

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
JULIO TAKASHI CAVATA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE MANUFATURA AVANÇADA
BASEADA EM AGENTES**

São Bernardo do Campo

2017

JULIO TAKASHI CAVATA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE MANUFATURA AVANÇADA
BASEADA EM AGENTES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Orientado pelo Prof. Dr. Fábio Lima.

São Bernardo do Campo

2017

Cavata, Julio Takashi.

Modelagem e simulação de sistema de manufatura avançada baseada em agentes / Julio Takashi Cavata. São Bernardo do Campo, 2017.
116 p. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lima.

1. Manufatura Avançada. 2. Indústria 4.0. 3. Sistemas Ciber Físico. 4. Sistemas Multi Agente. 5. Simulação Baseada em Agentes. I. Lima, Fábio, orient. II. Título.

Aluno: Julio Takashi Cavata

Matrícula: 215311-2

Título do Trabalho: Modelagem e simulação de sistema de manufatura avançada baseada em agentes.

Área de Concentração: Produção

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lima

Data da realização da defesa: 18/09/2017

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, 18 / 09 / 2017.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fábio Lima

Ass.: _____

Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote

Ass.: _____

Prof. Dr. Eduardo de Senzi Zancul

Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO

REPROVADO

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA
EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Dedico a minha esposa pela compreensão do tempo dedicado à elaboração deste trabalho e todo apoio e incentivo recebido nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família que apoiou nesta empreitada ao longo destes dois anos de trabalho. Em especial ao meu sogro e minha sogra que me incentivaram e apoiaram em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Fábio Lima pela dedicação dispensada na orientação da dissertação e os direcionamentos recebidos para que este trabalho fosse concluído.

Ao Prof. Dr. Alexandre Massote pelo incentivo e apoio para iniciação ao mestrado no Centro Universitário FEI.

Agradeço aos amigos que trilharam juntos nesta jornada ao longo destes anos auxiliando nos estudos e contribuindo com discussões técnicas para enriquecimento da pesquisa.

Finalmente agradeço a Deus que me iluminou e pela graça recebida de saúde e bem-estar.

“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças”

(Charles Darwin)

RESUMO

As inovações nos processos de manufatura proporcionadas pela nova tendência da Quarta Revolução Industrial abrem lacunas de pesquisa nos atuais modelos de produção para a sua adequação aos conceitos inseridos pela Indústria 4.0, tornando o processo produtivo em uma nova forma de manufatura avançada. Dentre os principais conceitos introduzidos destacam-se a Internet das Coisas e Sistemas Ciber-Físicos como as bases para o desenvolvimento da manufatura. O objetivo desta pesquisa é de apresentar, a partir de comparativo entre um modelo de manufatura convencional e um modelo de manufatura avançada, que a implementação da manufatura avançada pode trazer benefícios nos indicadores de produção. O método adotado de comparação é a modelagem e simulação de um processo produtivo convencional e de um processo de manufatura avançada, adotando algumas funcionalidades resultantes da aplicação de Internet das Coisas e Sistemas Ciber-Físicos. Neste estudo aborda-se a questão dos métodos de simulação que podem representar a transição da manufatura convencional para a manufatura avançada. Os modelos gerados são simulados computacionalmente utilizando método de simulação baseado em agentes.

Palavras-chave: Manufatura Avançada. Indústria 4.0. Sistemas Ciber Físico. Sistemas Multi Agente. Simulação Baseada em Agentes.

ABSTRACT

The innovations in manufacturing processes provided by the new Fourth Industrial Revolution trend open research gaps in current production models to adapt them to the concepts introduced by Industry 4.0, making the manufacturing process a new form of smart manufacturing. Among the main concepts introduced are the Internet of Things and Cyber-Physical Systems as the basis for the development of manufacturing. The objective of this research is to present, from a comparison between a conventional manufacturing model and a smart manufacturing model, that the implementation of smart manufacturing could bring benefits to the production indicators. The adopted method of comparison is the modeling and simulation of a conventional production process and a smart factory process, adopting some functionalities resulting from the Internet of Things and Cyber-Physical Systems. In this study addresses the question of simulation methods which can represent the transition from the conventional manufacture to the smart manufacturing. The generated models are computationally simulated using agent based simulation method.

Keywords: Smart Manufacturing. Industry 4.0. Cyber Physical Systems. Multi Agent Systems. Agent Based Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aplicações de simulação.....	19
Figura 2 - Métodos de modelagem de simulação	20
Figura 3 - As quatro Revoluções Industriais	23
Figura 4 - Gráfico de tendência de trabalhos acadêmicos	24
Figura 5 - Diagrama de Indústria 4.0 e a Manufatura Avançada	26
Figura 6 - Integração horizontal	27
Figura 7 - Integração engenharia ponta-a-ponta.....	27
Figura 8 - Integração vertical.....	28
Figura 9 - Classificação e seleção de tecnologia essencial.....	29
Figura 10 - Arquitetura referência de fábrica avançada baseada em IoT	30
Figura 11 - Evolução de documentos referenciando CPS	32
Figura 12 - Arquitetura 5C para implementação de CPS	33
Figura 13 - Ontologia de CPS.....	35
Figura 14 - Código de barras e código matricial bidimensional.....	37
Figura 15 - Arquitetura de integração vertical de manufatura avançada.....	41
Figura 16 - Mecanismo de operação de uma manufatura avançada.....	42
Figura 17 - Evolução de pesquisa em multi-agente.....	43
Figura 18 - Arquitetura hierárquica de SMA.....	46
Figura 19 - Arquitetura holônica de SMA.....	46
Figura 20 - Arquitetura coalisão de SMA	47
Figura 21 - Arquitetura baseado em time de SMA.....	47
Figura 22 - Comunicação local de SMA	48
Figura 23 - Comunicação em rede de SMA	48
Figura 24 - Modelo de Mitroff de processo de pesquisa	51
Figura 25 - Modelo típico de agente.....	54
Figura 26 - Fluxo de fabricação de subconjunto soldado.....	58
Figura 27 - Planta baixa de uma área fabril.....	59
Figura 28 - Diagrama de Simulação de Eventos Discretos	61
Figura 29 - Geração de ordem de produção	62
Figura 30 - Modelagem da área de prensas	63
Figura 31 – Modelagem do estoque de estampados	64
Figura 32 - Modelagem da área de solda.....	65

Figura 33 - Diagrama de estados do agente prensa	68
Figura 34 - Diagrama de estados do agente ferramenta	69
Figura 35 - Diagrama de estados do agente ferramentaria	70
Figura 36 - Diagrama de estados do agente solda	71
Figura 37 - Diagrama de estados do agente manutenção	72
Figura 38 - Diagrama de estados do agente "prensa"	76
Figura 39 - Diagrama de estados do agente "ferramenta"	78
Figura 40 - Diagrama de estados do agente "ferramentaria"	79
Figura 41 - Diagrama de estados do agente "solda"	81
Figura 42 - Diagrama de estados do agente "manutencao"	82
Figura 43 - Diagrama de estados do agente "prensa" avançado	86
Figura 44 - Diagrama de estados do agente "solda" avançado.....	88
Figura 45 - Alocação das prensas	91
Figura 46 - Nível de utilização das prensas	92
Figura 47 - configuração do Plant Simulation.....	93
Figura 48 - Alocação das células de solda.....	95
Figura 49 - Alocação das células de solda.....	96
Figura 50 - Alocação de Serviços por SED	97
Figura 51 - Alocação de Serviços por SBA.....	98
Figura 52 - Volume diário de produção nas prensas	100
Figura 53 - Volume diário de produção nas células de solda	100
Figura 54 - Nível de produção diária.....	101
Figura 55 - Nível de utilização das prensas avançadas	102
Figura 56 - Alocação da ferramentaria	103
Figura 57 - Alocação das células de solda avançadas	103
Figura 58 - Alocação da manutenção	104
Figura 59 - Nível de produção diária.....	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de CPS.....	31
Quadro 2 - Quantidade a ser produzida em cada ordem de produção.....	62
Quadro 3 - Composição de peças de um produto.....	62
Quadro 4 - Parâmetros de operação da prensa.....	64
Quadro 5 - Parâmetros de operação da célula de solda.....	66
Quadro 6 - Parâmetros do agente "prensa".....	77
Quadro 7 - Parâmetros do agente "ferramenta".....	78
Quadro 8 - Parâmetro de tempos do agente "ferramentaria".....	80
Quadro 9 - Parâmetros do agente "solda".....	82
Quadro 10 - Parâmetros de tempos do agente "manutencao".....	83
Quadro 11 - Quantidades de componentes em uma ordem de produção.....	84
Quadro 12 - Parâmetros de agente "prensa" avançada.....	87
Quadro 13 - Parâmetros de agente "solda" avançado.....	89
Quadro 14 - Resultado de SED e SBA de alocação das prensas.....	94
Quadro 15 - Resultado de SED e SBA de alocação das células de solda.....	97
Quadro 16 - Resultado de SED e SBA de alocação de serviços de ferramentaria.....	99
Quadro 17 - Resultado de SED e SBA de alocação de serviços de manutenção.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACATECH	Academia Nacional de Ciência e Engenharia da Alemanha
BDI	Federação das Indústrias da Alemanha
BLE	Comunicação pessoal sem fio de baixa energia (<i>Bluetooth Low Energy</i>)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CLP	Controlador Lógico Programável
CNI	Confederação Nacional da Indústria
ERP	Sistema de Planejamento de Recursos (<i>Enterprise Resource Planning</i>)
CPS	Sistemas Ciber Físico (<i>Cyber Physical Systems</i>)
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
IIoT	Internet Industrial das Coisas (<i>Industrial Internet of Things</i>)
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
IoS	Internet de Serviços (<i>Internet of Services</i>)
IPv6	Protocolo de Internet com endereçamento de 128 bits
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
NFC	Comunicação sem fio de curto alcance (<i>Near Field Communication</i>)
RAMI	Modelo de Arquitetura Referência para Indústria 4.0 (<i>Reference Architecture Model Industrie 4.0</i>)
RFID	Identificação por Rádio Frequência
SBA	Simulação Baseada em Agentes
SED	Simulação de Eventos Discretos
SMA	Sistemas Multi Agente
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
VDE	Associação Técnica e Científica para Elétrica, Eletrônica e Tecnologia de Informação da Alemanha
VDI	Associação de Engenheiros da Alemanha
WiFi	Comunicação sem fio baseada no padrão IEEE 802.11. Marca Registrada da <i>WiFi Alliance</i>
WSN	Rede de Sensores sem fio (<i>Wireless Sensor Network</i>)
ZVEI	Associação de empresas fabricantes de Elétrica e Eletrônica da Alemanha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	16
1.2	QUESTÕES DE PESQUISA	17
1.3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	17
1.4	ABRANGÊNCIA	17
1.5	METODOLOGIA.....	18
1.6	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1	INDÚSTRIA 4.0.....	22
2.1.1	Sistemas Ciber-Físicos	30
2.1.2	Internet das Coisas	36
2.1.3	Manufatura Avançada	39
2.2	SISTEMA MULTI AGENTE (SMA)	43
2.2.1	Classificação de SMA	45
2.2.2	Comunicação de SMA	48
2.2.3	Tomada de Decisão em SMA	49
2.2.4	Coordenação em SMA	49
2.2.5	Aprendizado em SMA	49
2.2.6	Sistemas Multi Agente aplicados na Manufatura	50
2.3	MODELAGEM DE SISTEMA DE MANUFATURA	50
2.3.1	Modelagem e Simulação de Eventos Discretos	52
2.3.2	Modelagem e Simulação Baseada em Agentes	53
3	MODELAGEM DOS MODELOS DE MANUFATURA	56
3.1	ESTRUTURA DO MODELO DE MANUFATURA	57
3.2	MODELAGEM E SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS	59
3.2.1	Geração das Ordens de Produção	60

3.2.2	Estampagem das partes componentes do subconjunto	62
3.2.3	Estocagem de estampados	64
3.2.4	Solda dos subconjuntos	65
3.3	MODELAGEM BASEADA EM AGENTES	66
3.3.1	Estruturação dos Agentes na Manufatura Convencional	66
3.3.1.1	<i>Agente Prensa</i>	67
3.3.1.2	<i>Agente Ferramenta</i>	68
3.3.1.3	<i>Agente Ferramentaria</i>	69
3.3.1.4	<i>Agente Solda</i>	70
3.3.1.5	<i>Agente Manutenção</i>	71
3.3.2	Estruturação dos Agentes no Conceito de Manufatura Avançada	72
3.3.2.1	<i>Prensa Avançada</i>	73
3.3.2.2	<i>Ferramental Avançado</i>	74
3.3.2.3	<i>Célula de Solda Avançada</i>	74
3.3.2.4	<i>Serviços Avançados de Preparação e de Manutenção</i>	74
3.4	SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES DA MANUFATURA CONVENCIONAL	75
3.4.1	Modelo Computacional do Agente “prensa”	75
3.4.2	Modelo Computacional do Agente “ferramenta”	78
3.4.3	Modelo Computacional do Agente “ferramentaria”	79
3.4.4	Modelo Computacional do Agente “solda”	80
3.4.5	Modelo Computacional do Agente “manutencao”	82
3.4.6	Modelo Computacional do Agente “ordens”	83
3.4.7	Estrutura Computacional do Agente Principal (“main”)	84
3.5	SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES DA MANUFATURA AVANÇADA ...	85
3.5.1	Modelo Computacional do Agente “prensa” avançado	85
3.5.2	Modelo Computacional do Agente “solda” avançado	87

4	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	90
4.1	RESULTADOS DE SED E SBA DA MANUFATURA CONVENCIONAL	90
4.1.1	Resultados da Prensa	90
4.1.2	Resultados da Célula de Solda	94
4.1.3	Resultados dos Serviços	97
4.1.4	Resultados de Produção	99
4.2	RESULTADOS DE SBA DA MANUFATURA AVANÇADA	101
5	CONCLUSÃO	106
	REFERÊNCIAS	108
	ANEXO A – TELAS DE EXECUÇÃO DO MODELO NO ANYLOGIC	113

1 INTRODUÇÃO

O cenário tecnológico mundial vem evoluindo de modo amplo e velozmente no desenvolvimento de novas tecnologias e na evolução do conhecimento da tecnologia digital. Esta evolução é observada na rotina de vida humana em diversas formas, como o acesso da sociedade à internet por meio de *smartphones*, televisão digital, automóveis com sistemas de direção autônoma, sistemas integrados de informação, são alguns exemplos dentre as diversas inovações presentes no cotidiano.

Segundo Schwab (2016), esta tendência faz parte da Quarta Revolução Industrial com as inovações tecnológicas em diversos segmentos interagindo nos domínios físico, digital e biológico, e que reflete em todos os setores da sociedade, como a área da saúde, comunicação, energia, produção, agricultura, educação e meio ambiente. Os domínios físico, digital e biológico são profundamente relacionados e são agrupados em megatendências: Domínio Físico: veículos autônomos, impressoras tridimensionais, robótica avançada e novos materiais, Domínio Digital: internet das coisas (IoT), identificação por rádio frequência (RFID) e comércio digital com moeda virtual, e Domínio Biológico: projeto Genoma Humano foi primeiro passo e o próximo passo será a biologia sintética com a sintetização do genoma para a cura de doenças de origem genética.

Schwab (2016) define que todos os novos desenvolvimentos e tecnologias tem uma característica chave em comum: aproveitam-se do poder da digitalização e da tecnologia de informação. Sequenciamento genético, por exemplo, não poderia ter acontecido sem o progresso da computação e das ciências de análise de dados, assim como a robótica avançada não existe sem a inteligência artificial.

Dentro do mundo industrial e corporativo, a Quarta Revolução Industrial tem levado a uma corrida tecnológica de diversos setores para a oferta de soluções, produtos e serviços, buscando vantagens competitivas comerciais com a divulgação de produtos e serviços compatíveis com a Indústria 4.0.

No lado acadêmico, embora já houvessem pesquisas anteriores relacionadas a Internet das Coisas e Sistemas Ciber Físicos, a partir de 2014 houve um aumento do volume de pesquisa acadêmica relacionado especificamente ao tema Indústria 4.0 com a crescente demanda da necessidade de conhecimento das tecnologias emergentes relacionadas ao tema (KANG *et al.*, 2016), e o envolvimento da comunidade acadêmica para a definição de métodos e princípios de

projetos relacionados a Indústria 4.0 (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016) orientando sobre os grupos de pilares que compõem a base da Indústria 4.0.

As organizações governamentais e não governamentais atuam para que o desenvolvimento do tema Indústria 4.0 seja orientado a partir de padrões e recomendações como o relatório sobre o modelo referência de arquitetura de indústria 4.0 (RAMI) da Associação de Engenheiros da Alemanha e Associação Técnica e Científica para Elétrica, Eletrônica e Tecnologia de Informação (VDI/VDE) (2015) e da Associação de Empresas Fabricantes de Elétrica e Eletrônica da Alemanha (ZVEI), relatório de recomendações para a implementação da iniciativa estratégica da Indústria 4.0 da Academia Nacional de Ciência e Engenharia da Alemanha (ACATECH) (2013), relatório da Industrial Internet Consortium (IIC) (2015), consórcio sem fins lucrativos de parceria entre indústria, governo e academia para Internet industrial dos Estados Unidos com o modelo de arquitetura de referência para internet industrial, e outras iniciativas nos países onde busca-se a implantação do modelo.

Dentro deste contexto global de inovações, os sistemas de manufatura absorvem estas transformações e surge o conceito de manufatura avançada. A manufatura avançada consiste na evolução da manufatura convencional com os elementos tecnológicos da Indústria 4.0. Neste trabalho de dissertação são apresentados os conceitos gerais da evolução e as implicações destes conceitos no processo produtivo.

O termo Indústria 4.0 citado neste trabalho refere-se aos conceitos definidos pela ACATECH (2013) que formam a base para a construção da Manufatura Avançada.

A manufatura avançada prevê uma série de avanços nos comportamentos de seus componentes de acordo com as condições do ambiente. Esta característica de operação pode ser melhor representada na forma de agentes. Os agentes são entidades autônomas que tem suas regras de operação individuais e o sistema de interação dos vários agentes é denominado de sistema multi-agente. Para o modelamento computacional da manufatura avançada, parte-se para uma revisão literária dos conceitos de sistema multi-agente e a aplicabilidade para o modelamento baseado em agentes para se poder distinguir o comportamento dos diversos agentes dentro de um ambiente de manufatura com as interações entre os mesmos.

1.1 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é verificar, a partir de comparativo entre um modelo de manufatura convencional e um modelo de manufatura avançada, se a implementação da manufatura avançada pode trazer benefícios para as empresas que a adotam.

O projeto de pesquisa consiste em apresentar o conceito de manufatura avançada e as principais implicações no processo produtivo a partir do modelamento de processo produtivo convencional aperfeiçoado com inovações nos sistemas de controle e gerenciamento, tornando-o em um processo produtivo avançado.

1.2 QUESTÕES DE PESQUISA

As questões de pesquisa são relacionadas ao entendimento dos princípios da Indústria 4.0 aplicados na implementação da manufatura avançada e as vantagens competitivas obtidas com relação à manufatura convencional. Pode-se sintetizar a pesquisa na seguinte questão: quais os benefícios da manufatura avançada?

Neste estudo comparativo entre os métodos de manufatura, levanta-se uma segunda questão sobre a simulação dos modelos de manufatura: quais métodos de simulação podem ser aplicados para a representação da manufatura avançada?

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Há no ambiente corporativo do setor industrial um desconhecimento e falta de referências de modelo de manufatura avançada, dúvidas sobre o nível de implementação necessário, e os benefícios que podem ser obtidos. No ambiente acadêmico o tema encontra-se na fase exploratória com aumento gradativo de pesquisas no setor. As pesquisas abrangem de modo amplo todos os componentes de Indústria 4.0 que formam a manufatura avançada com trabalhos que incluem desde a conceituação até a implementação (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016). Porém há uma lacuna na abordagem de métodos comparativos e benefícios que a nova tendência de Indústria 4.0 possa contribuir para ganhos nos processos produtivos da manufatura avançada.

1.4 ABRANGÊNCIA

O projeto de pesquisa busca contribuir com um estudo de modelos computacionais que representem o processo produtivo de manufatura avançada com as inovações tecnológicas que compõem a Indústria 4.0. A contribuição acadêmica será uma orientação para a obtenção de resultados comparativos da simulação computacional do cenário convencional de processo de produção contra o cenário inovador de manufatura avançada.

1.5 METODOLOGIA

O conceito de manufatura avançada será explorado e contextualizado a partir da revisão literária dos elementos principais que compõem o tema e seu relacionamento com a Indústria 4.0. Embora o tema Indústria 4.0 seja recente, as bases que o sustentam são assuntos pesquisados a longa data e possuem material literário disponível na base de dados. A evolução da tecnologia digital promoveu o desenvolvimento em maior escala destes elementos, formando a manufatura avançada.

A partir do estudo realizado sobre a manufatura avançada, o trabalho passa para a elaboração do modelo que represente um modelo de manufatura convencional e um modelo de manufatura avançada baseado na evolução do modelo convencional com aplicação de conceitos derivados de Indústria 4.0. O método adotado de validação dos modelos é a simulação computacional dos processos de manufatura para se obter dados comparativos e determinar os indicadores que possam ser observados. Os métodos de modelagem e simulação computacional têm se destacado com o avanço das tecnologias de computação.

A abordagem metodológica adotada é de modelagem e simulação comparando quantitativamente os resultados obtidos da simulação computacional da manufatura avançada com os resultados da simulação da manufatura convencional.

A escolha de simulação de um sistema produtivo segue algumas recomendações de Martins, Mello e Turrioni (2014) que cita condições onde a simulação é mais apropriada, quando:

- a) é difícil ou mesmo impossível o desenvolvimento de modelo matemático;
- b) o sistema possui variáveis aleatórias;
- c) complexidade na dinâmica do processo;
- d) observação do comportamento do sistema por um determinado período;
- e) uso de animação para visualização do processo.

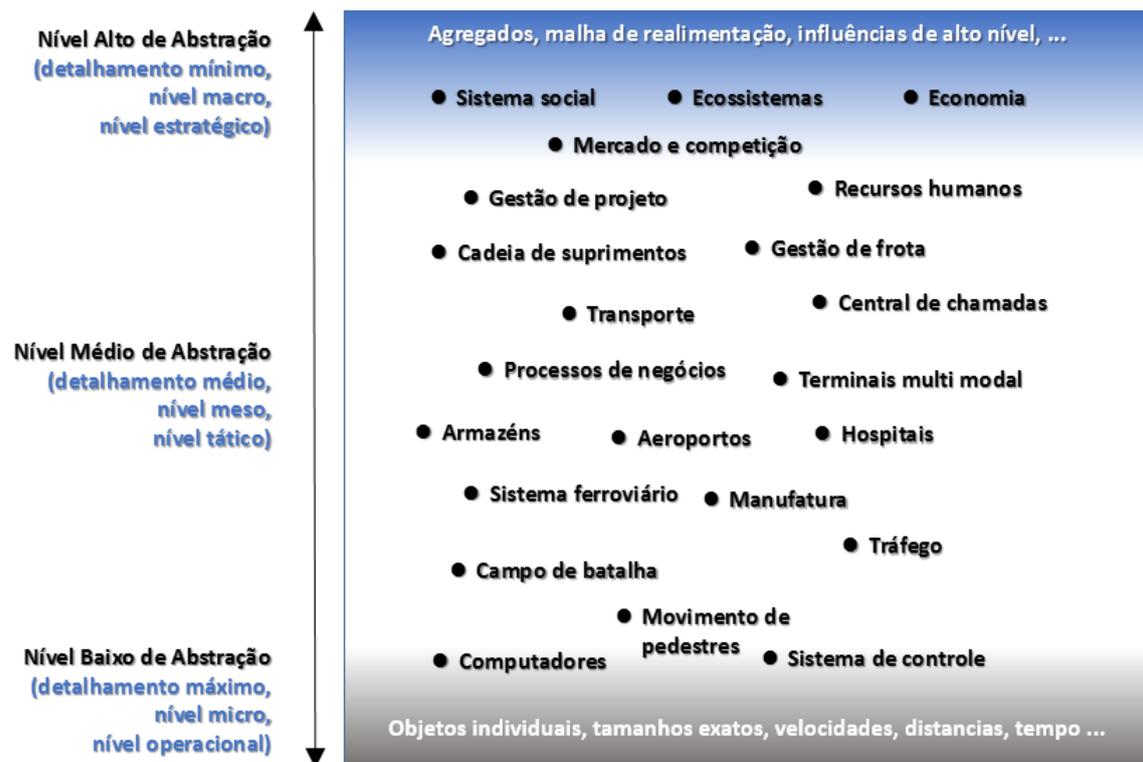
Aliado a isso destacam-se as vantagens de (MARTINS; MELLO; TURRIONI, 2014):

- f) a experimentação ocorre em curto período de tempo com o apoio computacional;
- g) menor necessidade de análise uma vez que os pacotes de *software* de mercado facilitam a análise dos dados;
- h) facilidade de demonstração dos modelos através de interface gráfica dos *softwares*;

- i) possibilidade de experimentação em níveis que não são permitidos nos experimentos físicos.

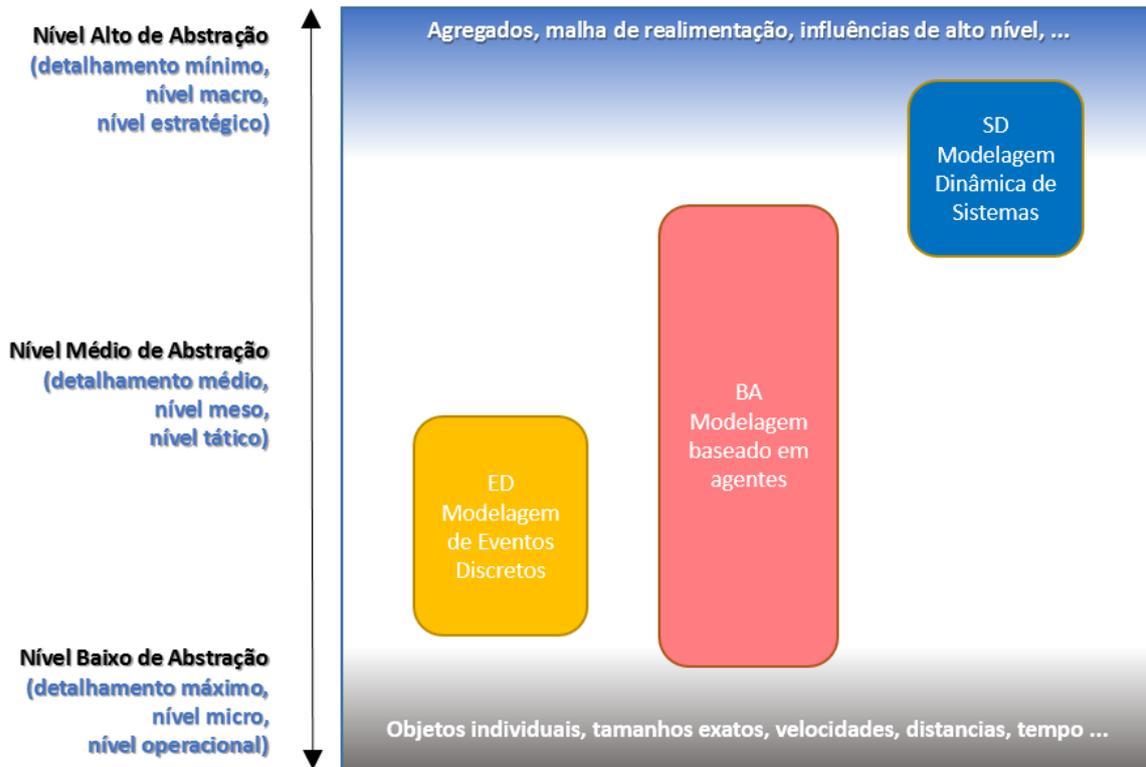
O modelamento do processo deve-se avaliar o nível de informação que se possui e o nível de resultados esperados. De acordo com o tipo de aplicação que se planeja simular, tem-se uma classificação do nível de abstração do modelo (Figura 1), e conforme o nível de abstração utiliza-se o tipo de simulação mais adequado ao modelo de aplicação (Figura 2) (BORSHCHEV, 2013). Com base nos gráficos de Borschchev (2013), a manufatura convencional, pelo seu nível operacional e detalhado, pode ser enquadrada tanto na simulação de eventos discretos como na simulação baseada em agentes. A manufatura avançada, pode possuir níveis de abstração mais elevados para certas funcionalidades que sejam definidas pelos conceitos de Indústria 4.0. Para o modelamento da manufatura avançada pode-se utilizar a simulação de eventos discretos, porém com maior nível de complexidade na elaboração do modelo para atingir os níveis de abstração, ou pode-se utilizar a simulação baseada em agentes preparada para absorver os níveis de abstração mais altos.

Figura 1 - Aplicações de simulação



Fonte: Autor "adaptado de" Borshchev, 2013, cap.1.3

Figura 2 - Métodos de modelagem de simulação



Fonte: Autor “adaptado de” Borshchev, 2013, cap.1.3

Neste trabalho de dissertação de modelagem para o comparativo entre a manufatura convencional e a manufatura avançada, a manufatura convencional é simulada nos dois métodos, eventos discretos e baseado em agentes, e a manufatura avançada é simulada somente no método baseado em agentes, foco desta dissertação. Os modelos de manufatura convencional e avançada são desenvolvidos nos programas de simulação computacional para a análise dos indicadores obtidos a partir da simulação e avaliação das vantagens e desvantagens da manufatura avançada.

1.6 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em capítulos organizados para o desenvolvimento da pesquisa seguindo a seguinte ordem:

O capítulo 2 apresenta a revisão literária dos conceitos de Indústria 4.0 que definem a manufatura avançada, os sistemas multi agente, e a modelagem e simulação de sistemas de manufatura.

O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento dos modelos do processo de manufatura convencional e do processo de manufatura avançada.

O capítulo 4 apresenta os resultados das simulações computacionais e análise do comparativo entre os métodos adotados.

O capítulo 5 apresenta a conclusão dos trabalhos e recomendações para futuras pesquisas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão literária abrange uma revisão dos conceitos de Indústria 4.0, especificamente sobre os Sistemas Ciber Físicos (CPS), Internet das Coisas (IoT) e Manufatura Avançada. Para o entendimento do modelo de simulação utilizado, apresenta-se os conceitos de sistemas multi agente e a modelagem e simulação baseada em agentes.

