UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS–GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

HIRAM CARLOS COSTA AMARAL

SISTEMA INTELIGENTE ÁGIL DE PROCESSO EVOLUTIVO - SIAPE:
Um protótipo brasileiro de sistemas EPS

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Duarte Cavalcante

MANAUS – AMAZONAS – BRASIL
Março / 2016

HIRAM CARLOS COSTA AMARAL

SISTEMA INTELIGENTE ÁGIL DE PROCESSO EVOLUTIVO - SIAPE:
Um protótipo brasileiro de sistemas EPS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, área de concentração Controle e Automação de Sistemas do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas

Universidade Federal do Amazonas – UFAM

Faculdade de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Duarte Cavalcante

MANAUS – AMAZONAS – BRASIL

Março / 2016

Amaral, Hiram Carlos Costa
A485s Sistema Inteligente Ágil de Processo Evolutivo - SIAPE: Um protótipo brasileiro de Sistemas EPS / Hiram Carlos Costa amaral. 2016.
151 f. : il. color; 31 cm.

Orientador: André Luiz Duarte Cavalcante.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Engenharia. 2. Automação e Controle. 3. Sistemas Evolutivos (EPS). 4. Cyber-Physical Systems. 5. SIAPE. I. Cavalcante, André Luiz Duarte II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

Errata

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se

HIRAM CARLOS COSTA AMARAL

SISTEMA INTELIGENTE ÁGIL DE PROCESSO EVOLUTIVO-SIAPE: UM PROTÓTIPO BRASILEIRO DE SISTEMAS EPS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração Controle e Automação de Sistemas.

Aprovado em 28 de março de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Luiz Duarte Cavalcante, Presidente

Universidade Federal do Amazonas- UFAM

Prof. Dr. Lucas Carvalho Cordeiro, Membro

Universidade Federal do Amazonas- UFAM

Prof. Dr. José Francisco de Magalhães Netto, Membro

Universidade Federal do Amazonas- UFAM

A meus pais.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por me proporcionar a saúde e as condições necessárias para realizar este trabalho, a meus falecidos pais José Maria de Souza Amaral e Maria de Nazaré da Costa Amaral por me trazerem à vida, e por ter a certeza que ficariam felizes por essa realização. À minha amada esposa, Maria de Jesus Ferreira Amaral, meus filhos Thiago Amaral, Nicole Amaral e Paula Lima por suas participações e apoio neste projeto. Agradeço também ao meu orientador prof. Dr. André Cavalcante por sua paciência e ensinamentos e conhecimentos repassados que viabilizaram a realização deste trabalho de pesquisa, aos professores do PPGEE, Dr. João Edgar, Dr. Vicente Lucena, Dr. Cícero Costa, Dr. Lucas Cordeiro, Dr. Waldir Sabino, Dr. Eddie Filho, Dr. Carlos Caldas, Dra. Marly Costa, Dr. Celso Carvalho e Dr. Carlos Cruz pela dedicação e seriedade na formação de mestres na área da Engenharia. Aos colegas do Mestrado que muito me auxiliaram nas horas de dificuldades, são eles: Vandermi Costa, Ricardo Erickson, Orlewilson Bentes, Adriano Frutuoso, Victor Lauria, Cláudio Eddy, Kenny Vinente, Fernando Souza, Márcia Drumand, Wollace Picanço e Rafael Mendonça. Aos técnicos e secretárias do PPGEE e do CETELI por me ajudarem nos procedimentos acadêmicos. São eles: Sandro Monteiro, Ricardo Almeida, Renata Freitas e Evani Larisse. Não poderia deixar de lembrar de duas pessoas que ajudaram com o cafezinho são elas: Glória e a Nira.

Meus agradecimentos também às instituições Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM, ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologia Eletrônica e da Informação - CETELI e à empresa Samsung Eletrônica do Amazonas pelo investimento financeiro e utilização de seus laboratórios e equipamentos em todas as fases de desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

"Tu, Senhor e Deus nosso, és digno de receber a glória, a honra e o poder, porque criaste todas as coisas, e por tua vontade elas existem e foram criadas". Apocalipse 4:11)

Resumo

Paradigmas emergentes de fabricação têm sido usados na tentativa de solucionar o problema da customização, isto é, a manufatura de produtos em lotes baixos e com elevados níveis de variedades de produtos. Notadamente os *Evolvable Production Systems (EPS)* tem conseguido tratar o problema através do conceito de agentes mecatrônicos e de uma inversão do local de onde a inteligência do processo produtivo está dentro do sistema de manufatura. Entretanto, ainda há várias lacunas e barreiras ao amplo uso de EPS, dentre elas a necessidade de protótipos de sistemas que contemplem os conceitos de sistemas evolutivos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema evolutivo denominado de Sistema Inteligente Ágil de Processo Evolutivo - SIAPE que visa adaptação à demanda e a evolução do sistema produtivo de acordo com a evolução do produto. Para testar a viabilidade do SIAPE foi criado primeiramente um protótipo de automação simplificado chamado de Produto UFAM que é comparado com o protótipo SIAPE propriamente dito em torno de suas aderências às exigências da Plataforma da Indústria 4.0 ($i4.0$).

Palavras-chave: Engenharia, Automação e Controle, Sistemas Evolutivos (*EPS*), *Cyber-Physical Systems*, SIAPE.

Abstract

Manufacturing emerging paradigms have been used in an attempt to solve the problem of customization, i.e. the manufacture of products with mid and low batches and high variability. Namely Evolvable Production Systems (EPS) has been able to address the problem through the concept of mechatronics agents and a reversal of the local where intelligence (the production process) is in th the manufacturing system. However, there are still many gaps and barriers for the widespread use of EPS, namely the real prototypes that address the concepts of evolvable systems. This work presents the development of an evolvable system called Agile Intelligent System for Evolvable Process (SIAPE), which aimed adpats to demand variations and the evolution of the production system according to the changing of the product. To test the viability of SIAPE was first created a simplified automation prototype called Product UFAM which is compared with the SIAPE prototype itself among their compliance with the requirements of Industry Platform 4.0 (i4.0).

Keywords: Engineering, Automation and Control, Evolutionary Systems (EPS), Cyber-Physical Systems, MeDSE.

