção científica internacional, tais como o *Web of Science*, *Scopus*, *Research Gate*, *Elsevier*, *Google Scholar*. Utilizando-se também de normas internacionais e os livros acadêmicos relacionados ao tema, além de anais de congressos de tema abordado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 é dedicado à introdução do tema de pesquisa, na qual são apresentadas as motivações do trabalho, objetivo geral e objetivos específicos, além da metodologia de pesquisa aplicada no trabalho.

O Capítulo 2 é dedicado para a revisão bibliográfica, em que é apresentado o conceito de sistemas de manufatura e um breve contexto histórico, uma apresentação dos tipos de automação, o conceito tecnológico denominado Indústria 4.0, o conceito de sistema de controle e a mudança de estado pela ocorrência de eventos discretos. Neste capítulo também são apresentadas algumas ferramentas para modelagem de sistemas de controle e seus formalismos.

O Capítulo 3 apresenta a proposta para gerar o modelo estruturado de um sistema de controle utilizando as ferramentas UML e a metodologia *PFS/ E-MFG*.

O Capítulo 4 apresenta a aplicação da proposta em um estudo de caso para demonstrar a sistemática para geração dos modelos estruturados.

O Capítulo 5 é dedicado a apresentar os resultados e discussões do trabalho de pesquisa.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e contribuições, além de apresentar algumas sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os conceitos importantes para o entendimento da proposta do trabalho. A revisão da bibliografia começa definindo sistema de manufatura (SM) e sua evolução com o passar do tempo. Outro ponto importante é entender a classificação de acordo com a produtividade, flexibilidade e tipo de tecnologia de automação empregada. Para finalizar, aborda-se o contexto de sistema de controle explorando as tecnologias, métodos e ferramentas para desenvolver uma análise sobre qual procedimento apresentam viabilidade para modelar o sistema de controle de SFM.

2.1 SISTEMA DE MANUFATURA

Segundo Groover (2011), um sistema de manufatura pode ser definido como um conjunto de pessoas, máquinas, equipamentos, ferramentas e outros dispositivos que executam atividades com o mesmo objetivo, transformar um recurso de entrada (matéria-prima, material) em um produto final de saída com valor agregado (Figura 1).

Figura 1- Modelo sistema de manufatura com entrada/saída



Fonte: Mazzoni, 2018.

Um sistema de manufatura pode ser classificado de acordo com seu arranjo físico, volume de produção e da variedade de processos que se pretende executar.

Também é classificado de acordo com a sua flexibilidade, ou seja, a facilidade que possui para migrar de um produto para outro, com o mínimo de ajustes e com o menor tempo de preparo. Com isto são definidas as metas de produção, as especificações e requisitos para selecionar a tecnologia adequada para suprir as necessidades do sistema de manufatura. Porém, segundo Groover (2011), a flexibilidade é constituída de um conjunto de atributos que tornam o sistema flexível, conforme apresentado na Tabela 1. O emprego das tecnologias de automação contribui para alcançar a flexibilidade exigida pelo mercado dinâmico e competitivo, o objetivo é melhorar o desempenho e a capacidade produtiva dos SM.

Tabela 1- Tipos de flexibilidade em Sistemas Produtivos

Tipos de Flexibilidade	Definição	Fatores
Máquina	Capacidade da máquina executar uma variedade de funções .	Tempo de setup, facilidade de reprogramação, capacidade de armazenar ferramentas, habilidade e versatilidade dos operadores no sistema.
Produção	Capacidade de produção de uma variedade de produtos .	Flexibilidade das máquinas
Produto	Capacidade de produzir um novo produto.	Similaridade do novo produto para classificá-lo em uma família de produto existente e flexibilidade das máquina.
Rotas	Capacidade de produzir mediante sequências alternativas de rotas de fabricação e movimentação .	Similaridade de mix, similaridade de estações de trabalho, duplicação de estações de trabalho.
Volume	Habilidade de produzir de forma econômica baixo e alto volume de um mesmo produto.	Nível de trabalho manual executado na produção.
Expansão	Capacidade de expansão do sistema para aumentar a quantidade total produzida.	Aquisição de estações de trabalho, disponibilidade física.

Fonte: Adaptado de Groover, 2011.

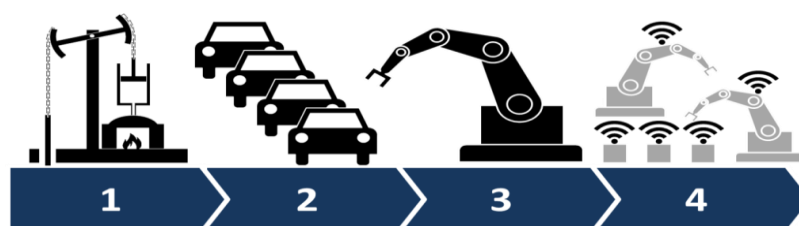
Partindo dessa premissa, um sistema de manufatura automatizado pode ser classificado em três tipos básicos (KALPAKJIAN, 2008; GROOVER, 2011):

- Automação fixa ou rígida;
- Automação programável;
- Automação flexível.

2.1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Com as inovações e avanços tecnológicos a maneira de se produzir um bem de consumo ou prestação de serviço vem sofrendo alterações consideráveis, um exemplo disso são as revoluções industriais (Figura 2).

Figura 2- As quatro revoluções Industriais



Fonte: Roser, 2016.

A primeira revolução industrial teve início no final do século XVIII, nesse período surgiram às primeiras fábricas, impulsionada pela máquina a vapor que substituiu a força humana, além disso, os trabalhadores começaram a sair do campo para os grandes centros, aumentando a mão de obra nas fábricas (BATOCCHIO, et al., 1999).

A segunda revolução industrial, no início do século XX, trouxe um modelo proposto por Ford e Taylor que organizava a produção em linha com o conceito de produção em massa (PEINADO e GRAEML, 2007).

No período pós-guerra, iniciou-se a terceira revolução industrial com o emprego do computador e da microeletrônica no controle tanto do processo, como dos sistemas em geral (SLACK et al., 2002).

Atualmente vivemos o início da transição para quarta revolução industrial, a chamada Indústria 4.0 (I4.0) ou manufatura avançada, que vem sendo amplamente pesquisada no mundo acadêmico. Com a evolução dos recursos computacionais e a integração dos sistemas de informação com os sistemas de automação, o volume de informações aumentou consideravelmente. Como consequência, o conceito *Smart Factory* se mostra eficiente em um ambiente extremamente competitivo em um contexto de mercado globalizado. A redução dos custos, economia de energia,

conservação ambiental, redução do desperdício, aumento da qualidade e personalização ou customização em escala industrial são alguns benefícios da manufatura avançada (HERMANN et al., 2015; WANG et al., 2016; CHENG et al., 2016).

2.1.2 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

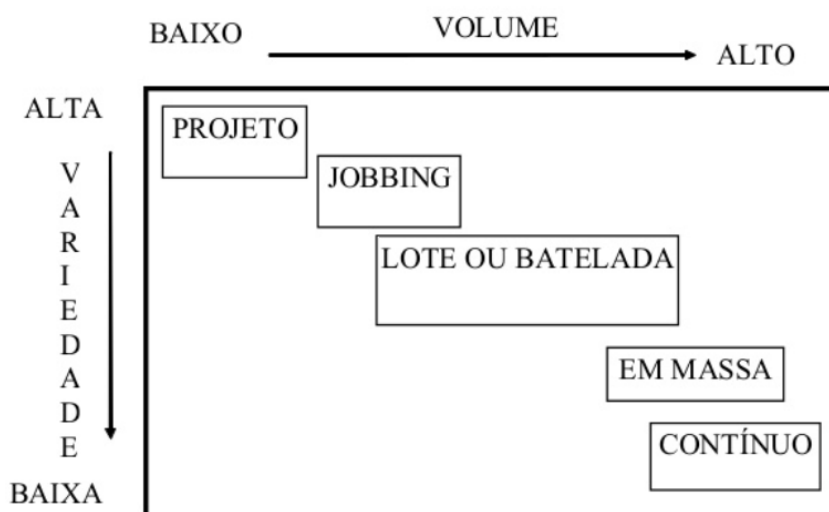
O termo automação vem da palavra automática, ou seja, ter um mecanismo de atuação própria, que faça uma ação requerida em tempo determinado ou em resposta a algum estímulo. A automação é o controle de processos utilizando o auxílio de máquinas ou sistemas automáticos ou por controle remoto, com a mínima intervenção humana. Em suma, automação é a substituição de trabalho humano ou animal por máquinas.

Groover (2011) define automação como a tecnologia pela qual um processo ou procedimento é realizado sem auxílio humano, por meio de programas de instruções combinado com um sistema que executa os programas.

A automação industrial revolucionou a maneira de se produzir algo, em Kalpakjian (2008) a definição de automação é um processo onde máquinas realizam sequências pré-determinadas, com uso reduzido ou total ausência do homem, utilizando equipamentos especiais e dispositivos para otimizar os processos produtivos. Lucro e produtividade sempre foi o foco das empresas e, o aumento da competitividade do mercado global da indústria de bens de consumo exige avançados processos de manufatura, envolvendo maquinário, ferramentas e operações alinhadas com esse objetivo (KALPAKJIAN, 2008).

Com a globalização e os novos modelos de negócios, os ciclos de vida dos produtos estão cada vez menores. Além disso, a customização torna a manufatura mais numerosa e complexa. Segundo Groover (2011), quanto maior a variedade de produtos, menor será a produção. Com o passar do tempo, diversos tipos de SPs foram criados a fim de adequar a manufatura para o fluxo e quantidade de peças a serem fabricadas. Um exemplo disso é a fabricação em massa, batelada e em lotes que surgiram como modelos de produção para atenderem diferentes demandas (Figura 3).

Figura 3- Correlação entre volume e variedade em diferentes tipos de sistemas produtivos



Fonte: Slack, 2002.

2.1.3 AUTOMAÇÃO FIXA

A automação fixa ou rígida está baseada em uma linha de produção especialmente projetada para a fabricação de um produto específico e determinado.

São utilizados para volumes elevados de produção em que os equipamentos são projetados adequadamente para produzir em altas quantidades de um único produto ou uma única peça de forma rápida e eficiente, isto é, para ter uma alta taxa de produção. O alto custo inicial do equipamento pode ser distribuído por um número muito grande de unidades produzidas, tornando o custo de produção unitário (GROOVER, 2011). Entretanto, no caso da automação fixa, os custos podem aumentar consideravelmente se houver alterações de demanda de mercado como redução de volume e/ou alteração de produto.

2.1.4 AUTOMAÇÃO PROGRAMÁVEL

A automação programável é baseada em um equipamento com capacidade de fabricar uma variedade de produtos com características diferentes, segundo um programa de instruções previamente introduzido. Esse tipo de automação é utilizado

quando o volume de produção de cada item é baixo. O equipamento de produção é projetado para ser adaptável às diferentes características e configurações dos produtos fabricados.

Essa adaptabilidade é conseguida mediante a operação do equipamento sob controle de um programa de instruções, preparado para o produto em questão. Um sistema típico de automação programável é composto por máquinas de usinagem com controle numérico computadorizado (CNC). O recurso de produção é projetado com a capacidade de mudar a sequência de operações para acomodar configurações de produtos diferentes (GROOVER, 2011).

Segundo Groover (2011), os sistemas de produção automatizados programáveis são usados para produção de baixo e médio volume. As peças ou produtos são tipicamente feitos em lotes. Para produzir cada novo lote de um produto diferente, o sistema deve ser reprogramado com as novas instruções da máquina que correspondem ao novo produto.

2.1.5 AUTOMAÇÃO FLEXÍVEL

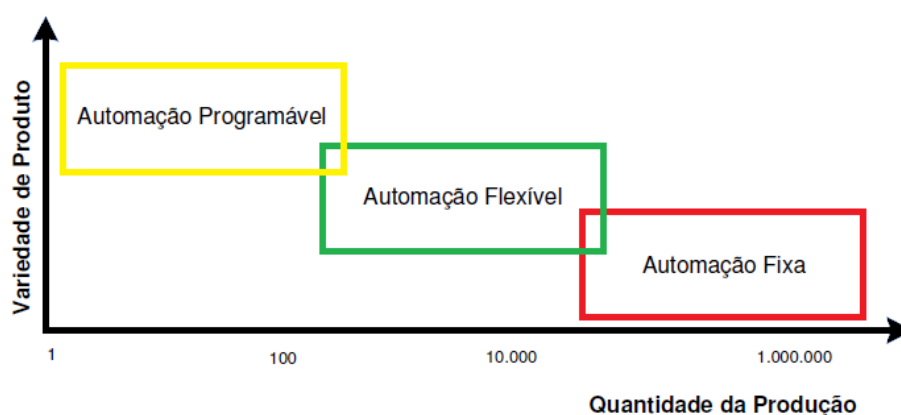
A automação flexível pode ser entendida como uma solução entre a automação fixa e a automação programável. A automação flexível também é conhecida como sistema de Manufatura Integrada por Computador (CIM) e, em geral, parece ser mais indicado para o volume médio de produção. Os sistemas de produção baseados na automação flexível têm algumas das características da automação fixa e outras da automação programável.

Os sistemas flexíveis automatizados consistem, em geral, de estações de trabalho autônomas com um alto grau de integração. Essas estações estão interligadas por um sistema de manuseio, transporte e armazenamento do material. Um computador central é utilizado para controlar e monitorar as diversas atividades que ocorrem no sistema, determinando a rota das diversas partes para as estações apropriadas controlando as operações previamente programadas nas diferentes estações (GROOVER, 2011).

Os sistemas flexíveis de manufatura se mostram competitivos à exigência do mercado globalizado, por outro lado, esse tipo de processo produtivo, também trouxe como consequência uma dificuldade na integração dos sistemas e um

aumento considerável no fluxo de dados trocados, gerando maior complexidade quando comparado aos outros tipos de manufatura. Um grande número de atividades ocorrendo de forma paralela e concorrente, compartilhando recursos finitos torna a implementação extremamente complicada. A figura 4 mostra a relação dos diferentes tipos de automação com a variedade e quantidade de produção.

Figura 4- Gráfico dos níveis de automação



Fonte: Adaptado de Groover (2011).

2.2 INDÚSTRIA 4.0

A indústria 4.0 (I4.0) se refere a quarta revolução industrial introduzida na feira industrial de Hannover- Hannover Messe 2011. No ano de 2013 o conceito começou a ser implantado, foi originado de um projeto do governo da Alemanha, voltado para novas estratégias que aliam tecnologia e meios de produção sustentável, com a utilização inteligente dos recursos para responder a competição global do mercado, que exige qualidade do produto e baixo custo de fabricação (KAGERMANN et al., 2013).

Segundo Hermann et al. (2015), I4.0 pode ser definida como a união de novos conceitos e tecnologias para gerir e organizar a cadeia de valor. Criar modelos virtuais com o auxílio dos sistemas cyber-físicos (CPS), e tomar decisões descentralizadas em uma fábrica inteligente e modularizada, tudo em tempo real e com cooperação entre o mundo real e virtual. Tudo isso graças ao avanço tecnológico da Internet e da tecnologia da informação, que integram as redes e

realizam o compartilhamento das informações em tempo real a todos os níveis da cadeia produtiva (BRETTEL et al., 2014).

Segundo Kagermann et al. (2013), no futuro toda cadeia de valores estará integrada em grandes redes globais, com intensa troca de informações de maneira autônoma graças ao *CPS*, *IoT (Internet of Things)* e *Cloud Computing*. Posicionamento defendido por Hermann et al. (2015) que destaca seis conceitos para identificar e implementar a indústria 4.0:

- Interoperabilidade (conectividade entre *CPS*, *IoT* e *CLOUD* no intuito de trocar informações em tempo real).
- Virtualização (é a criação de uma cópia virtual da fábrica que permite o monitoramento remoto de todos os processos da cadeia de produção).
- Descentralização (decisões sendo tomadas de maneira autônoma pelo *CPS*).
- Capacidade em tempo real (Coleta e analisa dados em tempo real para tomada de decisão, *BIG DATA*).
- Orientação a Serviço (uso de arquiteturas de softwares direcionadas aos serviços, oferecidos pelo *CPS* para uso compartilhado).
- Modularidade (capacidade de reposição ou expansão através de módulos individuais).