2.1 INDÚSTRIA 4.0

A indústria faz parte da economia como um todo promovendo a geração de bens industrializados, e ao longo da história o seu processo evolutivo sofreu transformações de quebra de paradigmas (LASI *et al.*, 2014) que são denominadas como revoluções industriais. Dentro desse contexto, a sociedade passa pela quarta revolução industrial (Figura 3) sendo definida as três revoluções anteriores como: a primeira revolução industrial que ocorreu com a mecanização dos processos e o advento da máquina a vapor no final do século 18; a segunda revolução industrial que surgiu com a expansão da rede elétrica e o advento da produção em massa, exemplificado pela primeira linha de produção de Ford T no início do século 20; a terceira revolução industrial com a computação sendo usado em larga escala e a possibilidade da automação industrial com o advento dos controladores lógicos programáveis (CLP) no início da década de 70, e a quarta revolução industrial no século 21 que advém do uso da internet industrial, da digitalização dos processos produtivos (CPS) e o uso de sistemas avançados na produção. Um dos principais facilitadores da evolução da Internet das Coisas (IoT) foi a introdução do novo protocolo de Internet IPv6 em 2012 que utiliza protocolo de endereçamento de internet (IP) de 128 bits passando a permitir 340 sextiliões ($3,4 \times 10^{38}$) de endereços de IP (ACATECH, 2013).

Figura 3 - As quatro Revoluções Industriais

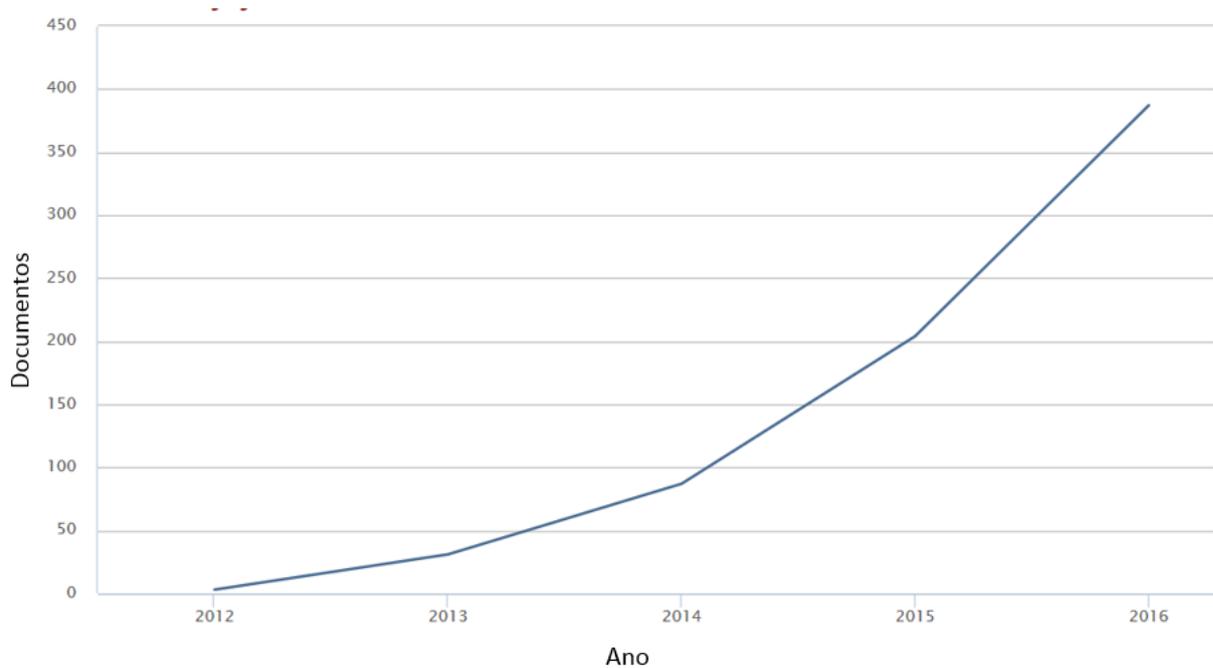


Fonte: Autor “adaptado de” ACATECH, 2013

A Quarta Revolução Industrial dentro do setor industrial está sendo direcionada por diversas iniciativas governamentais nos países desenvolvidos para o desenvolvimento e a modernização do seu parque industrial. Alguns programas se destacam como: “*Industrie 4.0*” na Alemanha, lançado na feira de Hannover em 2011 e “*Industrial Internet*” nos Estados Unidos (DRATH; HORCH, 2014).

O programa “*Industrie 4.0*” tem se difundido de forma ampla nos principais países industrializados e têm buscado aumentar o conhecimento no tema para o seu desenvolvimento industrial (UBS, 2016), e a comunidade acadêmica está buscando o estado de arte do conhecimento no tema para contribuir no desenvolvimento tecnológico. Em uma busca realizada na base de dados SCOPUS (2017), uma das principais fontes de pesquisa acadêmica, utilizaram-se as palavras chaves “*Industry 4.0*” e “*Industrie 4.0*”, resultando no gráfico da Figura 4.

Figura 4 - Gráfico de tendência de trabalhos acadêmicos
Evolução de documentos por ano



Fonte: Autor “adaptado de” Scopus, 2017

O gráfico apresenta uma tendência de que, após o tema ter sido lançado na Feira Industrial de Hannover em 2011, houve uma evolução exponencial na quantidade de pesquisa realizada na comunidade acadêmica.

Houve um período inicial de ceticismo quanto aos avanços propostos pela Indústria 4.0, questionando se a mesma seria efetivamente uma tendência futura ou uma estratégia de marketing, conforme artigo de Drath e Horch (2014).

Lasi (2014) em seu artigo “*Industry 4.0*”, um dos artigos mais citados relacionados ao tema, faz uma descrição geral sobre os conceitos envolvidos e princípios a serem considerados. Trata-se de um dos primeiros artigos acadêmicos a abordar o assunto diretamente e descreve os direcionadores no desenvolvimento da Indústria 4.0. Pode-se dividir em duas vertentes de desenvolvimento: de um lado puxado pelos anseios gerados pelas mudanças na sociedade, economia e política, como diminuição do tempo de inovação, demanda individualizada cada vez mais customizada, maior flexibilidade no desenvolvimento de produtos e eficiência dos recursos, e de outro lado existe uma excepcional motivação tecnológica nas práticas industriais. Esta tendência tecnológica pode ser identificada por algumas abordagens tecnológicas, como o aumento da automação com sistemas autônomos com controle independente, aumento da digitalização e da tecnologia de redes de comunicação, simulação digital e realidade aumentada,

e tendência a miniaturização com dispositivos sensores de melhor performance e menores para aplicação na produção e logística.

Drath e Horch (2014) determina os pré-requisitos básicos que devem direcionar os trabalhos relacionados ao tema Indústria 4.0:

- a) proteção do investimento: o conceito tem de ser introduzível nas plantas existentes;
- b) estabilidade: a implantação não pode comprometer a produção em andamento, nem por distúrbios e nem por quebras;
- c) privacidade dos dados: deve ter proteção da propriedade intelectual da empresa;
- d) segurança cibernética: deve prevenir contra acessos não autorizados aos sistemas produtivos para evitar danos ambientais, ou econômicos, ou ao ser humano.

Dentre os países desenvolvidos, a Alemanha e os Estados Unidos da América formaram grupos de pesquisas dedicadas ao estudo da Manufatura Avançada para a formação de recomendações e padrões. Na Alemanha, a Academia Nacional da Ciência e Engenharia (ACATECH) formulou um relatório com recomendações para a implementação de Indústria 4.0 (ACATECH, 2013) e um relatório com recomendações para formação de conexões de máquinas através de Internet em plataforma digital (ACATECH, 2015). A Associação de Engenheiros da Alemanha e a Associação técnica e científica para Elétrica, Eletrônica e Tecnologia de Informação (VDI/VDE) na Alemanha publicou relatório com modelo recomendado para arquitetura de referência representando as diversas camadas de valor para a Indústria 4.0, denominada de Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0 (RAMI4.0) (VDI/VDE, 2015) e a Industrial Internet Consortium dos Estados Unidos publicou relatório de referência para a Internet Industrial (IIC, 2015) com recomendações para a formação de Internet das Coisas para uso industrial (IIoT).

Uma grande preocupação com a tendência de Indústria 4.0 quanto a digitalização em nuvem é a segurança da informação na internet e os direitos legais sobre o uso das informações nos servidores remotos terceirizados. Algumas iniciativas como o relatório da Federação das Indústrias Germânicas (BDI, 2015) e do Diretório Geral de Políticas Internas do Parlamento Europeu (DIRECTORATE-GENERAL FOR INTERNAL POLICIES, 2016) discorrendo sobre a questão legal do processo.

No Brasil estão em andamento algumas iniciativas governamentais direcionadas a tendência da Indústria 4.0: o Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI), lançou no final de 2016 a consulta pública sobre Internet das Coisas; o Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES), contratou a consultoria McKinsey e CPqD para definição de políticas públicas para a Internet das Coisas; e a Confederação Nacional da Indústria (CNI)

publicou em 2016 o relatório “Desafios para Indústria 4.0 no Brasil” (CNI, 2016) com uma agenda de propostas para as empresas industriais absorverem as oportunidades da Manufatura Avançada.

A essência do conceito de Indústria 4.0 (Figura 5) é a integração de Sistemas Ciber-Físicos (CPS) na manufatura e na logística, e o uso de Internet das Coisas (IoT) e Internet de Serviços (IoS) nos processos industriais (ACATECH, 2013). De acordo com o relatório de recomendações da ACATECH (2013), o conceito Indústria 4.0 abrange uma ampla diversidade de disciplinas interconectadas pela IoT e CPS formando o elo da “manufatura avançada” relacionado com a “logística avançada”, com “produtos avançados”, com a “rede avançada de energia”, com “prédios avançados”, e com “mobilidade avançada”.

Figura 5 - Diagrama de Indústria 4.0 e a Manufatura Avançada



Fonte: Autor “adaptado de” ACATECH, 2013

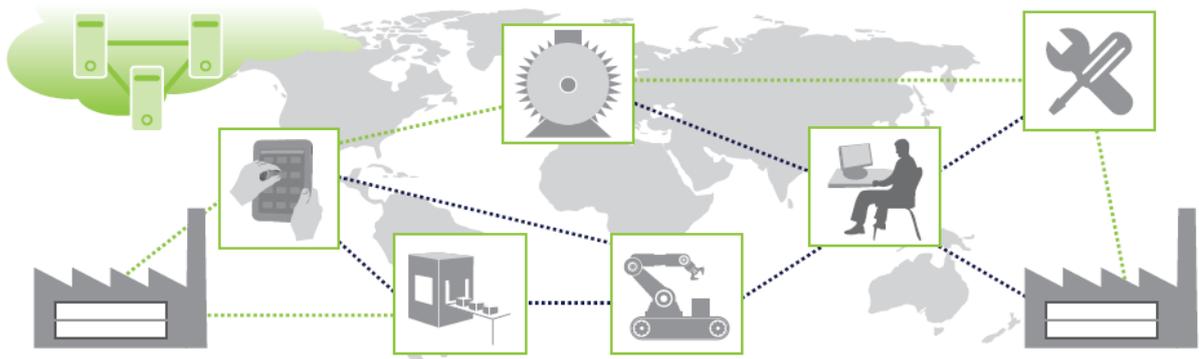
O perfeito atendimento dos objetivos da Indústria 4.0 somente será possível se os principais atores da cadeia de suprimentos e as principais estratégias de mercado sejam coordenados para garantir que os potenciais benefícios se complementem (ACATECH, 2013). Esta abordagem é referida como Estratégia Dual e incorpora três funcionalidades chaves:

- a) desenvolvimento de valores na cadeia de suprimentos entre empresas através da integração horizontal;

- b) engenharia digital de ponta-a-ponta na cadeia de valor do produto e do processo de manufatura associado;
- c) desenvolvimento, implementação e integração vertical de sistema de manufatura flexível e reconfigurável.

A integração horizontal (Figura 6) abrange o uso dos recursos de Indústria 4.0 em toda a gestão da cadeia de suprimentos para suportar novos valores na rede e novos modelos de negócios entre as empresas envolvidas. As redes de comunicação entre todos os elos da cadeia de suprimentos formam um modelo de negócio cooperativo entre as corporações envolvidas.

Figura 6 - Integração horizontal



Fonte: Autor “adaptado de” ACATECH, 2013

A integração de engenharia digital de ponta-a-ponta (“*End-to-End*”) (Figura 7) objetiva todo o processo de gestão do ciclo de vida do produto, desde o desenvolvimento do produto até os serviços de pós-venda ao fim do ciclo de vida do produto, mantendo a conexão entre o mundo digital e real no ciclo de vida e em toda a cadeia de suprimentos.

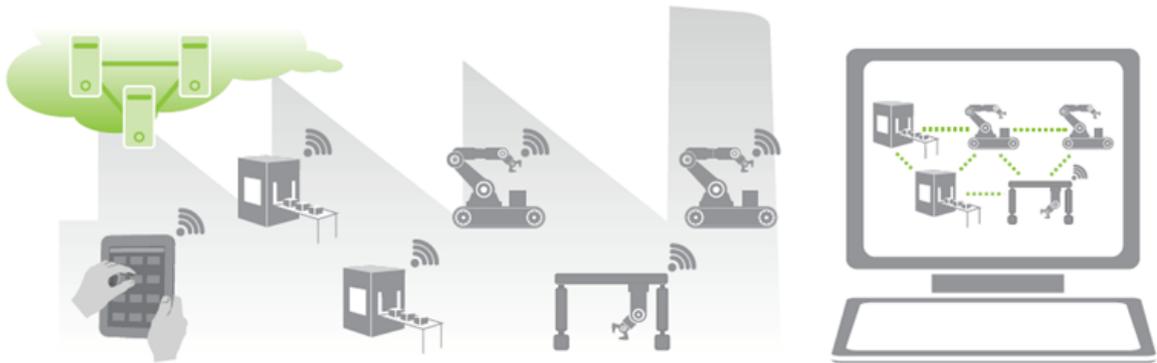
Figura 7 - Integração engenharia ponta-a-ponta



Fonte: Autor “adaptado de” ACATECH, 2013

A integração vertical (Figura 8) e os sistemas de manufatura totalmente conectados abrangem desde os sensores de equipamentos do chão de fábrica, passando pelos controladores lógico programáveis, robôs, sistemas de gestão visual, até os sistemas de gestão empresarial corporativo para tornar os sistemas de manufatura totalmente flexíveis e reconfiguráveis para permitir a alteração automática da estrutura de produção.

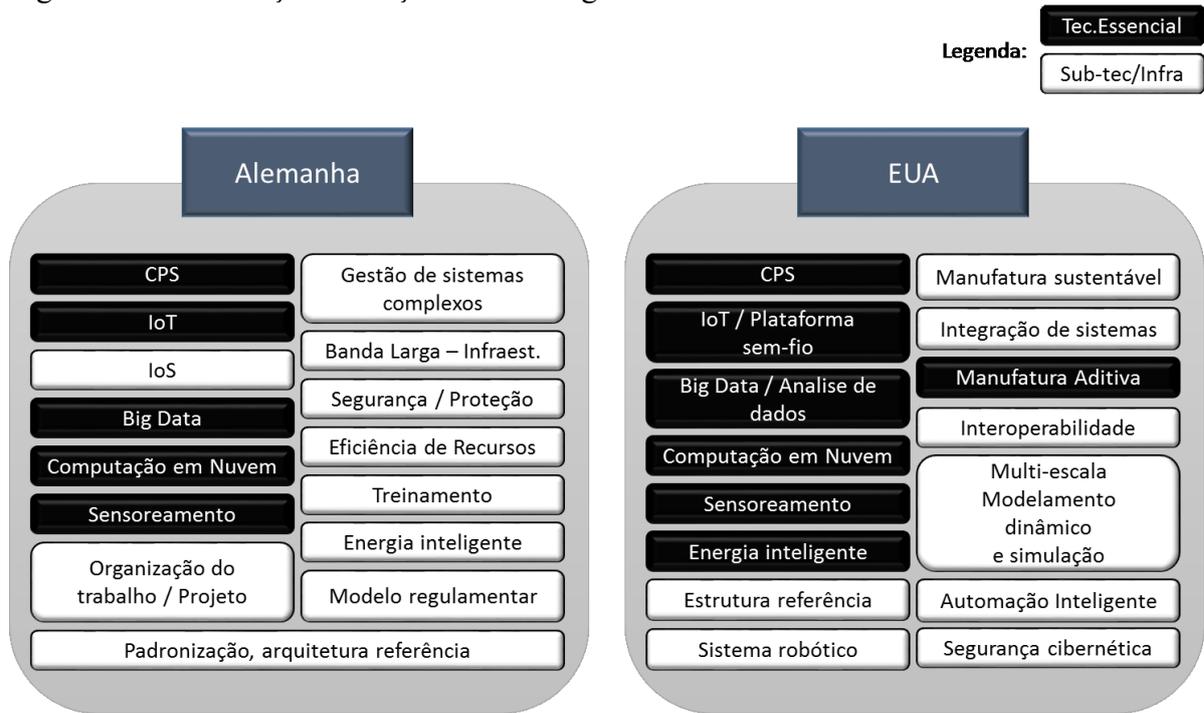
Figura 8 - Integração vertical



Fonte: Autor “adaptado de” ACATECH, 2013

O modelo de manufatura avançada refere-se a uma composição de uma ampla gama de disciplinas e conceitos resultantes de inovações e tecnologias. Podem-se classificar as tecnologias pesquisadas pela Alemanha e pelos Estados Unidos da América (EUA) em tecnologias essenciais e abordagem estratégica não tecnológica relacionada a outros elementos como infraestrutura para o programa “*Industrie 4.0*” da Alemanha e para o programa Manufatura avançada dos EUA (KANG *et al.*, 2016). Esta classificação é ilustrada na Figura 9.

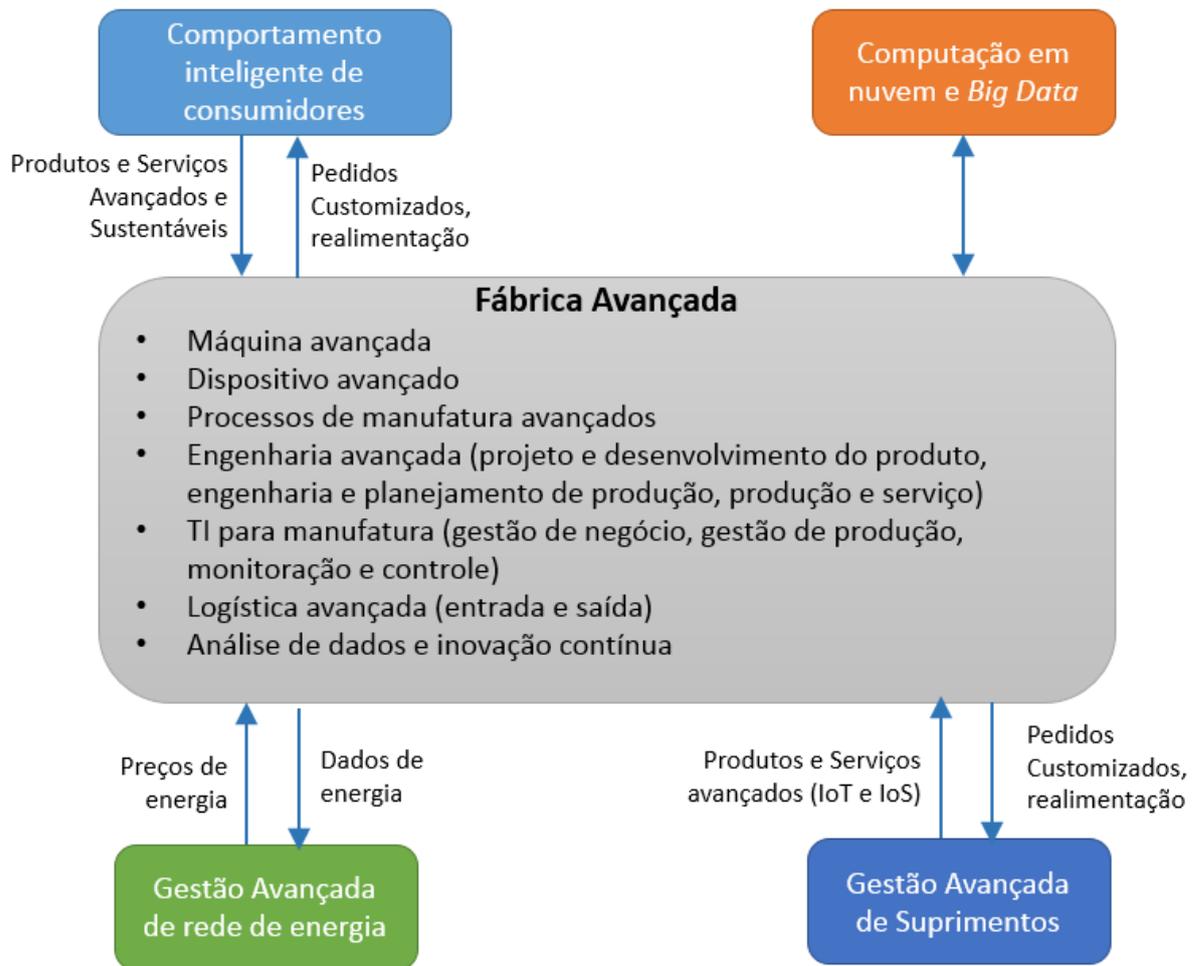
Figura 9 - Classificação e seleção de tecnologia essencial



Fonte: Autor “adaptado de” Kang et al., 2016

Todos os conceitos agrupados formam a base para a manufatura avançada. Shrouf, Ordieres e Miragliotta (2014) apresentam uma arquitetura de referência para uma fábrica avançada baseada em IoT (Figura 10).

Figura 10 - Arquitetura referência de fábrica avançada baseada em IoT



Fonte: Autor “adaptado de” Shrouf, Ordieres e Miragliotta, 2014

2.1.1 Sistemas Ciber-Físicos

Os sistemas ciber-físicos (CPS)¹ são definidos como uma tecnologia de transformação para gestão dos sistemas interligados entre os ativos físicos e as capacidades computacionais (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). Os CPS são definidos como os sistemas que oferecem integração da computação, rede e processos físicos, ou como sistemas que o físico e os componentes de *software* estão profundamente entrelaçados, cada qual operando em diferentes escalas de espaço e tempo, exibindo múltiplas e distintas modalidades comportamentais e interagindo um com outro em uma miríade de formas que mudam conforme o contexto (KHAITAN; MCCALLEY, 2015).

¹ Do inglês Cyber Physical Systems

O trabalho de pesquisa de Khaitan e McCalley (2015) realiza uma revisão literária sobre as publicações referentes a CPS (Quadro 1). Nesta revisão o autor classificou os trabalhos em quatro grupos: 1) Projeto, 2) Aspectos e Questões, 3) Aplicações, e 4) Desafios e caminhos. Estes grupos são divididos em subclasses onde são enquadrados os trabalhos pesquisados.

Quadro 1 - Classificação de CPS

Classificação	Referências
Projeto	
Arquitetura e modelagem	71 artigos
Simulador / simulação	9 artigos
Ferramentas e modelos de programação	3 artigos
Verificação e validação	8 artigos
Aspectos e Questões	
Segurança	34 artigos
Resiliência	9 artigos
Confiabilidade	9 artigos
Qualidade de Serviço (QoS)	6 artigos
Requisitos de tempo real	6 artigos
Aplicações	
Sistemas veiculares e transporte	13 artigos
Sistemas médicos e de saúde	15 artigos
Casas avançadas e edifícios	14 artigos
Redes sociais e jogos	8 artigos
Planejamento	7 artigos
Gestão de energia e térmicas	8 artigos
Computação em nuvem e central de dados	8 artigos
Sistemas de potência e rede de energia	18 artigos
Sistemas de redes	16 artigos
Vigilância	3 artigos
Controle de processo industrial	1 artigo
Aeroespacial e gestão de tráfego aéreo	5 artigos
Mecanismo de busca	1 artigo
Monitoramento ambiental	1 artigo
Engenharia civil	75 artigos
Processamento de vídeo	99 artigos
Distribuição de água	1 artigo
Robótica	1 artigo
Desafios e Caminhos (roadmap)	11 artigos

Fonte: Autor “adaptado de” Khaitan e McCalley, 2015

O Quadro 1 com as classificações apresenta a heterogeneidade de aplicações de CPS e concentração em alguns temas sendo eles: projeto - arquitetura e modelagem, aspectos e questões de segurança, aplicação em sistemas veiculares e transporte, aplicação em sistemas médicos, aplicação em casas e edifícios avançados, aplicação em sistemas de potência e rede de energia, aplicação em sistemas de rede, aplicação em engenharia civil e aplicação em processamento de vídeo, e de desafios e caminhos a seguir.

Uma busca realizada na base de dados SCOPUS (2017), uma das principais fontes de pesquisa acadêmica, utilizaram-se as palavras chaves “*Cyber Physical Systems*”, resultando no gráfico da Figura 11.

Figura 11 - Evolução de documentos referenciando CPS



Fonte: Autor “adaptado de” Scopus, 2017

O gráfico da Figura 11 apresenta que houve início no ano de 2006, ano quando o tema CPS foi abordado no seminário “*NSF workshop on cyber-physical systems*” organizado pelo Prof. Raj Rajkumar de Carnegie Mellon University de EUA e patrocinado pela *National Science Foundation* (NSF), instituição de pesquisa do governo norte-americano (RAWUNG; PUTRADA, 2014). A partir do ano de 2009 há um aumento gradativo e acentuado de publicações acadêmicas.

No ambiente industrial da manufatura avançada, Lee, Bagheri e Kao (2015) propõe uma estrutura de cinco níveis denominado de arquitetura 5C (Conexão, Conversão, Cibernético,

Cognição e Configuração) com diretrizes para desenvolvimento e implementação de CPS aplicados na manufatura (Figura 12).

Figura 12 - Arquitetura 5C para implementação de CPS



Fonte: Autor “adaptado de” Lee, Bagheri e Kao., 2015

Nível I Conexão avançada – nível mais baixo sendo o primeiro passo da integração de elementos físicos como sensores, atuadores, controladores ligados em redes de comunicação para a passagem de informações para o próximo nível. Novas tecnologias permitem sensores ligados diretamente em rede Internet por tecnologia sem fio com maior capacidade de processamento embutido que torna o sensor mais avançado. (TRAPPEY *et al.*, 2016).

Nível II Conversão de dados – são feitos muitos tipos de inferências com os dados recebidos e os resultados são transferidos para níveis superiores e pode atuar de volta ao nível de conexão para correções no processo. O volume de informação gerada necessita de uma infraestrutura capaz de suportar grandes volumes de dados (“*big data*”) e armazenamento em nuvem computacional para interação com todo o sistema. (TRAPPEY *et al.*, 2016).

Nível III Cibernético – tem-se o uso de infraestrutura computacional com equipamentos e *softwares* como uso de algoritmos para análise do comportamento corrente e futuro das construções lógicas de programas, arquiteturas, algoritmos, e segurança do sistema. (TRAPPEY *et al.*, 2016).

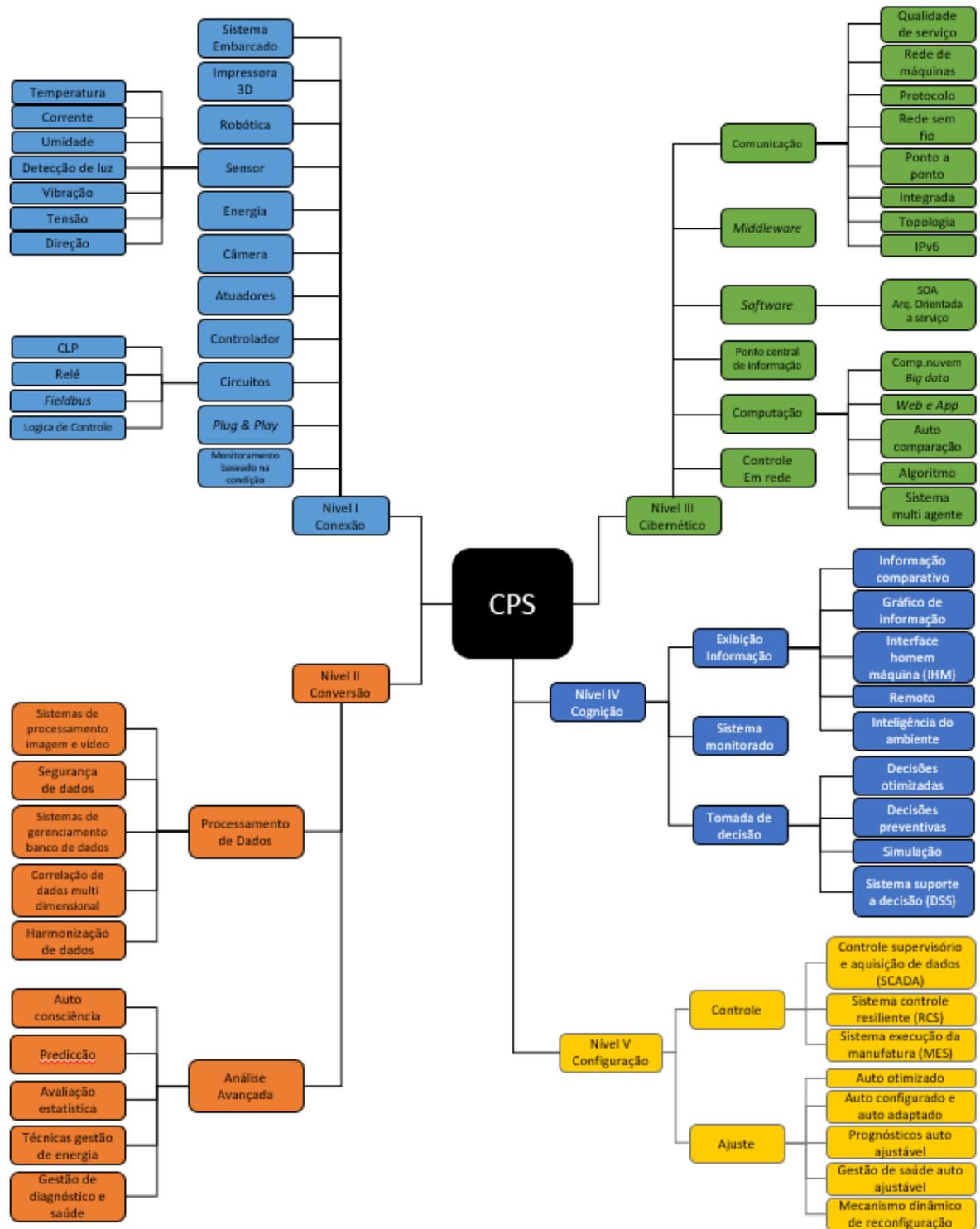
Nível IV Cognição – nível que apresenta o conhecimento acumulado nos níveis mais altos para suporte na tomada de decisões. O nível de Cognição auxilia na solução de problemas

de gestão da manufatura bem como a manutenção dos equipamentos e planejamento da produção com o conhecimento do comportamento corrente e futuro do sistema. (TRAPPEY *et al.*, 2016).