Lista de ilustrações

Figura 1 – SIAPE: Paradigmas de produção 26
Figura 2 – Projetos Europeus e os sistemas evolutivos 26
Figura 3 – EUA: Linha do tempo dos CPS 27
Figura 4 – Brasil: Atraso da Indústria Brasileira 28
Figura 5 – SIAPE - Metodologia da pesquisa 31
Figura 6 – Revoluções Industriais, problemas e soluções 35
Figura 7 – IADE: Arquitetura de referência EPS 39
Figura 8 – Evolução do Paradigmas de Produção 40
Figura 9 – Visão geral da Arquitetura proposta por Cavalcante 42
Figura 10 – Arquitetura para uma aplicação em um sistema de montagem 43
Figura 11 – Implementação de referência EPS 44
Figura 12 – Aplicação da arquitetura EPS no SIAPE 45
Figura 13 – SIAPE: Ciclo de vida do produto 48
Figura 14 – Redução do Lead time de Produção 50
Figura 15 – SIAPE: FIPA – ACL 52
Figura 16 – MeDSE - Fases do paradigma EPS 53
Figura 17 – Método de Desenvolvimento de Sistemas Evolutivos - MeDSE 58
Figura 18 – MeDSE: Dividindo o problema global em regional e local 60
Figura 19 – MeDSE: Fase de Conceitos 62
Figura 20 – MeDSE - Fase de Realizações 63
Figura 21 – MeDSE: Realimentações do método 64
Figura 22 – MeDSE: Fase de Finalizações 65
Figura 23 – MeDSE: Descrição da atividades nas etapas 67
Figura 24 – SIAPE: Problema Global 69
Figura 25 – SIAPE: Requisitos 72
Figura 26 – SIAPE: Cenário concepção do sistema 73
Figura 27 – SIAPE: Geração do documento de concepção do sistema 74
Figura 28 – SIAPE: Arquitetura SIAPE aplicada ao PG 76
Figura 29 – SIAPE: Módulos de Hardware e Software 78
Figura 30 – Caso de uso: Realizar plano 80
Figura 31 – SIAPE: Diagrama de sequência 81

Figura 32 – SIAPE: Diagrama de atividades 82
Figura 33 – SIAPE: Diagrama de estados 83
Figura 34 – Esteira: Da modelagem à simulação 84
Figura 35 – Carimbador: Da modelagem à simulação 85
Figura 36 – Classe AcHw 85
Figura 37 – Modelagem Classe YPA 85
Figura 38 – Modelagem classe Order 86
Figura 39 – Modelagem classe Anagrama 86
Figura 40 – Modelagem Mensagens FIPA 87
Figura 41 – Simulação de Hardware 87
Figura 42 – Simulação de Software 88
Figura 43 – Projeto de Sistema 90
Figura 44 – Evolução dos módulos: do circuito elétrico aos módulos 92
Figura 45 – Evolução da esteira: do modelo ao protótipo 93
Figura 46 – SIAPE : Parte elétrica 93
Figura 47 – SIAPE : Fontes 93
Figura 48 – SIAPE : Roteador 94
Figura 49 – SIAPE : Interface elétrica 94
Figura 50 – SIAPE : Circuito elétrico módulo 94
Figura 51 – SIAPE : Interface 95
Figura 52 – SIAPE : Acesso Hardware 95
Figura 53 – SIAPE: YPA 96
Figura 54 – SIAPE: ORDER 96
Figura 55 – SIAPE: ANAGRAMA 97
Figura 56 – Etapa de testes 98
Figura 57 – Etapa de integração modular e validação 100
Figura 58 – Detecção de desconexão de módulos 101
Figura 59 – Etapa de integração e validação sistêmica 103
Figura 60 – Etapa de Comissionamento 105
Figura 61 – Etapa de Entrega 107
Figura 62 – Produto UFAM 109
Figura 63 – Diagrama em bloco do Produto UFAM 110
Figura 64 – SIAPE - Experimentação 111
Figura 65 – Ambiente de produção para o estudo de caso 112
Figura 66 – Configuração do Ambiente de produção para a experimentação 114
Figura 67 – Power dos dispositivos 114
Figura 68 – Rede MeDSE siape - ip:10.0.0.1 115
Figura 69 – Rede MeDSE siape - Raspberry Pi - 10.0.0.5 115
Figura 70 – Plataforma Jade - Agente YPA 116

Figura 71 – Plataforma Jade – Agente AcHw 116
Figura 72 – Plataforma Jade - Agente Order 116
Figura 73 – Plano de produção montado 117
Figura 74 – SIAPE: trecho extends 118
Figura 75 – SIAPE: trecho achw 118
Figura 76 – SIAPE: trecho GetLetters 118
Figura 77 – SIAPE: trecho tablePlan 119
Figura 78 – SIAPE: trecho MoveToStart 119
Figura 79 – SIAPE: trecho MoveToEnd 119
Figura 80 – SIAPE: trecho Status 120
Figura 81 – Log passagem UFAM para UTAM 120
Figura 82 – Realizando Plano de produção 121
Figura 83 – Interface gráfica com Plano de produção 122
Figura 84 – Plano de produção realizado 123
Figura 85 – SIAPE - Ciclo de vida do produto 126
Figura 86 – Ciclo de vida do produto: Fase Produção 126
Figura 87 – Ciclo de vida do produto: Lead time. 127
Figura 88 – SIAPE- Palete 128
Figura 89 – SIAPE- ANAGRAMA UFAM 129
Figura 90 – SIAPE- Tensão e corrente 130
Figura 91 – SIAPE: Setup e Ramp up 131
Figura 92 – SIAPE: Lead time 132
Figura 93 – SIAPE: Anagramas, módulos e palavras 133
Figura 94 – SIAPE: Negociação de agentes 134
Figura 95 – SIAPE: NR-12 Segurança 136