2.2.1 PILARES DA INDÚSTRIA 4.0

Para alcançar esse propósito, a I4.0 tem sua base tecnológica composta por sistemas cibernéticos, Internet das Coisas e *Big Data*. Combinadas, essas tecnologias pretendem tornar autônomo e mais eficiente as etapas de produção. Existem alguns pilares que sustentam a base tecnológica para o desenvolvimento da I4.0. Esses pilares, que representam os principais avanços alcançados na área da tecnologia nos últimos anos, são:

- **Sistemas Cyber-Físicos (*Cyber Physical Systems*) CPS** - Segundo Kagermann et al. (2013), são sistemas que incorporam o mundo virtual no mundo real. *CPS* consistem de objetos com software integrados e eletrônicos que são conectados entre si ou via internet para formar um sistema único em rede. Inclui sensores e componentes para mover ou controlar um mecanismo ou sistema, os chamados atuadores, de modo que possa ligar o *CPS* ao

mundo exterior. Os sensores permitem que o sistema adquira e processe os dados. Os dados são posteriormente disponibilizados aos serviços baseados em redes que usam atuadores para impactar diretamente nas medições realizadas no mundo real. Isso leva à fusão entre o mundo físico e ciberespaço dentro da I4.0. CPS é definido como uma integração e coordenação da computação embarcada e as variáveis físicas do processo, a interação é feita por sensores e atuadores. Esses elementos tornam o SP inteligente. Máquinas, armazenamento, recursos de operação trocam informações e disparam ações de maneira autônoma (LEE e SESHIA, 2011).

- **Big Data** - Blanchet et al. (2014) descreve Big Data como gigantesco volume de dados estruturados e não estruturados coletados e armazenados por softwares, é aplicado ao contexto da I4.0 para a qualificação desses dados, transformando-os em informações relevantes para o negócio. Engloba todas as informações que precisam ser salvas, processadas e analisadas.
- **Internet das Coisas (*Internet of Things*) IoT** - Hermann et al. (2015) conceitua *IoT* como objeto de interação e cooperação dos componentes inteligentes para alcançar os objetivos comuns. O principal objetivo da *IoT* é conectar objetos físicos, ambientes e máquinas à rede mundial de computadores, que por sua vez, permite a coleta e a troca de dados entre esses itens. Essa nova fase de desenvolvimento da cadeia de produção passa diretamente pela *IoT*, pois os CPS, que são utilizados pela I4.0, funcionam a base de sensores dessa conexão. “A *IoT* integra o CPS em uma única rede que é a rede Internet, com isso *RFID*²(*Radio Frequency Identification*), sensores, atuadores, telefones celulares, que, através de esquemas de endereçamento único, interagem e cooperam uns com os outros e com a sua vizinha, para alcançar objetivos comuns” (HERMANN et al., 2015).
- **Internet dos Serviços (*Internet of Services*) IoS** – agrega valor à cadeia de suprimentos ao permitir que serviços, sejam fornecidos de forma integrada e combinada com vários canais e participantes. “Através da *IoS* os serviços

² *RFID* é um método de identificação automática através de sinais de rádio, recuperando e armazenando dados remotamente através de dispositivos denominados etiquetas *RFID*.

internos e inter-organizacionais são oferecidos e utilizados pelos participantes da cadeia de valor” (HERMANN et al., 2015).

- **Robótica colaborativa** – Robôs capazes de interagir com outras máquinas e com os seres humanos, atuando no mesmo espaço físico de maneira flexível e colaborativa.
- **Manufatura Aditiva e Híbrida** – permite a produção através da adição de material reduzindo os custos e desperdícios com matéria-prima, com o uso das impressoras 3D. Permite a formação de novas cadeias de fornecimento, mediante a redução do estoque e a entrega de produtos no menor tempo possível. A manufatura híbrida permite tanto a adição quanto à remoção do material através de centros de usinagens integrados com impressora 3D.
- **Simulação Virtual** – permite criar modelos virtuais para simulação de produtos e processos, realizar teste e ensaios ainda na etapa de concepção, reduzindo custos com falhas de projeto.
- **Realidade Aumentada** – fornece uma interface interativa com o usuário dentro dos CPS, apresenta instruções e indicadores para auxiliar na rápida tomada de decisão.
- **Cloud Computing** – permite a integração de sistemas, plantas industriais acesso ao banco de dados e suporte de qualquer lugar do planeta.
- **Segurança Cibernética** – tem o objetivo de garantir a segurança do imenso volume de dados presente no conceito I4.0.
- **Integração dos Sistemas** – sistemas de softwares (ERP, MES, SAP) que integram toda cadeia de valor produtivo.

Segundo Santos et al., 2018, nesse contexto, CPS compreendem objetos inteligentes (máquinas, produtos ou dispositivos) que trocam informações de forma autônoma, em colaboração com o mundo físico ao seu redor. Os produtos inteligentes, identificados através de chips *RFID*, fornecem informações sobre sua localização, produção, status e rotas. Essas informações permitem que as estações de trabalho conheçam quais as etapas de fabricação devem ser realizadas para cada produto e se adaptem para executar uma determinada função. A *IoT*, que conecta todos esses dispositivos a uma rede de internet, possibilita o intercâmbio de informações em tempo real. Com o *Big Data* e *Cloud-computing* é possível realizar a coleta, armazenagem e avaliação abrangente dos dados de diversas fontes e

clientes para apoiar a tomada de decisões, otimizar operações, economizar energia e melhorar o desempenho do sistema, além de permitir que colaboradores possam acessá-las de qualquer lugar, através de um tablet ou smartphone (BAHRIN et al., 2016).

2.3 MODELAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE

Um modelo, em engenharia, pode ser definido como uma abstração da realidade, ou uma representação simplificada de um sistema com o intuito de estudá-lo. Para poder representar um sistema do mundo real e tirar conclusões sobre determinada aplicação é necessário um modelo detalhado. Os modelos devem considerar a representação de todos componentes envolvidos no sistema como entidades, atributos, atividades, eventos e estados (MIYAGI, 1996). Como os modelos do mundo real tendem a ser complexos pelo grande número de informações, geralmente utilizam-se ferramentas computacionais para, gerar ou analisar os modelos.

As ferramentas computacionais revolucionaram a indústria, proporcionando diversos benefícios como a melhoria na gestão corporativa, o aumento da produção e a redução nos custos de desenvolvimento e projetos. Consequentemente são imprescindíveis para se atingir um alto nível de competitividade requerida pelo mercado (GROOVER, 2011). No presente trabalho, algumas ferramentas foram estudadas com objetivo de selecionar as que podem ser úteis para modelagem de sistema de controle do sistema flexível de manufatura (MIYAGI, 1996; SANTOS FILHO, 2000; NAKAMOTO, 2008; NAKAMOTO et.al, 2009).

2.4 CONTROLE DE SFM

Partindo da premissa que um sistema de manufatura corresponde a um conjunto de elementos que executam atividades para transformação de um material de entrada em um produto de saída, é de extrema importância ter o controle sobre esses elementos para que as atividades sejam executadas de acordo com o estabelecido pelo planejamento da produção. Controle pode ser definido como ações pré-determinadas capazes de estabelecer o comportamento dinâmico

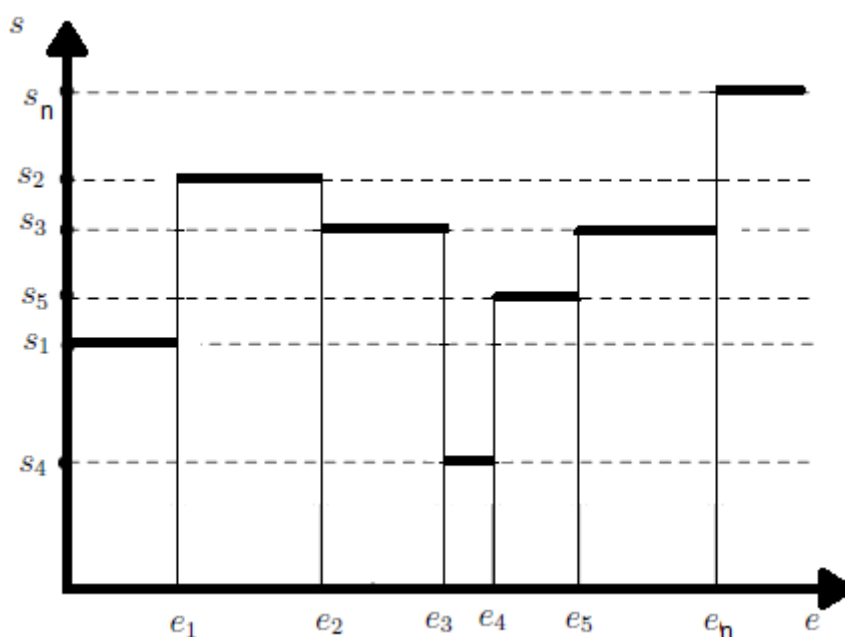
desejado ao sistema (MIYAGI, 1996; SANTOS FILHO, 2000). O comportamento desejado de um SFM é o cumprimento do plano mestre de produção estabelecido pelo planejamento, obedecendo às restrições com relação aos diferentes volumes, tipos de produtos, prazos e recursos utilizados.

Assim, os SFM podem ser modelados a partir de um conjunto de estados mediante a ocorrência de eventos instantâneos, ou seja, como sistemas dinâmicos a eventos discretos (SDED) (MIYAGI, 1996; SANTOS FILHO, 1998; CASSANDRAS e LAFORTUNE, 2008).

2.5 SISTEMAS DINÂMICOS A EVENTOS DISCRETOS

Os SFM fazem parte da classe dos SDED (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 2008), ou seja, são sistemas cuja evolução dinâmica no tempo depende da interação entre eventos discretos. Cada evento ocorre em um determinado instante de tempo e marca uma mudança de estado no sistema. Evento pode ser identificado com uma ação específica ocorrida (on/off, 0/1, aberto/fechado, etc.), conforme apresentado na figura 5.

Figura 5- Sistema Dinâmico a Eventos Discretos



Fonte: Adaptado de Cassandras e Lafortune, 2008.

O SDED é definido em Cardoso e Valette (1997) como um sistema que é modelado de tal sorte que as variáveis de estado variam bruscamente em instantes determinados e que os valores das variáveis de estado seguintes podem ser calculados diretamente a partir dos valores precedentes e sem considerar o tempo entre estes dois instantes. Os instantes de mudança de estado do sistema são chamados de eventos, os eventos correspondem em geral ao início ou ao fim de uma atividade (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 2008).

As atividades correspondem às ações realizadas no sistema físico entre dois eventos. Assim um processo se caracteriza por uma sequência de eventos e atividades interdependentes (MURATA, 1988).

Segundo Cardoso e Valette (1997), os conceitos básicos utilizados na modelagem de um sistema baseada numa abordagem por eventos discretos são os seguintes:

- **Eventos:** são os instantes de mudança de estado do sistema.
- **Atividades:** corresponde a um macro evento que representa a realização de operações como processamento, montagem, desmontagem, etc.
- **Processos:** são sequências de eventos e de atividades interdependentes. Por exemplo, um evento provoca uma atividade, que provoca um evento de fim de atividade, que por sua vez pode provocar outra atividade e assim por diante.

No caso dos sistemas flexíveis de manufatura o problema no controle de SDED está em estabelecer um conjunto de regras e restrições que permitam que o sistema se comporte conforme pré-estabelecido, uma vez que estão presentes os indeterminismos com relação ao tempo em que ocorrem os eventos e também o indeterminismo com relação ao sequenciamento de múltiplas atividades utilizando um número finito de recursos (SANTOS FILHO, 2000).

2.5.1 TÉCNICAS DE MODELAGEM DOS SDED

O comportamento dinâmico dos SDED pode ser entendido pela evolução de seus processos que possuem características específicas e que uma ferramenta de modelagem de SDED deve ser capaz de representar o conflito e a concorrência de eventos (MIYAGI, 1996).

Estes processos, por sua vez, são compostos por um conjunto de atividades que podem ocorrer de forma paralela e/ou simultânea, que significa que os estados de diferentes processos podem tanto evoluir independentemente, como pode haver inter-relações mútuas.

Não foi identificada uma técnica generalizada para qualquer tipo de SDED, no entanto, algumas técnicas vêm sendo bem sucedidas para aplicações específicas como a teoria de filas, cadeia de *Markov*, máquina de estado e, principalmente, as Redes de Petri (Tabela 2) considerando o tipo de variável (lógicas, algébricas ou análise de desempenho); a dependência ou não do tempo para ocorrência dos eventos (temporizados ou não-temporizados); e a natureza dos eventos (determinísticos ou estocásticos) (HO, 1989; ZHOU e ZURAWSKI, 1994).

Tabela 2- Técnicas de modelagem de SDED

	Temporizados	Não-temporizados
Lógicos	Rede de Petri Temporal	Rede de Petri lugar/transição Maquinas de estado finito
Algébricos	Álgebra min-max	Processos recursivamente finitos Processos seqüenciais de comunicação
Desempenho	Cadeias de Markov Rede de Filas, GSPN GSPN/simulação	

Estocásticos → ← Determinísticos

Fonte: Adaptado de Ho, 1989.

2.6 REDE DE PETRI

A Rede de Petri (RdP) é resultado da tese de doutorado de *Carl Adam Petri* defendida em 1962, em que se apresentou RdP como um formalismo matemático para descrever os relacionamentos entre condições e eventos em sistemas assíncronos em computadores e protocolos de comunicação (MURATA, 1989).

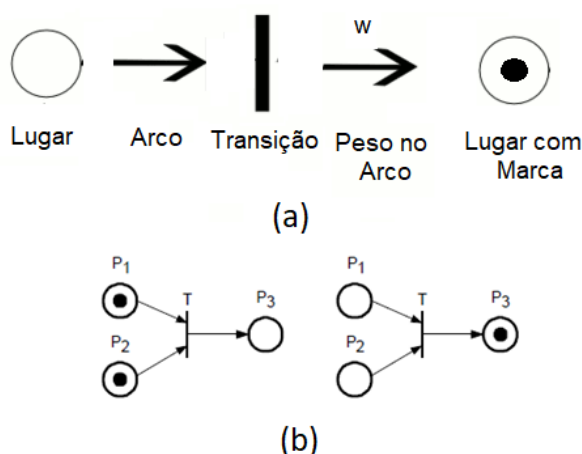
A RdP é uma ferramenta gráfica que possui formalismo matemático, capaz de se adaptar a um grande número de aplicações como: avaliação de desempenho,

análise e verificação formal de sistemas discretos, protocolos de comunicação, controle de oficinas de fabricação, concepção de softwares de tempo real e/ou distribuído, sistemas de informação, sistema de transporte, logística, gerenciamento de base de dados, interface homem-máquina e multimídia (CARDOSO e VALETTE, 1997).

De modo geral uma RdP é um grafo orientado bipartido (Figura 6) compostos por *lugar* (representado graficamente por um círculo), *transição* (representado por um retângulo ou barra) e *arcos orientados* conectam os *lugares* com *transições* e vice-versa. Os *arcos* podem possuir um peso para atribuir uma determinada característica à *marcação*. A dinâmica de um sistema é representada mediante o conceito de *marcação* que associa a cada *lugar* um conjunto de *marcas* (representadas graficamente por pontos) que indicam o estado atual do sistema.

O conceito do disparo de *transição* estabelece regras para evolução da *marcação*. A evolução dinâmica de uma RdP é definida pelo número de *marcas* e sua distribuição no grafo que é alterada com o disparo de *transições* da RdP. Uma *transição* dispara removendo as *marcas* nos *lugares* de entrada (pré-condição) e criando novas *marcas* nos *lugares* de saída (pós-condição)³.

Figura 6- (a) Representação gráfica dos elementos da RdP, (b) Exemplo de disparo da transição T



Fonte: adaptado Junqueira, 2001.

³ Os conceitos de pré-condição e pós-condição está associado a RdP condição/evento, que é um tipo especial de rede em que cada lugar pode conter no máximo 1 marca, conforme será visto em detalhes na sequência.

Zhou e Zurawski (1994) define RdP como uma técnica de representação gráfica e matemática, fornece um ambiente uniforme para modelagem, análise formal e projetos de sistemas dinâmicos a eventos discretos.

Miyagi (1996) define RdP como sendo uma representação que pode ser usada tanto no nível conceitual quanto no nível funcional, em que o sistema ou processo podem ser analisados e validados antes de prosseguir com o projeto detalhado e a implementação. Possui a vantagem de um mesmo modelo poder ser usado para análise das propriedades comportamentais e para avaliação de desempenho, assim como para a especificação da solução de controle. Pode ser usado para identificar propriedades de sistemas como sincronização de processos, eventos assíncronos, operações concorrentes, conflitos ou compartilhamento de recursos, etc.

Matematicamente, a RdP pode ser descrita com um conjunto de equações algébricas lineares. Por isso, pode ser usada para verificação formal de relações de precedência entre eventos, operações concorrentes, sincronização de processos, inexistência de *deadlocks* (travamento indesejável do sistema), atividades repetitivas e exclusão mútua de recursos compartilhados (ZHOU e ZURAWSKI, 1994).