Nível V Configuração – nível de transformação da inteligência em ação. Movimento do mundo cibernético para o mundo físico. Configuração para aprendizagem, otimização, customização, adaptação, aprimoramento, auto-organização e automontagem. Na Indústria 4.0 a aplicação de inteligência artificial se dá para prover gestão dos objetivos, planejamento e controle. A ideia é que o sistema automaticamente modifique seu comportamento ajustando as condições de operação para alcançar os objetivos traçados. (TRAPPEY *et al.*, 2016).

Trappey et al. (2016) em seu trabalho realizaram uma revisão literária para mapeamento das normas e patentes ligadas a CPS e elaboraram um diagrama com a ontologia do CPS (Figura 13) baseado na arquitetura 5C de Lee, Bagheri e Kao (2015).

Figura 13 - Ontologia de CPS



Fonte: Autor “adaptado de” Trappey et al., 2016

2.1.2 Internet das Coisas

Aliado a CPS, o conceito de Internet das Coisas e Internet dos Serviços forma o elo entre o ambiente físico e o virtual mantendo a integração do CPS em tempo real (ACATECH, 2013). A Internet das Coisas (IoT²) corresponde a uma rede de comunicação que permite a dispositivos avançados comunicarem-se com outras máquinas, objetos e dispositivos (SAHA *et al.*, 2016).

Desde o início do funcionamento da internet ocorre o crescimento de conexões de dispositivos na rede em larga escala. O termo “*Internet of Things*” foi introduzido em 1999 por Kevin Ashton, diretor executivo da AutoIDCentre do Massachusetts Institute of Technology (MIT), que neste mesmo ano criou o sistema de identificação baseado em rádio frequência (RFID) (SAHA *et al.*, 2016; SURESH *et al.*, 2014). No ano de 2012 houve um grande salto com o lançamento do protocolo IPv6 que permite o endereçamento na rede internet de uma infinidade de componentes conectados com endereço único (ACATECH, 2013). O desenvolvimento da Internet das Coisas teve um grande salto na última década expandindo sua atuação em grande escala para as áreas de saúde, transporte, utilidades e tudo que seja possível se conectar à rede.

A Internet das Coisas deve transformar o modo de vida, trabalho e diversão. Desde a automação nas fábricas e conectividades dos automóveis, aos sensores em vestuário e utilidades na casa, o impacto será em todas as dimensões na vida humana (SAHA *et al.*, 2016). O mercado global de IoT está preparado para crescimento rápido de 4,9 bilhões de dispositivos conectados em 2015 para uma projeção de 21 bilhões de dispositivos em 2020 (SCHATSKY; TRIGUNAIT, 2016).

Um panorama das principais tecnologias que possibilitam a evolução de Internet das Coisas mostra os seguintes elementos (SAHA *et al.*, 2016; SURESH *et al.*, 2014; YANG; SHEN; WANG, 2016):

- a) identificação por rádio frequência (RFID): é a tecnologia chave para a identificação única de objetos. Consiste de sistema eletromagnético sem fio de transferência de dados armazenados em uma etiqueta eletrônica fixa no objeto. As etiquetas podem ser ativas ou passivas. As ativas possuem bateria interna que permite a emissão de sinais continuamente. As passivas são ativadas somente com a atuação de antenas para a leitura e escrita nas mesmas.

² Do inglês Internet of Things

- b) redes de sensores sem fio (WSN): a rede de sensores é composta por pontos autônomos de rede distribuídos espacialmente que podem monitorar o ambiente, conduzir para processamento central, e comunicar com outros pontos. Também podem ser atuadores para o controle do ambiente.
- c) comunicação *Near Field Communication* (NFC): recente tecnologia de comunicação de curta distância que passa a ser utilizada para transmissão de dados das etiquetas de RFID. Os sistemas NFC são projetados para uso em dispositivos pareados bem próximos, cerca de 5cm, e atualmente muitos *smarthphones* de última geração possuem o sistema NFC incorporados.
- d) código de barras e código matricial bidimensional (Figura 14): códigos de barras são utilizados desde a década de 70 e atualmente empregam-se em praticamente todos os itens comerciais do varejo. São de fácil implementação e baixo custo com relação ao uso de RFID. A evolução para códigos matriciais bidimensionais ampliou a quantidade de informação possível de armazenamento com relação ao código de barras unidimensional. Os códigos atualmente podem ser lidos por qualquer *smartphone* equipado com câmera e aplicativo de leitura.

Figura 14 - Código de barras e código matricial bidimensional



Fonte: adaptado de embalagens de produtos

- e) redes “*Wi-Fi*”: a difusão das redes sem fio com protocolo IEEE802.11 utilizado em todos os dispositivos comerciais como *smarthphones*, uso doméstico nos computadores, uso empresarial e industrial, conexões em locais públicos para uso pela população, escolas, hospitais, torna-se um dos principais elementos para o aumento do uso de internet das coisas. O termo “*Wi-Fi*” é marca registrada da *Wi-Fi Alliance*.
- f) computação em nuvem: com os bilhões de dispositivos conectados, a computação em nuvem torna-se a principal opção para o armazenamento e análise dos dados. Com a evolução da internet e sua infraestrutura, o uso de servidores remotos

conectados através da rede internet vem se difundindo através do uso de *smarthphones*.

- g) *Bluetooth* de baixa energia (BLE): *bluetooth* é uma tecnologia popular difundida pelo uso de telefones celulares. Uma nova tecnologia denominada de BLE, *bluetooth* de baixa energia, vem sendo utilizada em diversos dispositivos de vestimentas como relógios avançados, óculos avançados, calçados avançados, e tudo mais que possa ser inserido para sensoriamento.

A internet das coisas, com o desenvolvimento de novos sensores e dispositivos, possui aplicações em diversas áreas sendo descritas algumas a seguir (SAHA *et al.*, 2016; SURESH *et al.*, 2014):

- a) área médica (IoT-MD): uso de dispositivos para monitoração remota do corpo humano para controle de doenças crônicas e cuidados da condição física na execução de esportes. Os dispositivos podem ser sensores de temperatura, batimento cardíaco, respiração, posição do corpo, pressão arterial e o que puder acrescentar de informação para o diagnóstico médico. Vestuário avançado com sensores que monitoram as condições de saúde e calçados que informam o desgaste do solado para informar ao fabricante a necessidade de adquirir um novo calçado.
- b) edificação avançada: uso para reduzir custos e aumentar o conforto e segurança atuando nos recursos da edificação. Atuação no controle da iluminação, ar condicionado, sistema de câmeras de circuito interno de segurança, e o que for passível de monitoração e controle. Também se tem eletrodomésticos avançados como o refrigerador, por exemplo, monitorando o que está sendo consumido, realiza a chamada de manutenção preventiva, dentre outras utilidades.
- c) cidade avançada: uso para controle de energia, iluminação, controle do tráfego e segurança. Atuação com uma infraestrutura de rede que cobre todos os pontos da cidade.
- d) fábrica avançada e Internet Industrial das Coisas: atuação nas indústrias para o controle de produção e rastreabilidade da produção além da digitalização da planta através de CPS.
- e) fazenda avançada: uso para controle da plantação, controle de pestes, mapeamento das áreas com relação a produtividade, e previsão de tempo.
- f) controle avançado de desastres e meio ambiente: uso para controle da qualidade do ar, previsão de desastres naturais como terremotos, enchentes, e fogo em mata.

- g) logística e transporte: possibilidade de monitoração das condições da carga em transporte como temperatura de container refrigerado, abertura de containers, batidas, vibrações, e também as condições do cavalo mecânico como freios, pressão do óleo e dos pneus. É possível mapear as rotas e caminhos utilizados através de sistema global de posicionamento (GPS).

2.1.3 Manufatura Avançada

A manufatura avançada é o resultado da interação de IoT e CPS aplicado no processo produtivo possibilitando a integração vertical, horizontal e engenharia ponta-a-ponta através da digitalização completa e comunicação por meio de internet para que o meio físico seja totalmente representado pelo meio virtual (ACATECH, 2013).

As principais características potenciais da manufatura avançada, e como as mesmas podem aprimorar a sua sustentabilidade, conforme trabalho de Shrouf , Ordieres e Miragliotta (2014) são:

- a) customização em massa: o processo produtivo permite a execução de ordens de produção com baixo volume podendo ser unitário, mantendo a mesma lucratividade que a produção em larga escala.
- b) flexibilidade: processo de produção avançado e autoconfigurável considerando aspectos como tempo, qualidade, preço e sustentabilidade.
- c) visibilidade da fábrica e tomada de decisão otimizada: a internet das coisas permite a transparência de engenharia ponta-a-ponta em tempo real possibilitando a tomada de decisões no tempo certo, otimizando a produção na planta e melhorando a eficiência.
- d) novos métodos de planejamento para a fábrica: uso de modelos digitais que reflitam de modo fiel a realidade da produção e permitam o planejamento abstrato para obter melhor produtividade dos recursos e eficiência do uso de energia.
- e) criação de valor com grande volume de dados (“*big data*”): com o grande volume de dados coletados através dos dispositivos ligados a internet das coisas, é possível fazer uma análise destes dados para aprimorar os conhecimentos sobre a fábrica e permitir a previsão de comportamentos futuros e melhorar o planejamento da produção.
- f) criação de novos serviços: a tecnologia da internet das coisas abre novos meios de criar serviços e valores para os consumidores na pré-venda e no pós-venda.

- g) monitoramento remoto: a tecnologia da internet das coisas possibilita o envolvimento de terceiros no monitoramento, na operação e na manutenção das fábricas com a criação de novos serviços.
- h) automação e mudança do papel do ser humano: a operação da produção pode ser otimizada com um mínimo de intervenção humana melhorando a eficiência e reduzindo os erros e desperdícios de energia e outros recursos.
- i) manutenção proativa: monitoramento da produção e coleta de dados em tempo real permite o conhecimento do comportamento das máquinas permitindo uma ação preventiva.
- j) cadeia de suprimentos conectada: a internet das coisas auxilia as empresas a conhecerem a sua cadeia de suprimentos para possibilitar a entrega em tempo real. Com a informação das máquinas e equipamentos dos fornecedores conectados, a gestão da cadeia de suprimentos tem maior controle sobre o fluxo de materiais.
- k) gestão de energia: a eficiência energética está diretamente ligada ao comportamento de consumo de energia da linha de produção. Sensores avançados de consumo energético provêm informação em tempo real para melhorar a eficiência do uso de energia ajustado a produção.

O termo manufatura avançada deriva do termo em inglês “*smart factory*”. O termo “*smart*” tem sido utilizado em diversas situações como por exemplo “*smartphones*”, “*smart cities*”, “*smart home*”, “*smart grid*”, dentre outros. O termo “*smart factory*” é utilizado por profissionais da indústria e por acadêmicos, mas não há uma definição consistente (RADZIWON *et al.*, 2014). Existem outros termos utilizados indistintamente como “fábrica ubíqua” (“*ubiquitous factory*”), “fábrica das coisas” (“*factory of things*”), “fábrica em tempo real” (“*real time factory*”) ou “fábrica inteligente do futuro” (“*intelligent factory of the future*”). Acadêmicos citam “*smart factory*” como uma tecnologia, uma abordagem ou um paradigma. (RADZIWON *et al.*, 2014).

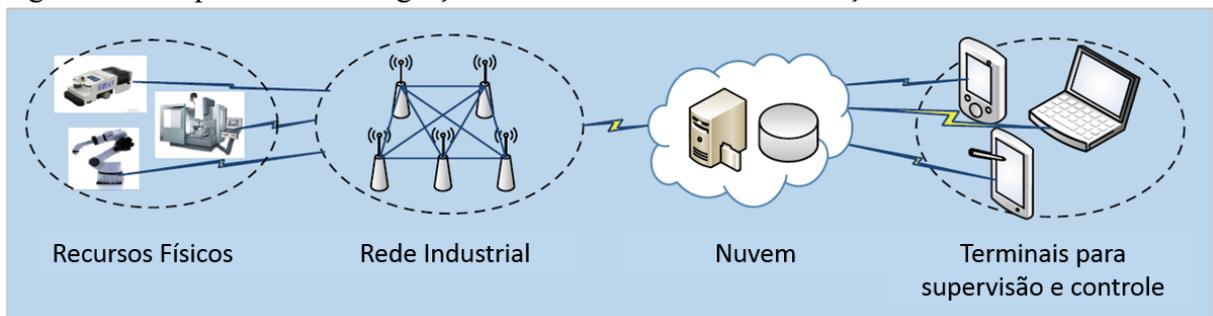
Radziwon et al. (2014) define em seu trabalho com base na análise da literatura sobre a manufatura avançada.

Uma manufatura avançada é uma solução de manufatura que fornece processos de produção flexíveis e adaptáveis que solucionam problemas surgidos em uma unidade de produção com condições limítrofes dinâmicas e em rápida mudança num mundo de crescente complexidade. Esta solução especial poderia, por um lado, estar relacionada com a automação, entendida como uma combinação de *software*, *hardware* e/ou mecânica, o que deveria levar à otimização da produção resultando na redução de mão de obra desnecessária e desperdício de recursos. Por outro lado, pode ser visto numa perspectiva de colaboração entre diferentes parceiros industriais e não industriais, onde a condição avançada provém da formação de uma organização dinâmica (RADZIWON *et al.*, 2014, p. 1187).

A manufatura é a transformação de materiais brutos e semiacabados em produtos acabados. Dentro dos limites da fábrica há o envolvimento no processo produtivo de vários subsistemas físicos e informacionais. Estes subsistemas estão presentes nos diferentes níveis, desde os atuadores e sensores nas máquinas, controle e gestão da produção, até o nível de planejamento. A manufatura avançada supõe a integração vertical dos níveis hierárquicos de subsistemas para transpor da fábrica tradicional para sistema de produção altamente flexível e reconfigurável, ou seja, implementar a fábrica avançada (WANG *et al.*, 2015).

Wang et al. (2015) apresenta a arquitetura de integração vertical (Figura 15) de uma manufatura avançada consistindo de quatro camadas tangíveis denominadas de: camada de recursos físicos, camada de rede industrial, camada de nuvem privada, e camada de terminais de controle e supervisão. Os recursos físicos são implementados como dispositivos avançados que podem se comunicar entre si através da rede industrial. Os sistemas de informação na nuvem computacional privada podem coletar e analisar os dados da camada de recursos físicos e interage com as pessoas através dos terminais.

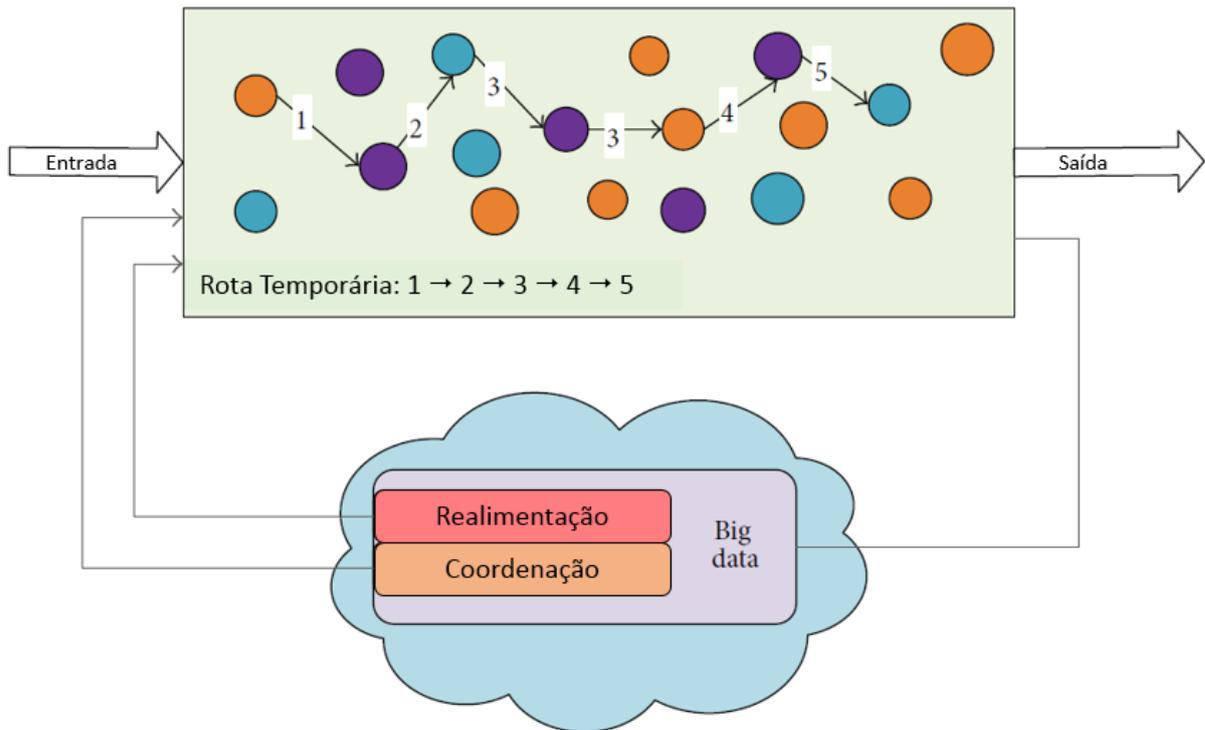
Figura 15 - Arquitetura de integração vertical de manufatura avançada



Fonte: Autor “adaptado de” Wang et al., 2015

A manufatura avançada possui um mecanismo de operação, sob perspectiva de engenharia de controle, que pode ser considerado como sistema de malha fechada, como mostra a Figura 16 (WANG *et al.*, 2015).

Figura 16 - Mecanismo de operação de uma manufatura avançada



Fonte: Autor “adaptado de” Wang et al., 2015

No centro da malha de controle está a rede de artefatos avançados. Os artefatos avançados possuem capacidade de computação, comunicação e controle, e além disso têm autonomia e sociabilidade. Por autonomia entende-se que tomam decisões por si, e nenhuma outra entidade pode controlar diretamente seu comportamento. Por sociabilidade entende-se que segue as regras comuns de negociação a partir dos conhecimentos comuns.

Através da colaboração, os artefatos tentam alinhar seus comportamentos para alcançar o objetivo maior. Porém o desempenho do sistema geralmente não é o ótimo. Isto devido aos artefatos avançados serem míopes e tomarem decisões baseadas nas informações locais. A análise do grande número de dados (“*big data*”) na nuvem computacional privada recebidos de sensores e sistemas de informações dos meios físicos através da rede industrial, baseada na habilidade de potentes computadores, coordena os comportamentos dos artefatos avançados e realiza a realimentação dos indicadores de desempenho global para auto ajuste. (WANG *et al.*, 2015).

Os processos de manufatura tiveram sua evolução acompanhando as demandas geradas pela necessidade de atendimento ao mercado. A demanda crescente de produtos personalizados e a flexibilidade para atendimento de alterações de última hora alavancaram o desenvolvimento de novos métodos de produção como Sistema de Manufatura Flexível, Sistema de Manufatura

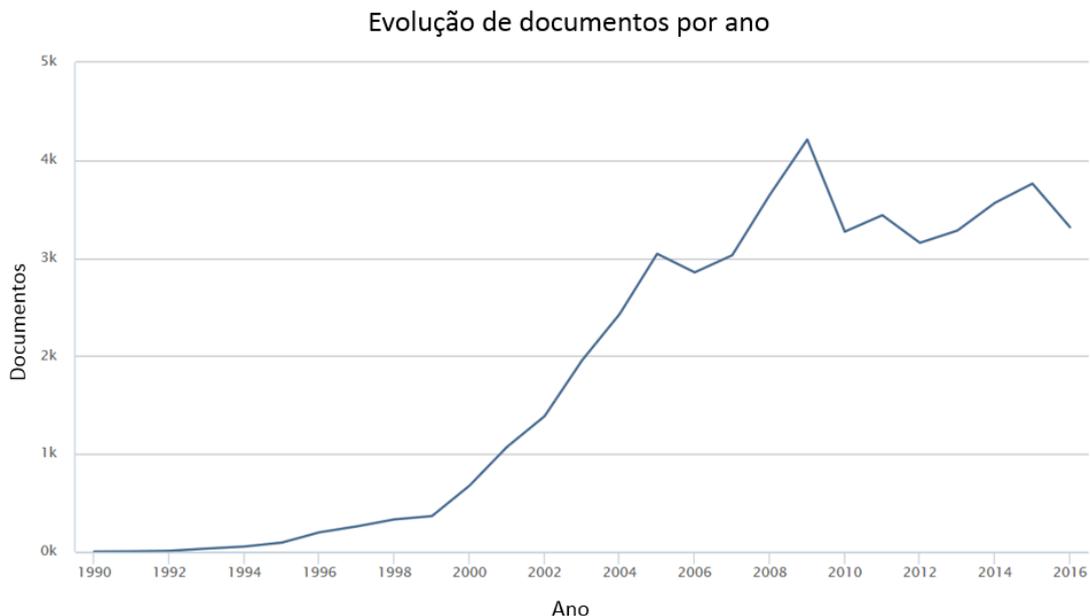
Ágil, Sistema de Manufatura Inteligente, e Sistema de Manufatura Multi-Agente. O conceito de manufatura avançada tem como base o CPS, também denominado como Sistema de Produção Ciber Físico (CPPS). Os sistemas de manufatura flexível e ágil preveem um sistema de controle centralizado enquanto o sistema de manufatura multi agente trata os recursos como agentes inteligentes que negociam entre si para implementar reconfiguração dinâmica para alcançar a flexibilidade desejada. Com a evolução de CPS ganha-se mais instrumentos para viabilização do sistema de manufatura multi agente, que é considerado por diversas pesquisas acadêmicas ser o mais representativo para modelamento da manufatura avançada (WANG *et al.*, 2016).

2.2 SISTEMA MULTI AGENTE (SMA)

A abordagem de sistemas multi agente (SMA) tem sido muito utilizada para a resolução de problemas complexos principalmente no campo das Ciências da Computação. Sistemas multi-agentes constituem-se como uma sub-área dos estudos de Inteligência Artificial Distribuída e que passou a ser um novo paradigma da Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) no início da década de 90. (MONOSTORI; VANCZA; KUMARA, 2006).

A evolução das pesquisas acadêmicas no campo de sistemas multi-agentes tem crescido de modo elevado a partir do ano 2000 com os avanços em TIC, conforme apresenta o gráfico de pesquisa do tema “*multi agent systems*” na base de dados Scopus (2017) (Figura 17).

Figura 17 - Evolução de pesquisa em multi-agente



Fonte: Autor “adaptado de” Scopus, 2017

O termo “agente” não possui uma definição universalmente aceita em função de haver discrepâncias entre o uso diferenciado em uma variedade de aplicações com diferenças de importância para cada domínio de utilização. (WOOLDRIDGE, 2002). A definição apresentada neste trabalho é baseada na definição de Wooldridge (WOOLDRIDGE, 2002, p. 15): “Um agente é um sistema computacional que está situado em algum ambiente, e que é capaz de ação autônoma em seu ambiente para alcançar seus objetivos de projeto”. Transportado o conceito para o sistema de manufatura, um agente consiste em uma entidade que realiza uma tarefa de modo autônomo dentro de um ambiente coexistindo com outros processos (ADEYERI; MPOFU; ADENUGA, 2015).

De modo geral o termo “agente” é utilizado para denotar um sistema de computador com *software* com as seguintes propriedades (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995):

- a) autonomia – os agentes operam sem a interferência direta do ser humano ou outros, e tem um tipo de controle sobre suas ações e estado interno;
- b) habilidade social – agentes interagem com outros agentes por meio de algum tipo de linguagem de comunicação;
- c) reatividade – agentes percebem seu ambiente e reagem em tempo hábil às mudanças que ocorrem nele;
- d) pró-atividade – além de responder ao ambiente, os agentes são capazes de apresentar um comportamento orientado a metas tomando sua própria iniciativa.

Para alguns pesquisadores, mais especificamente ligados a Inteligência Artificial, o termo “agente” possui uma denotação mais forte que a citada acima. Os agentes são considerados sistemas computacionais que, além das propriedades citadas, são conceituados ou implementados usando conceitos que são mais usualmente aplicados a seres humanos, como: conhecimento, crença, intenção, obrigação, e até mesmo emoção. (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995).

Os agentes coexistem em um ambiente com outros agentes e em certas condições podem executar tarefas por si próprios ou, na maior parte das situações, necessitam da cooperação de outros agentes. Sendo o agente uma entidade que possui conhecimento sobre um certo domínio, o agrupamento de vários agentes complementa os conhecimentos de diversos domínios para a resolução de um certo problema. (JUCHEM; BASTOS, 2001).

Os sistemas com múltiplos agentes podem ser distinguidos em duas classes: (JUCHEM; BASTOS, 2001):

- a) sistema distribuído de resolução de problemas: os agentes envolvidos são explicitamente projetados para atingirem um dado objetivo;

- b) sistemas abertos: os agentes não são necessariamente projetados para atingirem um objetivo comum podendo dinamicamente entrar e sair do sistema;

Um SMA é formado por uma rede de agentes computacionais que interagem e comunicam-se entre si. Nenhuma hipótese de sistema fechado pode ser mantida. O sistema multi agente está imerso e interage dentro de seu ambiente, que não é completamente definido (ou difícil de definir) por meios formais. Sempre que novos tipos de interação com o ambiente ocorram, o SMA deve ser aberto e capaz de evoluir. (MONOSTORI; VANCZA; KUMARA, 2006).

O SMA tem aplicabilidade na solução de sistemas abertos, no qual a estrutura do sistema é capaz de, por si própria, alterar-se dinamicamente, solucionar sistemas complexos, e solucionar sistemas computacionais ubíquos. (JENNINGS; WOOLDRIDGE, 1998).

SMA pode ser aplicado em diversas áreas, sendo citados alguns exemplos abaixo: (JENNINGS; WOOLDRIDGE, 1998):

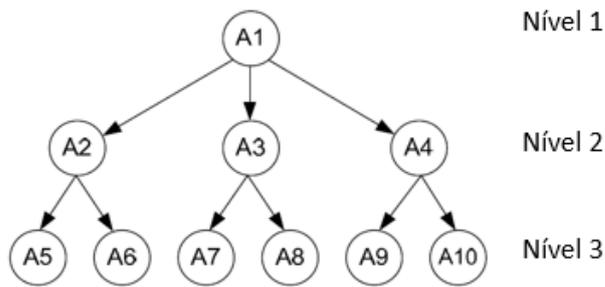
- a) aplicação industrial – controle de processo, sistemas de manufatura, controle de tráfego aéreo;
- b) aplicação comercial – gerenciamento de informação, comércio eletrônico, gestão de negócios;
- c) aplicação médica – monitoração de paciente, assistência médica;
- d) entretenimento – jogos, teatro e cinema interativo;

2.2.1 Classificação de SMA

A classificação de SMA é uma tarefa difícil pois pode ser feita com base em diferentes atributos tais como arquitetura, modo de aprendizagem, comunicação, coordenação e outros. Classificando SMA de acordo com a arquitetura do sistema adotado tem-se os seguintes modelos (BALAJI; SRINIVASAN, 2010):

Organização Hierárquica (Figura 18) – na arquitetura hierárquica os agentes são arranjados em uma típica estrutura em árvore. Os agentes em diferentes níveis na estrutura têm diferentes níveis de autonomia. As informações dos níveis inferiores fluem para os níveis superiores e os sinais de controle ou supervisão fluem de cima para baixo (BALAJI; SRINIVASAN, 2010).

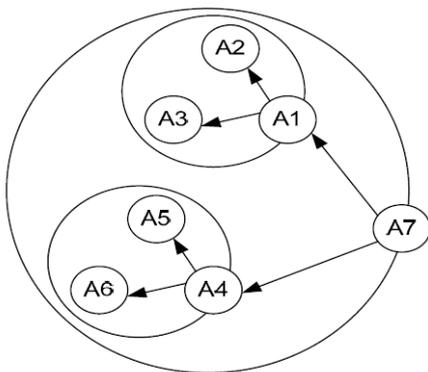
Figura 18 - Arquitetura hierárquica de SMA



Fonte: Autor “adaptado de” Balaji e Srinivasan, 2010

Organização Holônica de Agentes (Figura 19) – um “*Hólon*” é uma estrutura estável e coerente semelhante ou uma estrutura fractal que consiste em vários “*hólons*” como sua subestrutura e é em si uma parte de um quadro maior. O conceito de um *hólon* foi proposto por Arthur Koestler em seu livro “O Fantasma da Máquina” (KOESTLER, 1967) para explicar o comportamento social das espécies biológicas. No entanto, a estrutura hierárquica do *hólon* e suas interações têm sido usada para modelar comportamentos da manufatura e de negócios de grandes empresas. Em um sistema multi-agente holônico, um agente que aparece como uma entidade única pode ser composto de muitos subagentes unidos por compromissos. Os subagentes não estão vinculados por restrições rígidas ou por regras pré-definidas, mas por meio de compromissos. Estes referem-se às relações acordadas por todos os agentes participantes dentro do *hólon*. Cada *hólon* nomeia ou seleciona um Agente Principal que pode se comunicar com o ambiente ou com outros agentes localizados no ambiente. A seleção do agente principal geralmente é baseada na disponibilidade de recursos, na capacidade de comunicação e na arquitetura interna de cada agente (BALAJI; SRINIVASAN, 2010).

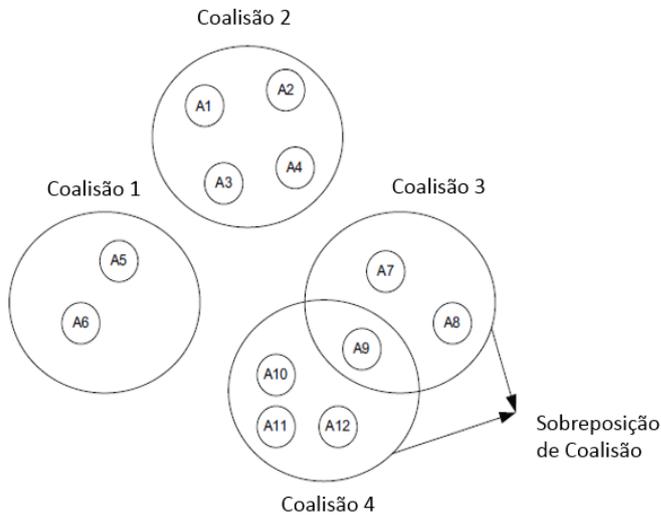
Figura 19 - Arquitetura holônica de SMA



Fonte: Autor “adaptado de” Balaji e Srinivasan, 2010

Coalisção (Figura 20) – na arquitetura de coalisção, um grupo de agentes reúnem-se por período curto de tempo para aumentar a utilidade ou a performance de um agente individual em um grupo. A coalisção deixa de existir quando o objetivo é alcançado (BALAJI; SRINIVASAN, 2010).