Lista de tabelas

Tabela 1 – Itens processados em cada etapa 67
Tabela 2 – Tabela da etapa 1 - Conceitos 69
Tabela 3 – Tabela da etapa 2 - Análises 75
Tabela 4 – Tabela da etapa 4 - Projetos 89
Tabela 5 – Tabela da etapa 5 - Implementações 92
Tabela 6 – Tabela da etapa 6 - Testes 98
Tabela 7 – Tabela da etapa 7 - Integração modular e validação 100
Tabela 8 – Tabela da etapa 8 - Integração e validação sistêmica 102
Tabela 9 – Tabela da etapa 9 - Comissionamento 104
Tabela 10 – Tabela da etapa 10 - Entrega 106
Tabela 11 – Legenda da planta do produto UFAM 111
Tabela 12 – PC - Itens características de software 113
Tabela 13 – PC - Itens características de hardware 113
Tabela 14 – Roteador - Itens características de software 113
Tabela 15 – Roteador - Itens características de hardware 113
Tabela 16 – SIAPE - Itens características de hardware 114
Tabela 17 – SIAPE - REQUISITOS / RESTRIÇÕES /CAPACIDADES 125
Tabela 18 – SIAPE X PRODUTO UFAM: TEMPO DE PRODUÇÃO (s) 139
Tabela 19 – SIAPE X PRODUTO UFAM: STAMPER, OPERADOR e TROCA(s) 140
Tabela 20 – SIAPE X PRODUTO UFAM: TEMPO DE BOOTSTRAP (s) 141
Tabela 21 – SIAPE X PRODUTO UFAM: TEMPO DE PRODUÇÃO(s) 142

Lista de abreviaturas e siglas

AcHw	Acesso Hardware
ACL	Agent Communication Language Specification - Especificação da Linguagem de Comunicação de Agentes
AGV	Automated Guided Vehicle - Veículo Guiado Autonomamente
AI	Artificial Intelligence - Inteligência Artificial
AMS	Agent Managment System - Sistema de Gerência de Agentes
At	Componente atômico
ATD	Assistência Técnica e Descarte
BMS	Bionic Manufacturing Systems - Sistema de Manufatura Biônica
C	A parte comunicação do MESC principal e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRc;
CH1	Chave on-off
CLA	Coalition Leader Agent - Agente Líder de Coalisão
Cp	Compponente composto
CPS	Cyber Physical System - Sistema Ciber-físico
DA	Deploy Agent - Agente de distribuição
DF	Directory Facilitator - Facilitador do Diretório
DPS	Documento de Projeto de Sistema
DRQI	Documento de RQI
E	A parte eletrônica do MESC principal e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRe;

E4.0	Engenharia 4.0
EAS	Evolvable Assembly Systems - Sistemas de Montagem Evolutivos
EEme	Entidade eletromecânica da esteira
EEml	Entidade eletromecânica das letras
END	Engenharia de Desenvolvimento
ENP	Engenharia de Processo
EPS	Evolvable Production System - Sistemas de Produção Evolutivos
Et	Especificação técnica
EtC	Especificação técnica de comunicação
EtE	Especificação técnica elétrica
EtEe	Especificação tecnica elétrica da esteira
EtEf	Especificação tecnica elétrica da fonte
EtEie	Especificação tecnica mecânica da interface elétrica
EtEm	Especificação tecnica elétrica do módulo
EtEr	Especificação tecnica elétrica do roteador
EtM	Especificação técnica mecânica
EtMe	Especificação tecnica mecânica da esteira
EtMm	Especificação tecnica mecânica do módulo
EtS	Especificação técnica de software
EtSah	Especificação tecnica do acesso hardware
EtSan	Especificação tecnica de software agente anagrama
EtSao	Especificação tecnica de software agente order
EtSis	Especificação tecnica interface de software
EtSpf	Especificação tecnica de software protocolo FIPA
EtSyp	Especificação tecnica do YPA
EU	European Union - União Europeia

FIPA	Foundation for Inteligent Physical Agents - Fundação para Agentes Físicos Inteligentes
FMS	Flexible Manufacturing System - Sistemas de Manufatura Flexíveis
FSM	Finite State Machine - Máquina de Estados Finitos
FT	Faculdade de tecnologia
HMS	Holonic Manufacturing Systems - Sistemas de Manufatura Holônica
I3.0	Indústria 3.0
i4.0	Indústria 4.0
IADE	IDEAS Agent Development Environment - Ambiente de Desenvolvimento de Agentes do IDEAS
IDEAS	Instantly Deployable Evolvable Assembly Systems Project - Projeto de Sistemas de Montagem Evolutivos e Distribuíveis Instantaneamente
IHM	Interface Homem-Máquina
Iho	Integração horizoantal
Ihu	Integração Humana
IOP	Instalação e Operações
IoT	Internet of Things - Internet das Coisas
Ive	Integração vertical
JADE	Java Agent DEvelopment framwork - framework de Desenvolvimento de Agentes em Java
LP1 a LP5	Lâmpadas correspondentes aos solenoides SL1 a SL5
LP6	Lâmpada correspondente ao sensor 0
LP7	Lâmpada correspondente ao sensor 6
M	A parte mecânica do MESC principal e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRm;
MA	Mechatronic Agent - Agente Mecatrônico
MAS	Multi-Agent Systems - Sistemas Multiagentes

ME	A parte ME do MESC contendo a integração das partes M e E e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRme;
ME	Mecânica e Eletrônica
MeDSE	Metodologia para Desenvolvimento de Sistemas Evolutivos
MÊS	Integração das partes M, E e S do MESC principal e tem seus requisitos refinados o rotulados como RQRmes;
MES	Mecânica e Eletrônica e Software
MESC	Mecânica, Eletrônica, Software e Comunicação
MESCA	MESC do anagrama A
MESCa	O módulo mecatrônico que realiza a letra A e tem seus requisitos rotulados como RQRA;
MESCE	MESC do anagrama E
MESCe	O módulo mecatrônico que realiza a letra E e tem seus requisitos rotulados como RQRE.
MESCF	MESC do anagrama F
MESCf	O módulo mecatrônico que realiza a letra F e tem seus requisitos rotulados como RQRF ;
MESCM	MESC do anagrama M
MESCm	O módulo mecatrônico que realiza a letra M e tem seus requisitos rotulados como RQRM;
MESCmain	Parte do MESC principal do sistema contendo a integração das partes M, E, S e C e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRmesc;
MESCT	MESC do anagrama T
MESCt	O módulo mecatrônico que realiza a letra T e tem seus requisitos rotulados como RQRT;
MESCU	MESC do anagrama U
MESCu	O módulo mecatrônico que realiza a letra U e tem seus requisitos rotulados como RQRU;
MKT	Marketing