Formalmente, é adotada a seguinte definição: uma RdP é uma quintupla (P, T, A, W, m_0) em que (MURATA, 1989):

- $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ é um conjunto finito de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$ é um conjunto finito de transições;
- A é um conjunto finito de arcos pertencentes ao conjunto $(P \times T) \cup (T \times P)$, em que $(P \times T)$ representa o conjunto dos arcos orientados de p_i para t_j , também designados por (p_i, t_j) , e $(T \times P)$ representa o conjunto dos arcos orientados de t_i para p_j , ou (t_i, p_j) ;
- W é a função que atribui um peso w (um número inteiro) a cada arco;
- m_0 é um vetor cuja i -ésima coordenada define o número de marcas (tokens) na posição p_i , no início da evolução da rede;
- Os conjuntos T e P são disjuntos, i.e., $T \cap P = \emptyset$;
- $n = |P|$ é a cardinalidade do conjunto P , o número de posições da RdP;
- $m = |T|$ é o número de transições da RdP.

Para acrescentar novas funcionalidades e simplificar os modelos foram propostas extensões para RdP. Dentre estas extensões destacam-se a inclusão de arcos habilitadores (este arco determina que a pré-condição da transição está atendida apenas na condição de marcação não nula), inibidores (este arco determina que a pré-condição da transição está atendida apenas na condição de marcação nula) e temporizações (propriedade que define quantos ciclos de tempo a marca deve permanecer dentro de um lugar antes de ser movida pelo disparo de uma transição, ou por quantos ciclos de tempo as pré-condições e pós-condições devem ser mantidas para que a transição dispare) (SOUZA, 2015).

Normalmente, para que um modelo esteja correto, a RdP deve apresentar um conjunto de propriedades, tais como: limitabilidade, reiniciabilidade e vivacidade. É importante considerar que determinadas propriedades podem ser estudadas independentemente da marcação inicial. Estas propriedades, associadas às RdP não marcadas, são conhecidas como propriedades estruturais e podem ser analisadas a partir do estudo da matriz de incidência. Por sua vez, as propriedades associadas às RdP marcadas, em função da utilização da marcação inicial, são conhecidas como propriedades comportamentais ou dinâmicas. A seguir são apresentadas as principais propriedades comportamentais das RdP (MURATA, 1989):

- Limitação (*Boundedness*): Indica que o número de marcas em cada lugar não pode exceder um número finito k para qualquer marcação acessível a partir da marcação inicial.
- Vivacidade (*Liveness*): Indica a ausência de *deadlock* (travamento indesejável) do sistema. Uma RdP é considerada viva se, independente de qual marcação é alcançada a partir de uma marcação inicial, qualquer transição da rede pode ser disparada por alguma sequência de disparo (PETERSON, 1981; REISIG, 1985; MURATA, 1989).
- Se uma transição não pode ser disparada em qualquer sequência a partir da marcação inicial é chamada de morta (L0-viva).
- Se a transição pode ser disparada pelo menos uma vez em alguma sequência de disparos a partir da marcação inicial é chamada de L1-viva.
- Se a partir de um número inteiro positivo k , a transição t pode ser disparada pelo menos k vezes em alguma sequência a partir da marcação inicial é chamada de L2-viva.

- Se a transição aparece infinitamente, em alguma sequência de disparos a partir da marcação inicial é chamada de L3-viva.
- L4-viva ou viva, se a transição t é L1-viva para qualquer marcação M a partir da marcação inicial.
- Reversibilidade: Indica capacidade da rede retornar à marcação inicial.

Além das propriedades comportamentais as RdP são classificadas em função do tipo e quantidade de marcas que podem ser associadas aos lugares, como também em função da capacidade dos arcos orientados. A seguir são apresentadas algumas classificações de RdP (PETERSON, 1981; REISIG, 1985; MURATA, 1989):

- Rede de Petri ordinária: Nessa classe de RdP as marcas são do tipo inteiro não negativo.
 - RdP binária ou condição-evento: Nessa classe todos os lugares podem conter no máximo uma marca e todos os arcos tem peso unitário.
 - RdP lugar- transição: Nessa classe os lugares podem acumular marcas e os arcos podem ter pesos maiores que um.
- Rede de Petri não ordinária ou rede de alto nível: Nestas classes de redes, as marcas são diferenciadas com parâmetros que permite a individualização das marcas (REISIG, 1985).
 - RdP colorida: O principal objetivo das redes coloridas é a redução do tamanho do modelo, permitindo individualizar as marcas através de cores que podem representar diferentes processos ou recursos dentro de uma mesma sub-rede.
 - RdP hierárquica: Nessa classe de rede, os lugares e transições de um nível superior podem ser refinados, ou seja, podem ser sub-redes da sua rede global.

2.7 MARK FLOW GRAPH (MFG)

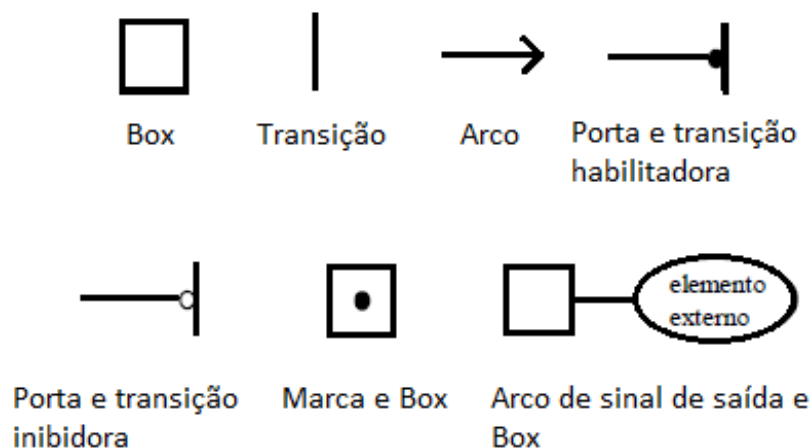
O *Mark Flow Graph* (MFG) é uma rede interpretada (HASEGAWA et al., 1984; MIYAGI, 1996), derivada de Redes de Petri (PETERSON, 1981; REISIG, 1985; MURATA, 1989) desenvolvida para a modelagem e controle de sistemas. O MFG além de representar a dinâmica do funcionamento do sistema, permite a representação de elementos externos por meio de sinais de controle, além de

permitir a representação dinâmica de situações como assincronismo, paralelismo, concorrência e intertravamentos (MIYAGI, 1996).

O MFG é composto basicamente pelos seguintes elementos estruturais (Figura 7):

- a) Os boxes que representam as pré-condições e pós-condições;
- b) As transições que indicam a ocorrências de eventos;
- c) Os arcos orientados que estabelecem uma relação causal entre os eventos e as condições;
- d) As portas que habilitam ou inibem a ocorrência dos eventos e;
- e) As marcas que indicam a manutenção de uma condição.
- f) Arco de sinal de saída envia um sinal binário do box para os dispositivos externos do grafo.

Figura 7- Elementos básicos do MFG



Fonte: adaptado Hasegawa et al., 1988.

No processo de modelagem de um SFM, os boxes representam as condições, operações ou tarefas associadas aos dispositivos e as transições representam o início e término de um processo. O comportamento dinâmico do sistema é representado pela alteração dos estados causada pela ocorrência de eventos. Para que isto seja representado no MFG, define-se a seguir as regras de disparo de transições que correspondem à ocorrência de eventos.

- Habilitação de Disparo: uma transição está habilitada para disparo se as seguintes condições são todas satisfeitas:
 - Não existe box no lado de saída com marcas;
 - Não existe box no lado de entrada sem marcas;
 - Não existe arco habilitador interno que esteja no estado de desabilitação;
 - Não existe arco inibidor interno que esteja no estado de inibição.

Uma transição que está habilitada para o disparo é chamada de *transição habilitada*. Uma transição que não satisfaz uma dessas condições é denominada *transição desabilitada*.

- Disparo: Uma transição é denominada disparavel se ela é uma transição habilitada e não possui:
 - Nenhuma porta habilitadora externa no estado de desabilitação, e também;
 - Nenhuma porta inibidora externa no estado de inibição.

Se uma transição é disparável, ela dispara imediatamente, com exceção de certos casos que envolvem conflito e atrasos de tempo.

2.8 ENHANCED MARK FLOW GRAPH – E-MFG

A ferramenta de modelagem *E-MFG* inclui as marcas individuais aos elementos estruturais do *MFG* (HASEGAWA, 1988) e permite a manipulação de marcas com atributos sem, no entanto, fugir do modelo de rede convencional. Possui capacidade de modelar e controlar as alterações de informações das marcas e seleção das tarefas associadas aos boxes (SANTOS FILHO, 2011). O *E-MFG* é composto basicamente dos elementos estruturais do *MFG*, conforme apresentado na figura 8:

- a) Box: representa a pré-condição e pós-condição de eventos;
- b) Transição: representa a ocorrência dos eventos;
- c) Arco orientado: relaciona a conexão entre o Box e a transição, ou seja, relação entre os eventos e as condições;
- d) Porta e transição habilitadora: responsável por habilitar a ocorrência de eventos;
- e) Porta e transição inibidora: responsável por inibir a ocorrência de eventos;

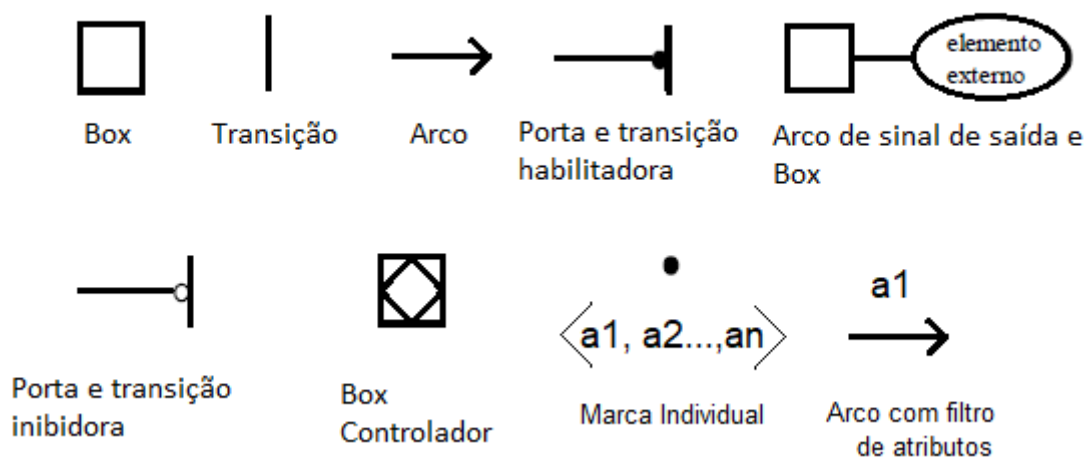
f) Arco de sinal de saída envia um sinal binário do box para os dispositivos externos do grafo.

g) Marca: indica a manutenção de uma condição e apresenta um conjunto de atributos;

h) Box Controlador: exerce a função de controlar o estado dos atributos de uma marca;

i) Arco com filtro seletor de atributos.

Figura 8- Elementos básicos E-MFG



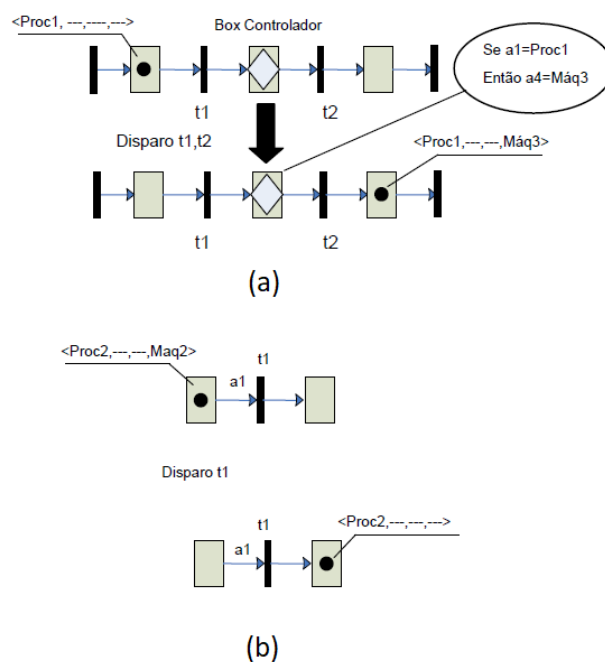
Fonte: adaptado de Santos Filho, 2000.

No *E-MFG* as marcas são acompanhadas por um vetor de atributos que lhe garantem individualidade. A estes atributos pode se associar diversas informações referentes ao produto, ao processo e ao controle. O atributo zero ou nulo significa ausência destes atributos (SANTOS FILHO, 2000). Os atributos podem ser manipulados de duas maneiras, através de alterações condicionadas, ou através de filtragem seletiva (Figura 9).

A alteração condicionada significa que os estados dos atributos podem ser alterados dependendo do estado presente desses próprios atributos da marca, realizando assim a função de atualização do estado do sistema. Essa tarefa é executada pelo Box controlador e esse tipo de Box exerce a função de controlar o estado dos atributos da marca, atualizando o estado global do sistema a partir da manutenção do estado local representado por cada uma das marcas. Regras de produção do tipo “*if...then...*” são aplicadas para verificação e atualização dos

atributos previamente especificados. Já na filtragem seletiva são estabelecidos os campos correspondentes aos atributos que devem ou não acompanhar a marca, após o disparo de uma transição. Essa especificação é realizada através de inscrições nos arcos orientados (ASATO, 2015).

Figura 9- Manipulação de atributos da marca (a) alterações condicionais, (b) Filtragem seletiva



Fonte: adaptado de Asato, 2015.

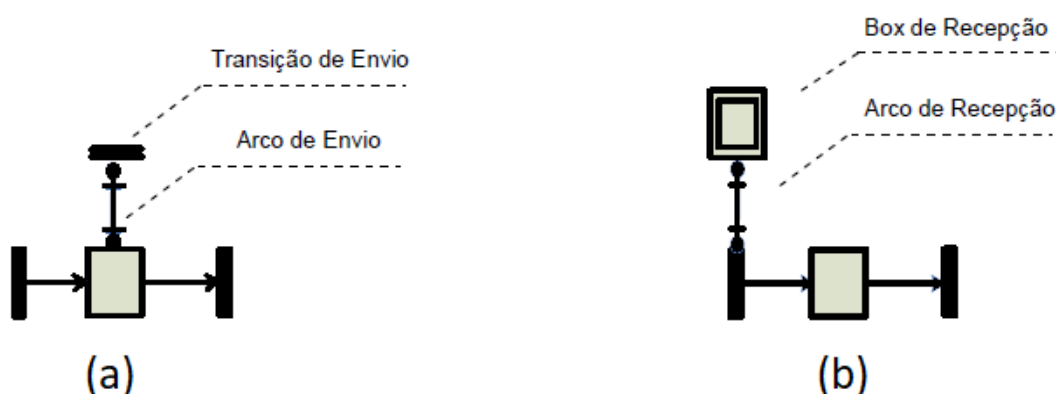
O *E-MFG* com comunicadores (MATSUSAKI, 2006) introduziu elementos de comunicação para modelar a interação entre as partes de um sistema distribuído através de mensagens. O *E-MFG* com comunicadores mantém as marcas individualizadas dos elementos estruturais originais e acrescenta os elementos de interface de transmissão e interface de recepção (NAKAMOTO, 2008).

A interface de transmissão envia mensagens assíncronas quando o Box conectado a ela estiver marcado. A interface de transmissão de mensagem corresponde ao método "call" de outro objeto baseado no paradigma de orientação a objetos. A atividade de transmissão de mensagens ocorre quando um sistema de controle necessita interagir com outro sistema de controle, por exemplo, para requisitar um serviço, ou informar o status, etc. A atividade de recepção ocorre quando um método de um objeto é chamado através de uma mensagem. A partir

desta atividade, o processamento requisitado pode ser executado, e o resultado pode ser enviado como retorno (MATSUSAKI, 2006).

As interfaces de transmissão e recepção de mensagens realizam o tráfego das informações (Figura 10). A captura e o processamento de mensagens vindas de outras partes são formados pelo Box de recepção e pelo arco de recepção (ASATO, 2015).

Figura 10-(a) Interface de transmissão, (b) Interface de recepção



Fonte: adaptado de Matsusaki, 2004.