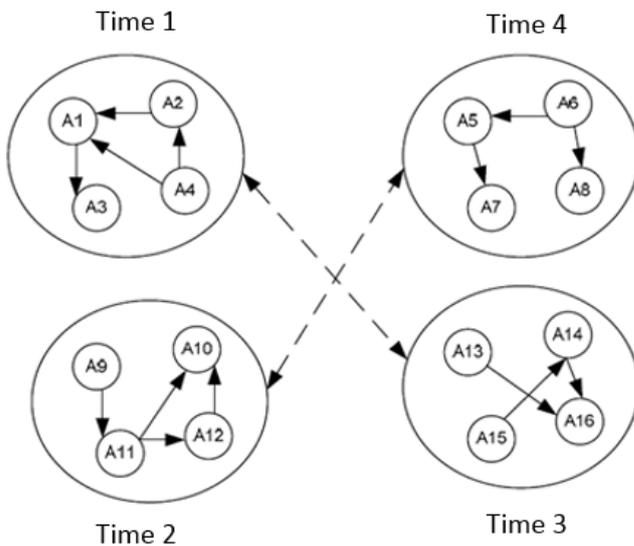
Figura 20 - Arquitetura coalisção de SMA



Fonte: Autor “adaptado de” Balaji e Srinivasan, 2010

Times (Figura 21) – arquitetura baseado em time de SMA é similar a arquitetura de coalisção exceto que os agentes no time trabalham juntos para aumentar o desempenho global do grupo, ao invés de cada um trabalhar individualmente (BALAJI; SRINIVASAN, 2010).

Figura 21 - Arquitetura baseado em time de SMA



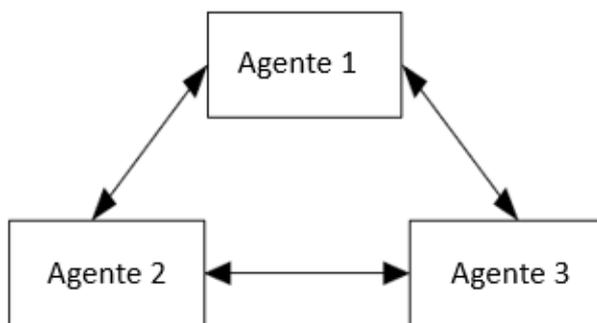
Fonte: Autor “adaptado de” Balaji e Srinivasan, 2010

Outros modelos de arquitetura, além destes citados, podem ser encontrados na literatura como federações, sociedades e congregações (BALAJI; SRINIVASAN, 2010).

2.2.2 Comunicação de SMA

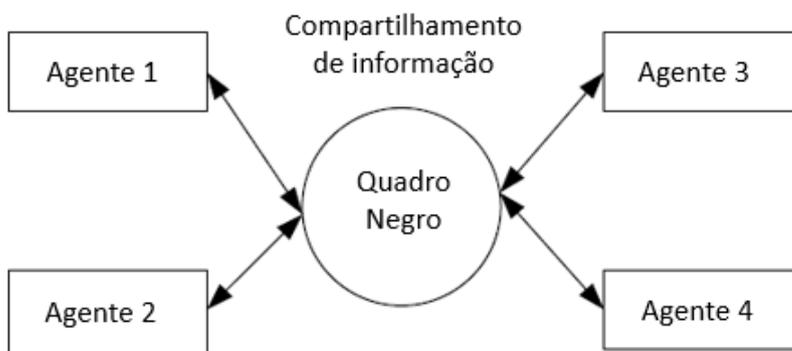
A comunicação também é um dos componentes cruciais em sistemas multi agente que necessita de considerável atenção. Uma comunicação desnecessária ou redundante entre agentes pode aumentar o custo e causar instabilidade. A comunicação em um sistema multi agente, baseada na arquitetura do sistema de agente e no tipo de informação que deve ser comunicado entre os agentes, pode ser classificada em dois tipos. Pode ser classificada como comunicação local ou passagem de mensagens (Figura 22), e comunicação em rede ou “quadro negro” (Figura 23) (BALAJI; SRINIVASAN, 2010).

Figura 22 - Comunicação local de SMA



Fonte: Autor “adaptado de” Balaji e Srinivasan, 2010

Figura 23 - Comunicação em rede de SMA



Fonte: Autor “adaptado de” Balaji e Srinivasan, 2010

2.2.3 Tomada de Decisão em SMA

A tomada de decisão no sistema multi agente é diferente de um simples sistema de decisão de agente único. A incerteza associada aos efeitos de uma ação específica sobre o meio ambiente e a variação dinâmica no meio ambiente como resultado da ação de outros agentes torna a tomada de decisão multi agente uma tarefa difícil. Geralmente, a tomada de decisão no SMA é considerada como uma metodologia para encontrar uma ação conjunta ou o ponto de equilíbrio que maximiza a recompensa recebida por cada agente que participa no processo de tomada de decisão. A tomada de decisão no SMA pode ser tipicamente modelada como um método teórico de jogo. Jogo estratégico é a forma mais simples de processo de tomada de decisão. Aqui cada agente escolhe suas ações no início do jogo e a execução simultânea da ação escolhida por todos os agentes (BALAJI; SRINIVASAN, 2010).

2.2.4 Coordenação em SMA

A coordenação é a questão central na concepção de sistemas multi agentes. Os agentes raramente são sistemas isolados e geralmente envolvem mais de um agente trabalhando em paralelo para alcançar um objetivo comum. Quando vários agentes são empregados para atingir uma meta, há uma necessidade de coordenar ou sincronizar as ações para garantir a estabilidade do sistema. A coordenação entre agentes aumenta as chances de alcançar uma solução global ideal (BALAJI; SRINIVASAN, 2010).

2.2.5 Aprendizado em SMA

A aprendizagem de um agente pode ser definida como construindo ou modificando a estrutura de crenças baseada na base de conhecimento, informações disponíveis de entrada e nas conseqüências ou ações necessárias para atingir a meta local. Com base nesta definição, a aprendizagem do agente pode ser classificada em três tipos (BALAJI; SRINIVASAN, 2010):

- a) aprendizagem ativa
- b) aprendizagem reativa
- c) aprendizagem baseada na consequência

Na aprendizagem ativa e reativa, a atualização da crença do agente com a estratégia de ação ótima, tem a preferência de seleção como sendo o melhor modelo de crença com a maior probabilidade de seleção apropriada da ação (BALAJI; SRINIVASAN, 2010).

2.2.6 Sistemas Multi Agente aplicados na Manufatura

Dentro da área industrial, SMA têm sido usados para o modelamento de diversos arranjos de processo de manufatura. Os processos de manufatura multi agente caracterizam-se por serem sistemas compostos por entidades autônomas que se interagem dentro de um ambiente. A tecnologia de multi agentes é amplamente utilizada no processo de fabricação, na integração de sistemas, no sistema de controle, planejamento de produção, desenvolvimento de negócios, entre outras aplicações. (ADEYERI; MPOFU; ADENUGA, 2015).

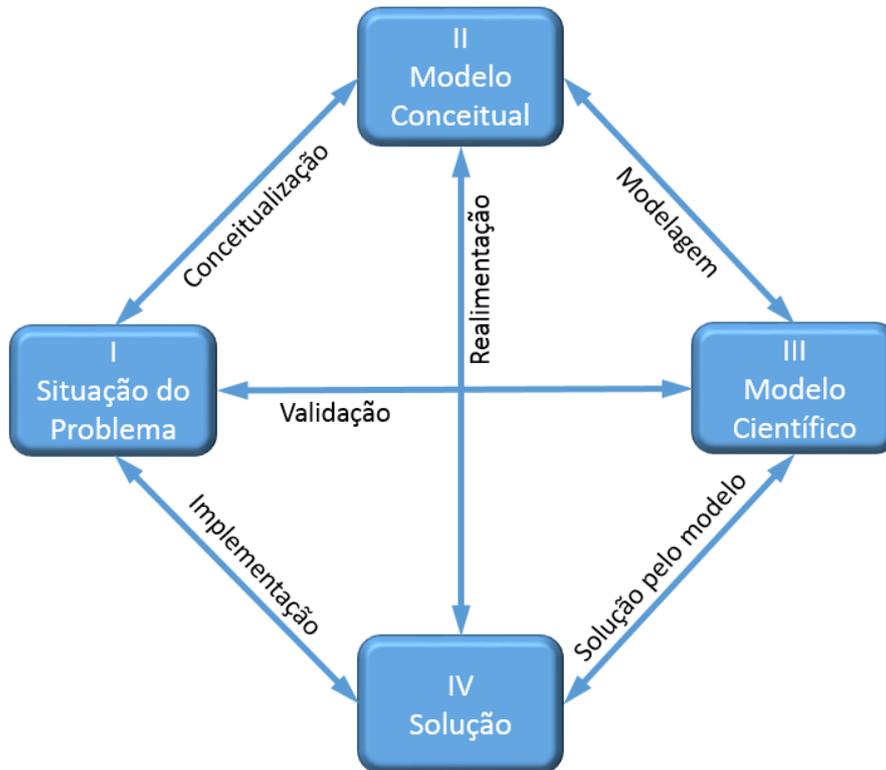
Vrba et al. (2011) aborda arquitetura de controle de CLP da *Rockwell Automation* baseado no sistema de controle holônico e multi agente. Leitão, Mařík e Vrba (2013) fazem uma análise sobre passado, presente e futuro da aplicação industrial de agentes para sistemas de controle industriais. Em seu trabalho mais recente, Leitão et al. (2016) apresenta a utilização de agentes em sistemas ciber físicos para controle e automação e cita casos reais de utilização de agentes em produção avançada, em rede de energia avançada e em logística avançada. Metzger e Polaków. (2011) em sua pesquisa apresenta a utilização de sistemas multi agente na solução de automação de processos contínuos. Shpilevoy et al. (2013) aplica SMA para o modelamento do planejamento de produção de manufatura de motores de aeronaves e os agentes são definidos como as ordens de produção, organização, máquinas, montadores, produto e operação. Adeyeri, Mpofu e Adenuga (2015) apresentam em seu trabalho uma revisão literária de artigos de 2003 a 2014 de uso de agentes na manufatura especificamente em sistemas de manufatura reconfigurável. Os autores propõem um modelo estruturado de agentes para sistema de manufatura reconfigurável.

2.3 MODELAGEM DE SISTEMA DE MANUFATURA

A modelagem e simulação de um sistema produtivo de manufatura consiste no processo de reproduzir e experimentar o sistema físico em um modelo matemático computadorizado. Os principais propósitos de utilização deste método em projeto de pesquisa consistem em: conhecer detalhadamente a forma de operação do sistema, desenvolver políticas operacionais e recursos para aperfeiçoamento do desempenho do sistema, testar novos conceitos e sistemas antes de sua implantação, e obter informações sem interferir no sistema atual. (MARTINS; MELLO; TURRIONI, 2014).

Martins, Mello e Turrioni (2014) apresenta o modelo genérico de Mitroff (MITROFF *et al.*, 1974) (Figura 24) a ser aplicado como metodologia de pesquisa, no qual o processo segue quatro etapas: conceitualização, modelagem, solução do modelo e implantação.

Figura 24 - Modelo de Mitroff de processo de pesquisa



Fonte: Autor “adaptado de” Mitroff et al., 1974

A primeira etapa é de declaração clara da situação do problema a ser resolvido. O problema deve abranger um sistema existente ou um entendimento sobre um sistema proposto. A próxima etapa passa a conceitualizar especificamente o modelo de simulação definindo os objetivos, as entradas, as saídas, o conteúdo, suposições e simplificações formando o modelo conceitual. Na etapa de modelagem o modelo conceitual é convertido para um modelo científico, ou seja, passa para um modelo computacional, que pode ser programado em um *software* de simulação ou em uma linguagem de programação. Uma vez desenvolvido o modelo, passa a simular experimentações para analisar e validar com a situação do problema e, com o modelo validado, busca-se as soluções no modelo através de experimentações de suposições para buscar os resultados possíveis realimentando o modelo conceitual. Fechando o ciclo, passa-se à implementação do modelo e seus resultados no mundo real resolvendo o problema (MARTINS; MELLO; TURRIONI, 2014).

2.3.1 Modelagem e Simulação de Eventos Discretos

A simulação computacional tem sido utilizada em diversos campos de aplicação como na saúde, em *marketing*, na logística, estratégia militar, dentre outros, e tem tido uma importância significativa na avaliação de desempenho de sistemas de manufatura. A Simulação de Eventos Discretos (SED) é uma das técnicas mais utilizadas para analisar e entender a dinâmica de sistemas de manufatura (NEGAHBAN; SMITH, 2014).

Existem duas características chaves que caracterizam os sistemas de eventos discretos: A primeira característica é que a sua dinâmica é impulsionada pelos eventos e não pelo tempo, ou seja, o comportamento de sistemas de eventos discretos é governado somente pela ocorrência de diferentes tipos de eventos no tempo ao invés dos tiques do relógio. O tempo entre os eventos não afeta o comportamento do sistema. A segunda característica é que ao menos algumas das variáveis naturais requeridas para descrever o sistema são discretas. Por exemplo o acionamento de um botão, uma falha, estado de um recurso ou a quantidade de um contador (CASSANDRAS; LAFORTUNE; OLSDER, 1995).

Negahban e Smith (2014) em seu trabalho apresentam uma revisão literária de publicações sobre a aplicação de simulação de eventos discretos nos sistemas de manufatura. A pesquisa abrange publicações entre 2002 a 2013 totalizando 290 artigos. O autor classifica os trabalhos em três classes: projeto de sistema de manufatura, operação do sistema de manufatura, e desenvolvimento de linguagem/pacote de simulação. Também categoriza em onze sub-classes com base na área de aplicação. A análise dos artigos revelou algumas tendências na pesquisa:

- a) importante constatação de aumento significativo no número total de publicações indicando uma tendência crescente na aplicação de simulação para solução de diferentes problemas na manufatura.
- b) os resultados demonstram a simulação utilizada principalmente em problemas de projeto de longo prazo onde o tempo utilizado para o seu desenvolvimento computacional não desempenha um papel substancial no prazo final. Houve um deslocamento de aplicações da simulação de projeto para simulação operacional.
- c) a partir do ano de 2002 observa-se uma retomada lenta, mas crescente tendência de aplicações de simulação em projetos de sistemas de manufatura principalmente ligada a sistemas de manufatura flexível e sistema de manufatura celular.

- d) nos anos mais recentes há um crescente interesse na classe de desenvolvimento de linguagem/pacote de simulação. Uma das razões seria o aumento de interesse em simulação por meta-modelagem e otimização.

2.3.2 Modelagem e Simulação Baseada em Agentes

A modelagem e simulação baseada em agentes consiste em modelo computacional para modelamento de sistemas complexos que podem ser representados por agentes autônomas e sua interação. A modelagem baseada em agentes é utilizada para diversas áreas de atuação. Podem ser utilizadas para a simulação de comportamento de *marketing*, na economia, na cadeia de suprimentos, difusão de epidemias e diversos sistemas de comportamento humano (MACAL; NORTH, 2010, 2014).

Segundo Macal e North (2010) uma típica estrutura de um modelo baseado em agentes possui três elementos:

- a) um grupo de agentes, seus atributos e comportamentos;
- b) um conjunto de relações entre agentes e métodos de interação;
- c) o ambiente dos agentes. Os agentes interagem com seu ambiente e outros agentes.

Um agente (Figura 25) possui certas propriedades e atributos listados a seguir (MACAL; NORTH, 2010):

- a) autonomia: um agente é autônomo e auto direcionado. Um agente pode funcionar independentemente em seu ambiente e em suas interações com outros agentes;
- b) modularidade: agentes são modulares e independentes. Um agente é uma entidade discreta identificável com um conjunto de características ou atributos, comportamentos, e capacidade de tomada de decisão. A modularidade implica que o agente tem uma fronteira e pode facilmente determinar se algo é parte de um agente ou não, ou se é uma característica compartilhada entres agentes;
- c) sociabilidade: um agente é social interagindo com outros agentes;
- d) condicionalidade: um agente tem um estado que varia com o tempo. Assim como um sistema tem um estado consistindo de uma coletânea de suas variáveis de estado, um agente também tem um estado que representa sua condição, definido pelas variáveis associadas à sua situação corrente. O estado do agente consiste de um conjunto de atributos e seus comportamentos. O estado de um modelo baseado em agentes é a somatória dos estados de todos os agentes juntamente com o estado do ambiente.

Figura 25 - Modelo típico de agente



Fonte: Autor “adaptado de” Macal e North, 2014

Weimer, Miller e Hill (2016) define que a modelagem baseada em agentes é uma simulação, utilizando primariamente a programação de eventos discretos, no qual as entidades da simulação têm maior grau de autonomia de movimento e tomada de decisão do que normalmente encontrados em modelos de simulação.

Todo esforço para modelagem e simulação requer abstrair o sistema ou processo do mundo real em uma forma conceitual e então em uma forma executável. A modelagem baseada em agentes requer um diferente processo de abstração focado nos objetivos e decisões das entidades autônomas distribuídas no sistema. Não necessariamente irá realizar um fluxo das entidades através do sistema (comum na simulação de eventos discretos). E as entidades dentro da modelagem baseada em agentes possuem algum nível de inteligência interna (WEIMER; MILLER; HILL, 2016).

Weimer, Miller e Hill (2016) compila diversos trabalhos e define algumas condições para o uso de modelagem baseada em agentes:

- a) o sistema ou processo é representável por agentes distribuídos e interagindo;
- b) as decisões requeridas e as regras de como a entidade tomará estas decisões estão bem definidas;

- c) o comportamento do agente é um foco de estudo e como estes comportamentos podem direcionar o comportamento a nível de sistema;
- d) a adaptação no sistema pelas entidades dentro do sistema são foco do trabalho;
- e) quando adaptações por entidades podem afetar outras entidades alterando assim a natureza do sistema em estudo é um aspecto de interesse do estudo.

Macal e North (2010) apresentam uma metodologia para o modelamento baseado em agente. Primeiramente deve-se responder a uma série de questões que levam ao desenho do modelo inicial. São questões sobre o problema a ser resolvido, definição dos agentes do modelo, seu comportamento, seu ambiente, a interação entre os agentes, sobre as entradas e saídas do sistema, como validar o modelo, e todas as questões para fechar os três elementos do sistema baseado em agentes. Após respondidas as questões pode-se montar o modelo em *softwares* específicos de modelagem ou programar em linguagem de programação.

A modelagem e simulação baseada em agentes, até início dos anos 2000, era conhecido e utilizado preponderantemente na área acadêmica (BORSHCHEV, 2013). A adoção da metodologia por profissionais iniciou-se por volta do ano de 2002 motivado por:

- a) desejo de obter uma visão aprofundada de sistemas que não são bem capturadas por abordagens tradicionais;
- b) avanços na tecnologia de modelagem proveniente da ciência da computação, com a modelagem orientada a objetos, linguagem de modelagem unificada e diagramas de estado;
- c) crescimento acelerado da disponibilidade de computadores com maior potência e memória. Os modelos baseados em agentes demandam mais nestes quesitos em comparação com modelos de eventos discretos.

O diagrama de estados é uma construção visual que permite definir o comportamento orientado por evento ou tempo de vários objetos. São úteis nos modelos de simulação e muito utilizados em modelos baseados em agentes. Diagrama de estados consiste em estados e transições. Um estado pode ser considerado como um "histórico concentrado" do objeto e também como um conjunto de reações a eventos externos que determinam o futuro do objeto. As reações em um estado são definidas por transições de saída desse estado. Cada transição possui um gatilho, como a chegada de uma mensagem, uma condição ou um limite de tempo (BORSHCHEV, 2013).

3 MODELAGEM DOS MODELOS DE MANUFATURA

O conceito de Manufatura Avançada traz a digitalização como principal aspecto tecnológico. A digitalização é o resultado da aplicação de CPS, de IoT e de computação na nuvem permitindo que toda a fábrica seja representada em tempo real no ambiente digital (ACATECH, 2013).

Um dos principais questionamentos sobre a manufatura avançada reside em determinar o impacto da digitalização na fábrica quanto aos benefícios que podem ser obtidos relacionados a produtividade e outros índices mensuráveis da produção.

Para esta análise é realizado um comparativo entre dois modelos de produção, o primeiro modelo um sistema de manufatura convencional e o segundo modelo um sistema de manufatura avançada. A metodologia adotada neste trabalho para classificar os resultados derivados de implantação da manufatura avançada, é a modelagem e simulação de uma área fabril de uma fábrica convencional e em seguida, a modelagem e simulação da mesma área acrescida de alguns conceitos de manufatura avançada. A partir dos resultados de índices de produtividade pode-se observar os benefícios gerados pela implantação.

Siebers et al. (2010) apresenta um comparativo entre simulação a eventos discretos e simulação baseado em agentes em um painel de debates sobre os simuladores em pesquisa operacional. Os atributos que definem o modelo de eventos discretos são: a orientação ao processo, abordagem de cima para baixo, controle centralizado e fluxo da entidade ao longo do processo. Em contrapartida os atributos que definem o modelo baseado em agentes são: a orientação ao indivíduo, abordagem de baixo para cima, controle descentralizado e não utilização do conceito de fluxo. Esta abordagem define de modo claro que para modelagem onde há uma orientação a aspectos particulares de indivíduo, a simulação baseada em agentes torna-se mais adequada para representação do processo.

Borshchev e Filippov (2004) entendem que os métodos de simulação têm cada qual as suas vantagens e desvantagens e o melhor método é a conjunção de diversos métodos para a resolução dos problemas, como a utilização do método de agentes representando os indivíduos e o método de eventos discretos para representar o fluxo do processo, montados sobre a mesma plataforma. Silva, Santos e Miyagi (2015) elabora o modelamento de um sistema de controle da Indústria 4.0 utilizando modelo baseado em agente na arquitetura holônica, redes de Petri e arquitetura orientada a objetos.

Sauter, Bode e Kittelberger (2015) apresenta relatório sobre o impacto da manufatura avançada na criação de valor nas empresas de manufatura. Na pesquisa os potenciais benefícios

podem ser classificados em quatro dimensões: redução de custo, flexibilidade, estabilidade e garantia de qualidade, e aumento do volume de negócios. O principal vetor das aplicações é a redução de custos e três quartos das aplicações buscam, direta ou indiretamente, esta dimensão. A segunda dimensão é a flexibilidade, procurando a resiliência da fábrica para reagir rapidamente a flutuações de mercado e satisfazer o consumidor com lotes individualizados. Os autores observaram as principais funções no processo produtivo que são foco da manufatura avançada para a criação de valor: quase 90% dos casos impactam direta ou indiretamente na preparação do trabalho e na produção. Também são citadas a manutenção e a logística.

Baseado nesta análise de criação de valor, para se obter resultados significativos da modelagem e simulação dos processos de manufatura avançada, deve-se inserir na modelagem, além do processo produtivo, as operações de manutenção, preparação das operações, planejamento de operação, e controle de qualidade.

3.1 ESTRUTURA DO MODELO DE MANUFATURA

O cenário de sistema fabril definido para a modelagem consiste em um processo comumente utilizado em empresas metalúrgicas fabricantes de subconjuntos soldados para o setor automotivo. O setor metalúrgico relacionado ao setor automotivo é uma das vertentes das indústrias de transformação que vem diminuindo a cada ano a sua participação na economia brasileira (FIESP DEPECON, 2016), além disso, as indústrias brasileiras enfrentam um alto grau de endividamento e sucateamento do seu parque fabril (FIESP-DECOMTEC, 2016), o que torna necessário uma revisão urgente dos processos de produção.

Para a modelagem do processo produtivo adotou-se uma estrutura fictícia de produção não relacionada a qualquer empresa em específico. O modelo de produção e os dados inseridos são baseados na experiência do autor em atuação nos processos de produção similares no setor automotivo.

O processo convencional de fabricação de subconjunto soldado é constituído de máquinas e equipamentos de produção, e armazenamento que farão parte do fluxo produtivo desde o recebimento das matérias primas até a expedição final. A estrutura típica de fluxo de produção é representada na Figura 26, e é dividida nas seguintes áreas de produção:

- a) recebimento de materiais;
- b) corte de bobinas de aço;
- c) estamparia para corte e conformação de peças do subconjunto;
- d) solda das peças para formação do subconjunto;

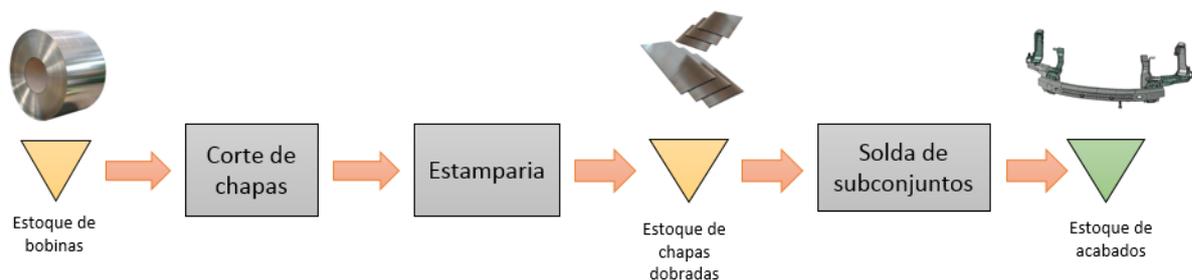
- e) controle de qualidade;
- f) embalagem e armazenamento de produto acabado;

A área de recebimento de materiais faz o armazenamento de matéria prima básica como bobinas de aço e placas de aço, e também de acessórios como parafusos, insumos de solda, outros itens que deverão compor o subconjunto.

A área de corte refere-se aos maquinários de corte das bobinas de aço em placas de aço ou na divisão da bobina recebida da usina de aço em bobinas com tiras menores para alimentação de prensas.

A área de estamparia realiza o corte e a conformação das placas de aço e das tiras de aço em bobinas formando as peças estampadas que formam o subconjunto.

Figura 26 - Fluxo de fabricação de subconjunto soldado



Fonte: autor

A área de solda agrupa as peças estampadas formando o subconjunto soldado. As peças estampadas são agrupadas sobre dispositivos de fixação para que seja executada a solda das peças através de robôs de solda. A qualidade do produto é verificada através de gabaritos que são utilizados para verificação de amostras. Ao final o produto acabado é embalado e armazenado na expedição para ser enviado para a montadora contratante.

Além das áreas de produção, existem as áreas de armazenamento intermediário para o balanceamento da produção, armazenamento de peças estampadas, e armazenamento de produto acabado.

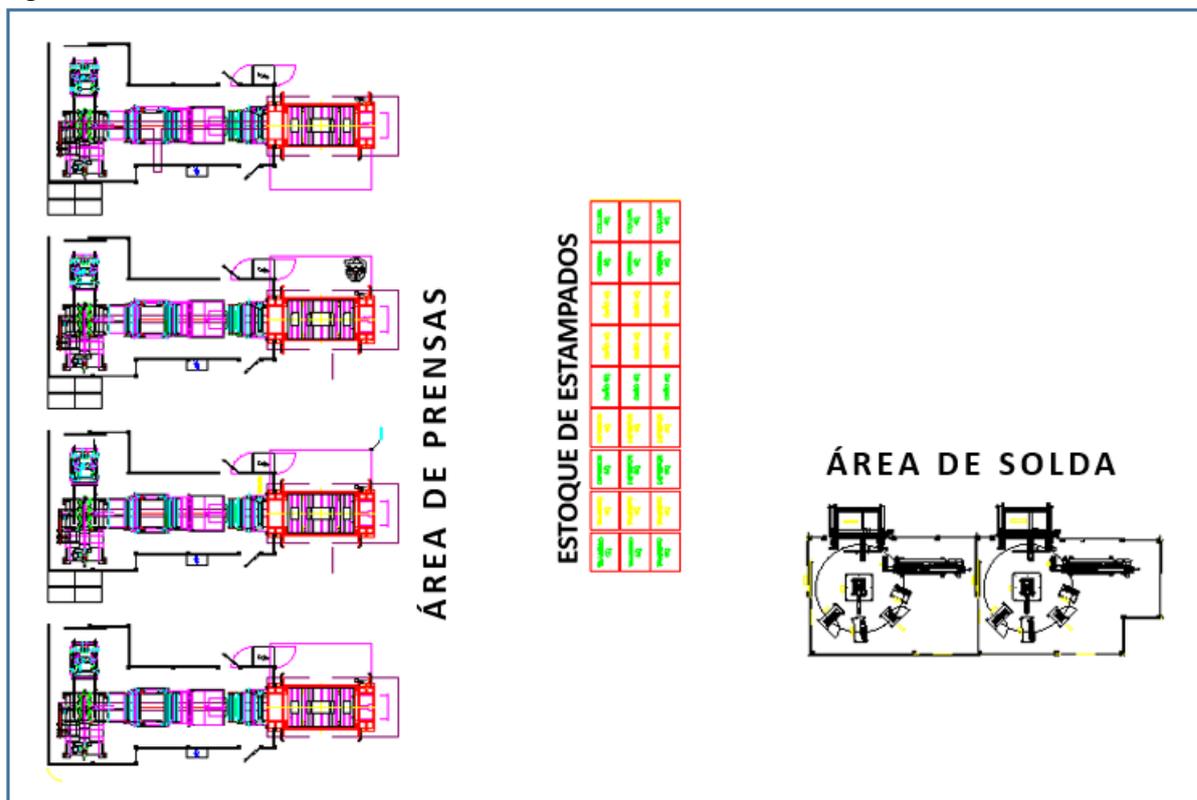
Dentre as áreas citadas, a estamparia e a solda são as principais áreas com maior complexidade de operação. Na área de estamparia há necessidade de troca de ferramenta para cada lote de peças produzidas e na área de solda há uma verificação constante da qualidade da solda e dimensional do conjunto.