MRA	Machine Resource Agent - Agente de Recurso de Máquina
MT	Manual técnico
MU	Manual de usuário
NR-12	Norma Regulatória número 12
OMAC	Organization for Machine Automation and Control - Organização para Máquinas de Automação e Controle
PA	Product Agent - Agente Produto
PC	Personal Computer - Computaor pessoal
PG	Problem Global
PIA	Produção, Inspeção e Armazenagem
PL	Problema Local
PLC	Programable Logic Controller - Controlador Lógico Programável
PR	Problema Regional
ProtC	Protótipo de comunicação
ProtE	Protótipo elétrico
ProtM	Protótipo mecânico
ProtS	Protótipo de software
PscC	Projeto de sistema e de classe de comunicação
PscE	Projeto de sistema e de classe da elétrica
PscM	Projeto de sistema e de classe da mecânica
PscS	Projeto de sistema e de classe de software
RFID	Radio-Frequency Identification - Identificação Rádio-frequência
RL1 a RL6	Relé correspondente aos sensores S0 a S5
RL7	Relé do motor DC
RL8	Relé do motor DC
RMS	Reconfigurable Manufacturing Systems - Sistemas de Manufatura Reconfiguráveis

RQ01	Cliente-Performance ciclo de produção mínimo
RQ02	Cliente-Performance setup simplificado
RQ03	Cliente-Performance ramp up mínimo
RQ04	Cliente-Performance lead time mínimo
RQ05	Cliente-Produto Ufam carimbar A,F,M,T,U
RQ06	Cliente-Produto Ufam carimbar palavra a partir do RQ5
RQ07	Interno-EPS modularidade
RQ08	Interno-EPS plugabilidade
RQ09	Interno-EPS reconfigurabilidade
RQ10	Enterno-Globalização Customização
RQ11	Externo-Governo NR-12 (Segurança)
RQ12	Externo-Economia Custos
RQ13	Externo-IoT Plug & Work
RQ14	Externo-i4.o Integração Horizontal
RQ15	Externo-Academia Estado da arte
RQI	Requisitos Iniciais
RQRl	Requisitos refinados do sistema na forma local
RQRm	Requisitos refinados da mecânica
RQRme	Requisitos refinados da mecânica-elétrica
RQRmes	Requisitos refinados da mecânica-elétrica-software
RQRmesc	Requisitos refinados da mecânica-elétrica-software-comunicação
RQRr	Requisitos refinados do sistema na forma regional
RQRs	Requisitos refinados do sistema
RS01	Restrição de tensão DC1
RS02	Restrição de corrente DC
RS03	Restrição Força do módulo - elétrica

S	A parte de software do MESC principal e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRs;
S0	Sensor de Entrada
S1	Sensor correspondente à letra M
S2	Sensor correspondente à letra A
S3	Sensor correspondente à letra F
S4	Sensor correspondente à letra T
S5	Sensor correspondente à letra U
S6	Sensor de Saída
SimC	Simulação da parte de comunicação
SimE	Simulação da parte elétrica
SimM	Simulação da parte mecânica
SimS	Simulação da parte de software
SL1	Solenoide correspondente à letra M
SL2	Solenoide correspondente à letra A
SL3	Solenoide correspondente à letra F
SL4	Solenoide correspondente à letra T
SL5	Solenoide correspondente à letra U
SOA	Service Oriented Architecture - Arquiteturas Orientadas a Serviços
SUP	Suprimentos
TEA	Transport Entity Agent - Agente Entidade de Transporte
TProtC	Teste do protótipo de comunicação
TProtE	Teste do protótipo elétrico
TProtM	Teste do protótipo mecânico
TProtS	Teste do protótipo de software
TSA	Transport System Agent - Agente de Sistema de Transporte

UEA	Universidade do Estado do Amazonas
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UTAM	Instituto de tecnologia do Amazonas
VDI	Vendas e Distribuição
YPA	Yellow Pages Agent - Agente Páginas Amarelas

Sumário

1 INTRODUÇÃO 25
1.1 Contextualização Global 25
1.1.1 União Europeia (UE) 26
1.1.2 Estados Unidos da América (EUA) 27
1.1.3 Brasil: Saindo da Indústria Mecânica e se estabelecendo na Indústria Flexível 27
1.2 Tema e Problema 28
1.2.1 Delimitação do tema 29
1.2.2 Especificação do problema 29
1.2.3 Questões de pesquisa (QP) e hipóteses relacionadas (HR) 29
1.2.4 Objetivo geral e específicos 29
1.3 Proposta do trabalho de dissertação 30
1.3.1 A proposta do projeto 30
1.3.2 Metodologia da pesquisa 31
1.3.3 Contribuições relevantes 32
1.4 Organização do trabalho 33

2 CONCEITOS 34
2.1 Panorama dos paradigmas de produção até os dias atuais . . . 34
2.1.1 Revoluções industriais 34
2.1.2 Da máquina de Heron às máquinas flexíveis 35
2.1.3 O surgimento dos sistemas flexíveis baseados no paradigma FMS 35
2.1.4 O surgimento dos sistemas emergentes baseados em BMS, HMS e RMS 36
2.1.5 O surgimento da IoT, dos CPS e da Indústria 4.0 37
2.2 Sistemas Evolutivos de Produção - *EPS* 38
2.2.1 Visão geral da arquitetura EPS 41
2.2.2 Descrição da Arquitetura EPS de Cavalcante 42
2.2.3 A Arquitetura do SIAPE 44
2.3 Conceituação teórica de termos importantes para a pesquisa . 46
2.3.0.1 Auto-organização e emergência 46
2.3.1 Plataforma da Indústria 4.0 47
2.3.2 Termos do Sistema de Produção 48
2.3.3 Agentes e Sistemas Multi-Agentes (MAS) 50
2.3.4 O protocolo FIPA – Foundation for Intelligent Physical Agents 51