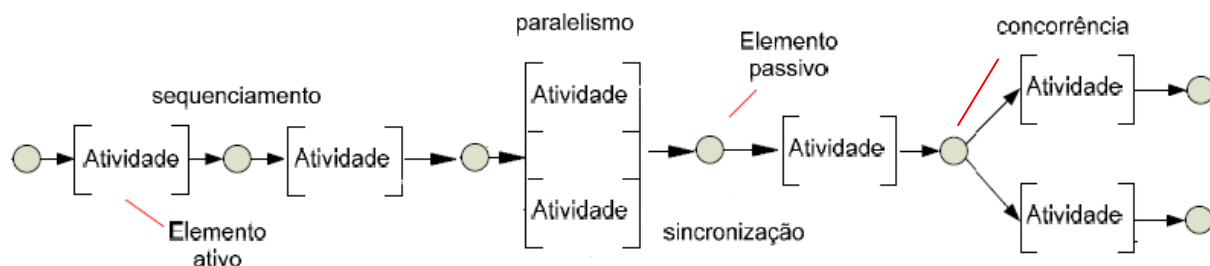
2.9 PRODUCTION FLOW SCHEMA – PFS

O *PFS* é uma ferramenta que permite construir um modelo conceitual num nível alto de abstração sem considerar a dinâmica do sistema (HASEGAWA, 1988; MIYAGI, 1996). O *PFS* possui três elementos básicos:

- Elemento ativo ou atividade: são elementos que realizam uma função associada ao processo;
- Elemento passivo ou distribuidor: são elementos que apresentam o estado em que se encontra o objeto que realiza uma determinada atividade;
- Arcos orientados: são elementos que associam atividades ao distribuidor e vice-versa.

Neste contexto, os sistemas podem ser modelados por meio de um conjunto de atividades, que realizam um processo, desempenhando uma função para cada atividade. O *PFS* diferentemente das RdP não possui marcação e atende às características de SDEDs como: sequenciamento, paralelismo, sincronização e concorrência, conforme ilustrado na figura 11.

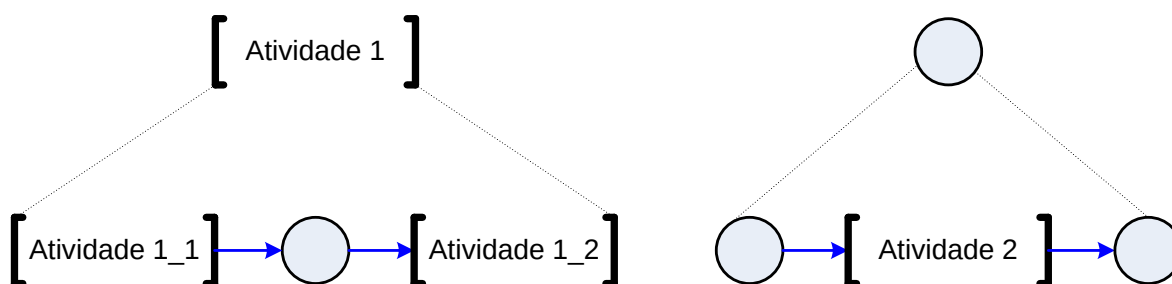
Figura 11- Elementos estruturais do PFS



Fonte: adaptado Morales, 2009.

O procedimento de modelagem em *PFS* baseia-se em aplicar a técnica do refinamento sucessivo (Figura 12), de maneira a inserir gradativamente e naturalmente o detalhamento do processo no modelo. O refinamento dos níveis de abstração é realizado de forma “*top-down*” em que se assume que a relação dos elementos básicos está inteiramente descrita no nível anterior proporcionando uma visão hierárquica do modelo (MIYAGI, 1996).

Figura 12- Refinamento sucessivo dos elementos atividade e distribuidor



Fonte: adaptado de Nakamoto, 2008.

2.10 METODOLOGIA *PFS/MFG*

A metodologia *PFS/MFG* é baseada na metodologia *Top-Down* de projetos e na abordagem estruturada hierárquica através do refinamento sucessivo (MIYAGI, 1996; SANTOS FILHO, 2000). As atividades e distribuidores do modelo de alto nível

em *PFS* são substituídos por uma rede detalhada em *PFS* ou *MFG*, sendo que no nível mais detalhado do projeto, a rede deverá possuir apenas modelos *MFG* para serem implementados (Figura 13). O uso dessa metodologia permite o mapeamento do modelo conceitual em *PFS* para o modelo formal em *MFG* de forma estruturada e modular, tornando mais eficiente o processo de modelagem do sistema global. Além disso, permite que problemas complexos possam ser decompostos em módulos mais simples, simplificando a modificação, atualização e correção, ou seja, a manutenção do programa (MIYAGI, 1996; SANTOS FILHO, 2000).

Miyagi (1996) divide as atividades em níveis hierárquicos para facilitar a distinção no processo do refinamento sucessivo. Os níveis mais representativos estão listados a seguir:

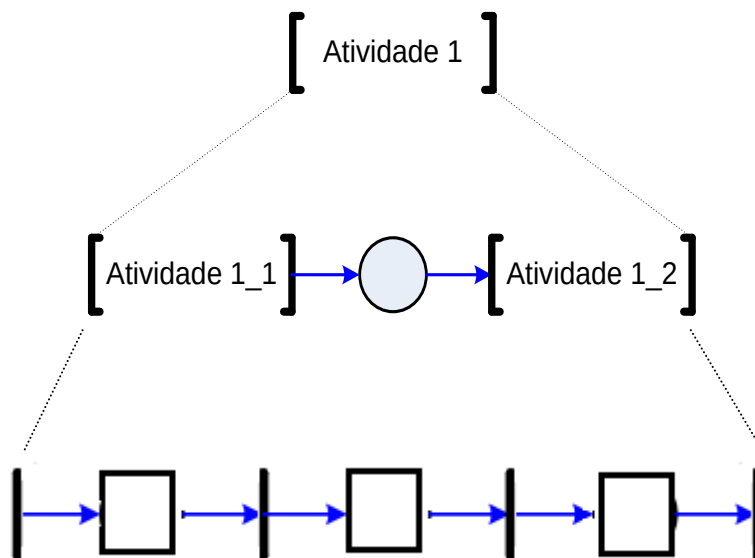
- **Nível de tarefas:** Engloba atividades onde um valor é acrescido ao processo produtivo.
- **Nível de operações:** Atividades correspondentes às operações de máquinas, dispositivos, etc.
- **Nível de ações:** Atividades correspondentes à ações e movimentos físicos simples.

Desta forma uma atividade no nível de tarefas contém atividades ao nível de operações, que por sua vez possuem atividades do nível de ações. Se for necessário adicionar outros níveis, os mesmos podem ser introduzidos em cada um dos níveis acima.

Miyagi (1996) apresenta os passos para o desenvolvimento da metodologia *PFS/MFG*.

- 1° Passo: Identificação dos principais fluxos de atividades;
- 2° Passo: Detalhamento dos fluxos de atividades;
- 3° Passo: Detalhamento das atividades;
- 4° Passo: Introdução dos elementos de controle de recursos;
- 5° Passo: Indicação dos sinais de controle com a planta.

Figura 13- Refinamento sucessivo das atividades em PFS/MFG



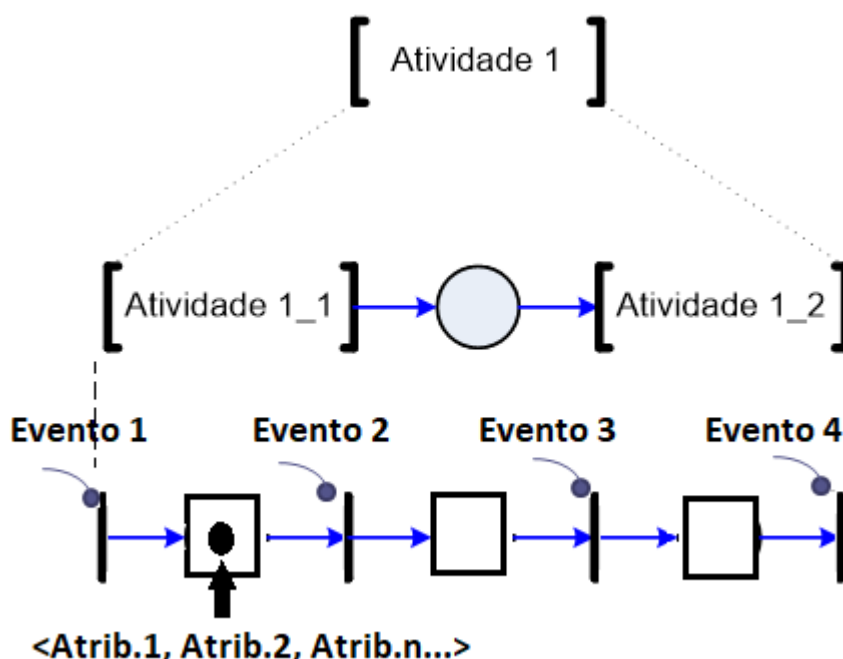
Fonte: Mazzoni, 2018.

2.11 METODOLOGIA PFS/E-MFG

Santos Filho (2000) acrescentou a marcação individual ao modelo *MFG* e gerou a metodologia *PFS/E-MFG* (Figura 14), seguindo os seguintes procedimentos:

- I. Representação de cada processo por um modelo *PFS* conceitual de alto nível de abstração.
- II. Detalhamento de cada processo em atividades, definindo a lógica de sequenciamento inerente a cada um deles.
- III. Definir o conjunto de atributos que deve ser associado às marcas do grafo *E-MFG*.
- IV. Detalhar as atividades dos processos através de modelos *E-MFG*.
- V. Mapeamento dos sinais de controle indicando os eventos gerados pelo controlador a partir de arcos de sinal de saída e os eventos ocorridos na planta a partir das portas externas.

Figura 14- Refinamento sucessivo das atividades em PFS/E-MFG



Fonte: Mazzoni, 2018.

2.12 UNIFIED MODELING LANGUAGE – UML

Unified Modeling Language (UML) surgiu no final dos anos oitenta com a união dos métodos de *Booch*, *Rumbaugh* e *Jacobson* (BOOCH et al., 2005). Esta união de métodos passou pela padronização na *OMG* (*Object Management Group*) e se tornou uma linguagem de modelagem orientada a objeto muito utilizada, principalmente na área de desenvolvimento de softwares com objetivo de poder visualizar, especificar e construir toda documentação de objetos que façam uso de sistemas complexos.

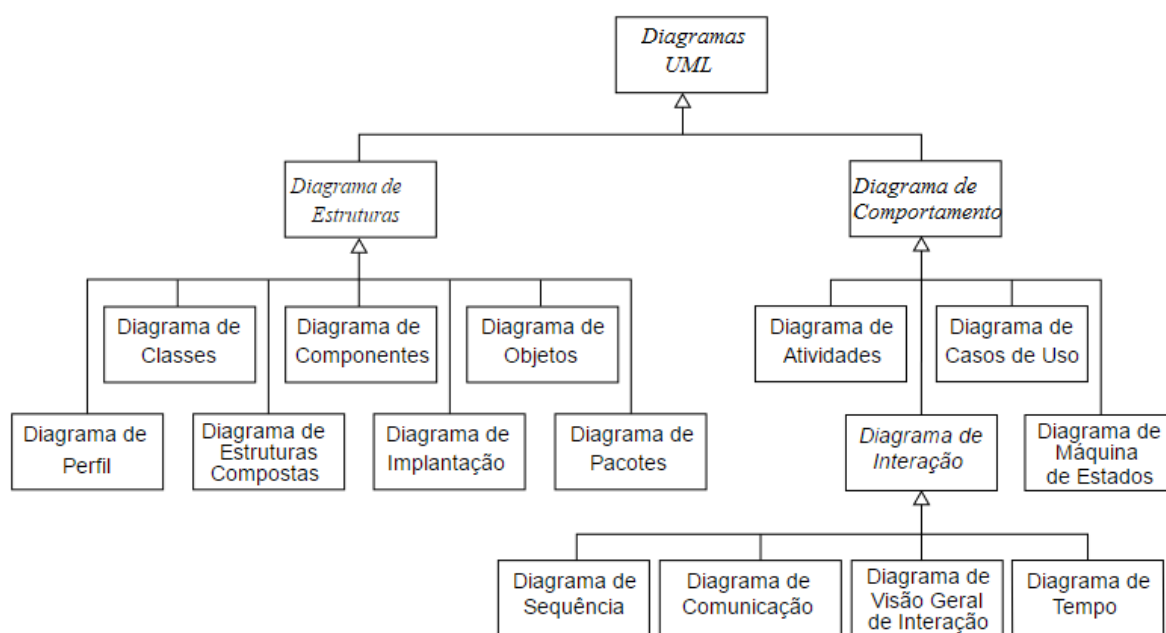
Pressman (2011) define *UML* como linguagem padrão para descrever/documentar projeto de software e modelo de negócios. Se você entender os elementos visuais dos diagramas e seus significados, pode facilmente entender e especificar um sistema e explicar esse sistema para outra pessoa interessada.

UML é uma linguagem para modelagem, com vocabulário e regras originalmente focados na representação conceitual e física de um sistema de software, que pode ser usada na modelagem de negócio e sistemas em geral (BOOCH et al., 2005; OMG, 2017).

Segundo a *OMG* (2017) *UML* vem se tornando o padrão para modelagem OO (Orientada a Objetos) no seu estado atual, e define uma notação e um metamodelo. A notação é a parte gráfica, ela é a sintaxe da linguagem de modelagem. Já os metamodelos são os diagramas que empregam as notações e seus relacionamentos.

A atual versão 2.5 da *UML* dispõe de quinze diagramas divididos em duas categorias: Estruturais (sete diagramas) e comportamentais (oito diagramas) que permitem a modelagem de alto nível, como nos diagramas de caso de uso, que descrevem as interações e os relacionamentos entre os atores e as funções básicas do negócio, até diagramas de baixo nível, como os diagramas de objetos, que capturam instancias de objetos individuais de dados (*OMG*, 2017). A figura 15 ilustra a hierarquia dos diagramas representados em um diagrama de classes.

Figura 15- Diagrama de Classe representando todos os diagramas UML



Fonte: adaptado de *OMG*, 2017.

Os diagramas estruturais estão relacionados com o aspecto estrutural tanto do ponto de vista do sistema quanto das classes. Existem para visualizar, especificar, construir e documentar os aspectos estáticos de um sistema, ou seja, a representação de seu esqueleto e estruturas (*BOOCH et al.*, 2005). Os aspectos estáticos de um sistema de software abrangem a existência e a colocação de itens

como classes, interfaces, colaborações, componentes. Os diagramas estruturais capturam a estrutura estática do sistema em diferentes níveis de abstração, os diagramas de estrutura não mostram os detalhes do comportamento dinâmico, que são ilustrados por diagramas comportamentais. No entanto, eles podem mostrar relacionamentos com os comportamentos dos classificadores exibidos nos diagramas de estrutura. Os seguintes diagramas fazem parte dos diagramas estruturais:

- Diagrama de Classes – Classificadores Estruturados
- Diagrama de Objetos - Classificação
- Diagrama de Pacotes - Pacotes
- Diagrama de Perfil - Pacotes
- Diagrama de Estruturas Compostas – Classificadores Estruturados
- Diagrama de Implantação – Implantações
- Diagrama de Componentes – Classificadores Estruturados

Os diagramas de comportamento mostram o comportamento dinâmico dos objetos em um sistema, incluindo seus métodos, colaborações, atividades e estados. O comportamento dinâmico de um sistema pode ser descrito como uma série de mudanças que ocorrem no tempo. Os diagramas de comportamento fornecem uma abstração de alto nível para as funcionalidades do sistema e incluem os seguintes diagramas (OMG, 2017).

- Diagrama de Caso de Uso – Casos de Uso
- Diagrama de Atividades - Atividades
- Diagrama de Interação – Interações
- Diagrama Máquina de Estado – Máquinas de Estado

Além dos diagramas citados acima existem os diagramas da classe de interação que fornecem uma descrição mais detalhada das funcionalidades do sistema, incluindo as interações entre os objetos:

- Diagrama de Sequência - Interações
- Diagrama de Comunicação – Interações
- Diagrama de Tempo – Interações
- Diagrama de Visão Geral da Interação – Interações

O uso da ferramenta *UML* nesta proposta de pesquisa está no fato da ferramenta oferecer uma linguagem gráfica padronizada que permite a visualização,

especificação, construção e documentação dos elementos que compõem um sistema de manufatura na etapa de levantamento das especificações e requisitos, possibilitando obter uma estrutura de dados ou uma biblioteca dos elementos participantes do sistema de manufatura.

Com isso três diagramas se destacam na captura dos aspectos importantes do sistema, porém apenas o modelo de classes está sendo considerado na proposta do trabalho, uma vez que o modelo de estados e interações pode ser substituído pela metodologia PFS/E-MFG, os três modelos são descritos a seguir:

- i. o modelo de classes representa os aspectos estáticos, estruturais, de “dados” de um sistema;
- ii. o modelo de estados representa os aspectos temporais, comportamentais, de “controle” de um sistema e;
- iii. o modelo de interações representa a colaboração de objetos individuais, os aspectos de “interações” de um sistema (RUMBAUGH, 2006).