Neste trabalho define-se um modelo fabril fictício para a representação destas áreas críticas. O modelo da área de estamparia é formado por um grupo de quatro prensas que fazem

o corte e repuxo da chapa de aço para a formação das peças. O modelo da área de solda é formado por duas células robotizadas para formar o subconjunto soldado a partir das peças estampadas. A Figura 27 ilustra uma planta fictícia sugestiva do processo fabril com as prensas e células de solda. No modelo são considerados que cada subconjunto será composto de oito tipos de peças estampadas. As prensas podem estampar qualquer uma das peças utilizando o ferramental correspondente. As células de solda são independentes e soldam o subconjunto por completo.

O processo produtivo na estamparia tem o suporte da equipe de ferramentaria para a preparação do ferramental na prensa e ajustes durante a produção. Todas as áreas têm o suporte da equipe de manutenção para o reparo das máquinas e das células de solda e para a manutenção preventiva.

Figura 27 - Planta baixa de uma área fabril



Fonte: autor

3.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS

A manufatura convencional pode ser modelada e simulada pelo método de simulação de eventos discretos pela característica de sequenciamento das operações de manufatura e a

sincronização por eventos. O modelo foi inserido no *software* de simulação *Plant Simulation* da empresa *Siemens* onde são representadas as áreas de produção conforme o fluxo de operações. O diagrama de operações é apresentado na Figura 28. O modelamento de eventos discretos é orientado a processo e se detalha a movimentação do material produtivo ao longo do processo de manufatura sob uma abordagem sistêmica desde a geração da ordem de produção até a saída do produto acabado.

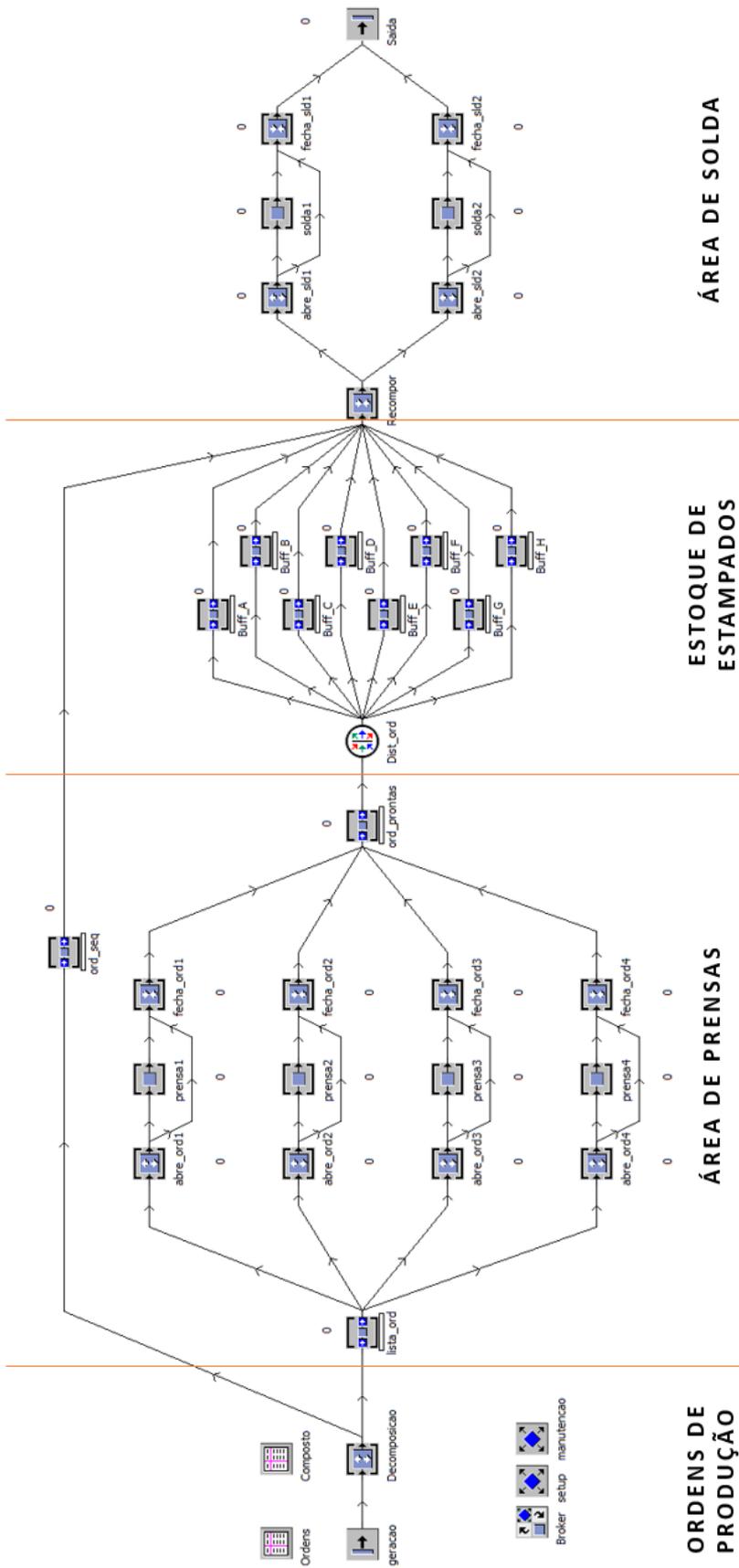
O modelo criado possui um fluxo de operação que segue o fluxo de movimentação das peças no processo produtivo. São consideradas quatro etapas no fluxo para a produção dos conjuntos soldados, sendo definidas como:

- a) geração das ordens de produção;
- b) estampagem das partes componentes do subconjunto;
- c) estocagem de estampados;
- d) solda dos subconjuntos.

3.2.1 Geração das Ordens de Produção

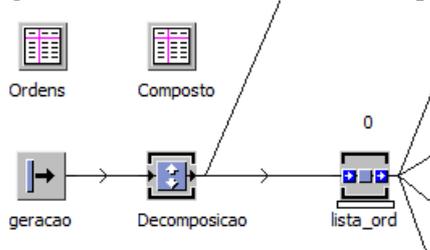
As ordens de produção são geradas no início do fluxo a partir de uma tabela fixa de sequência de ordens a serem inseridas no processo. A tabela permite que diferentes tamanhos de lotes de produção possam ser alinhados na sequência de ordens, porém, para que se possa ter dados estatísticos controlados para comparação entre os modelos, adota-se manter constante o tamanho do lote das ordens de produção e o tipo de produto a ser manufaturado. A Figura 29 detalha as funções desta etapa. O módulo “geracao” gera as ordens baseada na planilha “Ordens”. O módulo “Decomposicao” decompõe a ordem em uma série de ordens menores de produção das peças que compõem um conjunto. Este desmembramento obedece a planilha “Composto” e é definido como composto um conjunto soldado. O Quadro 2 apresenta o tamanho do lote da ordem de produção a ser produzido de modo cíclico inserido na planilha “Ordens”, e o Quadro 3 apresenta a composição de peças de um produto inserido na planilha “Composto”. No modelo simulado uma ordem de produção é decomposta em oito ordens de produção referentes a produção das peças que compõem o produto. As ordens de produção de peças são armazenadas na lista “lista_ord” que corresponde a uma fila de ordens que são consumidas pelas prensas.

Figura 28 - Diagrama de Simulação de Eventos Discretos



Fonte: autor

Figura 29 - Geração de ordem de produção



Fonte: autor

Quadro 2 - Quantidade a ser produzida em cada ordem de produção

Ordem de Produção	Quantidade
Conjunto Soldado	500

Fonte: autor

Quadro 3 - Composição de peças de um produto

Tipos de Peças	Composição
Componente estampado tipo 1	1
Componente estampado tipo 2	2
Componente estampado tipo 3	1
Componente estampado tipo 4	1
Componente estampado tipo 5	2
Componente estampado tipo 6	3
Componente estampado tipo 7	2
Componente estampado tipo 8	1

Fonte: autor

3.2.2 Estampagem das partes componentes do subconjunto

As ordens de produção de peças a serem estampadas são distribuídas sequencialmente para as prensas em operação. Cada prensa recebe uma ordem como um pacote que é aberto para execução da operação de estampagem de cada peça. A Figura 30 detalha as operações no modelo da área de prensas.

Figura 30 - Modelagem da área de prensas



Fonte: autor

As ordens armazenadas na fila “lista_ord” são consumidas sequencialmente pelas quatro prensas conforme a liberação das mesmas. Cada ordem é aberta no módulo “abre_ord” na entrada de cada operação de prensa. O módulo “abre_ord” recebe uma ordem da fila “lista_ord” e gera peças na quantidade definida pelo lote de produção da peça a ser estampada. O módulo “prensa” executa a operação de estampo em cada peça conforme os parâmetros apresentados no Quadro 4. O módulo de fechamento da ordem de produção “fecha_ord” aguarda o término de execução de estampo de todas as peças que compõem a ordem para encerrar a ordem e passar a ordem para a fila de ordens prontas “ord_prontas”.

Quadro 4 - Parâmetros de operação da prensa

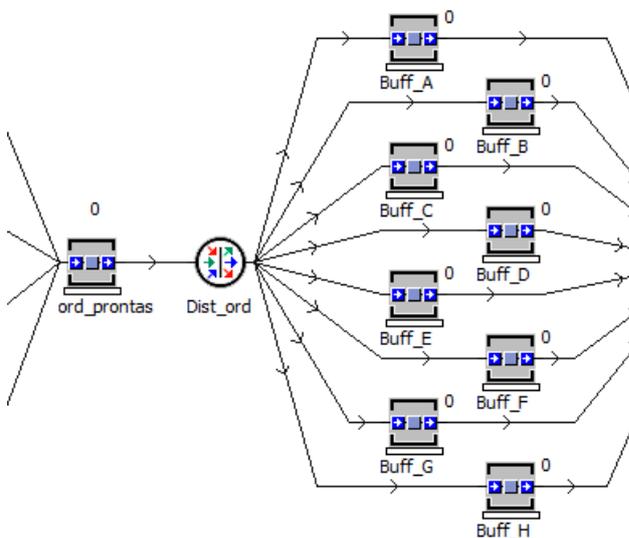
Parâmetro	Valor
Tempo de processamento de 1 peça	15 segundos
Tempo de preparação total (<i>setup</i>) de troca de ferramenta da prensa	90 minutos
Taxa de falhas da prensa	15 falhas/mês
MTBF (tempo médio entre falhas) da prensa	2 dias
Tempo de reparo da falha (MTTR – tempo médio de reparo)	30 minutos
Prazo de execução de manutenção preventiva	120 dias
Tempo de execução da manutenção preventiva	1 dia

Fonte: autor

3.2.3 Estocagem de estampados

As peças estampadas nas prensas são armazenadas na área de estoque de estampados separadamente por tipo de peça estampada. A Figura 31 detalha os módulos do modelo do estoque de estampados. A fila de ordens prontas em “ord_prontas” é distribuída em filas de ordens específicas de cada tipo de peça estampada pelo módulo “Dist_ord” para as filas “Buff_A” ao “Buff_H”.

Figura 31 – Modelagem do estoque de estampados



Fonte: autor

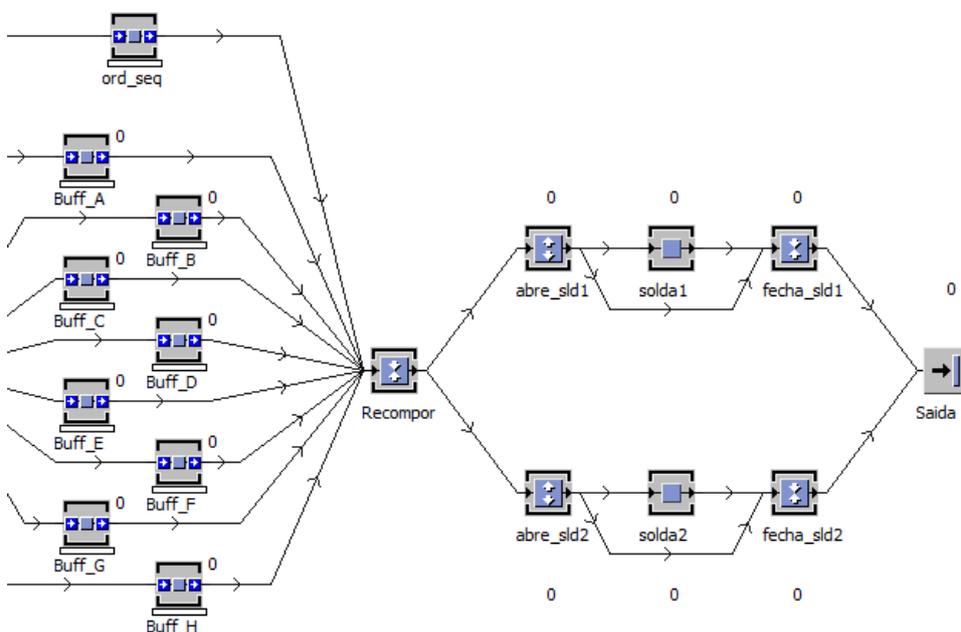
3.2.4 Solda dos subconjuntos

As ordens de produção seguem o fluxo após a operação da prensa. A ordem de produção aguarda que haja no estoque de estampados ao menos um lote de cada peça componente do produto para recomposição da ordem. Cada célula de solda recebe uma ordem como um pacote que é aberto para execução da operação de solda em cada peça.

A Figura 32 detalha os módulos da modelagem da área de solda. O módulo “Recompor” recompõe a ordem de produção principal decomposta no módulo “Decomposicao” no início da geração das ordens de produção. O módulo aguarda que haja ao menos um item nos módulos “ord_seq” e “Buff_A”, “Buff_B”, “Buff_C”, “Buff_D”, “Buff_E”, “Buff_F”, “Buff_G” e “Buff_H”. A ordem recomposta é distribuída entre as duas células de solda.

As ordens recompostas em “Recompor” são consumidas sequencialmente pelas duas células de solda conforme a liberação das mesmas. Cada ordem é aberta no módulo “abre_sld” na entrada de cada operação de solda. O módulo “abre_sld” recebe uma ordem de “Recompor” e gera peças na quantidade definida pelo lote de produção de conjuntos a serem produzidos. O módulo “solda” executa a operação de solda do conjunto conforme os parâmetros apresentados no Quadro 5. O módulo de fechamento da ordem de produção “fecha_sld” aguarda o término de execução de solda de todos os conjuntos que compõem a ordem para encerrar a ordem e, posteriormente, enviá-la para o final do processo na “saída”.

Figura 32 - Modelagem da área de solda



Fonte: autor

Quadro 5 - Parâmetros de operação da célula de solda

Parâmetro	Valor
Tempo de processamento de 1 conjunto	2 minutos
Taxa de falhas / ajustes da célula de solda	6 intervenções / dia
Tempo de correção falhas/desvios para retorno da produção	30 minutos
Prazo de execução de manutenção preventiva	120 dias
Tempo de execução da manutenção preventiva	1 dia

Fonte: autor

3.3 MODELAGEM BASEADA EM AGENTES

A manufatura convencional e a manufatura avançada podem ser modeladas pelo método de modelagem baseada em agentes. Neste capítulo define-se a estrutura dos agentes que compõem o modelo de manufatura convencional e as alterações no modelo para representar a manufatura avançada. O modelamento baseado em agentes é orientado ao indivíduo, ou ao agente, definindo seu comportamento individual em reação aos eventos gerados pelo ambiente de operação.

3.3.1 Estruturação dos Agentes na Manufatura Convencional

A manufatura convencional é modelada na forma de agentes que interagem entre si e com o ambiente. Os agentes podem ser categorizados como aprendizagem reativa para as reações às condições do ambiente na manufatura convencional (BALAJI e SRINIVASAN, 2010). Consideram-se os seguintes agentes dentro do ambiente fabril:

- a) agente prensa – representa a máquina de estampo: corte e repuxo;
- b) agente ferramenta – representa o ferramental para estampo;
- c) agente ferramentaria – representa o técnico que realiza a preparação e troca de ferramentas, e a manutenção do estado de conservação das mesmas;
- d) agente solda – representa a célula de solda robotizada para a formação do subconjunto soldado;
- e) agente manutenção – representa o técnico que realiza a manutenção das máquinas;

3.3.1.1 Agente Prensa

O agente denominado “prensa” define a máquina tipo prensa que realiza a operação de corte e conformação da chapa de aço para formar a peça estampada. A prensa pode estar basicamente em dois estados distintos: estado “ocioso” e estado “em operação”. No estado “ocioso” a máquina está parada aguardando uma ordem de produção. No estado “em operação” a máquina está em produção do lote de peças referente a ordem de produção recebida. Porém, ao receber a ordem de produção, a máquina precisa ser preparada para a produção do produto selecionado pela ordem de produção. Esta condição é representada pelo estado “em preparação”. Após o término da preparação a máquina passa para o estado de operação.

A máquina em operação pode sofrer alguma avaria que provoque uma parada de produção. A avaria pode ocorrer por diversas causas como desgaste de algum componente, desajuste das regulagens da máquina, erro na operação, produto fora de especificação, causas externas como queda de energia, dentre outras. Nesta situação a máquina para de produzir e passa para o estado de “em manutenção corretiva”.

A máquina também pode ter paradas programadas para a realização de manutenção preventiva a partir um plano de ação com tarefas definidas, como troca de componente com desgaste, limpeza de filtros, reaperto de parafusos e outras ações recomendadas pelo fabricante. Nesta situação a máquina passa para o estado “em manutenção preventiva”. A manutenção preventiva, por ser programada, aguarda que a máquina retorne à condição de estado ocioso.

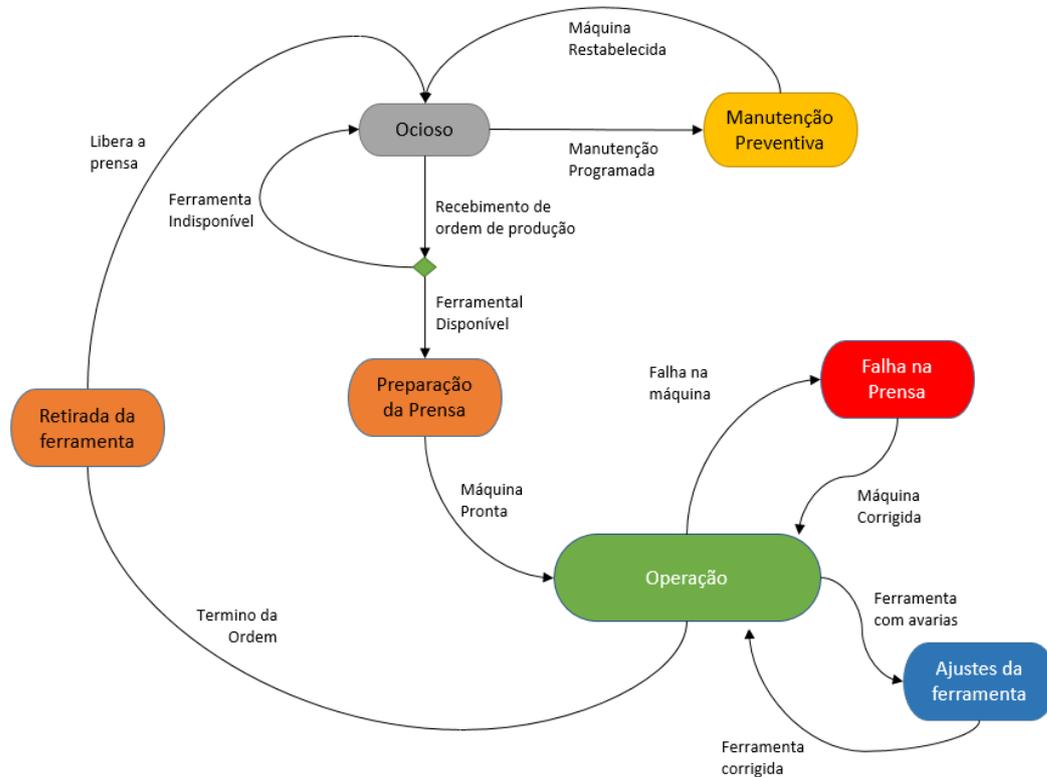
Devem-se considerar também outras condições de operação como a falta de disponibilidade do ferramental quando solicitado para a preparação para nova ordem de produção. Pode ocorrer de a máquina estar com problemas e, quando ocorre a troca do ferramental ou preparação para novas bobinas de aço, descobrem-se falhas na máquina exigindo a manutenção corretiva durante a preparação.

Durante o estado de operação deve-se realizar uma verificação de qualidade sobre uma amostra a cada certo número de peças produzidas ou certo tempo de operação. Se esta inspeção acusar falha no produto, por este estar fora da especificação, a operação deverá ser parada e passa-se a um estado de ajustes para que a ferramenta seja corrigida e após os ajustes feitos, a prensa retorne à operação.

Ao término da produção do lote de peças definido na ordem de produção, há uma nova intervenção da ferramentaria para a retirada do ferramental utilizado da prensa.

Para que se possa refletir no modelo as condições expostas acima, o conjunto da prensa é representado por dois agentes distintos: um agente representa a prensa como máquina e outro agente representa o ferramental. A Figura 33 apresenta a sequência de estados do agente prensa.

Figura 33 - Diagrama de estados do agente prensa

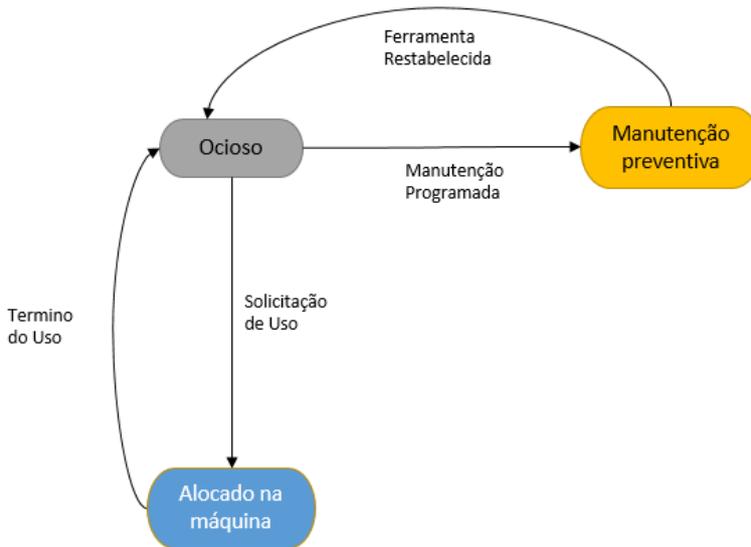


Fonte: autor

3.3.1.2 Agente Ferramenta

O agente denominado “ferramenta” define o ferramental de estampo a ser utilizado na prensa para a operação de corte e repuxo da peça a ser produzida. Cada peça a ser produzida possui seu ferramental específico. O ferramental pode estar em estado “ocioso” ou estado “em operação”. No estado “ocioso” o ferramental pode estar armazenado aguardando a próxima solicitação de uso da ferramenta ou pode estar em reparo e manutenção preventiva. No estado “em operação” estará montado na máquina produzindo as peças da ordem de produção. A Figura 34 apresenta a sequência de estados do agente ferramental.

Figura 34 - Diagrama de estados do agente ferramenta

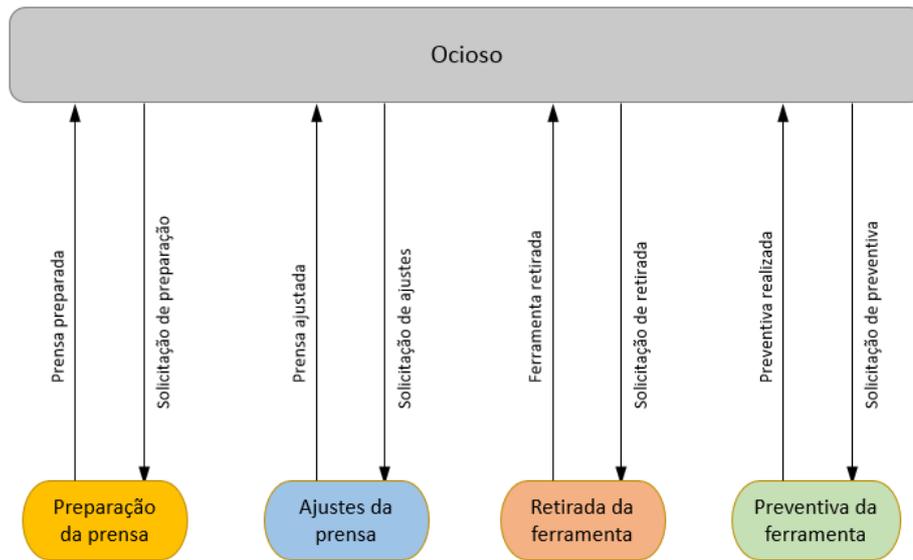


Fonte: autor

3.3.1.3 Agente Ferramentaria

O agente denominado “ferramentaria” é composto pelos técnicos que realizam a preparação da máquina para a execução da ordem de produção. Os técnicos podem estar em estado “ocioso” ou estado “em serviço”. No estado “ocioso” os técnicos estão à disposição na área de ferramentaria. No estado “em serviço” podem estar realizando diversas atividades sendo elas: a preparação da ferramenta na prensa, ajustes na ferramenta em operação na prensa, a retirada da ferramenta da prensa, e manutenção preventiva nos ferramentais que não estão sendo utilizados. A Figura 35 apresenta a sequência de estados do agente ferramentaria.

Figura 35 - Diagrama de estados do agente ferramentaria



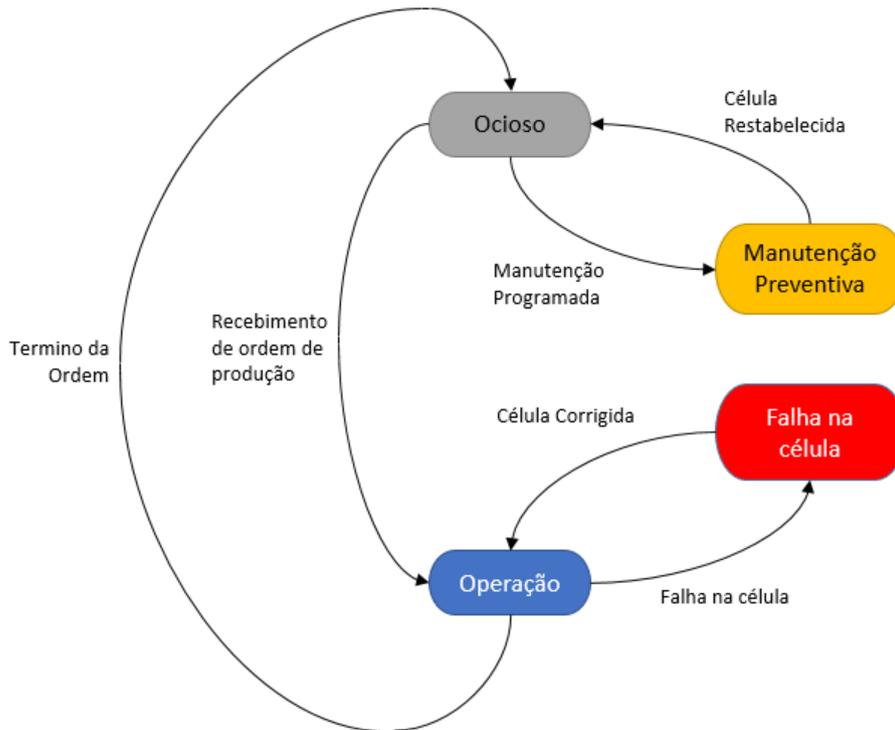
Fonte: autor

3.3.1.4 Agente Solda

O agente denominado “solda” define a célula de solda robotizada que realiza a montagem do conjunto soldado a partir das peças estampadas. A célula de solda pode estar basicamente em dois estados distintos: estado “ocioso” e estado “em operação”. No estado “ocioso” a célula de solda está parada aguardando a ordem de produção e a chegada das peças estampadas para a formação de conjuntos soldados. No estado “operação” a célula de solda está em produção do lote de conjuntos soldados referente a ordem de produção recebida.

A célula de solda pode ter paradas em razão de problemas ou falhas que exigem uma intervenção da equipe de manutenção para a realização de reparos e ajustes. Periodicamente são programadas as manutenções preventivas a partir um plano de ação com tarefas como troca de componente com desgaste, revisão do robô e da máquina de solda, limpeza da área, reaperto de parafusos e outras ações recomendadas pelo fabricante. Nesta situação a máquina passa para o estado “em preventiva”. A Figura 36 apresenta a sequência de estados do agente solda.

Figura 36 - Diagrama de estados do agente solda

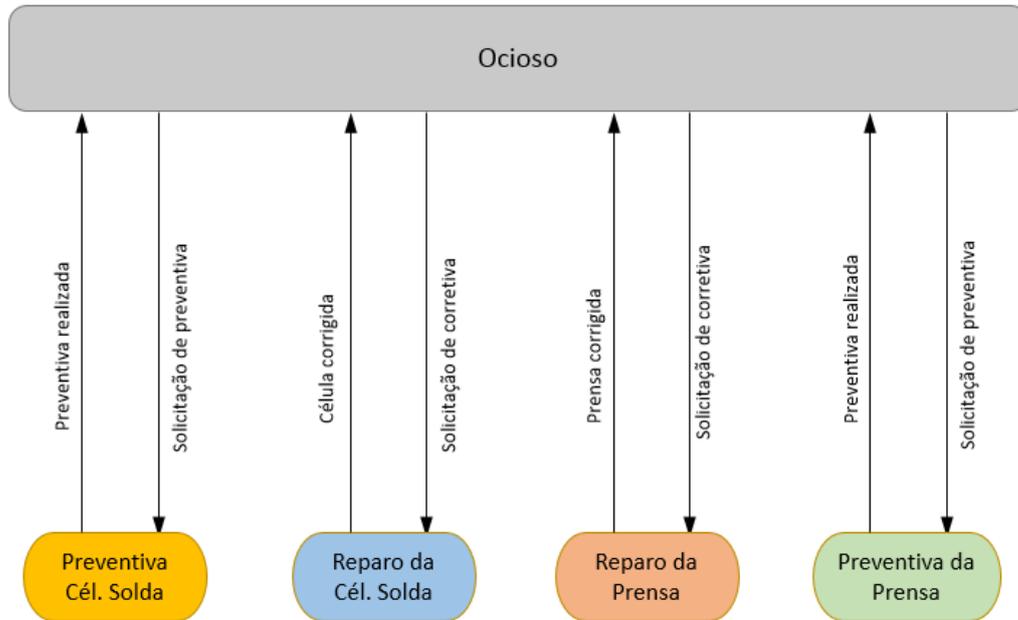


Fonte: autor

3.3.1.5 Agente Manutenção

O agente denominado “manutenção” é composto pelos técnicos que realizam a manutenção das prensas e das células de solda. Os técnicos podem estar em estado “ocioso” ou no estado “em serviço”. No estado “ocioso” os técnicos estão à disposição na área de manutenção. No estado “em serviço” podem estar realizando a correção de falhas em uma prensa ou em uma célula de solda realizando os reparos necessários, ou realizando a manutenção preventiva nas máquinas. A Figura 37 apresenta a sequência de estados do agente manutenção.