2.4 As Fases do Paradigma Evolutivo: acadêmica, experimental e holística . . . 52
2.4.1 A Fase Acadêmica do Paradigma Evolutivo . . . 53
2.4.2 A Fase Experimental do Paradigma Evolutivo . . . 54
2.4.3 A Fase Holística do Paradigma Evolutivo . . . 55

3 DESENVOLVIMENTO . . . 57
3.1 Visão do Método de Desenvolvimento de Sistemas Evolutivos (MeDSE) . . . 57
3.1.1 Definição de agente mecatrônico, problema global, problema regional e problema local . . . 59
3.1.2 A Fase de Conceitos . . . 61
3.1.3 A Fase de Realizações . . . 62
3.1.4 A Fase de Finalizações . . . 64
3.2 Aplicação do MeDSE ao SIAPE . . . 67
3.2.1 ETAPA 1 - CONCEITOS . . . 69
3.2.2 ETAPA 2 - ANÁLISES . . . 75
3.2.3 ETAPA 3 - SIMULAÇÕES . . . 79
3.2.4 ETAPA 4 - PROJETOS . . . 89
3.2.5 ETAPA 5 - IMPLEMENTAÇÕES . . . 92
3.2.6 ETAPA 6 - TESTES . . . 98
3.2.7 ETAPA 7 - INTEGRAÇÃO MODULAR E VALIDAÇÃO . . . 100
3.2.8 ETAPA 8 - INTEGRAÇÃO E VALIDAÇÃO SISTÊMICA . . . 102
3.2.9 ETAPA 9 - COMISSIONAMENTO . . . 104
3.2.10 ETAPA 10 - ENTREGA . . . 106

4 EXPERIMENTAÇÃO . . . 108
4.1 Produto UFAM . . . 108
4.1.1 Descrição do Produto UFAM . . . 108
4.1.1.1 Descrição de funcionamento do Produto UFAM . . . 109
4.2 Experimentação - Configurações do SIAPE . . . 110
4.2.1 Objetivos da configuração para a experimentação . . . 110
4.2.2 A configuração para a experimentação . . . 111
4.2.3 Descrições de software e hardware do ambiente de produção. . . . 112
4.2.4 Configuração do ambiente de produção. . . . 114
4.3 Realização da experimentação . . . 117

5 ANÁLISE DE RESULTADOS E VALIDAÇÃO . . . 124
5.1 Análise de resultados das restrições, requisitos e capacidades . 126
5.1.1 Análise das restrições de RS1 a RS3 . . . 130

5.1.2 Análise e validação dos requisitos RQ1 a RQ6 130
5.1.3 Análise e validação dos requisitos RQ07 a RQ12 133
5.1.4 Análise e validação dos requisitos RQ13 a RQ15 136
5.1.5 Comparações SIAPE versus Produto UFAM 139
5.1.6 Considerações finais 142

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 144

REFERÊNCIAS 147

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo descreve um breve resumo dos principais pontos do contexto global onde este trabalho está inserido, começando por identificar a criação dos sistemas evolutivos na União Europeia (UE) e os sistemas ciber-físicos nos Estados Unidos da América (EUA). Após o que, relaciona essas estratégias globais com o as estratégias brasileiras e reconhece-se a quase inexistência de dispositivos e protótipos que permitam à academia realizar os estudos e as pesquisas necessárias para a indústria brasileira se adaptar às recomendações da Indústria 4.0 ($i4.0$). Por fim identifica o tema, descreve o problema a ser tratado por esse trabalho, as questões de pesquisa, os objetivos geral e específicos, descreve a proposta de trabalho, as motivações, a metodologia utilizada, cita as principais contribuições e resume os demais capítulos que fazem parte desta pesquisa.

1.1 Contextualização Global

Até o final da década de 80 os sistemas flexíveis conseguiam resolver o principal problema das empresas industriais até então: a produção em lotes médios e pequenos. Contudo, a partir de 1989, intensificou-se a troca de bens entre diferentes continentes e as exigências dos clientes levou ao aumento do nível de customização. Além disso, tecnologias como a Internet aproximaram mercados e consumidores de locais distantes. A troca rápida de informações e os ativos intangíveis transformaram a economia mundial numa rede global de conhecimento (ABELE et al., 2008).

Para fazer frente a esses novos desafios, naturalmente houve o desenvolvimento de novas formas de se olhar a manufatura. Essas novas forma são conhecidas como os paradigmas da manufatura cujos surgimentos estão ilustrados na Figura 1. Nela estão enfatizados o paradigma *FMS* e o surgimento dos paradigmas emergentes *(HMS, BMS e RMS)*. Esses paradigmas inovaram ao desconsiderar os equipamento da manufatura como detentores da inteligência para a montagem, isto é, o conhecimento do processo produtivo. Nesses paradigmas e, em especial no paradigma *EPS*, o foco da inteligência foi direcionado

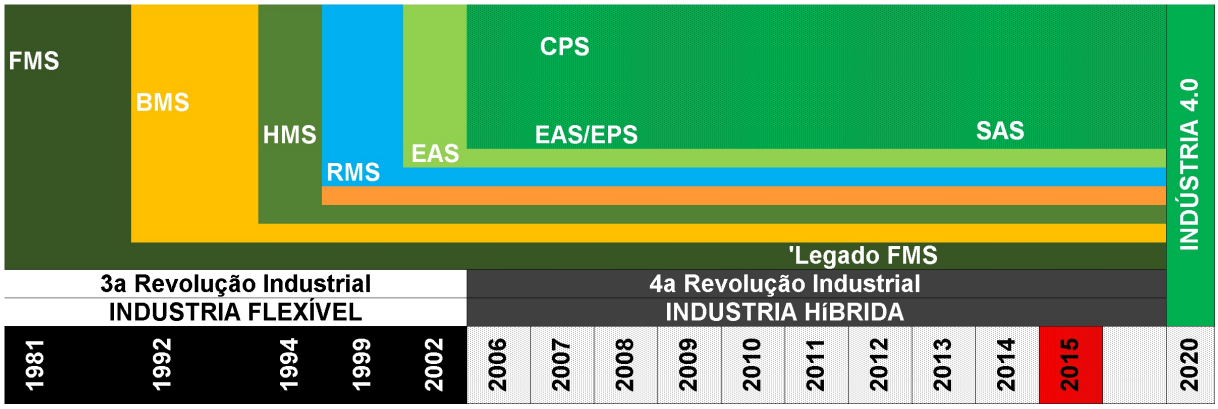


Figura 1 – SIAPE: Paradigmas de produção

para o produto, que detém o conhecimento da montagem de si mesmo e não mais as ferramentas de montagem.