❖ **Modelo de Classes:** Descreve a estrutura dos objetos em um sistema - sua identidade, seus relacionamentos com outros objetos, seus atributos e suas operações. O objetivo na construção dos modelos de classes é capturar os conceitos importantes para uma aplicação do mundo real. Os diagramas de classes representam o modelo de classes, a generalização permite que as classes compartilhem estrutura e comportamento e as associações relacionam as classes. As classes definem os atributos de cada objeto e as operações que cada objeto realiza ou experimenta (RUMBAUGH, 2006).

❖ **Modelo de Estados:** Descreve os aspectos dos objetos que tratam do tempo e da sequência de operações - eventos que marcam mudanças, estados que definem o contexto para eventos e a organização de eventos e estados. O modelo de estados captura o controle, o aspecto de um sistema que descreve as sequências de operações que ocorrem. Os diagramas de estados representam os modelos de estados, cada diagrama de estados mostra as sequências de estados e eventos permitidas em um sistema para uma classe de objetos. Ações e eventos em um diagrama de estados se tornam operações sobre objetos em um modelo de classes (RUMBAUGH, 2006).

❖ **Modelo de Interações:** Descreve interações entre objetos - como os objetos individuais colaboram para alcançar o comportamento do sistema como um todo. Os modelos de estados e interações descrevem diferentes aspectos

comportamentais do sistema e é necessário ambos para descrever o comportamento como um todo. Casos de uso descrevem as interações com atores externos, diagramas de sequência mostram os objetos que interagem e a sequência temporal de suas interações, e os diagramas de atividades mostra o fluxo de controle entre as etapas de processamento de um sistema (RUMBAUGH, 2006).

Outra vantagem encontrada na utilização da ferramenta *UML* está na facilidade em traduzir modelos de diagrama de estados em Rede de Petri, uma ferramenta altamente utilizada na modelagem de SDED, conforme visto nos trabalhos de GROBELNY et al., 2012; BOUARIOUA et al., 2011; ELMANSOURI et al., 2009; PAIS et al., 2011; BICCHIERAI et al., 2013.

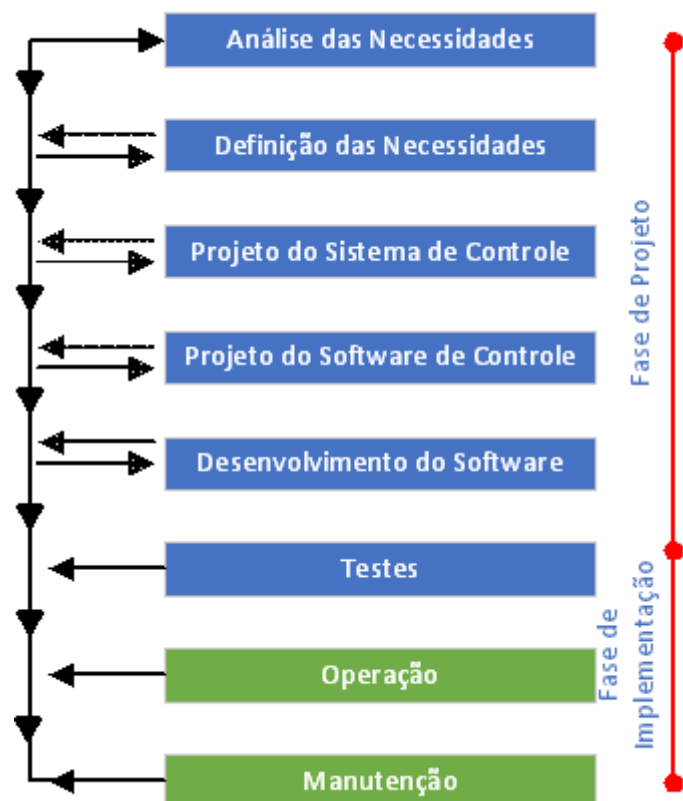
2.13 METODOLOGIA DE PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE

No presente trabalho será adotada a metodologia de projeto de sistemas de controle para sistemas produtivos proposta por Miyagi (1996), que afirma que independente da dimensão do sistema produtivo, as seguintes atividades devem ser realizadas:

- i. Identificação do objetivo final do sistema;
- ii. Compreensão do objeto de controle, instalações e equipamentos;
- iii. Organização do conhecimento sobre os dispositivos de controle;
- iv. Abstração e análise das funções de controle, modos de operação e monitoração da instalação;
- v. Definição das funções de controle, dos fluxos das funções de controle, das interfaces e das funções a estas associadas, da alocação dos sinais de entrada e saída e da estrutura do programa de controle;
- vi. Projeto de Reutilização de código;
- vii. Projeto do Sistema de Controle;
- viii. Desenvolvimento do programa;
- ix. Teste por unidade e teste do sistema.

Ainda, segundo Miyagi (1996), o ciclo de vida do sistema de controle possui duas fases, conforme apresentado na figura 16.

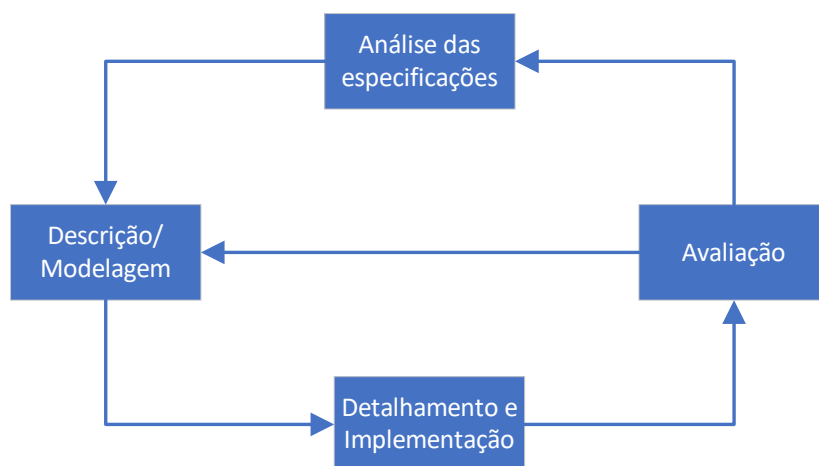
Figura 16- Ciclo de vida do Sistema de Controle



Fonte: adaptado de Miyagi, 1996.

Destaca-se que a primeira fase (Fase de projeto) é realizada de forma cíclica com base no ciclo de prototipagem de sistema de controle (Figura 17).

Figura 17- Ciclo de prototipagem de sistema de controle



Fonte: adaptado de Miyagi, 1996.

2.13.1 ANÁLISE DE NECESSIDADES

A análise das necessidades (análise do problema) consiste no julgamento da validade e viabilidade do atendimento das várias necessidades, seleção de alguns critérios de classificação destas necessidades e definição de uma especificação ótima. Em todas estas atividades, o objetivo final é utilizado como referencia para todas as decisões envolvidas (MIYAGI, 1996).

2.13.2 DEFINIÇÃO DAS NECESSIDADES

A tarefa de definição das necessidades consiste em analisar a especificação dos requisitos e gerar uma definição das necessidades com relação aos dispositivos de controle, objetos de controle e funções de controle (MIYAGI, 1996).

2.13.3 PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE

Esta etapa consiste na definição dos tipos e quantidades de dispositivos de controle a serem utilizados na realização das funções de controle definidas nas etapas anteriores (MIYAGI, 1996).

2.13.4 PROJETO DO SOFTWARE DE CONTROLE

O projeto do software de controle consiste em implementar no dispositivo de realização do controle a lógica das funções de controle descritas nos documentos gerados nas etapas de definições da necessidades e de projeto de sistema de controle (MIYAGI, 1996).

2.13.5 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE CONTROLE E TESTES

Quando é realizado um projeto interativo através de ferramentas de apoio ao projeto, a transcrição do programa-fonte (RdP, SFC, etc.) para o programa-objeto

(em linguagem de CLP, IEC 61131-3) é automática, assim, o trabalho manual é minimizado.

O teste dos procedimentos de controle consiste em executar no dispositivo de realização do controle o programa de controle projetado e desenvolvido, verificando se as exigências do usuário e do cliente foram satisfeitas (MIYAGI, 1996).

3 PROPOSTA DO TRABALHO

A proposta de sistemática desenvolvida visa complementar a metodologia *PFS/E-MFG* (SANTOS FILHO, 2000) para sistematizar a elaboração da estrutura de dados baseado na metodologia de projeto proposto por Miyagi (1996) nas atividades *iv* e *v*.

3.1 ESTUDO DOS OBJETOS DO SISTEMA DE CONTROLE

A atividade *iv* está relacionada com a abstração e análise das funções de controle, dos modos de operação e monitoramento das instalações e equipamentos, ou seja, um estudo sobre os objetos do sistema de controle, equipamentos e instalações. Para esta etapa da metodologia é utilizada a ferramenta *UML* para modelagem dos objetos estruturais integrantes do sistema de controle e seus relacionamentos.

Para cada um dos elementos do sistema de controle existem funções que devem ser pré-definidas, existem ações e operações que ativam a realização de funções e, como resultados desses comandos se têm transições de um estado para o outro, com isso, sensores devem ser instalados para identificar estes estados (MIYAGI, 1996).

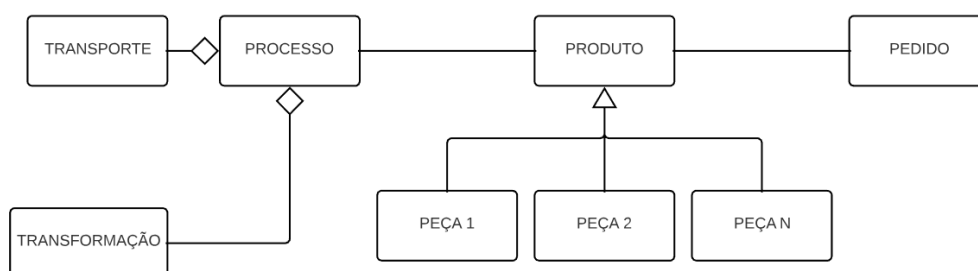
Para esta atividade, os seguintes documentos devem ser elaborados.

- Diagrama estrutural (esquemático) do objeto de controle: Diagrama contendo os elementos do objeto de controle, seus elementos de atuação, detectores e os inter-relacionamentos entre eles.
- Lista preliminar dos atuadores: São listas de motores, válvulas eletromagnéticas, etc. com a descrição do inter-relacionamento com o sistema mecânico como velocidade, direção de operação, etc.
- Lista preliminar dos detectores com descrição do tipo, estado de operação, posicionamento de operação, etc.

O diagrama estrutural do sistema de controle ilustra o processo para fabricação do produto final e o inter-relacionamento entre os atuadores e sensores.

Esta etapa é realizada através do diagrama de classe da ferramenta orientada a objetos *UML* que tem como objetivo apresentar os objetos e os relacionamentos entre eles, conforme mostra a figura 18.

Figura 18- Exemplo de Diagrama de classe de um sistema de manufatura



Fonte: Mazzoni, 2018.

3.2 DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE CONTROLE

A atividade *v* está relacionada com a definição das funções de controle, dos fluxos das funções de controle, das interfaces e das funções a estas associadas, da alocação dos sinais de entrada e saída e da estrutura do programa de controle.

Para a realização das operações referentes ao processo de manufatura, devem ser definidos os procedimentos que ativam as várias funções de controle, ou seja, a definição do fluxo das funções de controle. Esse fluxo define a sequência de produção de cada produto, conforme definido previamente. A ferramenta gráfica *PFS* permite representar os passos em blocos funcionais (atividades) de diferentes níveis conceituais admitindo, sem dificuldades, uma representação estruturada em diferentes níveis de abstração, do nível mais alto até o nível mais baixo, chamado nível de chão de fábrica (MIYAGI, 1996).

Na atual proposta os níveis hierárquicos, proposto por Miyagi (1996), sofreram uma alteração no nível de tarefas, que agora é substituído pelo nível de funcionalidades. Sendo assim temos:

- **Nível de funcionalidade:** Engloba as funcionalidades que acrescentam valor ao processo produtivo.
- **Nível de operações:** Atividades correspondentes às operações de máquinas, dispositivos, etc.

- **Nível de ações:** Atividades correspondentes a ações e movimentos físicos simples.

As funções de controle são definidas através das ferramentas gráficas *PFS/E-MFG* para modelagem de SDED que podem ser transcritas para códigos executáveis.

No presente trabalho houve uma alteração no segundo passo da metodologia *PFS/E-MFG* (SANTOS FILHO, 2000). O detalhamento de cada processo está associado às funcionalidades para definir a lógica de sequenciamento inerente a cada um deles. Assim a modelagem do sistema de controle se torna independente de uma atividade específica de um determinado recurso. Se um recurso for capaz de realizar diferentes funções e estiver disponível, poderá ser utilizado para fabricar uma série de produtos dentro da linha de produção (MAZZONI et al., 2018).

Sendo assim, a nova sistemática para modelagem de sistema de controle utilizando a metodologia *PFS/E-MFG*, segue os seguintes passos:

- 1° Passo: Identificação dos produtos a serem fabricados, utilizando a ferramenta *PFS*;
- 2° Passo: Detalhamento dos processos de fabricação descrevendo as funcionalidades, utilizando a ferramenta *PFS*;
- 3° Passo: Definição do conjunto de atributos e sub-redes que devem ser associados a cada grafo *E-MFG*;
- 4° Passo: Representação dos recursos, utilizando a ferramenta *E-MFG*;
- 5° Passo: Introdução dos elementos de controle de recursos, utilizando a ferramenta *E-MFG*;
- 6° Passo: Indicação dos sinais de controle com a planta, ferramenta *E-MFG*.

A ferramenta *PFS* é utilizada para descrever o sequenciamento das funcionalidades em um alto nível de abstração. Uma vez descrita as funcionalidades, se inicia o refinamento para o nível de operações e ações utilizando a ferramenta *E-MFG* para modelagem de baixo nível de abstração.

Juntamente com a modelagem do sistema de controle através da metodologia *PFS/E-MFG* é desenvolvida a estrutura de dados com os diagramas da *UML*, em paralelo (MAZZONI et al., 2018).

3.3 DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS DA MARCA E-MFG

Outra modificação da metodologia *PSF/E-MFG* está na definição dos atributos da marca, que no trabalho está baseado na norma *ANSI/ISA S95* (ISA, 2013) com o encapsulamento de uma sub-rede como um atributo para controlar os estados internos e as transições de estados da marca individual pela rede principal (macro rede) (MAZZONI et al., 2018).

A marca pode ser denominada como individual pelo fato de possuir um vetor de atributos vinculados a ela (Figura 19), podendo conter informações do produto, do processo ou do controle (SANTOS FILHO, 2000).

Figura 19- Atributos da marca E-MFG



< Inf. Produto ; Inf. Processo ; Inf. Controle >

Fonte: Mazzoni, 2018.

O trabalho propõe a definição dos atributos da marcação individual da rede *E-MFG*, baseados na norma *ANSI/ISA S95* (ISA, 2013).

De acordo com a norma *ANSI/ISA S95*, o modelo de objetos busca, por meio de categorias de informação, identificar objetos que são comuns aos vários fluxos de dados relacionados ao controle da produção, o que simplifica e otimiza a modelagem dos sistemas e sua implementação no ambiente industrial.

Os quatro grupos de informações relacionados ao gerenciamento da produção, que se identificam por categorias, são (Figura 20):

- 1º Informação para definição do produto: Dados dos recursos necessários e da segmentação da produção, de forma a delinear como fabricar determinado produto;
- 2º Informação da capacidade de produção: Indicações de quais recursos existem e estão disponíveis, capacidade de materiais, pessoas e equipamentos, tanto em curto quanto em médio prazo;
- 3º Informações do planejamento da produção: Define a sequência, os prazos, o que deve ser feito e utilizado para produzir determinado produto;

- 4º Resposta de produção: Define o que realmente foi produzido, o que foi utilizado e os resultados obtidos.

Figura 20- Informações relacionadas com gerenciamento da produção



Fonte: ISA, 2013

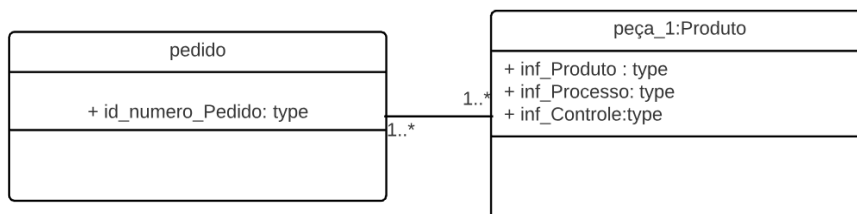
Dentre os itens listados a informação de capacidade de produção não faz parte do escopo da marcação individual, pois esta etapa deve ser gerenciada no nível de planejamento da produção.