Figura 37 - Diagrama de estados do agente manutenção



Fonte: autor

3.3.2 Estruturação dos Agentes no Conceito de Manufatura Avançada

Consideram-se nesta discussão os agentes definidos na modelagem da manufatura convencional, anteriormente apresentados, com a incorporação de funcionalidades da Manufatura Avançada como a Internet das Coisas e os Sistemas Ciber Físicos nos seus ambientes e comportamentos. As prensas, bem como as máquinas, estarão sendo monitoradas constantemente através de sensores conectados por uma rede de comunicação a um servidor de dados e terão os seus modelos digitais sendo atualizados constantemente. Os dados coletados estarão sendo processados e assim seu comportamento pode ser previsto através de lógica de aprendizado da máquina. Desse modo, pode-se prever quando deverá ser feita uma manutenção preditiva com antecedência, permitindo a compra antecipada de partes e peças que serão necessárias no momento da parada para manutenção. Com o sensoriamento da estrutura da prensa podem-se avaliar problemas nas colunas, lubrificação, empenamentos, nivelamentos, trepidações, e outros fatores que podem levar a danos que causem a parada.

O ferramental de estampo também estará sendo monitorado através de IoT e CPS a partir de sensores instalados na ferramenta que fará a digitalização do seu comportamento para o sistema de controle digital da prensa. Através dos dados dos sensores instalados e o seu comportamento monitorado durante a operação pode-se prever os desgastes que estão ocorrendo que estejam formando uma tendência de desvio dos dimensionais da peça produzida.

Através de câmeras de vídeo sobre as peças produzidas poderá ser possível a leitura das dimensões principais da peça. Outros sensores devem ser utilizados para avaliar avarias nas estruturas da ferramenta como trincas ou empenamentos.

A célula de solda robotizada, monitorada constantemente, possuirá o sistema de controle digital da célula informando a qualidade da solda que está sendo executada, previsão de falta de insumos, predição de comportamento do robô e da máquina de solda para correção de problemas de forma otimizada, e controle de qualidade do conjunto soldado para que se determine tendências de desvios para que se auto corrija sem a necessidade de parada da célula.

Os técnicos da manutenção e da ferramentaria serão acionados com maior velocidade uma vez que estarão conectados ao sistema de informação. Dessa forma, o diagnóstico dos problemas será definido com maior precisão e rapidez por um sistema de Inteligência Artificial a partir dos dados históricos armazenados no sistema. Um sistema de Realidade Aumentada torna a execução dos trabalhos mais rápida e determinística através de um sistema de visualização que informe toda a sequência de trabalho a ser realizada pelo operador baseada no diagnóstico do sistema de Inteligência Artificial.

Estas implementações seguem a teoria dos Sistemas Ciber Físicos da arquitetura 5C de Lee, Bagheri e Kao (2015) e utiliza algumas das funcionalidades descritas na ontologia descrita por Trappey et al. (2016).

3.3.2.1 Prensa Avançada

Uma prensa avançada, quando receber a ordem de produção, não terá a dúvida se o ferramental para aquele produto está ou não disponível. Isto porque o sistema de planejamento de recursos para a produção (*ERP*) já verificou a condição da ferramenta necessária, se disponível e a sua condição operacional de quantas batidas ele ainda pode suportar. Assim, o planejamento pode assumir que ele não terá problemas no decorrer da operação para aquele lote planejado na ordem de produção.

Durante a operação, a prensa estará sendo monitorada por uma rede de comunicação e seus dados serão armazenados em um servidor de dados para que todas as pequenas variações possam ser captadas e analisadas. Nesta situação de controle total, pode-se detectar uma tendência de algum problema e atuar de três diferentes modos: no primeiro modo, uma parada da operação com chamada imediata da manutenção para correção do problema no menor tempo possível para restabelecimento da produção, no segundo modo, ocorre a auto correção para a prensa ajustar-se sem interferência do operador ou da manutenção restabelecendo a produção,

ou no terceiro modo, determina-se que é possível terminar o lote de peças de forma satisfatória sem que ocorra uma avaria grave e assim leva a operação até o fim da ordem da produção. Ao término da ordem de produção define-se as ações que deverão ser tomadas antes do início da próxima ordem de produção.

3.3.2.2 Ferramental Avançado

Durante a operação, a ferramenta estará sendo monitorada por uma rede de comunicação e seus dados serão armazenados em um servidor de dados para que todas as pequenas variações possam ser captadas e analisadas. Nesta situação de controle total, pode-se detectar uma tendência de algum problema e atuar de três diferentes modos: no primeiro modo, seria uma parada da operação com chamada imediata da ferramentaria para correção do problema no menor tempo possível para restabelecimento da produção, no segundo modo, ocorre a auto correção para seu ajuste sem interferência do operador ou da ferramentaria restabelecendo a produção, ou no terceiro modo, determina-se que é possível terminar o lote de peças de forma satisfatória sem que ocorra uma avaria grave e assim leva a operação até o fim da ordem da produção. Ao término da ordem de produção define-se as ações que deverão ser tomadas antes do início da próxima ordem de produção.

3.3.2.3 Célula de Solda Avançada

A célula de solda avançada estará conectada ao sistema de gestão ERP para que esteja pronto quando o lote de peças estiver disponível para a produção. Ela saberá definir o momento adequado de ações de reparo automático com base na informação de operação das prensas. Determinará atividades correlatas como correção de trajetórias, limpeza do sistema de solda, que possam ser realizadas neste intervalo sem prejudicar o fluxo de produção.

Durante a operação, a célula de solda estará sendo monitorada e seus dados serão armazenados no servidor de dados para que todas as pequenas variações possam ser captadas e analisadas para a correção no menor tempo possível.

3.3.2.4 Serviços Avançados de Preparação e de Manutenção

Os serviços de preparação e de manutenção podem ser aprimorados com processos de inteligência artificial através de aprendizado da máquina, fazendo o mapeamento de histórico

de causas e efeitos de condições de comportamento. Dessa forma é possível um diagnóstico mais preciso e rápido tornando o tempo de intervenção na máquina mais otimizado e gerando a redução do tempo de parada. Com a manufatura aditiva, uma das tecnologias habilitadoras da manufatura avançada, as peças de reposição de partes danificadas das máquinas e equipamentos podem ser fabricadas com menor prazo que em modos convencionais de usinagem reduzindo os tempos de intervenção e parada de máquina.

3.4 SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES DA MANUFATURA CONVENCIONAL

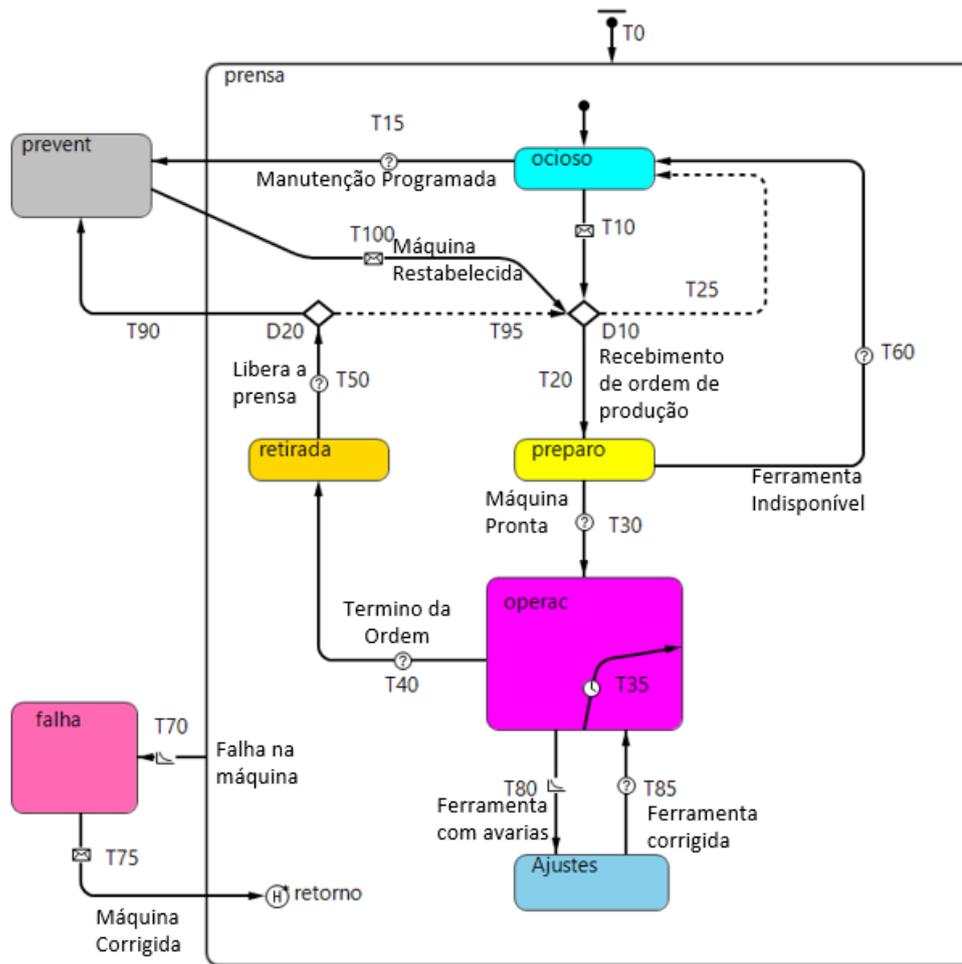
São representados no modelo computacional de simulação do *software AnyLogic* sete agentes que formam o modelo principal executável. São os seguintes:

- a) agente “prensa” – representa a prensa que realiza a operação de conformação das peças;
- b) agente “ferramenta” – representa a ferramenta que será utilizada na prensa para realizar a conformação de determinado peça;
- c) agente “ferramentaria” – representa a equipe de ferramenteiros que realizam a operação de preparação e ajustes da ferramenta na prensa;
- d) agente “solda” – representa a célula de solda robotizada que realiza a operação de solda do subconjunto a partir das peças estampadas;
- e) agente “manutencao” – representa a equipe de manutenção das máquinas que realiza a manutenção corretiva e preventiva das prensas e das células de solda;
- f) agente “ordens” – representa as ordens de produção que são geradas pelo sistema para a execução das operações de produção;
- g) agente “main” – programa principal que forma a estrutura geral do modelo simulado.

3.4.1 Modelo Computacional do Agente “prensa”

O agente “prensa” define a máquina autônoma tipo prensa que executa a função de conformação do produto e é representado no diagrama de estados da Figura 38.

Figura 38 - Diagrama de estados do agente "prensa"



Fonte: autor

No ponto de decisão D10 do diagrama de estados é feita a verificação se há uma ordem de produção na fila de espera. Havendo uma ordem de produção, a prensa passa pela transição T20 e entra no estado de "preparo" para aguardar que o agente "ferramentaria" realize a preparação da prensa para o produto definido na ordem de produção.

A preparação tem duas condições de término: a primeira de preparação concluída com sucesso (transição T30) e a segunda de indisponibilidade da ferramenta (transição T60) devido a estar sendo utilizada em outra prensa, ou estar em estado de manutenção preventiva da ferramenta.

No estado em operação denominado "operac" no diagrama, a prensa realiza a operação de conformação representada pela transição interna T35 que ocorre a cada peça executada. Ao término da quantidade de peças definidas na ordem de produção, ocorre a transição T40 que leva ao estado de desmontagem do ferramental da prensa (estado "retirada"). Neste estado de

“operac” podem ocorrer desvios na qualidade do produto que levam a uma necessidade de ajustes no ferramental (transição T80) que leva ao estado “ajustes”.

A qualquer instante da operação da prensa pode ocorrer uma falha na prensa que gera uma transição T70 que leva ao estado “falha”.

Ao término da desmontagem do ferramental no estado “retirada”, no ponto de decisão D20 verifica-se o prazo para a manutenção preventiva da prensa. Caso tenha vencido o prazo, passa-se pela transição T90 e entra no estado “prevent” para a realização da manutenção preventiva.

O agente “prensa” possui os seguintes principais parâmetros definidos no Quadro 6. Os parâmetros são os mesmos utilizados no modelamento em eventos discretos definidos no Quadro 4.

Quadro 6 - Parâmetros do agente "prensa"

Parâmetro	Transição	Valor
Tempo de ciclo da prensa para conformação de 1 peça	T35	15 segundos
Taxa de falhas da prensa – intervenção da manutenção	T70	15 falhas/mês
tempo médio entre falhas (MTBF) da máquina		2 dias
Taxa de desvios na qualidade do produto	T80	4 intervenções / dia
Prazo de execução de manutenção preventiva	T15 e T90	120 dias

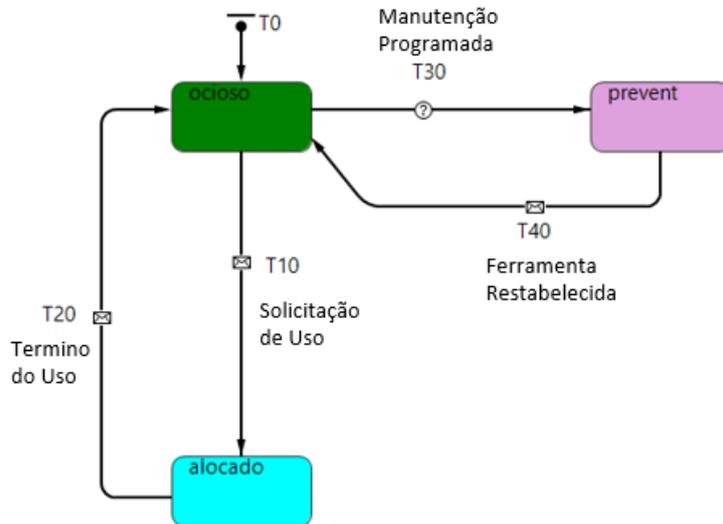
Fonte: autor

As ocorrências de falhas nas máquinas são esporádicas e sua periodicidade é baseada em uma distribuição exponencial de uma média de ocorrências conhecida a partir de dados históricos coletados definindo o tempo médio entre falhas (MTBF) (BORSHCHEV, 2013).

3.4.2 Modelo Computacional do Agente “ferramenta”

O agente “ferramenta” define o ferramental utilizado para a conformação de um determinado produto como um agente autônomo conforme o diagrama de estados da Figura 39.

Figura 39 - Diagrama de estados do agente "ferramenta"



Fonte: autor

A ferramenta é alocada para uma determinada prensa de acordo com o produto a ser produzido. A ferramenta é alocada na transição T10 a partir da solicitação de preparo da prensa pela equipe de ferramentaria.

A ferramenta passa por uma manutenção preventiva a cada intervalo definido para a correção de certos desgastes que podem ocorrer no ferramental (transição T30). Este tempo é especificado no Quadro 7.

Quadro 7 - Parâmetros do agente "ferramenta"

Parâmetro	Transição	Valor
Prazo de execução de manutenção preventiva para revisão do estado do ferramental	T30	30 dias

Fonte: autor

O agente “ferramentaria” possui tempos específicos para a execução de cada atividade definidos no Quadro 8. Os parâmetros de tempo de preparação e retirada do ferramental são os mesmos utilizados no modelamento em eventos discretos definidos no Quadro 4 correspondente ao tempo de preparação total (*setup*).

Quadro 8 - Parâmetro de tempos do agente "ferramentaria"

Parâmetro	Transição	Valor
Tempo de preparação do ferramental na prensa	T70	60 minutos
Tempo de ajustes para correção da qualidade do produto	T80	15 minutos
Tempo de retirada do ferramental da prensa	T90	30 minutos
Tempo para execução da manutenção preventiva	T100	4 horas

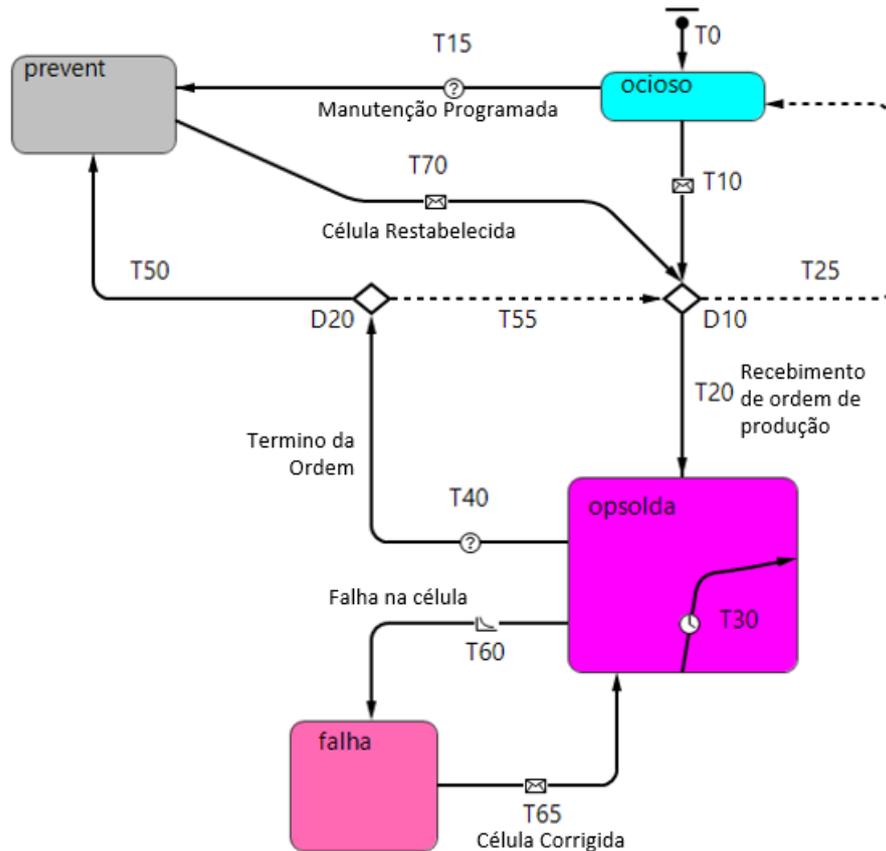
Fonte: autor

Para representar as variações que podem ocorrer nos tempos de execução, considerou-se uma distribuição triangular com valor mínimo de 50% do valor nominal e valor máximo de 150% do valor nominal. Os tempos podem variar conforme o tipo de avaliação a ser corrigida e no modelo de ferramenta a ser trocada. Estes tempos podem ser tabulados para uma empresa real e inseridos no modelo. Neste estudo adotou-se utilizar uma distribuição estatística para representar estas variações. O tipo de distribuição não afeta os resultados pois os mesmos dados e distribuições são aplicados igualmente em todos os modelos comparados.

3.4.4 Modelo Computacional do Agente “solda”

O agente “solda” define a célula de solda robotizada que executa a função de montagem e solda do conjunto de peças estampadas e é representado no diagrama de estados da Figura 41.

Figura 41 - Diagrama de estados do agente “solda”



Fonte: autor

No ponto de decisão D10 do diagrama de estados é feita a verificação se há na fila de espera ao menos um lote de cada componente estampado para formação do conjunto soldado. Havendo quantidade suficiente para a formação do conjunto, a célula de solda passa pela transição T20 e entra no estado de “opsolda” e realiza a solda do lote de conjuntos.

A qualquer instante da operação de solda pode ocorrer uma falha que gera uma transição T60 que leva ao estado “falha”.

Ao término da quantidade de conjuntos definida na ordem de produção, ocorre a transição T40 que leva ao ponto de decisão D20 e verifica-se o prazo para a manutenção preventiva da célula. Caso tenha vencido o prazo, passa-se pela transição T50 e entra no estado “prevent” para a realização da manutenção preventiva.

O agente “solda” possui os seguintes principais parâmetros definidos no Quadro 9. Os parâmetros utilizados são os mesmos do modelamento de eventos discretos definidos no Quadro 5.

Quadro 9 - Parâmetros do agente "solda"

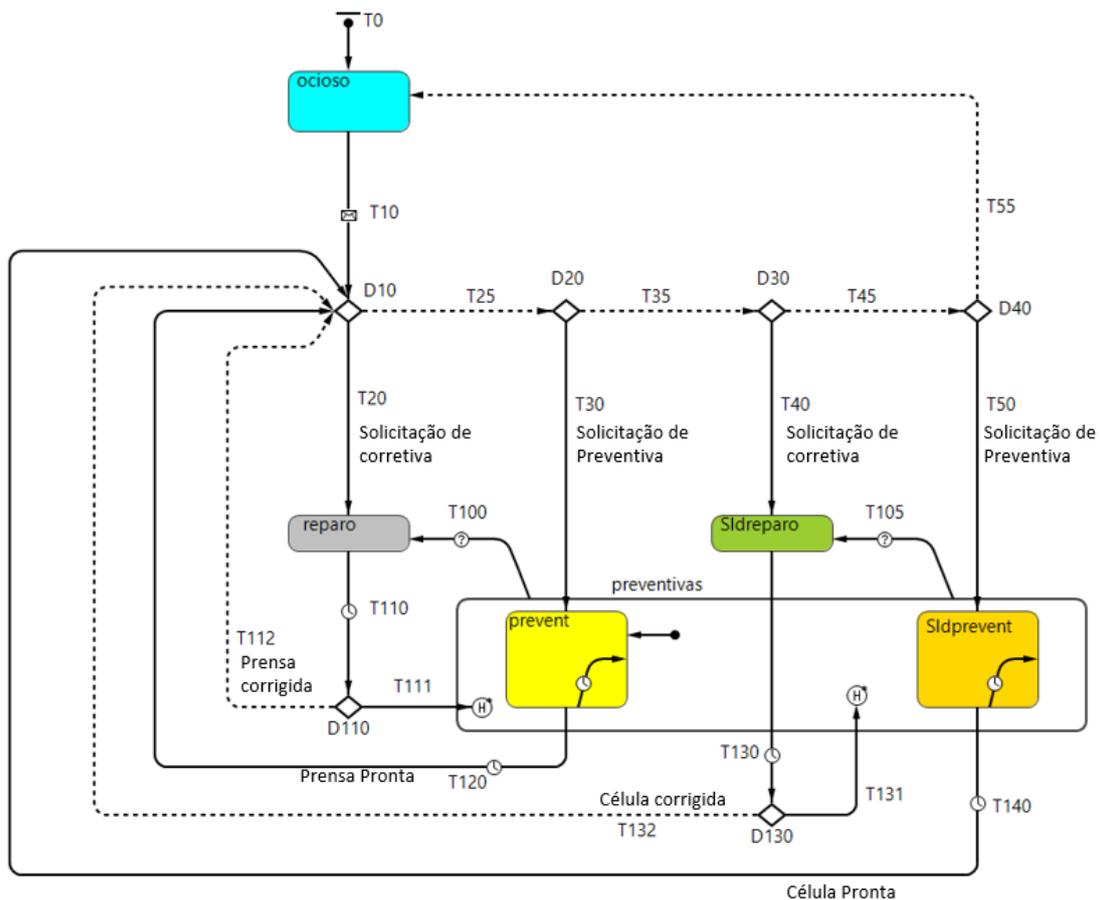
Parâmetro	Transição	Valor
Tempo de ciclo para solda de um conjunto	T30	120 segundos
Taxa de intervenções por falha ou ajustes na célula de solda ou troca de eletrodos	T60	6 intervenções / dia
Prazo de execução de manutenção preventiva	T15 e T50	120 dias

Fonte: autor

3.4.5 Modelo Computacional do Agente “manutencao”

O agente “manutencao ” define a equipe de manutenção de máquinas e equipamentos que realizam a manutenção corretiva e preventiva das prensas e das células de solda, e é representado no diagrama de estados da Figura 42.

Figura 42 - Diagrama de estados do agente "manutencao"



Fonte: autor

Nos pontos de decisão D10, D20, D30 e D40 verifica-se a fila de solicitações de reparo de prensa, manutenção preventiva de prensa, reparo de célula de solda, e manutenção preventiva de célula de solda, respectivamente. As operações de manutenção corretiva têm prioridade sobre a manutenção preventiva e assim as transições T100 e T101 ocorrem quando há uma solicitação de reparo a ser executada nas prensas ou células robotizadas.

O agente “manutencao” possui tempos específicos para a execução da manutenção corretiva e manutenção preventiva definidos no Quadro 10. Os parâmetros de tempo utilizados são os mesmos do modelamento de eventos discretos definidos no Quadro 4 e no Quadro 5.

Quadro 10 - Parâmetros de tempos do agente "manutencao"

Parâmetro	Transição	Valor
Tempo de manutenção corretiva da prensa	T110	30 minutos
Tempo de manutenção preventiva da prensa	T120	24 horas
Tempo de manutenção corretiva da célula de solda	T130	30 minutos
Tempo de manutenção preventiva da célula de solda	T140	24 horas

Fonte: autor

Para representar as variações que podem ocorrer nos tempos de execução, considera-se uma distribuição triangular com valor mínimo de 50% do valor nominal e valor máximo de 150% do valor nominal. Os tempos podem variar conforme o tipo de avaliação a ser corrigida. Estes tempos podem ser tabulados para uma empresa real e inseridos no modelo. Neste estudo adotou-se por simplificação do modelo, utilizar uma distribuição estatística para representar estas variações. O tipo de distribuição não afeta os resultados pois os mesmos dados e distribuições são aplicados igualmente em todos os modelos comparados.

3.4.6 Modelo Computacional do Agente “ordens”

O agente “ordens” define a sequência de produtos a serem fabricados nas prensas. O agente é uma fila infinita de ordens onde cada ordem possui a informação de produto a ser estampado e a quantidade.

As ordens de produção são geradas continuamente mantendo as prensas operando na sua capacidade máxima. Cada ordem de produção gera uma lista de produção contendo a quantidade de cada componente a ser estampado do conjunto soldado a ser fabricado. No modelo considerado há oito componentes a serem estampados e sua quantidade será

proporcional a necessidade para a fabricação de um conjunto soldado (Quadro 11). As quantidades do quadro são os mesmos utilizados na modelagem de eventos discretos definidos pela resultante do Quadro 2 multiplicada pelo Quadro 3.

Quadro 11 - Quantidades de componentes em uma ordem de produção

Tipos de Produtos	Quantidade por produto	Quantidade por Ordem
Componente estampado 1	1	500
Componente estampado 2	2	1000
Componente estampado 3	1	500
Componente estampado 4	1	500
Componente estampado 5	2	1000
Componente estampado 6	3	1500
Componente estampado 7	2	1000
Componente estampado 8	1	500
Conjunto Soldado	1	500

Fonte: autor

3.4.7 Estrutura Computacional do Agente Principal (“main”)

O agente “main” consiste no programa principal da aplicação no *software AnyLogic* que faz as chamadas dos demais agentes e define a estrutura de entradas e saídas na simulação do modelo. O agente “main” da aplicação de modelagem da estamperia é formada pelos seguintes agentes:

- a) quatro agentes “prensa” que operam independentemente em paralelo realizando a estampagem dos componentes;
- b) oito agentes “ferramenta” utilizados respectivamente para cada tipo de componente estampado;
- c) um agente “ferramentaria” que executa os serviços de preparação e ajustes da ferramenta na prensa;
- d) dois agentes “solda” que operam independentemente em paralelo realizando a solda dos conjuntos;

- e) um agente “manutencao” que executa os serviços de manutenção das prensas e células de solda;
- f) uma lista sem limites de agentes “ordens” que são as ordens de produção geradas continuamente pelo sistema;

Além dos agentes, o agente “main” é composto pelas listas dinâmicas de solicitações:

- a) solicitações de ordens de produção;
- b) solicitações de preparação de ferramenta na prensa;
- c) solicitações de retirada de ferramenta da prensa;
- d) solicitações de ajustes na ferramenta da prensa para a ferramentaria;
- e) solicitações de manutenção preventiva da ferramenta para a ferramentaria.
- f) solicitações de reparo da prensa para a manutenção;
- g) solicitações de manutenção preventiva da prensa;
- h) solicitações de reparo da célula de solda para a manutenção;
- i) solicitações de manutenção preventiva da célula de solda;
- j) estoque intermediário de peças estampadas separado por componente;

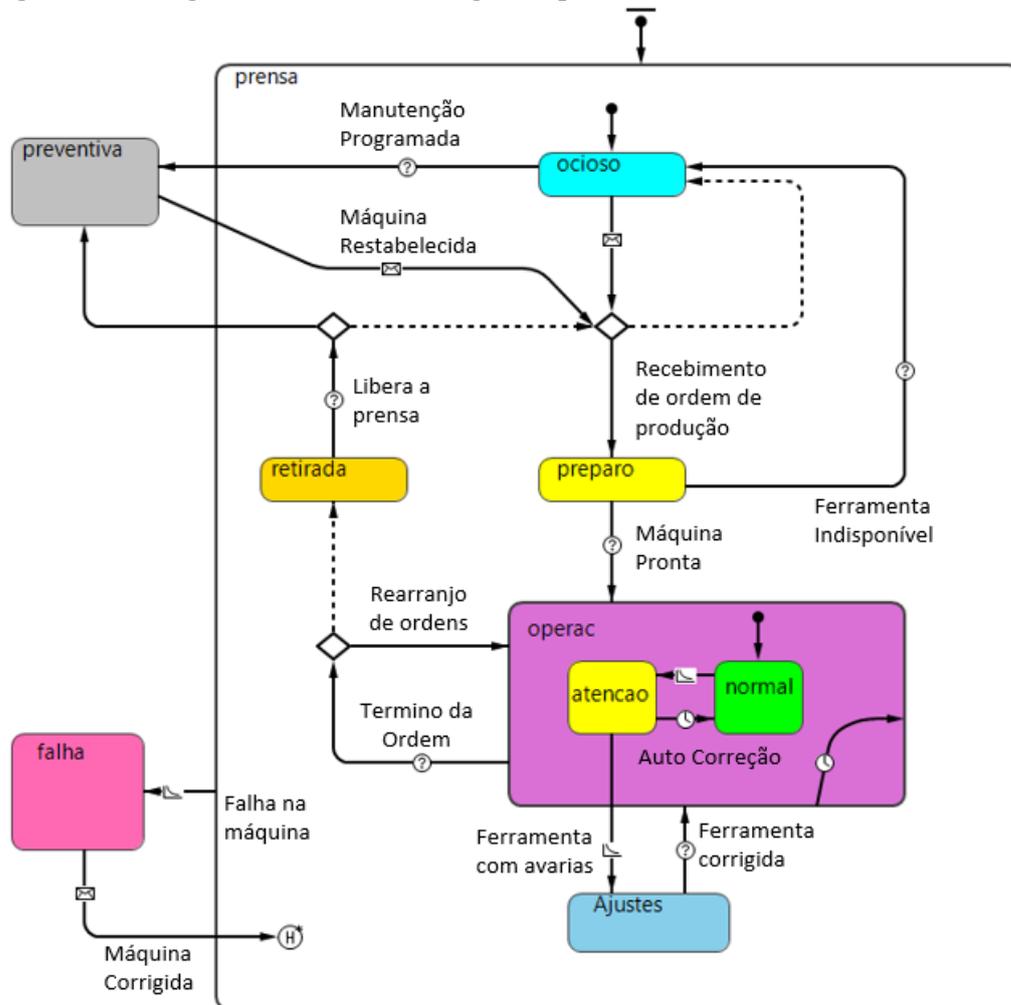
3.5 SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES DA MANUFATURA AVANÇADA

O modelo de manufatura avançada é composto pelos mesmos agentes definidos no modelo de manufatura convencional e simulado no *software AnyLogic*, com os agentes “prensa”, “ferramenta”, “ferramentaria”, “solda”, “manutencao”, “ordens” e “main”, contendo alterações que refletem a implantação de sistemas de manufatura avançada como Internet das coisas e sistemas ciber-físicos.