Também os sistemas evolutivos passam a ter, atualmente, maior relevância no tratamento do problema da customização e estão sendo testados objetivando as indústrias inteligentes e as exigências da Indústria 4.0. Mais recentemente surgiu um novo paradigma denominado de *SAS (Symbiotic Assembly System)* (FERREIRA; DOLTSINIS; LOHSE, 2014) que procura integrar os sistemas de automação rígido, flexível e programável às capacidades do ser humano.

1.1.1 União Europeia (UE)

A Figura 2 ilustra os principais eventos nos limites da UE e identifica os vários programas desenvolvidos desde a década de 80 até o ano 2020. Nela, igualmente, a criação do paradigma EPS em 2006 por Onori é enfatizada, assim como o Tratado de Lisboa em 2010 que concretizou a União Europeia como um bloco e possibilitou a posterior aprovação em 2013 do Programa Horizon 2020 – com vigência de 2013 a 2020 – que contempla os

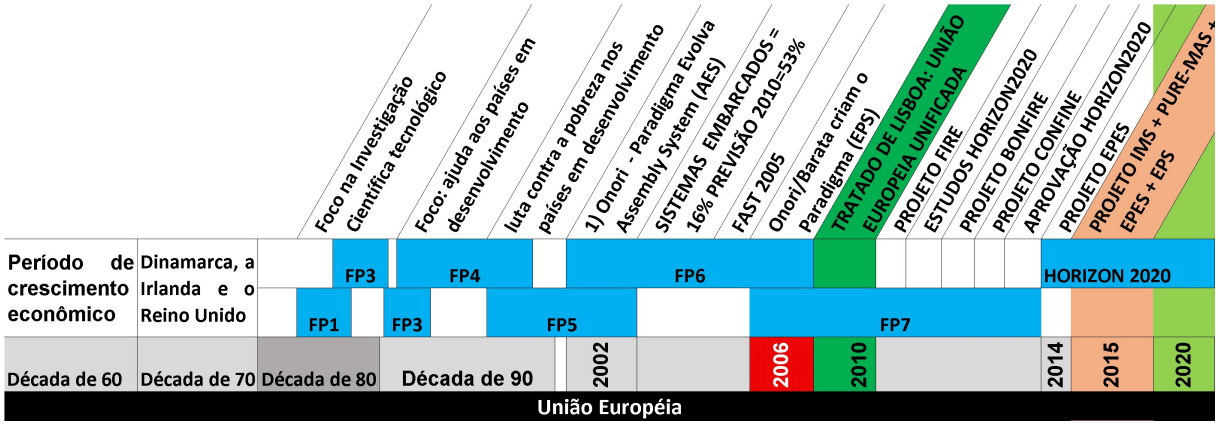


Figura 2 – Projetos Europeus e os sistemas evolutivos

principais projetos que estão em desenvolvimento para formar os ambientes necessário para a Indústria 4.0.

1.1.2 Estados Unidos da América (EUA)

A busca pela hegemonia científica e tecnológica nos EUA uniu as agências científicas, tecnológicas, militar, espacial e de segurança norte-americanas em torno das ciberestruturas (NITRDGROUPS(CPS), 2003).

A Figura 3 ilustra uma análise sobre o desenvolvimento das ciberestruturas desde a década de 60 até 2020, momento em que alguns projetos estarão sendo revisados ou concluídos. As principais iniciativas e projetos que motivaram o surgimento dos *Cyber Physical System (CPS)*. O período inicia na década de 60 e se prolonga até o 2020, momento que alguns projetos estarão sendo revisado ou concluídos. Nota-se claramente que desde a década de 60 os EUA investem maciçamente nos centros de computação acadêmica, culminando na criação da ciência da computação, iniciativas em computação avançada e na criação da Internet.

Alguns marcos importantes igualmente anotados na Figura 3: em 2006 Hellen Gill da *National Fundation Science (NFS)* cunha o termo *Cyber Physical System (CPS)* (GILL, 2005); em 2007 o nasce Conselho de Ciência em ciberinfraestrutura; em 2008 a comunidade acadêmica pressionou o governo (LEE; NEUENDORFFER, 2008) para uma reação conjunta; a partir de 2010 os orçamentos e projetos nos Estados unidos foram direcionados aos projetos *CPS*.



Figura 3 – EUA: Linha do tempo dos CPS

1.1.3 Brasil: Saindo da Indústria Mecânica e se estabelecendo na Indústria Flexível

Analisando-se documentos oficiais do governo (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2014), os projetos, programas e estratégias em curso pelo Governo Brasileiro não evidenciam a inclusão do Brasil no círculo de países que iniciarão dentro da Plataforma da Indústria 4.0,



Figura 4 – Brasil: Atraso da Indústria Brasileira

isso dado o seu distanciamento tecnológico, a falta de sistemas baseados nos paradigmas emergentes, das fábricas inteligentes e a falta de integração entre as metas do Governo, da Indústria (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI, 2013) e da Academia (CAPES - Volume I, 2011). Essa falta de integração e interação de estratégias, em moldes como acontecido na UE e EUA, condicionará o Brasil a receber o legado da Indústria Flexível e permanecer à margem da Indústria 4.0.

A Figura 4 ilustra a contextualização da Indústria Brasileira que ainda está se adequando à Indústria Flexível. Nesta figura pode-se ver as chamadas revoluções industriais, que são identificadas por R1, R2, R3 e R4. A fase entre R3 e R4 aqui é definida aqui como *Indústria Híbrida*, dada a condição de sobrevivência, no mesmo espaço industrial de vários dos paradigmas de manufaturas até então conhecidos.