Outro atributo da marca individual são sub-redes, que representam o sistema de controle embarcado na marca, proporcionando atribuir à marca, autonomia e autocontrole sobre os estados e transições de estados internos.

Assim a marca individual pode ser uma representação do produto, onde ficarão encapsuladas todas as informações do produto, processo e sub-redes de controle embarcado (MAZZONI et al., 2018).

O diagrama de objetos da *UML* foi utilizado para modelagem da estrutura de dados da marca *E-MFG* (Figura 21). Os diagramas de objetos são utilizados para visualização, especificação, construção e documentação da existência de certas instâncias encontradas no sistema, juntamente com os relacionamentos entre essas instâncias. (BOOCH et al., 2005).

Figura 21 - Modelagem da estrutura de dados da marca individual com Diagrama de objetos UML

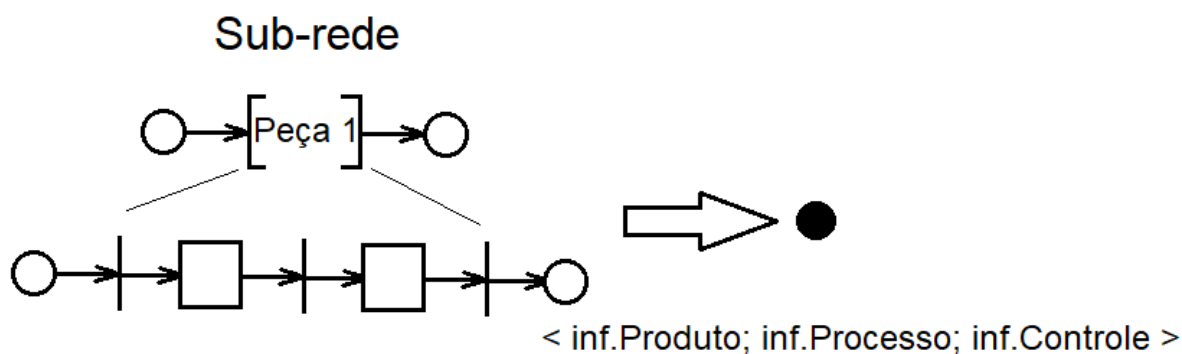


Fonte: Mazzoni, 2018.

3.4 SISTEMÁTICA PARA MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

De posse do modelo inicial do *PFS*, das informações de atuadores e sensores e dos atributos da marcação individual, continua-se o refinamento sucessivo até o passo *E-MFG* (Figura 22).

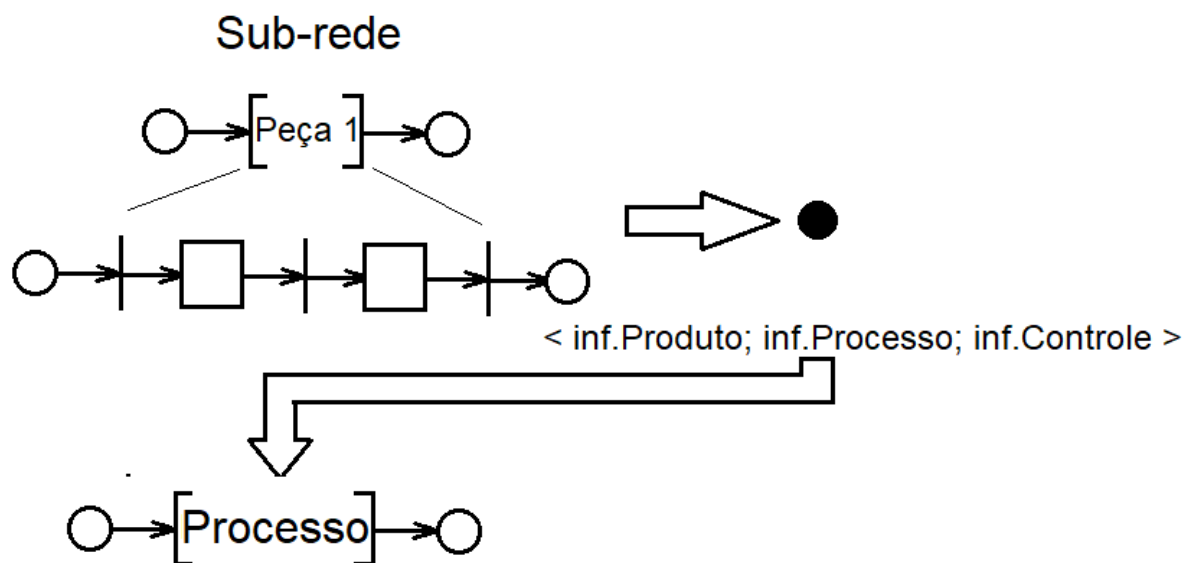
Figura 22- Refinamento sucessivo da sub-rede da marca E-MFG



Fonte: Mazzoni, 2018.

A rede *E-MFG* resultante da metodologia *PFS/E-MFG* com a modelagem da estrutura de dados pelo diagrama de objetos *UML*, está encapsulada dentro da marca individual que representa as especificidades do produto, processo e controle. Uma macro rede deve ser gerada para abrigar a marca individual, conforme a figura 23.

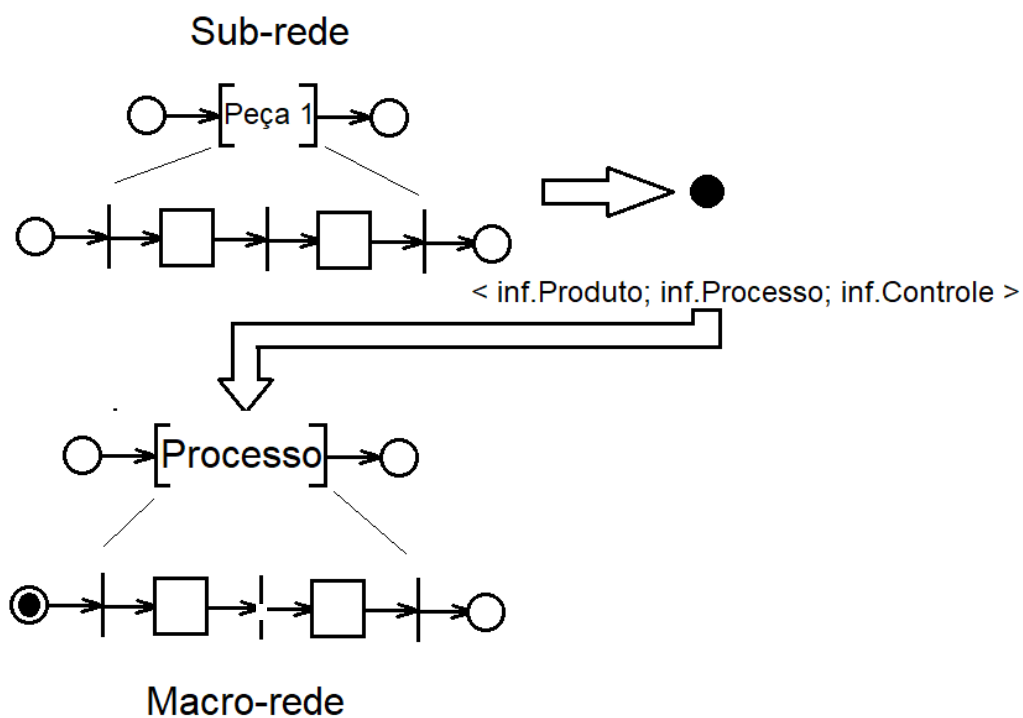
Figura 23- Macro rede representando o processo



Fonte: Mazzoni, 2018.

O modelo *PFS* da macro rede deve ser refinado até o nível de controle com os elementos *E-MFG* (Figura 24), para poder ser implementado em uma linguagem computável e executável no Controlador Lógico Programável (CLP) de maneira sistêmica com base na norma IEC 61131- 3 (Fonseca et al., 2008). A modelagem da estrutura de dados é realizada em paralelo a partir dos atributos definidos pelo diagrama de objetos, mediante utilização da linguagem padronizada de baixo nível como a linguagem Texto Estruturado (*Structured Text - ST*), como sugestão.

Figura 24- Refinamento da macro rede de processo



Fonte: Mazzoni, 2018.

Destaca-se que, de acordo com a necessidade e o grau de abstração necessária, é possível a implementação das redes no controlador utilizando as outras linguagens definidas pela norma IEC-61131-3.

4 APLICAÇÃO DA PROPOSTA

Para ilustrar a proposta para geração do fluxo de controle através da metodologia *PFS/E-MFG*, considerando a estrutura de dados da marca individual utilizando a ferramenta orientada a objetos *UML*, será apresentado um exemplo adaptado de Kubo (2017). O exemplo ilustra o layout de um SFM, cujo layout é composto de uma entrada de itens a produzir (ENTRADA), uma saída de itens produzidos (SAÍDA) e um estacionamento de transportadores. As vias deste exemplo possuem sentido único e indicadas através das setas. Existem vias exclusivas para as atividades de carregamento e descarregamento nas estações de trabalho com a finalidade de não obstruir as vias principais (Figura 25).

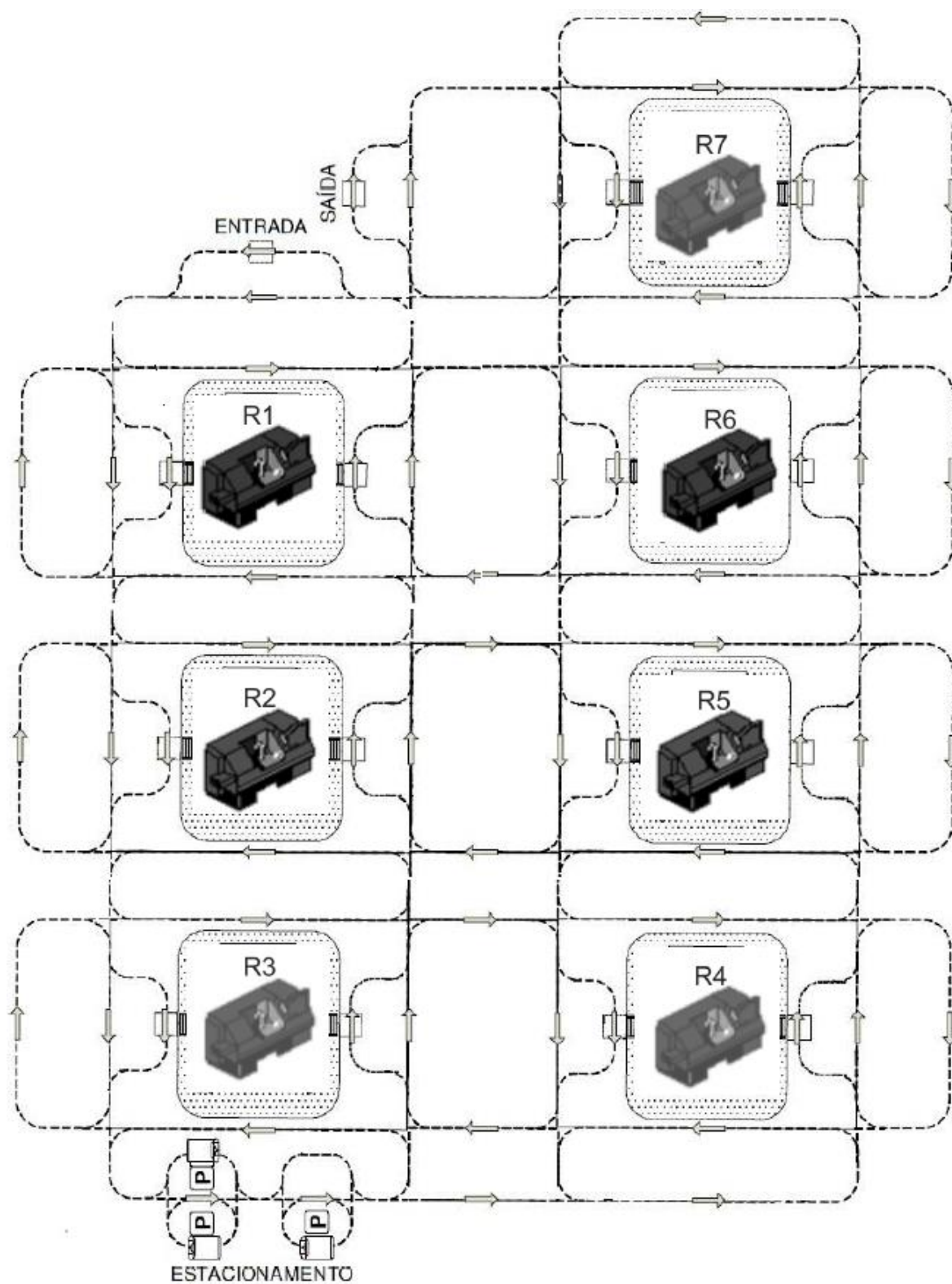
A arquitetura, as regras e estratégias de controle são as mesmas definidas no trabalho de Kubo (2017), que divide o sistema de controle em diferentes módulos: controle da atividade de transporte, controle das atividades de transformação e controle de utilização de recursos. O estudo de caso será aplicado considerando apenas o módulo de controle das atividades de transformação. Os recursos de transformação utilizados no exemplo são do tipo MFM (Máquinas-Ferramentas Multifuncionais) que possibilitam executar múltiplas tarefas (como torneiar, fresar, furar, etc.) no mesmo recurso. No exemplo, essas tarefas foram representadas em números arábicos, cada número representa uma tarefa diferente, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3- Descrição das funcionalidades dos recursos de transformação

RECURSO DE TRANSFORMAÇÃO	FUNCIONALIDADES
Recurso 1	1 e 2
Recurso 2	3 e 4
Recurso 3	5 e 6
Recurso 4	1 e 3
Recurso 5	2 e 4
Recurso 6	5
Recurso 7	6

Fonte: Mazzoni, 2018.

Figura 25- Layout de exemplo do SFM



Fonte: adaptado de Kubo, 2017.

4.1 1º PASSO: IDENTIFICAÇÃO DOS PRODUTOS A SEREM FABRICADOS

O SFM é capaz de produzir cinco diferentes tipos de produtos com quantidades variadas na linha de produção, a Tabela 4 apresenta os diferentes produtos que serão produzidos de acordo com as diferentes sequencias de funcionalidades. O sistema de manufatura conta com três transportadores AGV e um sistema automático que carrega e descarrega os recursos de transformação.

A dinâmica do SFM ocorre da seguinte maneira:

- A chegada da ordem de produção dispara a requisição para alocação do recurso que executa as funcionalidades.
- Com o recurso alocado o sistema de transporte escolhe a melhor opção para realizar o transporte do produto até os recursos de transformação.
- As estações de processamento disponibilizam um sistema automatizado para carregar e descarregar os produtos nos respectivos recursos de transformação.
- O processo repete essas etapas até a conclusão de todas as operações e finaliza com a saída do produto para um estoque ou armazém de produtos acabados.

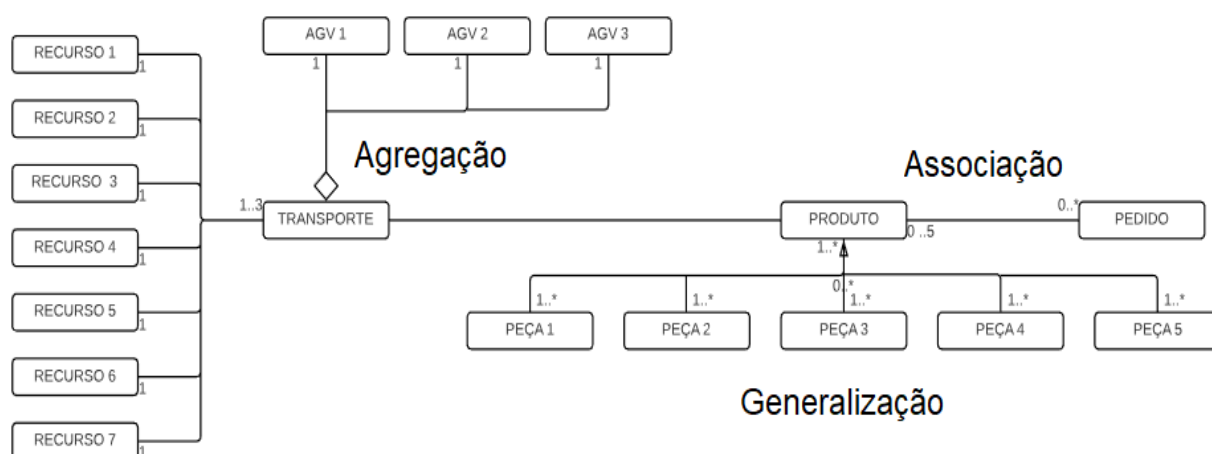
Tabela 4- Descrição dos processos dos produtos

PRODUTO	ATIVIDADE 1	ATIVIDADE 2	ATIVIDADE 3	ATIVIDADE 4
Processo Peça 1	Funcionalidade 1	Funcionalidade 3	Funcionalidade 2	Funcionalidade 6
Processo Peça 2	Funcionalidade 3	Funcionalidade 4		
Processo Peça 3	Funcionalidade 5	Funcionalidade 1	Funcionalidade 4	Funcionalidade 3
Processo Peça 4	Funcionalidade 4	Funcionalidade 6	Funcionalidade 3	
Processo Peça 5	Funcionalidade 1	Funcionalidade 6		

Fonte: Mazzoni, 2018.