3.5.1 Modelo Computacional do Agente “prensa” avançado

No agente “prensa” avançado foram inseridas duas funcionalidades para melhora da performance das prensas. O diagrama de estados no modelo é apresentado na Figura 43.

Figura 43 - Diagrama de estados do agente "prensa" avançado



Fonte: autor

A primeira funcionalidade inserida no processo consiste no estado "operac" quando a prensa está executando a operação de estampo. Há dentro do estado duas condições de trabalho, sendo o primeiro estado "normal" quando o produto está dentro das tolerâncias de qualidade e o segundo estado de "atenção" quando o produto está dentro das tolerâncias, porém, através de sensores instalados na ferramenta e na prensa, detecta-se que há uma tendência de desvio ocorrendo. No estado de atenção a prensa através de sistemas de controle com realimentação realiza ajustes automáticos em operação sem a necessidade ou conhecimento do operador. Em certas situações o controle não consegue restaurar a contento e passa para o estado de "Ajustes" com a solicitação de intervenção dos serviços da ferramentaria.

A segunda funcionalidade inserida consiste no sistema de planejamento de produção avançado que monitora a produção das prensas e avalia as próximas ordens de produção buscando dentro do planejamento as ordens que sejam possíveis de antecipar as ordens do

mesmo produto que a prensa terminou de produzir. Com isso passa a não ser necessário a troca de ferramenta diminuindo o tempo de máquina parada para troca de ferramenta. No diagrama de estados da Figura 43 são representados pelo ponto de decisão D30 e transição T45.

As funcionalidades acima descritas seguem a arquitetura 5C de Lee, Bagheri e Kao (2015) como parte de implementações para se atingir os cinco níveis de implementação contemplando a conexão dos sensores a rede (nível I), a conversão em informação (nível II), passar para o modelo virtual (nível III), análise e tomada de decisão (nível IV) e o auto ajuste (nível V).

O agente “prensa” avançado incorpora os seguintes parâmetros definidos no Quadro 12.

Quadro 12 - Parâmetros de agente "prensa" avançada

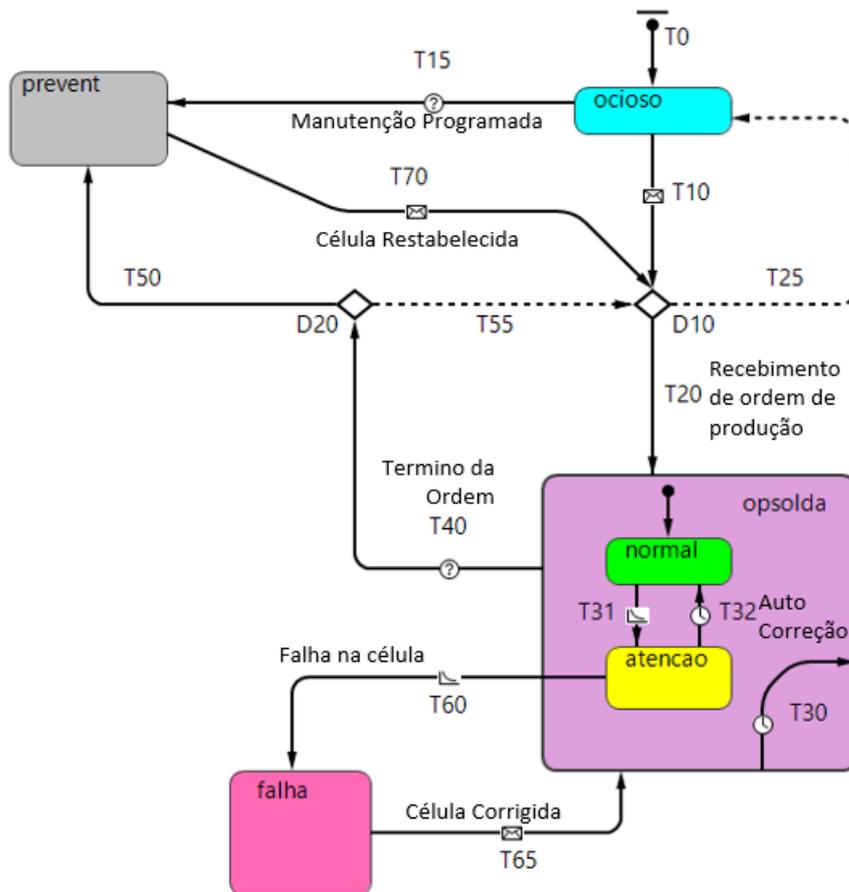
Parâmetro	Transição	Valor
Taxa de desvios do estado normal para atenção	T36	1 desvio / hora
Tempo de ajuste automático e retorno do estado atenção para normal	T37	2 minutos (4 ciclos da prensa)
Taxa de desvio de atenção para intervenção	T80	4 desvios / dia

Fonte: autor

3.5.2 Modelo Computacional do Agente “solda” avançado

O agente “solda” avançado teve uma alteração para o aumento de performance representado no diagrama de estados da Figura 44.

Figura 44 - Diagrama de estados do agente “solda” avançado



Fonte: autor

No estado de operação de solda da célula representado por “opsolda” foram inseridos os estados de condição “normal” de operação quando a célula está produzindo em perfeitas condições de trabalho. Na condição “atenção” há uma situação, através de sensores e sistema de controle, detecta-se que algum parâmetro da célula de solda saiu do seu ponto ideal de operação, como qualidade da solda, trajetória do robô, posição das peças, entre outras condições que podem ser monitoradas. Nesta condição o sistema de controle assume os ajustes e busca restaurar a condição ideal de trabalho automaticamente. Pode ocorrer situações que o sistema não consegue atingir esta condição e assim dispara uma solicitação para intervenção dos serviços de manutenção. Estas situações são representadas no diagrama da Figura 44 pelas transições T31 e T32 para reparo automático e T60 para intervenção da manutenção.

Do mesmo modo que o agente “prensa” avançado as implementações seguem a arquitetura 5C de Lee, Bagheri e Kao (2015) como parte de implementações para cumprir os níveis de CPS.

O agente “solda” avançado incorpora os seguintes parâmetros definidos no Quadro 13.

Quadro 13 - Parâmetros de agente "solda" avançado

Parâmetro	Transição	Valor
Taxa de desvios do estado normal para atenção	T31	1 desvio / hora
Tempo de reparo automático e retorno do estado atenção para normal	T32	8 minutos (4 ciclos de solda)
Taxa de falha de atenção para intervenção	T80	6 intervenções / dia

Fonte: autor

4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os modelos apresentados no capítulo anterior representando a manufatura de conjuntos soldados foram simulados nos *softwares Plant Simulation e Anylogic* por um longo período de tempo simulado, aproximadamente dois anos, para que haja uma quantidade relevante de dados para que as intervenções de manutenção preventiva sejam consideradas na geração dos gráficos a serem analisados.

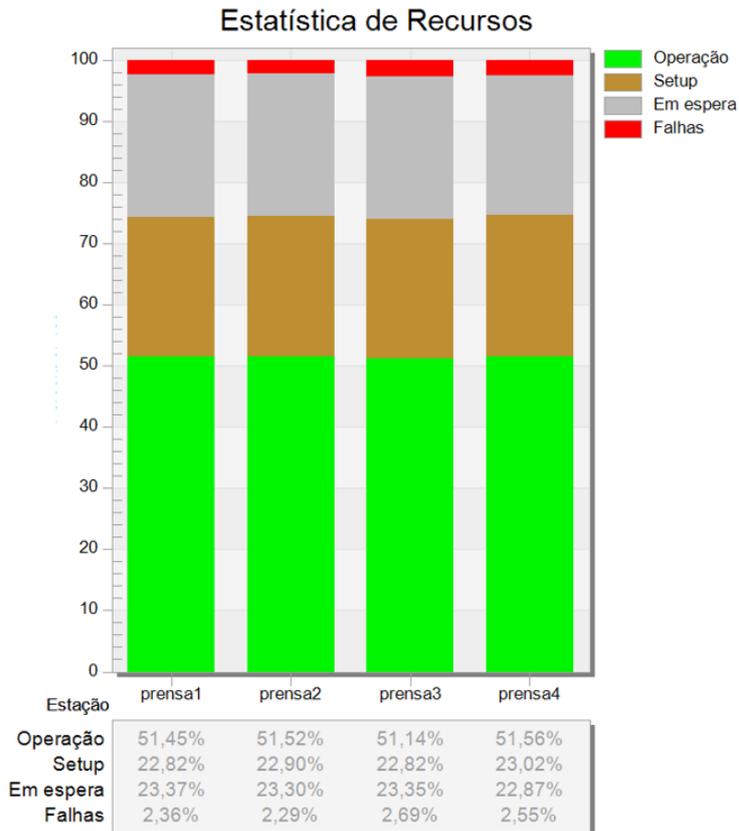
4.1 RESULTADOS DE SED E SBA DA MANUFATURA CONVENCIONAL

O modelo de manufatura convencional da fabricação dos conjuntos soldados foi simulado por dois métodos de simulação, simulação de eventos discretos com o *software Plant Simulation* e simulação baseada em agentes com o *software Anylogic*, para avaliação do comportamento do modelo e comparação de seus resultados.

4.1.1 Resultados da Prensa

Na simulação de eventos discretos, a Figura 45 apresenta o nível de utilização das prensas a partir do percentual de tempo dispendido em cada estado da prensa. Os estados são classificados em quatro categorias: “operação” – a prensa está executando a operação de estampagem, “*setup*” – a prensa está efetuando a troca da ferramenta, “em espera” – a prensa está aguardando recurso para realização da troca da ferramenta, “falha” – a prensa está em falha aguardando o reparo.

Figura 45 - Alocação das prensas

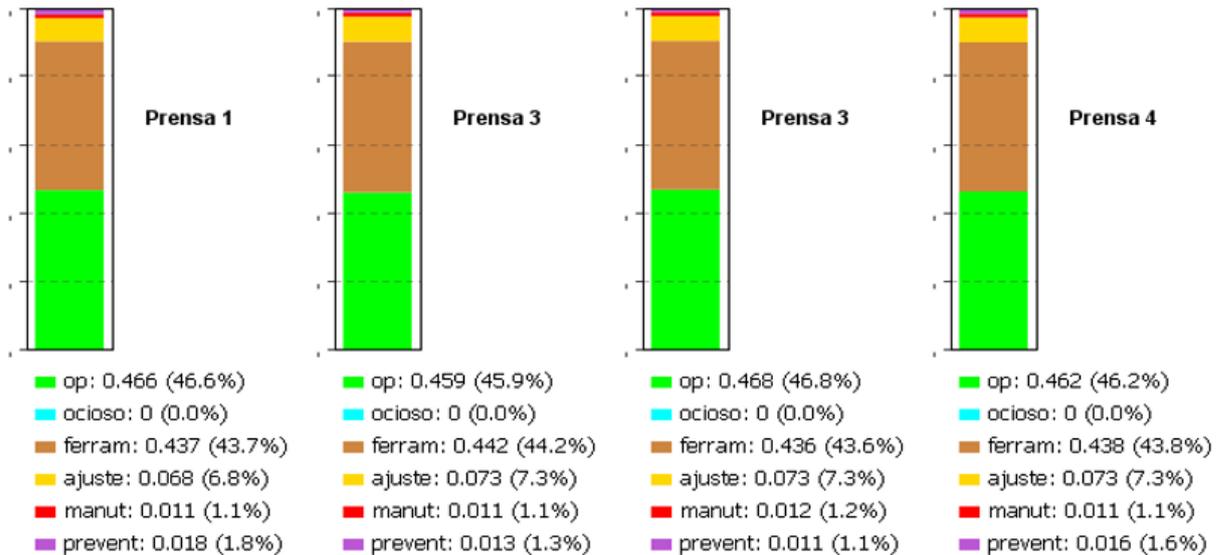


Fonte: autor

Os resultados da simulação de eventos discretos indicam que as prensas operam efetivamente por 51% do tempo total. O tempo demandado para a troca de ferramentas nas prensas está em cerca de 46% considerando a soma de tempo de “*setup*” e tempo “em espera”. O tempo “em espera” refere-se ao tempo total aguardando o recurso que realiza a operação de troca da ferramenta, e o tempo “*setup*” refere-se efetivamente a troca da ferramenta. O índice de falhas correspondente a falhas da prensa e manutenção preventiva corresponde a 2,5% do tempo total.

Na simulação baseada em agentes, a Figura 46 apresenta o nível de utilização das prensas a partir do percentual de tempo dispendido em cada estado do agente “prensa”. Os estados são classificados em seis categorias: ocioso, em operação, em parada para preparação, em parada para ajustes, em parada para manutenção corretiva, e em parada para manutenção preventiva.

Figura 46 - Nível de utilização das prensas



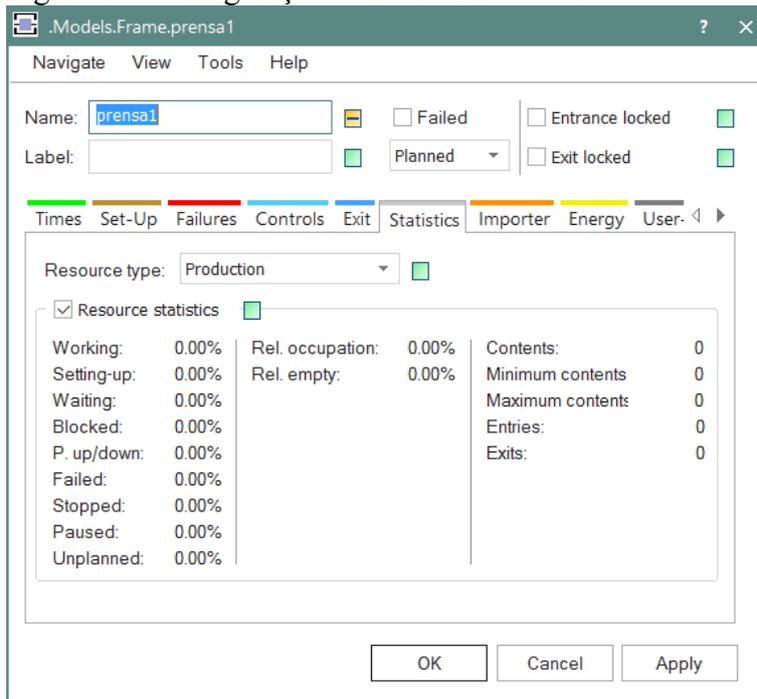
Fonte: autor

Legenda:

- op: estado prensa em operação
- ocioso: estado prensa parada sem atividade
- ferram: estado prensa em preparação ou retirada da ferramenta
- ajuste: estado prensa em ajuste da ferramenta durante a produção
- manut: estado prensa em manutenção corretiva
- prevent: estado prensa em manutenção preventiva

Os resultados da simulação baseada em agentes indicam que as prensas operam efetivamente por 46% do tempo total. O tempo demandado para a preparação e retirada das ferramentas nas prensas está em cerca de 44% do tempo total. O índice de ajustes para correção da ferramenta na operação está em torno de 7% e a manutenção da prensa, corretiva e preventiva, em torno de 2,6% do tempo total.

Existem diferenças na contabilização dos índices entre os métodos de simulação em função do modelamento da operação em cada *software*. O *software Plant Simulation* de eventos discretos define os índices conforme a função estatística da operação apresentada na Figura 47. No *software Anylogic* os estados dos agentes são definidos de modo livre conforme a estrutura de estados criada pelo usuário. Isto permite que seja modelado conforme a necessidade de informações de modo mais personalizado.

Figura 47 - configuração do *Plant Simulation*

Fonte: autor

Comparando-se os resultados entre os dois métodos obtém-se o Quadro 14 com os seguintes índices:

- o índice de utilização em operação refere-se ao tempo em que as prensas estão produzindo peças em ambos os métodos. A diferença entre os métodos é de 5,0%;
- o índice de utilização de preparação da prensa é definido no *Plant Simulation* como o tempo de “*setup*” somado ao tempo “em espera” de recurso para a execução do trabalho. No *Anylogic* o índice “*ferram*” é definido no diagrama de estados do agente “*prensa*” como o tempo total de preparação da ferramenta na prensa que engloba todo o tempo da prensa parada devido a troca de ferramenta não distinguindo entre o tempo de execução efetiva e o tempo de espera pelo recurso. A diferença entre os métodos é de 2,3%;
- o índice de falha da prensa é definido no *Plant Simulation* de modo único considerando o tempo de manutenção corretiva e preventiva. No *Anylogic* os tempos são contabilizados independentemente e faz-se a soma dos tempos para efeito comparativo. A diferença entre os métodos é de 0,1%.

Quadro 14 - Resultado de SED e SBA de alocação das prensas

Níveis de alocação	SED	SBA
Operação	51,4%	46,4%
Preparação da prensa	46,1%	43,8%
Falha da prensa	2,5%	2,6%
Ajustes na prensa em operação	n/d	7,2%

Fonte: autor

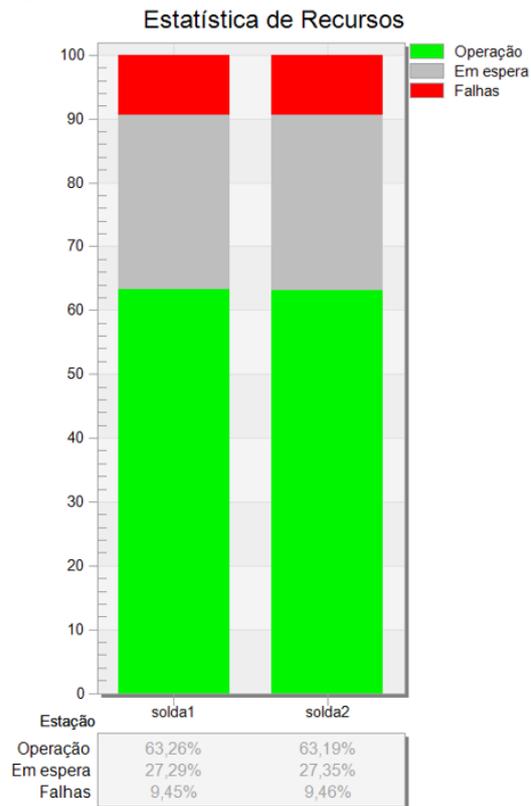
As diferenças podem ser clarificadas pelos seguintes aspectos entre os métodos de simulação:

- a) pelo método de eventos discretos no *Plant Simulation* a condição de parada para ajustes durante a operação da prensa não está destacada. Este tempo de parada para ajustes no modelo de agentes no *Anylogic* corresponde a cerca de 7% do tempo total, que passa a ser diluído no tempo de operação e de preparação no *Plant Simulation*;
- b) a SBA com a metodologia de agentes definiu a ferramenta a ser utilizada pela prensa como um agente independente que pode estar em estado de manutenção preventiva para a correção de problemas. Neste estado a ferramenta fica indisponível e exige intervenção da ferramentaria para a correção dos problemas. Esta função não é implementada no *Plant Simulation* pela complexidade de alteração da classe do modelo para esta funcionalidade. Desse modo este tempo de indisponibilidade, no SED passa a ser tempo de operação normal da prensa.

4.1.2 Resultados da Célula de Solda

Na simulação de eventos discretos, as células de solda que realizam a montagem dos conjuntos soldados a partir das peças estampadas nas prensas, têm um nível de utilização em torno de 63% do tempo total com um índice de ociosidade de 27% e nível de intervenções da manutenção em torno de 9%, como apresentado na Figura 48. O tempo em espera pode ser considerado como em estado de ociosidade porque o nível de estoque de estampados (Buff_A ao Buff_H) tem se mantido zerado.

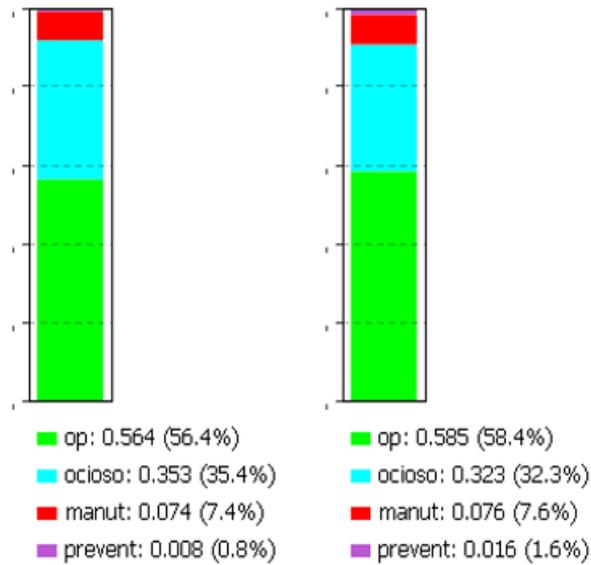
Figura 48 - Alocação das células de solda



Fonte: autor

Na simulação baseada em agentes, as células de solda têm um nível de utilização em torno de 56% do tempo total com um índice de ociosidade em torno de 33% como apresentado na Figura 49. O nível de intervenções da manutenção corretiva somado a preventiva em torno de 8,5%.

Figura 49 - Alocação das células de solda



Fonte: autor

Legenda:

- op: célula de solda em operação
- ocioso: célula de solda parada sem atividade
- manut: célula de solda em manutenção corretiva
- prevent: célula de solda em manutenção preventiva

Comparando-se os resultados entre os dois métodos obtém-se o Quadro 15 com os seguintes índices:

- a) o índice de utilização em operação refere-se ao tempo em que as células de solda estão produzindo conjuntos soldados em ambos os métodos. A diferença entre os métodos de 5,8%;
- b) o índice de utilização em espera por chegada de produto a ser soldado na célula de solda definido no *Plant Simulation* é equivalente ao índice de ociosidade no *Anylogic*. A diferença entre os métodos é de 6,5%;
- c) o índice de falha da prensa é definido no *Plant Simulation* de modo único considerando o tempo de manutenção corretiva e preventiva. No *Anylogic* os tempos são contabilizados independentemente e faz-se a soma dos tempos para efeito comparativo. A diferença entre os métodos é de 0,8%.

Quadro 15 - Resultado de SED e SBA de alocação das células de solda

Níveis de alocação	SED	SBA
Operação	63,2%	57,4%
Em espera aguardando produto	27,3%	33,8%
Falha da célula de solda	9,5%	8,7%

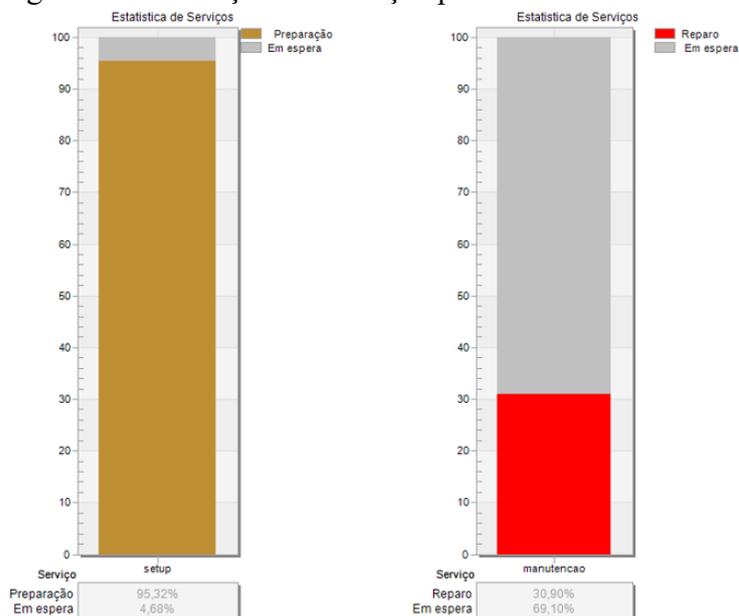
Fonte: autor

As diferenças podem ser clarificadas pelo seguinte aspecto entre os métodos de simulação: o fato de não haver a parada para ajustes na ferramenta da prensa durante a operação no método de eventos discretos no *Plant Simulation*, conforme descrito nos resultados das prensas, provoca um aumento da produtividade das prensas e consequente aumento da produtividade das células de solda por haver maior quantidade de conjuntos a serem soldados. Isto faz com que o índice de operação na célula de solda seja maior no método de eventos discretos.

4.1.3 Resultados dos Serviços

Na simulação de eventos discretos, os gráficos de alocação (Figura 50) de serviços de ferramentaria para troca de ferramenta e manutenção para correção de falhas e manutenção preventiva apresentam os índices de alocação de serviços.

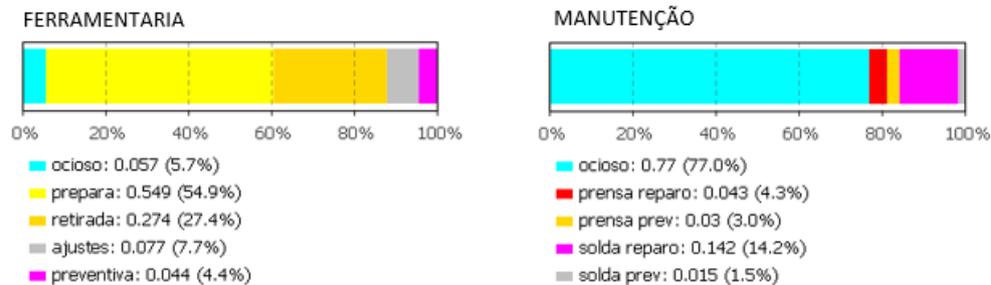
Figura 50 - Alocação de Serviços por SED



Fonte: autor

Na simulação baseada em agentes, observa-se na Figura 51 os resultados de alocação da ferramentaria e da manutenção dentro das suas atribuições de serviços. Os gráficos apresentam de modo mais detalhado cada função exercida pelas áreas.

Figura 51 - Alocação de Serviços por SBA



Fonte: autor

Legenda:

- ocioso: serviços de ferramentaria ou manutenção sem atividade
- prepara: serviço de preparação do ferramental da prensa
- retirada: serviço de retirada do ferramental da prensa
- ajustes: ajuste do ferramental da prensa durante a operação
- preventiva: manutenção preventiva do ferramental da prensa
- prensa reparo: serviços de reparo da prensa
- prensa prev: manutenção preventiva da prensa
- solda reparo: serviços de reparo na célula de solda
- solda prev: manutenção preventiva da célula de solda

Comparando-se os resultados entre os dois métodos obtém-se o Quadro 16 e o Quadro 17 com os seguintes índices:

- a) o índice de preparação da prensa no *Plant Simulation* é a soma de preparação e retirada da ferramenta no *Anylogic*. A diferença entre os métodos de 13,0%;
- b) o índice de ociosidade da ferramentaria define os tempos nas condições onde as prensas estão em operação e não há necessidade de intervenção. A diferença entre os métodos de 1,0%;
- c) os índices de ajustes e manutenção preventiva de ferramenta não estão considerados no SED. Este tempo de parada devido a estes índices reflete em aumento da produção e consequente maior número de preparações a serem executas pela ferramentaria;
- d) o nível de reparo executado pela manutenção refere-se em ambos os métodos a manutenção corretiva e a manutenção preventiva. O aumento de intervenções tem relação com o aumento da produção e com a questão de interrupções na manutenção preventiva para atendimento da manutenção corretiva. Na SBA, quando o sistema estiver em execução da manutenção preventiva e houver um chamado de manutenção corretiva, a manutenção suspende o processo atual e atende o chamado.

Ao término do atendimento retorna para completar a preventiva. Esta particularidade não está presente em SED. Para se implementar esta operação no *Plant Simulation* exige um trabalho complexo de alteração dos códigos e métodos de programação. Esta particularidade reflete em maior tempo de parada devido a falhas devido ao tempo de espera de disponibilidade de recurso para a execução da manutenção corretiva.