É importante notar que o Brasil ainda detém em grande parte de seu parque industrial sistemas legados da Indústria Mecânica e está se estabelecendo na Indústria Flexível, enquanto o mundo industrializado está totalmente incorporado aos sistemas flexíveis e experimentam a Indústria Híbrida, onde coexistem os sistemas flexíveis, ágeis, ciber e evolutivos. A marca R4 representa uma situação futura, a Indústria 4.0, onde sobreviverá a indústria inteligente, a saber àquela acoplada aos ciberespaços, contendo as ciberestruturas (ATKINS, 2003), os dispositivos e tecnologias que serão utilizados pelas fábricas inteligentes, que por sua vez, são baseados nos paradigmas evolutivos e nos *Cyber-Physical Systems* (CPS) (LEE; NEUENDORFFER, 2008).

1.2 Tema e Problema

Em ambientes industriais, a constante necessidade de reconfiguração das linhas de montagens é um problema recorrente. Nas atividades como a reprogramação das ferramentas de automação, braços robóticos e treinamentos de operadores de montagem, a reconfiguração é uma necessidade. Reduzir ou eliminar o tempo necessário para a

reconfiguração requer mais que máquinas flexíveis, requer uma nova visão, um novo paradigma para as fábricas, bem como todo o ferramental para a aplicação deste paradigma.

1.2.1 Delimitação do tema

Considerando a contextualização global, delimitou-se o tema como *Os sistemas evolutivos no contexto da Indústria 4.0 no Brasil.*

1.2.2 Especificação do problema

Como foi colocado anteriormente, existe um problema no Brasil que é *a inexistência de protótipos, no meio acadêmico e industrial, que reproduzam as propriedades dos sistemas evolutivos (Evolvable Production System – EPS) a fim de permitir estudos e pequisas nas áreas de automação, controle e sistemas multi-agentes, protótipos estes capazes de ensejar a diminuição do gap tecnológico do Brasil.*

1.2.3 Questões de pesquisa (QP) e hipóteses relacionadas (HR)

QP1 – Quais as características dos sistemas ágeis que podem evidenciar um sistema evolutivo de produção?

HR1 – A adaptabilidade, conseguida através da reconfiguração dos parâmetros do sistema, evidenciará um sistema evolutivo de produção.

HR2 – A evolutividade é realizada por meio da inclusão ou exclusão de módulos sem comprometer a eficiência e o funcionamento do sistema.

1.2.4 Objetivo geral e específicos

Para realizar e comprovar essas hipóteses os seguintes objetivos foram definidos:

Objetivo geral - *Desenvolver um protótipo de sistema evolutivo brasileiro baseado no paradigma EPS.*

Objetivos específicos :

1. Desenvolver o módulo mecânico intercambiável, com interface elétrica;
2. Desenvolver berço mecânico, com interface elétrica, para o módulo intercambiável;
3. Desenvolver um protótipo que represente a indústria 3.0 *(I3.0)*;
4. Desenvolver no PC a programação do agente de produto, consoante o paradigma EPS;

5. Desenvolver no PC a programação do agente de recurso, consoante o paradigma EPS;
6. Desenvolver programa de agentes que conversam entre si através do padrão FIPA;
7. Desenvolver o acesso hardware programado via Raspberry Pi usando Java;
8. Desenvolver interface SIAPE com o usuário para realizar o plug-and-produce;

1.3 Proposta do trabalho de dissertação

1.3.1 A proposta do projeto

As recomendações da Indústria 4.0 (GERMAN COMMISSION FOR ELECTRICAL – VDE, 2014) apontam para propriedades dos Sistemas Evolutivos. Os Sistemas Evolutivos são baseados em agentes inteligentes e autônomos que, interagindo entre si, realizam a cooperação de agentes mecatrônicos para a execução de um objetivo bem definido. Os sistemas evolutivos tem duas capacidades fundamentais: a capacidade de *adaptação* e a capacidade de *evolução*.

Este trabalho visa, pois, o desenvolvimento de um sistema deste tipo, o **Sistema Inteligente Ágil de Processo Evolutivo (SIAPE)** que é formado por uma planta composta de quatro partes que funcionam integradamente para reproduzir as duas características básicas dos sistemas EPS e pode ser analisado mediante estes quatro parâmetros.

O sistema é capaz de realizar a produção de anagramas que podem conter as seguintes letras: A, F, M, T, U. Essas letras são carimbadas em uma folha de papel contida em um carro que movimenta-se em uma esteira. Tais letras representam os processos que são realizados em sistemas industriais reais. Esses módulos são implementados como agentes inteligentes, e podem ser inseridos ou subtraídos do sistema para a concretização dos anagramas (produtos) e nas quantidades que se queira (lotes de produção), a partir de ordens de produção. Tais ordens são organizadas autonomamente em planos de produção de produtos. Quando há uma mudança na produção, isto é, a entrada de outra ordem para um novo anagrama, com quantidades diferentes, o sistema não tem a necessidade de reconfiguração entre tais produtos e lotes. E, finalmente, deve contar com o *plug-and-produce*, isto é, na necessidade de uma letra desenvolvida posteriormente ao próprio sistema de montagem, este deve ser capaz de operar com a entrada de novos módulos de letras (em nosso exemplo: “E”) como parte de seu funcionamento normal.

1.3.2 Metodologia da pesquisa

A Figura 5 ilustra a metodologia e facilita o entendimento entre os dois processos utilizados no desenvolvimento do SIAPE.