Para iniciar a modelagem é necessário conhecer os objetos integrantes do sistema de controle, o funcionamento do sistema e o sequenciamento para fabricação do produto. Nesta etapa um diagrama de classe da *UML* apresenta os objetos e os relacionamentos entre eles, conforme mostra o diagrama de classe da figura 26.

Figura 26- Diagrama de classe *UML* do SFM



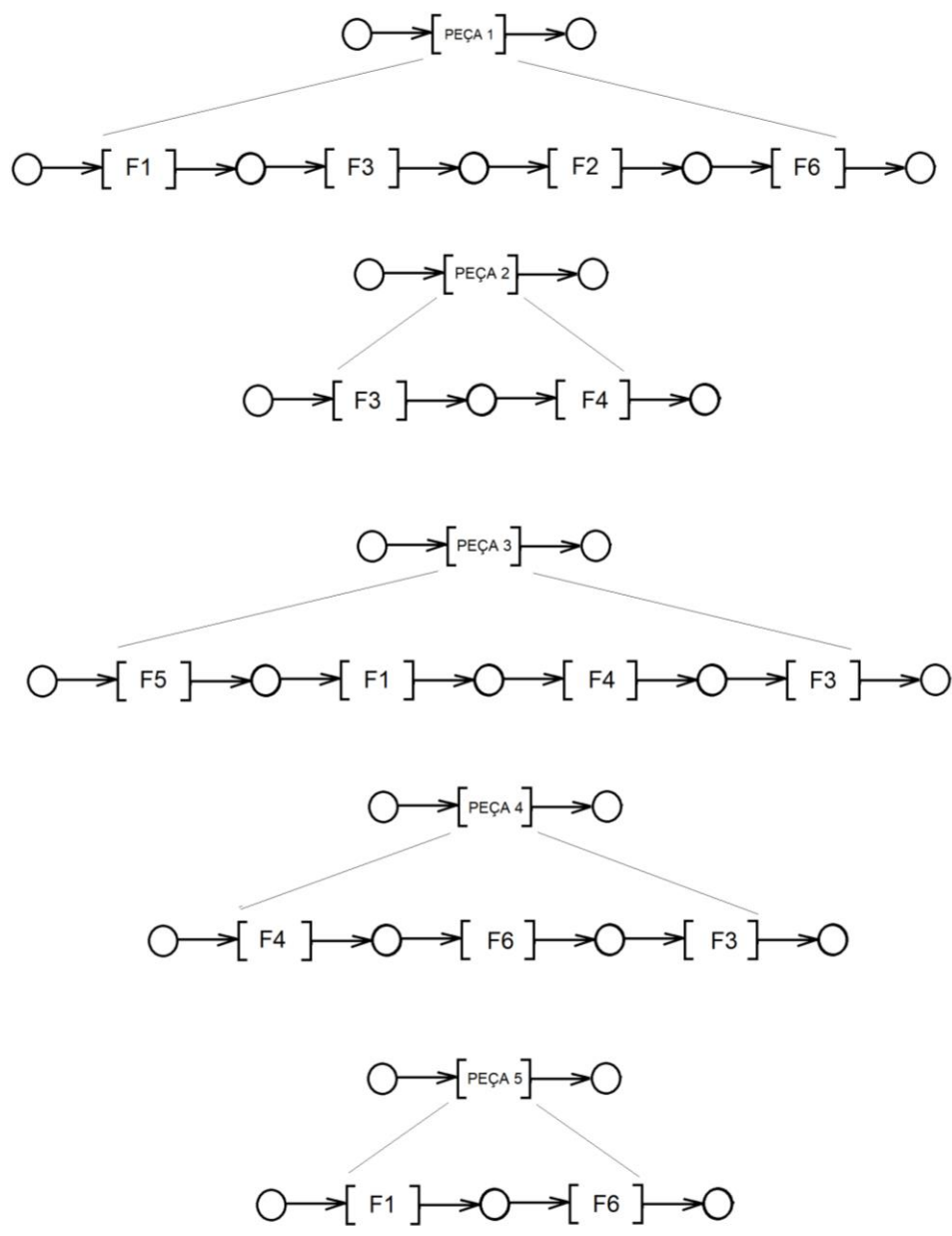
Fonte: Mazzoni, 2018.

4.2 2º PASSO: DETALHAMENTO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DESCRREVENDO AS FUNCIONALIDADES

As funções de controle analisadas através do diagrama estrutural de inter-relacionamento definem os elementos do sistema de controle considerando as características dos SDED, ou seja, as relações entre os eventos e os estados a partir dos dispositivos de atuação, dispositivos de sensoramento, dispositivos de comando e dispositivos de monitoração.

Nesta etapa o sequenciamento das funcionalidades para produção das peças no SFM é modelado com a ferramenta *PFS* (Figura 27).

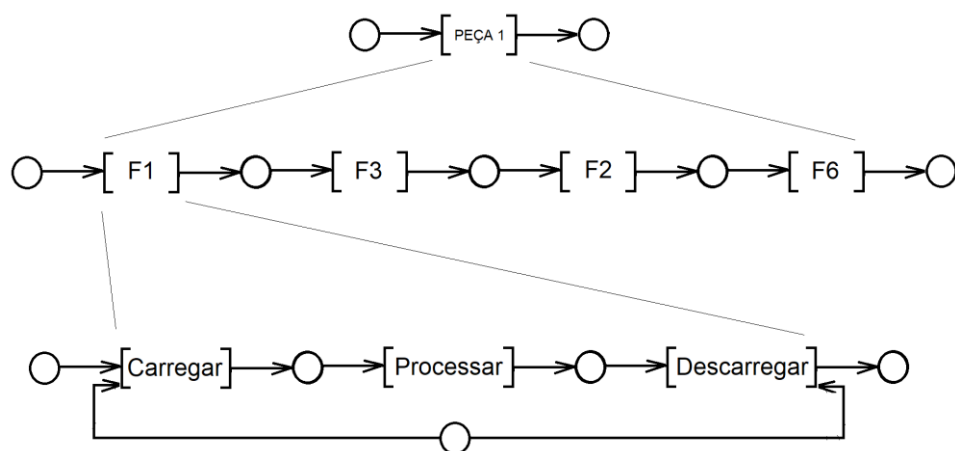
Figura 27- PFS do sequenciamento das funcionalidades dos produtos



Fonte: Mazzoni, 2018.

Conhecendo o sequenciamento das funcionalidades, agora se inicia o refinamento sucessivo para os outros níveis hierárquicos das funcionalidades (Figura 28).

Figura 28- Refinamento do PFS inicial

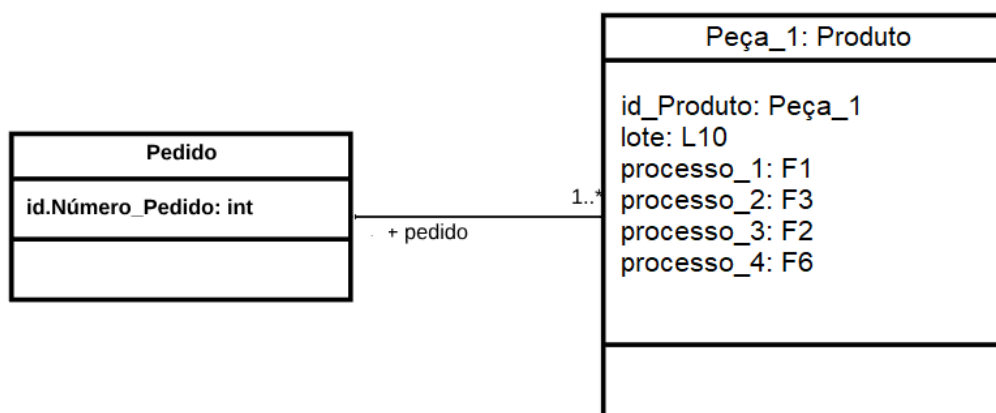


Fonte: Mazzoni, 2018.

4.3 3º PASSO: DEFINIÇÃO DO CONJUNTO DE ATRIBUTOS E SUB-REDES DA MARCA E-MFG

A figura 29 apresenta a modelagem da estrutura de dados da marca *E-MFG* para uma peça específica utilizada como exemplo, baseado no diagrama de objetos da *UML*. Os atributos modelados no diagrama de objetos *UML* é o mesmo presente na marca individual.

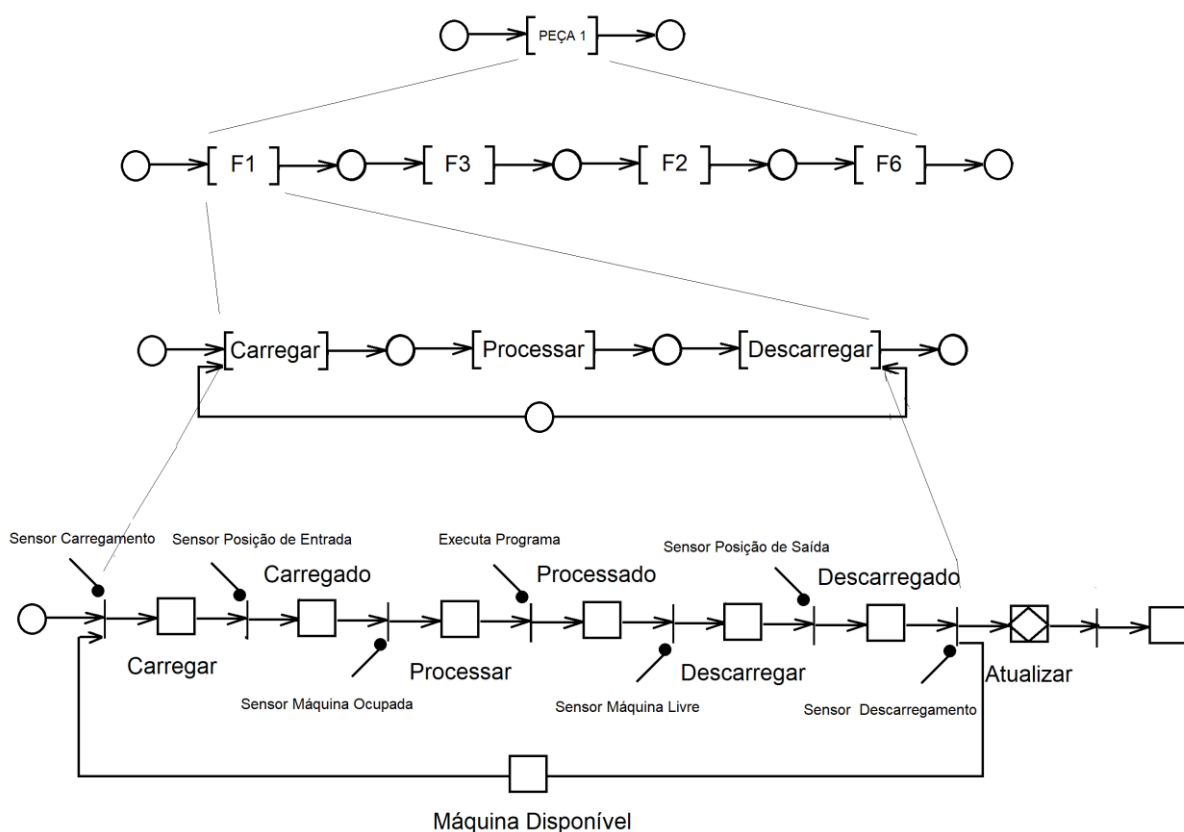
Figura 29- Diagrama de objetos UML



Fonte: Mazzoni, 2018.

De posse do modelo inicial do *PFS*, das informações de atuadores e sensores e dos atributos da marcação individual, continua-se o refinamento sucessivo até obter-se o modelo *E-MFG* (Figura 30). O Box controlador altera os atributos da marca de acordo com a seleção do produto. Desta forma, verifica-se que a rede em questão poderia realizar o processo de diferentes produtos, bastando apenas a alteração das funcionalidades pré-estabelecidas para cada peça.

Figura 30- Sub-rede do processo PFS



Fonte: Mazzoni, 2018.

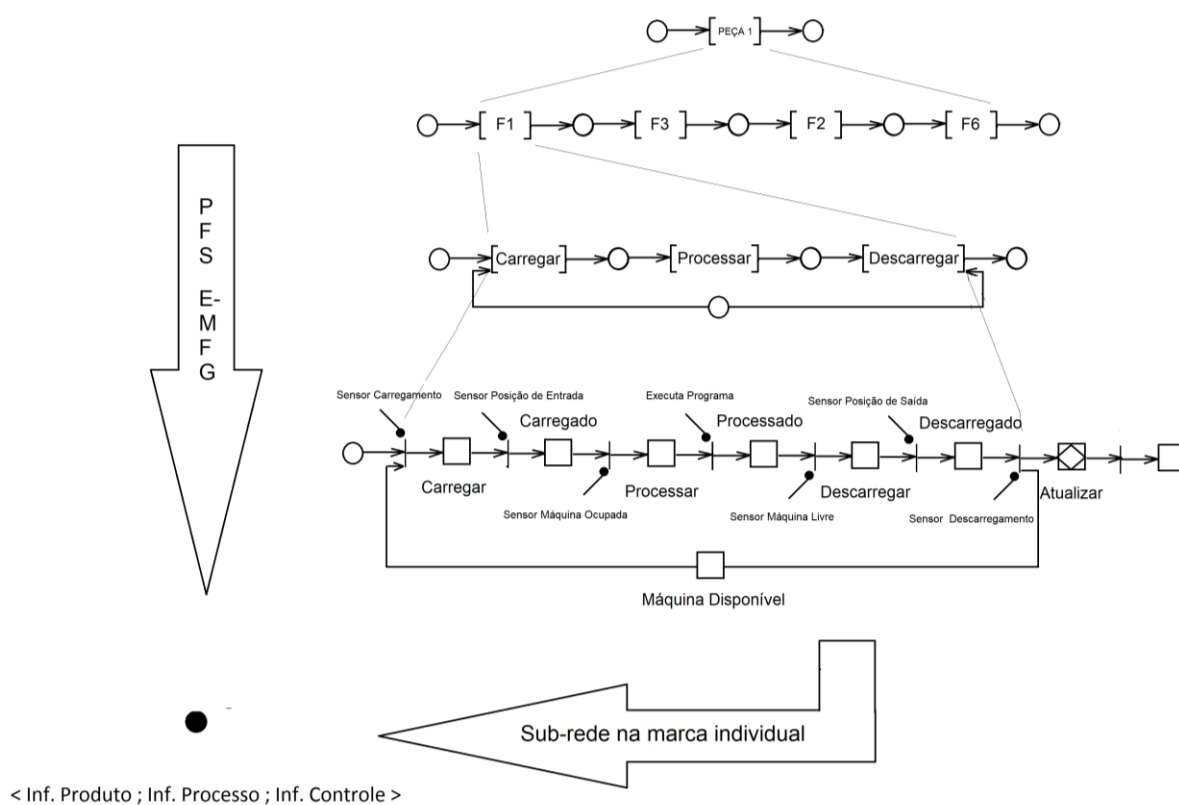
A rede *E-MFG* resultante da metodologia *PFS/E-MFG* com a modelagem da estrutura de dados pelo diagrama de objetos *UML*, estará encapsulada dentro da marca individual (Figura 31), que representa as especificidades do produto, processo e controle.

O modelo macro do processo deve ser refinado até o nível de controle com os elementos *E-MFG*, para poder ser implementado em uma linguagem computável e executável no Controlador Lógico Programável (CLP).

Destaca-se que, de acordo com a necessidade e o grau de abstração necessária, é possível a implementação do algoritmo executado no Box controlador utilizando as outras linguagens definidas pela norma *IEC-61131-3*.