Quadro 16 - Resultado de SED e SBA de alocação de serviços de ferramentaria

Níveis de alocação	SED	SBA
Preparação da prensa	95,3%	82,3%
Ociosidade	4,7%	5,7%
Ajustes em produção	n/d	7,7%
Preventiva da ferramenta	n/d	4,4%

Fonte: autor

Quadro 17 - Resultado de SED e SBA de alocação de serviços de manutenção

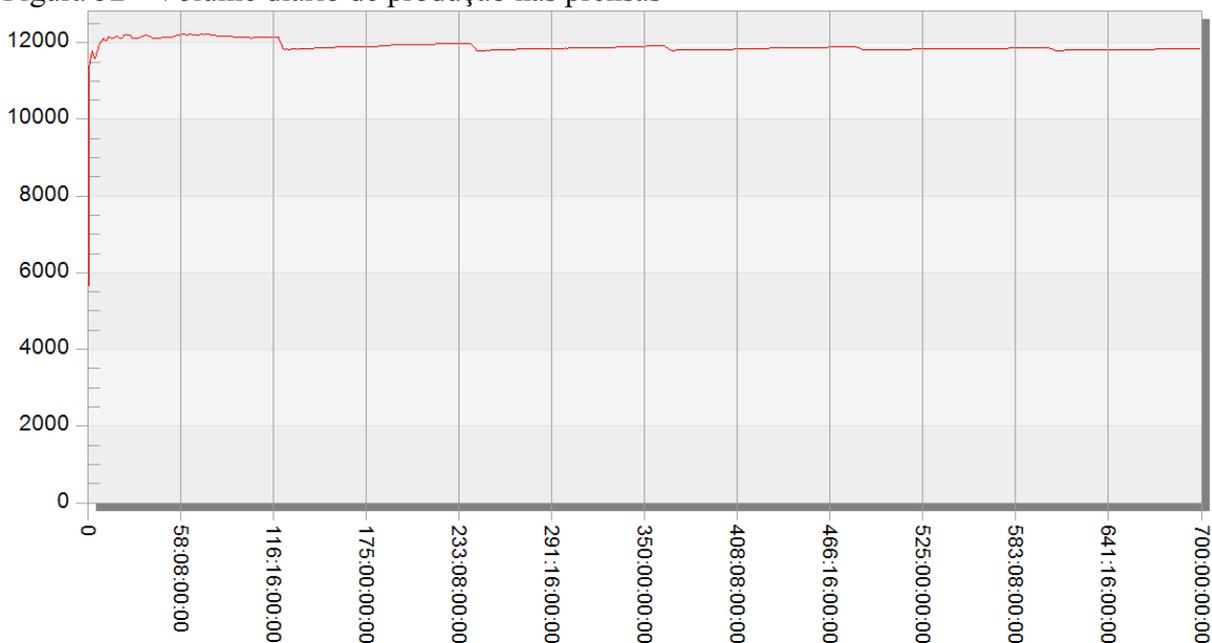
Níveis de alocação	SED	SBA
Reparo da prensa e célula de solda	30,9%	23,0%
Ociosidade	69,1%	77,0%

Fonte: autor

4.1.4 Resultados de Produção

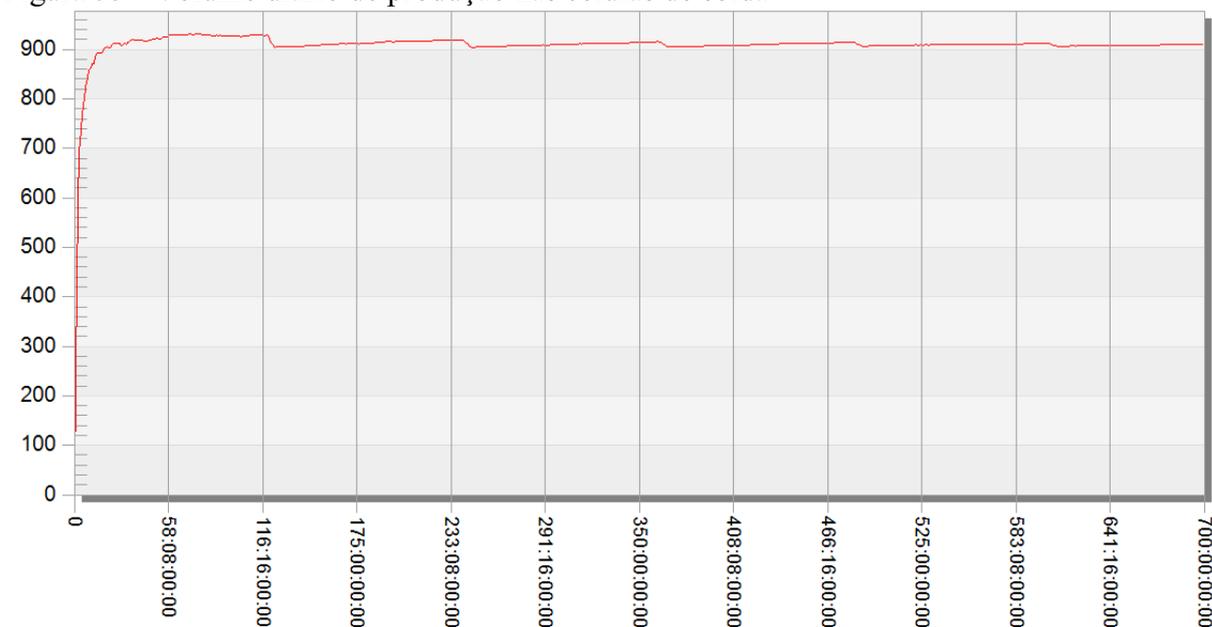
Na simulação de eventos discretos, os volumes de produção obtidos da operação das prensas e das células robotizadas são representados pelos gráficos das Figura 52 e Figura 53. Os valores são médias diárias de produção sendo produzidos em torno de 12.000 peças por dia nas prensas e cerca de 900 conjuntos soldados por dia.

Figura 52 - Volume diário de produção nas prensas



Fonte: autor

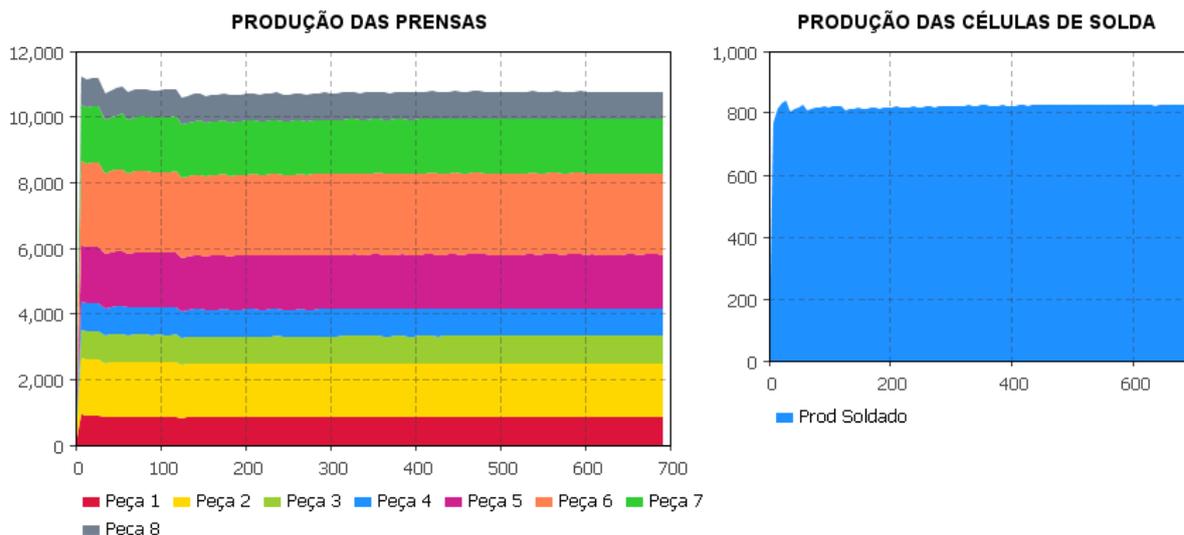
Figura 53 - Volume diário de produção nas células de solda



Fonte: autor

Na simulação baseada em agentes, os volumes de produção obtidos da operação das prensas e das células robotizadas são representados pelos gráficos da Figura 54. Os valores são médias diárias de produção sendo produzidos em torno de 10.500 peças por dia nas prensas e cerca de 800 conjuntos soldados por dia.

Figura 54 - Nível de produção diária



Fonte: autor

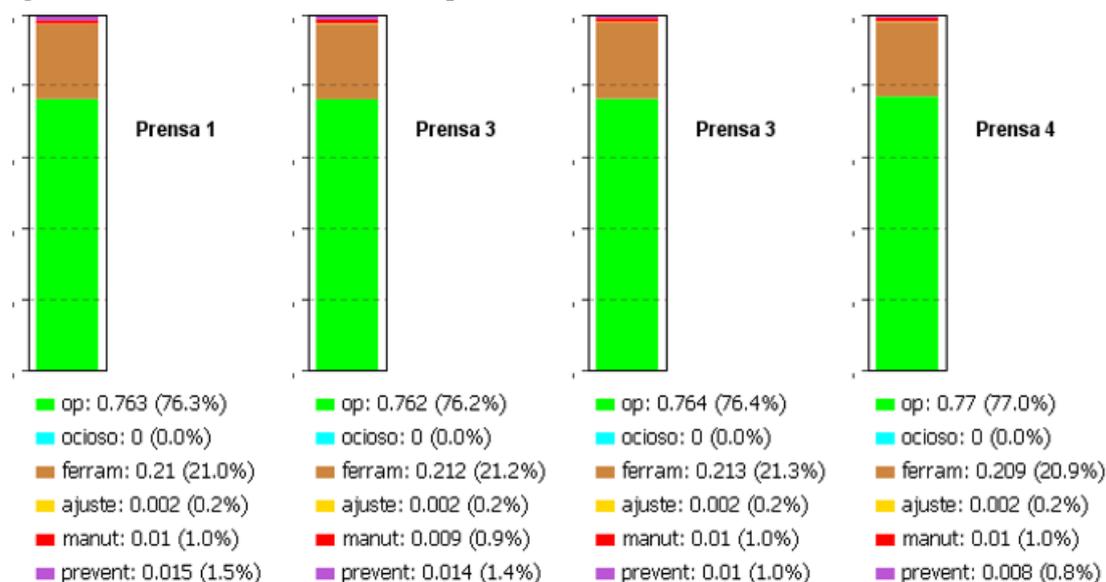
Este resultado de diferença de total produzido demonstra o que foi constatado na análise da área de prensa sobre a diferença de produtividade entre os modelos devido a não serem considerados na modelagem em SED a parada de produção para ajustes de ferramental e a disponibilidade da ferramenta sempre livre para a prensa que solicitar.

Os resultados das simulações apresentam um nível de ociosidade das prensas em 0% pois existe a disponibilidade constante de material no início da linha, porém o tempo de paradas devido a preparação da ferramenta é muito significativo. Em contrapartida, o nível de ociosidade das células de solda gira em torno de 30% aguardando produtos a serem soldados, o que indica que a área de estamparia é o gargalo dentro do fluxo de produção de conjuntos soldados.

4.2 RESULTADOS DE SBA DA MANUFATURA AVANÇADA

O modelo de manufatura avançada é simulado pelo método de simulação baseada em agentes no *software Anylogic* e são obtidos os resultados com a simulação executada por um período simulado equivalente de dois anos (700 dias). A Figura 55 apresenta o nível de utilização das prensas a partir do percentual de tempo dispendido em cada estado do agente “prensa” avançada.

Figura 55 - Nível de utilização das prensas avançadas



Fonte: autor

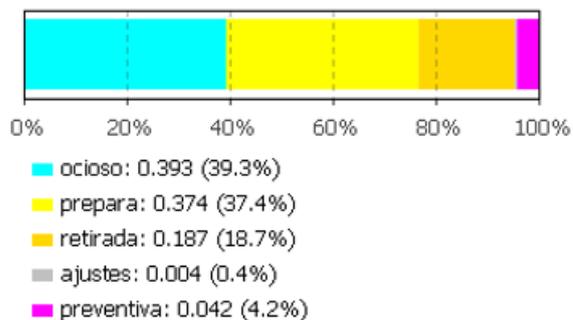
Legenda:

- op: estado prensa em operação
- ocioso: estado prensa parada sem atividade
- ferram: estado prensa em preparação ou retirada da ferramenta
- ajuste: estado prensa em ajuste da ferramenta durante a produção
- manut: estado prensa em manutenção corretiva
- prevent: estado prensa em manutenção preventiva

Os resultados de utilização indicam uma melhora significativa na produtividade das prensas que passam de 46% no convencional para 76% de utilização do tempo total. Isto deve-se principalmente na redução do tempo demandado para a preparação e retirada das ferramentas nas prensas que passou de 44% para 21% do tempo total. Também ressalta o índice de ajustes para correção da ferramenta na operação que caiu de 7% para menos de 1%.

A alocação de serviços da ferramentaria consequentemente mudou seu comportamento com a redução dos serviços de preparação e retirada dos ferramentais das prensas. A Figura 56 mostra o gráfico de alocação de serviços da ferramentaria. O gráfico apresenta que a alocação para os serviços de preparação e retirada de ferramentais das prensas caiu de 80% para cerca de 55% do tempo total e o tempo ocioso, anteriormente quase nulo, passou para 39%. Isto se deve a menor quantidade de trocas de ferramentas nas prensas devido a otimização do uso da ferramenta com os sistemas de reordenação das ordens de produção em tempo real. Com isso a ferramentaria tem um tempo ocioso que a princípio pode ser utilizado para outras funções não consideradas neste modelo.

Figura 56 - Alocação da ferramentaria



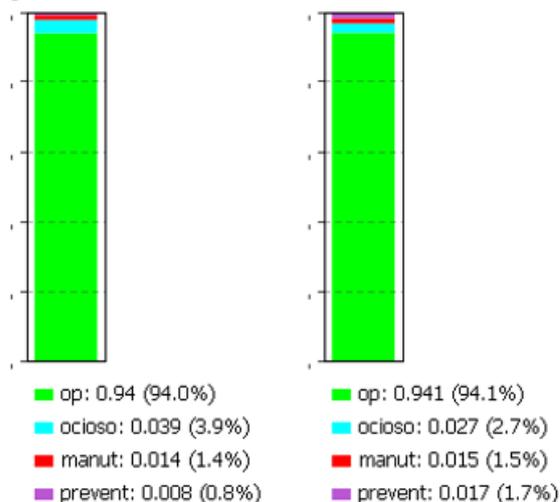
Fonte: autor

Legenda:

- ocioso: serviços de ferramentaria sem atividade
- prepara: serviço de preparação do ferramental da prensa
- retirada: serviço de retirada do ferramental da prensa
- ajustes: ajuste do ferramental da prensa durante a operação
- preventiva: manutenção preventiva do ferramental da prensa

As células de solda, com a alteração no sistema de monitoração e controle automático de falhas, passaram de um índice de reparos de 8% para cerca de 1,5% tornando as células mais confiáveis. O índice de operação passou a 94% com o aumento de produção das prensas preenchendo os tempos ociosos observados na simulação da manufatura convencional. Os gráficos da Figura 57 apresenta estes dados obtidos da simulação.

Figura 57 - Alocação das células de solda avançadas



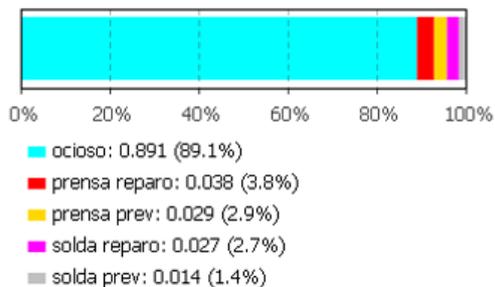
Fonte: autor

Legenda:

- op: célula de solda em operação
- ocioso: célula de solda parada sem atividade
- manut: célula de solda em manutenção corretiva
- prevent: célula de solda em manutenção preventiva

Com a redução do tempo de serviços de manutenção nas células de solda, o gráfico de alocação de serviços de manutenção (Figura 58) apresenta que houve uma redução do tempo alocado para reparo na célula de solda de 14% para menos de 3% do tempo total.

Figura 58 - Alocação da manutenção



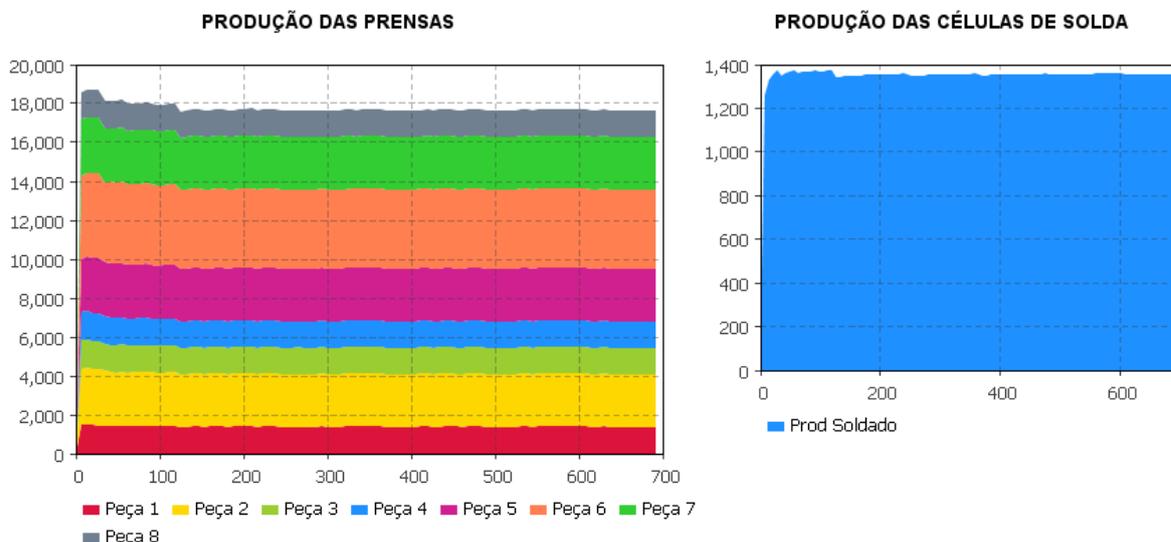
Fonte: autor

Legenda:

- ocioso: serviços de manutenção sem atividade
- prensa reparo: serviços de reparo da prensa
- prensa prev: manutenção preventiva da prensa
- solda reparo: serviços de reparo na célula de solda
- solda prev: manutenção preventiva da célula de solda

Os volumes de produção também sofreram incrementos significativos com a melhora de performance das áreas. Os gráficos da Figura 59 apresentam este fato. Os valores de produção diária passaram de 10.500 peças por dia para quase 18.000 peças por dia nas prensas e o volume de conjuntos soldadas passou de 800 para quase 1.400 conjuntos por dia na saída das células de solda.

Figura 59 - Nível de produção diária



Fonte: autor

Os resultados são reflexo de pequenas alterações referentes três itens identificados como os mais significativos: planejamento de produção, serviços de ferramentaria e serviços de manutenção. No planejamento de produção a prensa realiza dinamicamente a mudança do plano de ordens de produção para a otimização do uso do ferramental instalado. Nos serviços de ferramentaria o sistema realiza o auto ajuste da ferramenta automaticamente sem a parada de produção. Nos serviços de manutenção o sistema realiza a autocorreção de falhas automaticamente sem a parada de produção.

O modelo simulado de manufatura avançada atinge um estágio de produção de melhor performance com uma produção mais balanceada dos recursos de produção.

5 CONCLUSÃO

O modelamento e a simulação de uma linha de produção típica de subconjuntos soldados exemplifica uma aplicação de conceitos de Indústria 4.0 para análise dos benefícios que podem ser obtidos com a implantação de uma fábrica com manufatura avançada.

O modelo de manufatura convencional apresentado permitiu uma análise comparativa entre os métodos de simulação, de eventos discretos e baseado em agentes, e observar as diferenças de modelagem para cada método e a complexidade de transportar uma situação de produção para os elementos de modelagem específicos de cada *software* de simulação. O trabalho apresenta as possibilidades de utilização de métodos de simulação para avaliar os benefícios de implementação da manufatura avançada possibilitando definir quais funcionalidades podem trazer melhores resultados para a produção, e traçar um plano de investimentos baseado nos resultados das simulações.

No comparativo entre a manufatura convencional e a manufatura avançada, os diagramas de estados representando os modelos de simulação baseado em agentes se apresentaram mais flexíveis para a representação das funcionalidades individuais dos equipamentos. As simulações de manufatura convencional e de manufatura avançada pelos métodos de modelagem baseado em agentes apresentam diferenças de comportamento alterando os resultados nos indicadores de produção. Esta diferença evidencia os benefícios de aumento de produtividade que a manufatura avançada proporciona com a implementação de algumas alterações de processo baseados nas tecnologias que caracterizam uma manufatura avançada.

Os principais conceitos utilizados no modelo de manufatura avançada baseados nos pilares de Internet das Coisas e Sistemas Ciber Físicos foram: o uso de sensores avançados para monitoração e controle do processo e a inteligência artificial que deve ser utilizada para a correção automática com o sistema em operação sem a interferência direta do operador nos equipamentos. No planejamento de produção tem-se o uso de sistema avançado de plano de produção que utiliza as informações de produto que está sendo produzido que pode estar ligado a etiquetas de rastreabilidade dos produtos para identificar a produção e reavaliar o sequenciamento otimizando o uso dos recursos.

Nesta dissertação obteve-se resultados sobre os índices de produtividade. Não estão considerados os indicadores de qualidade e retrabalho que devem ocorrer com as alterações devido a introdução das inovações. A flexibilidade não teve alteração por não haver mudanças nos produtos e nos meios de produção. Estas análises de impacto nos demais indicadores e

também em nível mais amplo como o impacto na cadeia de suprimentos exige maior complexidade na modelagem e simulação. São sugestões para pesquisas futuras, onde poderão ser necessários outros métodos de simulação como a modelagem de dinâmica de sistemas.

As indústrias iniciam as implementações das inovações que direcionam a processos de manufatura avançada, com a crescente oferta de produtos e serviços no mercado corporativo. Estas aplicações tornarão possíveis em curto espaço de tempo uma amostragem de casos para realização de pesquisas de estudos de casos de aplicações de manufatura avançada. Este é um tema importante para pesquisa futura para validar com casos reais de implantação do modelo de manufatura avançada.

Uma questão relevante que se é levantada na sequência diz respeito ao impacto da Quarta Revolução Industrial sobre o consumo energético e a sustentabilidade dos processos produtivos. Em qual proporção a introdução de novos materiais e produtos e processos inovadores irão mudar a distribuição de demanda de energia, e como os novos produtos como as baterias elétricas utilizada pelos equipamentos autônomos poderão impactar no modo de distribuição de energia e no descarte destes no meio ambiente. A revolução industrial, como o próprio nome sugere, abre lacunas em diversas frentes de pesquisa e os gráficos neste trabalho apresentam um crescente número de pesquisas no tema e em diversas disciplinas que possam ser afetadas pelas inovações geradas pela revolução.

REFERÊNCIAS

ACATECH NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE AND ENGINEERING.

Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: final report of the industrie 4.0 working group. Alemanha: Federal Ministry of Education and Research, 2013.

ACATECH NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE AND ENGINEERING. **Smart service welt:** recommendations for the strategic initiative web-based services for business. Alemanha: Federal Ministry of Education and Research, 2015.

ADEYERI, M. K.; MPOFU, K.; ADENUGA, O. Integration of agent technology into manufacturing enterprise: a review and platform for industry 4.0. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 654., 2015, Dubai. **Proceedings...** Dubai: IEEE, 2015. p. 1625-1634.

BALAJI, P. G.; SRINIVASAN, D. An introduction to multi-agent systems. In: SRINIVASAN, D.; JAIN, L. C. **Innovations in multi-agent systems and applications – 1.** Berlin: Springer, 2010. Cap. 1, p. 1-27.

BDI FEDERATION OF GERMAN INDUSTRIES. **Industrie 4.0:** legal challenges of digitalisation. Alemanha: BDI, 2015.

BORSHCHEV, A. **The big book of simulation modeling:** multimethod modeling with AnyLogic 6. EUA: Anylogic North America, 2013.

BORSHCHEV, A.; FILIPPOV, A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In: THE 22ND INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE SYSTEM DYNAMICS SOCIETY, 2004, Oxford. **Proceedings...** Oxford: Wiley, 2004. p. 45.

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S.; OLSDER, G. J. Introduction to the modelling, control and optimization of discrete event systems. In: ISIDORI, A. **Trends in control:** a European perspective. Londres: Springer, 1995. p. 217-291.

CNI CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Desafios para indústria 4.0 no Brasil.** Brasília: CNI, 2016.

DARWIN, C. **A origem das espécies.** 1ª. Ed. São Paulo: Editora Martin Claret, 2014.

DIRECTORATE-GENERAL FOR INTERNAL POLICIES. POLICY DEPARTMENT A: ECONOMIC AND SCIENTIFIC. **Industry 4.0:** study for ITRE committee . União Européia: Parlamento Europeu, 2016.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: hit or hype? **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v.8, n.2, p.56-58, jun.2014.

FIESP FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - DEPECON DEPARTAMENTO DE PESQUISAS E ESTUDOS ECONÔMICOS. **Panorama da indústria de transformação brasileira**. São Paulo: FIESP, 13ª ed., 2016.

FIESP FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - DECOMTEC DEPARTAMENTO DE COMPETITIVIDADE E TECNOLOGIA. **Situação econômica do país e a deterioração financeira da indústria de transformação**. São Paulo: FIESP, 2016.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: 49TH HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, Koloa, 2016. **Proceedings...** Koloa: IEEE Computer Society, 2016, p.3928-3937.

IIC INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM. **Industrial internet reference architecture..** EUA: Industrial Internet Consortium, 2015.

JENNINGS, N. R.; WOOLDRIDGE, M. J. Applications of intelligent agents. In: JENNINGS, N. R.; WOOLDRIDGE, M. J. **Agent technology: foundations, applications, and markets**. Berlin: Springer, 1998. Cap. 1, p. 28.

JUCHEM, M.; BASTOS, R. M. **Engenharia de Sistemas Multiagentes: Uma Investigação sobre o Estado da Arte**. 2001. 43f. Relatório Técnico 014/2001 – Faculdade de Informática PUCRS, Porto Alegre, 2001.

KANG, H. S. et al. Smart manufacturing: past research, present findings, and future directions. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology**, v.3, n.1, p.111-128, jan. 2016.

KHAITAN, S. K.; MCCALLEY, J. D. Design techniques and applications of cyberphysical systems: a survey. **IEEE Systems Journal**, v.9, n.2, p.350-365, jun. 2015.

KOESTLER, A. **The Ghost in the Machine**. [S.l.:s.n.], 1967.

LASI, H. et al. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v.6, n.4, p.239-242, aug. 2014.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0: based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v.3, p.18-23, jan. 2015.

LEITAO, P. et al. Smart agents in industrial cyber-physical systems. **Proceedings of the IEEE**, v.104, n.5, p.1086-1101, maio 2016.

LEITÃO, P.; MARIK, V.; VRBA, P. Past, present, and future of industrial agent applications. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v.9, n.4, p.2360-2372, nov. 2013.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v.4, n.3, p.151-162, set. 2010.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Introductory tutorial: agent-based modeling and simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Savannah, 2014. **Proceedings...** Savannah: IEEE, 2014, p.6-20.

MARTINS, R. A.; MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B. **Guia para elaboração de monografia e tcc em engenharia de produção**. São Paulo: Atlas, 2014.

METZGER, M.; POLAKÓW, G. A Survey on applications of agent technology in industrial process control. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v.7, n.4, p. 570-581, nov.2011.

MITROFF, I. et al. On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon. **Interfaces**, v.4, n.3, p.46-53, maio 1974.

MONOSTORI, L.; VANCZA, J.; KUMARA, S. R. T. Agent-based systems for manufacturing. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, v.55, n.2, p. 697-720, fev.2006.

NEGAHBAN, A.; SMITH, J. S. Simulation for manufacturing system design and operation: literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems**, v.33, n.2, p.241-261, abr.2014.

RADZIWON, A. et al. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. In: 24TH DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION, Viena, 2013. **Proceedings...** Viena: Procedia Engineering, 2014, v.69, p.1184-1190.

RAWUNG, R. H.; PUTRADA, A. G. Cyber physical system: paper survey. In: 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ICT FOR SMART SOCIETY, Indonésia, 2014. **Proceedings...** Indonésia: IEEE, 2014, p.273-278.

SAHA, H. N. et al. Recent trends in implementation of internet of things: a review. In: IEEE 7TH ANNUAL INFORMATION TECHNOLOGY, ELECTRONICS AND MOBILE COMMUNICATION, Vancouver, 2016. **Proceedings...** Vancouver: IEEE, 2016, p.1-6.

SAUTER, R.; BODE, M.; KITTELBERGER, D. **How industry 4.0 is changing**: how we manage value creation. White Paper - Horváth & Partners Management Consultants, Stuttgart, 2015.

SCHATSKY, D.; TRIGUNAIT, A. **Internet of Things**: dedicated networks and edge analytics will broaden adoption. White Paper - Deloitte University Press, New York, 2016.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. Geneva: World Economic Forum, 2016.

SCOPUS. Base de dados de pesquisa literária. Disponível em: <<https://www.scopus.com>>. Acesso em: mar 2017.

SHPILEVOY, V. et al. Multi-agent system “smart factory” for real-time workshop management in aircraft jet engines production. In: 11TH IFAC WORKSHOP ON INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS, São Paulo, 2013. **Proceedings...** São Paulo: Elsevier Science Direct, 2013, p.65-70.

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. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT, Malasia, 2014. **Proceedings...** Malasia: IEEE, 2015, p.697-701.

SIEBERS, P. O. et al. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! **Journal of Simulation**, v.4, n.3, p.204-210, set. 2010.

SILVA, R. M. D.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Modelagem de sistemas de controle da indústria 4.0 baseada em holon, agente, rede de Petri e arquitetura orientada a serviços. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, Natal, 2015.

SURESH, P. et al. A state of the art review on the Internet of Things (IoT): history, technology and fields of deployment. In: IEEE - INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, ENGINEERING AND MANAGEMENT RESEARCH, India, 2014. **Proceedings...** India: IEEE, 2015, p.1-8.

TRAPPEY, A. J. C. et al. A review of technology standards and patent portfolios for enabling cyber-physical systems in advanced manufacturing. **IEEE Access**, v.4, p.7356-7382, out.2016.

UBS. **Extreme automation and connectivity**: the global, regional, and investment implications of the Fourth Industrial Revolution. In: WORLD ECONOMIC FORUM, Davos, 2016.

VDI/VDE ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS DA ALEMANHA E ASSOCIAÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA PARA ELÉTRICA, ELETRÔNICA E TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO. **Reference architecture model industrie 4.0**. Alemanha: VDI/VDE, 2015.

VRBA, P. et al. Rockwell Automation's holonic and multiagent control systems compendium. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.41, n.1, p.14-30, jan.2011.

WANG, S. et al. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v.12, n.1, p.1-10, jan.2015.

WANG, S. et al. Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. **Computer Networks**, v.101, p.158-168, jun.2016.

WEIMER, C. W.; MILLER, J. O.; HILL, R. R. Agent-based modeling: an introduction and primer. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Washington, 2016. **Proceedings...** Washington: IEEE, 2017, p.65-79.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to MultiAgent Systems**. Liverpool: John Wiley & Sons, 2002.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. Intelligent agents: theory and practice. **The Knowledge Engineering Review**, v.10, n.2, p.115-152, 1995.

YANG, C.; SHEN, W.; WANG, X. Applications of internet of things in manufacturing. In: IEEE 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SUPPORTED COOPERATIVE WORK IN DESIGN, China, 2016. **Proceedings...** China: IEEE, 2016, p.670-675.

ANEXO A – TELAS DE EXECUÇÃO DO MODELO NO ANYLOGIC