Com isso a macro rede, gerada a partir da metodologia *PFS/E-MFG* e a definição da estrutura de dados das respectivas peças, é capaz de produzir uma gama de produtos de acordo com os pedidos.

Figura 31- Rede E-MFG com a marca individual



Fonte: Mazzoni, 2018.

Para finalizar basta acrescentar as informações dos elementos de controle em *E-MFG* e indicar os sinais de controle com a planta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

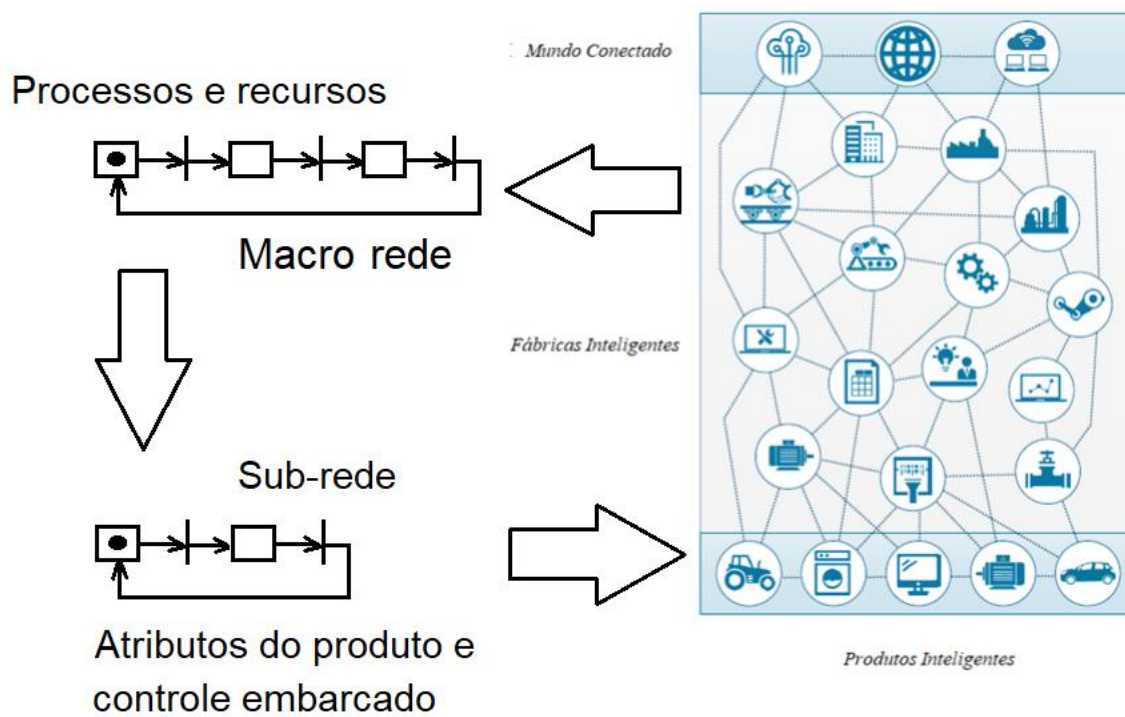
O presente trabalho apresentou uma proposta de integrar à metodologia *PFS/E-MFG* ferramentas do UML para modelagem de SDED. A nova metodologia *PFS/E-MFG* permite modelar a estrutura de dados e a gerar uma rede E-MFG de maneira estruturada aplicando a abordagem *top-down* para realizar o refinamento sucessivo, a partir de um alto nível de abstração, associando à estrutura de dados modelada. A partir da rede refinada, aplica-se a abordagem *bottom-up* que permite agrupar as sub-redes formando o modelo final de alto nível de abstração.

A adição da ferramenta orientada a objetos *UML* acrescenta formalismo nas etapas de análise e definição das funções de controle, mostra os conjuntos de classes e objetos, interfaces, colaborações e seus relacionamentos, abrangem a visão estática estrutural do projeto de sistemas de controle, resultando no desenvolvimento de estrutura de dados do objeto a ser modelado.

A individualização da marca da rede E-MFG, extensão da RdP, possui um aspecto fundamental que eleva a abstração da rede gerada. Entretanto, a rede E-MFG, gerada a partir da nova metodologia *PFS/E-MFG*, apresenta uma característica que eleva ainda mais o poder de abstração da rede, abrindo a possibilidade para o encapsulamento de estruturas de dados e sub-redes em marcas individuais, ou seja, a modelagem de redes aninhadas. A nova metodologia *PFS/E-MFG* permite a modelagem dos atuais sistemas produtivos baseado no conceito de Indústria 4.0, em que todos os elementos da cadeia produtiva possuem relativa autonomia, estão distribuídos e são colaborativos (Figura 32).

As marcas individuais poderiam representar produtos inteligentes, com elementos internos integrados em sua estrutura que possuem informações sobre processo de produção (sub-redes) e, por conseguinte, tais marcas evoluem dentro de outra rede E-MFG que possui um nível de abstração maior ou um processo global, por exemplo.

Figura 32- Sub-redes na hierarquia da Indústria 4.0



Fonte: adaptado de Schweichhart, 2016.

6 CONCLUSÃO

O conceito de Indústria 4.0 está cada vez mais presente nas novas tecnologias de automação dos sistemas de manufatura avançado cujos elementos são distribuídos, autônomos e colaborativos, integrando todos os níveis da cadeia produtiva.

Tal contexto influencia consideravelmente a gestão da execução dos processos produtivos e o comportamento do ciclo de vida do produto, resultado deste processo. Portanto, é necessária uma nova forma de observar e compreender o comportamento dinâmico dos sistemas produtivos, ou seja, torna-se necessário o desenvolvimento de novas ferramentas de modelagem para esta nova classe de sistemas produtivos. Neste sentido, as seguintes conclusões são apresentadas:

- ✓ apresentou-se neste trabalho a nova metodologia *PFS/E-MFG*. Uma proposta de agregar à metodologia *PFS/E-MFG* original a ferramentas do UML para modelar Sistemas Dinâmicos a Eventos Discretos (SDED);
- ✓ a nova metodologia *PFS/E-MFG* abre a possibilidade de modelagem de redes que permitem a modelagem de estruturas de dados e o respectivo encapsulamento dos mesmos em sub-redes nas marcas individuais ou redes aninhadas;
- ✓ a partir da rede E-MFG gerado pela nova metodologia *PFS/E-MFG*:
 - é possível o mapeamento para linguagem *Sequential Function Chart* (SFC), linguagem normalizada pela norma IEC-61131 parte 3;
 - permite a criação de blocos funcionais modulares de acordo com a norma IEC-61499.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, propõe-se:

- Aplicar nova metodologia *PFS/E-MFG* para modelagem de sistema de controle na arquitetura referência RAMI 4.0 proposta por SCHWEICHHART (2016);

- Trabalhar as características orientadas a objetos de generalização e heranças nos modelos *PFS/E-MFG* para desenvolvimento de blocos funcionais e reaproveitamento de códigos de controle;
- Modelar controladores virtuais com a metodologia *PFS/E-MFG* com marcas individuais e sub-redes de controle;
- Desenvolver uma sistemática para a geração de linguagem única de baixo nível para implementação a partir do modelo *E-MFG*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASATO, O.L. **Regeneração de sistemas produtivos mediante a realocação dinâmica de recursos com flexibilidade funcional**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2015.

ASATO, O.L., PESSOA, M.A.O., JUNQUEIRA, F., SANTOS FILHO, D.J., OKAMOTO JUNIOR, J., MIYAGI, P.E. **Using the Enhanced - Mark Flow Graph for dynamic resource allocation in distributed manufacturing**. *international journal of computer integrated manufacturing*, Vol. 29, pp. 1-14, 2015.

BAHRIN, H., OTHMAN, F., AZLI, N., TALIB, M. **Industry 4.0: a review on industrial automation and robotic**, *Jurnal Teknologi*, vol. 78, no.6-13, pp.137–143, 2016.

BLANCHET *et al.* **INDUSTRY 4.0: The new industrial revolution How Europe will succeed. Think Act**. Roland Berger: Munique, 2014.

BRETTEL, M. *et al.* **How Virtualization , Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective**. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, v. 8, n. 1, p. 37–44, 2014.

BICCHIERAI, I., BUCCI, G., Laura CARNEVALI, L., VICARIO, E. **Combining UML-MARTE and preemptive time Petri nets: an industrial case study**. *IEEE transactions on industrial informatics*, vol. 9, no. 4, nov. 2013.

BOOCH, G., RUMBAUGH, J., JACOBSON, I. 2005, **The Unified Modeling Language user guide**, 2nd Edition, Addison-Wesley Professional.

BOUARIOUA, M., CHAOUI, A., ELMANSOURI, R. **From UML statecharts diagrams to labeled generalized stochastic petri net models using graph transformation**. 2011 Fourth International Symposium on Innovation in Information & Communication Technology.

CASSANDRAS, C.G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems**, second edition, Springer, 2008.

CARDOSO, J.; VALETTE, R. **Redes de Petri**, Editora UFSC, 1997

CAVALCANTE, A., PEREIRA, C.E., BARATA, J. **Component-based approach to the development of self-X automation systems**. IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lisboa, 2010.

CAVALHEIRO, A. C. M., **Projeto de sistemas modulares e distribuídos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2004.

CHENG, H., ZENG, P., XUE, L., SHI, Z., WANG, P., YU, H. **Manufacturing ontology development based on Industry 4.0 demonstration production line**,

Third International Conference on Trustworthy Systems and Their Applications(TSA), Sept. 2016.

da SILVA, R.M. **Controle de sistemas reconfiguráveis de manufatura**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

ELMANSOURI, R., CHAOUI, A., KERKOUICHE, E., KHALFAOUI, K. **From UML statecharts and collaboration diagrams to coloured petri nets models**: a graph transformation based approach for modelling and analysis of business processes in virtual enterprises. 2009 Fourth South-East European Workshop on Formal Methods.

FONSECA, M.O.; SEIXAS FILHO, C.; BOTTURA FILHO, J.A., 2008, **Aplicando a norma IEC 61131 na automação de processos**, ISA Distrito 4, 568p.

GROBELNY, M., GROBELNA, I., ADAMSKI, M. **Hierarchical UML activity diagrams into control interpreted petri nets transformation**. MIXDES 2012, 19th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems", May 24-26, 2012, Warsaw, Poland.

GROOVER, M.P. **Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing**. New Jersey: Ed. Prentice-Hall, 2011. pp. 43-60.

GUIRRO, D.N. **Requisitos para modelagem do sistema de execução da manufatura com bases na norma ANSI/ISA S95**. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus São Paulo, 2017.

HASEGAWA, K., TAKAHASHI, K., MIYAGI, P.E. (1988) **Application of Mark Flow Graph to represent discrete event production systems and system control**. Society of Instrument and Control Engineers, Tokyo, v.24, n.1, p.69-75

HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015 **Design principles for industry 4.0 scenarios**, 2015 Business Engineering Institute St. Gallen, Lukasstr. 4, CH-9008 St. Gallen

HO, Y. C. **Dynamics of discrete event systems**. IEEE, v.77, nº1, p. 3-6, 1989.

ISA - The International Society of Automation. **ANSI/ISA-95.00.03-2013 enterprise-control system integration** - Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management, 2013.

ISO/IEC 15909- 2:2011- **Systems and software engineering** – High level Petri nets- Part 2: Transfer format, 2011.

JENSEN, K. **Coloured Petri nets**: A high level language for system design and analysis. In: Berlin: Springer, 1991, p.342-416.

JUNQUEIRA, F. **Modelagem de sistemas flexíveis de movimentação de materiais através de redes de Petri interpretadas**, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2001.

KAGERMANN, H.; WAHSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**. Acatech, pp. 13–78, 2013

KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. D. **Manufacturing, engineering and technology**. 5th edition. New Jersey: Prentice Hall, 2008, 1320p.

KUBO, R.H., **Proposta de sistema de controle para alocação de recursos multifuncionais e transporte (VGAs) tolerante a falha**. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus São Paulo, 2017.

LEE.E. A. and SESHIA. S. A, **Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach**, *LeeSeshia.org*, 2011.

MATSUSAKI, C.T.M., 2004. **Modelagem de sistemas de controle distribuídos e colaborativos de sistemas produtivos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 154p.

MATSUSAKI, C.T.M., SANTOS FILHO, D.J. **Modeling of distributed collaborative control systems of production systems**. ABCM Symposium Series in Mechatronics, pp. 345-352, 2006.

MAZZONI, U. R. C.; ASATO O. L.; SANTOS G. A.; FRAJUCA C.; KUBO R. H.; NAKAMOTO F. Y. **Sistemática para individualização de marcas do E-MFG no projeto de sistema de controle para sistema flexível de manufatura**. 22^o Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2018, 2018.

MIYAGI, P. E. **Controle Programável – Fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos**. São Paulo: Editora Edgard Bluncher, 1996.

MORALES, R. A. G. **Modelagem e análise de sistemas flexíveis de manufatura tolerantes a falhas baseado em rede Bayesiana e rede de Petri**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

MURATA, T. **Petri Nets: Properties, analysis and applications**, Proceeding of the IEEE, vol. 77 n° 4, pp.541-580, 1989.

NAKAMOTO, F.Y., 2008, **Projeto de sistemas modulares de controle para sistemas produtivos**, Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 158p.

NAKAMOTO, F.Y.; MIYAGI, P.E.; SANTOS FILHO, D.J., 2009. **Automatic generation of control solution for resource allocation using Petri net model**, Produção (São Paulo. Impresso), vol.19, p8-26.

OMG- Object Management Group. **OMG Unified Modeling Language**. <https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1>. 2017.

PAIS, R., GOMES, L., BARROS, J. P. **From UML state machines to petri nets: history attribute translation strategies**, 2nd Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, February 21-23, 2011, Lisbon, Portugal.

PEINADO, J., GRAEML, A. R. **Administração da produção: operações industriais e de serviços** Curitiba : UnicenP, 2007. 750 p.

PEIXOTO, JOÃO A., 2016. **Sistema minimamente invasivo baseado em agentes aplicado em controladores lógicos programáveis**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 225p.

PETERSON, J.L. **Petri net theory and the modeling of systems**. Englewood Cliffs, N.J., Prince-Hall, 1981.

PRESSMAN, R. S. **Software engineering: a practitioner`s approach** 7 th ed. 2011.

REISIG, W, 1985, **Petri Nets: An introduction**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 161p.

RUMBAUGH, J. **Modelagem e projetos baseados em objetos com UML 2**. Editora Campus, abril de 2006.

ROSER, C. **Faster, Better, Cheaper in the History of Manufacturing: From the Stone Age to Lean Manufacturing and Beyond**, 439 pages, 1st ed. Productivity Press. ISBN 978-1498756303, 2016.

SANTOS, B. P., CHARRUA-SANTOS, F., LIMA, T. M. **Challenges and opportunities**, Research in production and development, vol 4, n.1, p.111-124, 2018.

SANTOS FILHO, D.J. **Aspectos do projeto de sistemas produtivos**, Tese (Livre docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

SANTOS FILHO, D.J. **Controle de sistemas antropocêntricos de produção baseado em redes de Petri interpretadas**. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

SANTOS FILHO, D.J. **Proposta do Mark Flow Graph estendido para a modelagem e controle de sistemas integrados de manufatura**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

SANTOS FILHO, D.J., NAKAMOTO, F. Y., JUNQUEIRA, F., MIYAGI, P.E. **Task control of intelligent transportation vehicles in manufacturing systems**. Mechatronics Series 1, 146-169, 2011.

SAVORY, P. MACKULAK, G, COCHRAN, J. **Material handling in a flexible manufacturing system processing part families**. Simulation Conference, pp. 375-381, 1991

SCHWEICHHART, K. **Reference architectural model industrie 4.0 (RAMI 4.0)- An introduction, standardization & reference architecture**, Plattform Industrie 4.0. www.plattform-i40.de, acessado em 10/09/2018.

SHROUF, F., ORDIERES, J., MIRAGLIOTTA, G. **Smart Factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the internet of things paradigm**. 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 697-701, 2014.

SLACK, N., CHAMBERS, S., JOHNSTON, R. **Administração da produção**, 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002. 748 p. ISBN: 8522432503.

SOUZA, J.A.L. **Mitigação de falhas críticas em sistemas produtivos**. 2015. 144p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

Wang, S., Wan, J., Li, D., Zhang, C. **Implementing smart factory of Industrie 4.0: an outlook**, Int. Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 12, no.1, pp. 1-10, 2016.

ZHOU, M., ZURAWSKI, R. **Petri nets and industrial applications: A tutorial**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 41, n. 6, pp. 567-583, 1994.