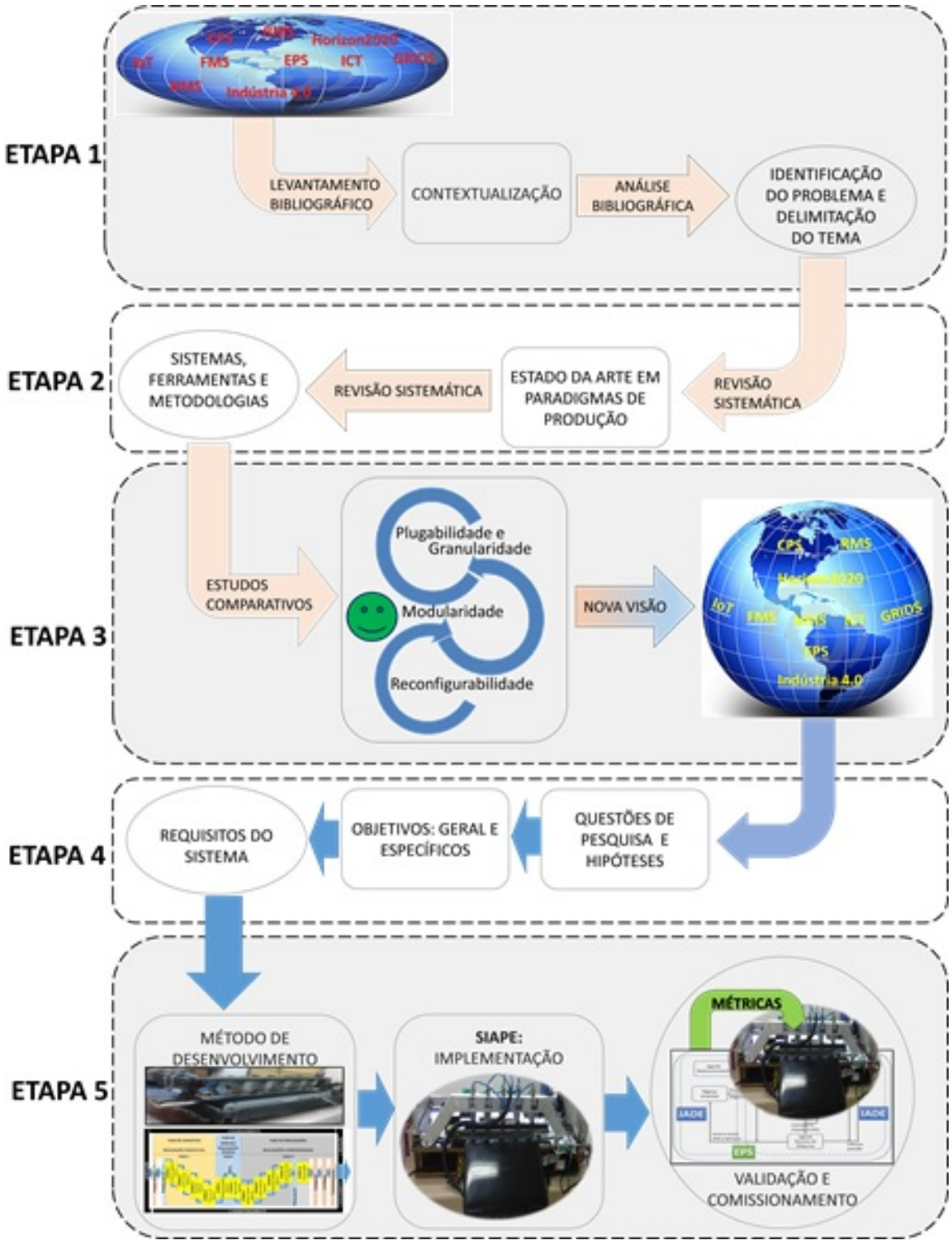


Figura 5 – SIAPE - Metodologia da pesquisa

1. ETAPA 1 - Objetivou o estudo do cenário atual como forma de evidenciar os principais pontos para a contextualização, e nos limites dessa, identificar um problema para ser tratado e a delimitação do tema da pesquisa.

2. ETAPA 2 - Objetivou evidenciar o estado da arte considerando o tema delimitado, e baseado neste a elaboração das questões de pesquisa e hipóteses.

3. ETAPA 3 - Nesta etapa foram definidas as propriedades e características que deveriam estar presentes no sistema desenvolvido.

4. ETAPA 4 - Essa etapa teve como meta a elaboração dos requisitos, a partir das questões de pesquisas e das hipóteses relacionadas.

5. ETAPA 5 - Nessa etapa o sistema foi implementado seguindo um método de desenvolvimento, foram realizadas experimentações e o sistema foi validado por meio das métricas previamente definidas.

A Etapa 4 forneceu os requisitos do sistema com bases nas questões de pesquisa e nos objetivos geral e específicos. Esses requisitos foram tratados por um método de desenvolvimento também criado, por necessidade, para o desenvolvimento de sistemas evolutivos; o método realiza, de uma forma sistematizada, o desenvolvimento de um EPS por meio de três fases: a fase de concepção do sistema, a fase de implementação e a fase de comissionamento e finalização. Este método é explicado no Capítulo 3 e uma aplicação dele no desenvolvimento do SIAPE encontra-se detalhado no Capítulo 4.

1.3.3 Contribuições relevantes

Pode-se enumerar, dentre outras, as seguintes contribuições deste trabalho:

1. os dois protótipos: um flexível para reproduzir a condição atual da Indústria 3.0 ($i3.0$) e um evolutivo, que comporte as propriedades do paradigma EPS e da Plataforma da Indústria 4.0, que podem auxiliar projetistas, especialistas e acadêmicos no estudo de sistemas evolutivos;

2. uma arquitetura para os sistemas evolutivos que integre as recomendações da Indústria 4.0 ($i4.0$) com a performance do paradigma evolutivo de produção;

3. a metodologia para desenvolvimento de sistemas evolutivos.

1.4 Organização do trabalho

Este capítulo foi elaborado para descrever um breve resumo da contextualização global, identificar o tema e delimitar o problema a ser tratado, as questões de pesquisa utilizadas, os objetivos geral e específicos da proposta de trabalho,além das motivações e a metodologia utilizada. Os capítulos restantes desse trabalho estão dividido conforme segue.

A Revisão da Literatura está descrita no Capítulo 2 que identifica as três revoluções industriais e alguns pontos que evidenciam a 4ª Revolução Industrial. Apresenta uma seção sobre EPS, objeto desta pesquisa. A conceituação teórica de alguns termos importantes e, finalmente, alguns trabalhos e pesquisas que se configuram como o estado da arte em sistemas evolutivos.

O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento do SIAPE e o método de desenvolvimento que foi criado para desenvolvê-lo.

No Capítulo 4 encontra-se a experimentação realizada por meio de um estudo de caso elaborado para evidenciar a operacionalidade do sistema.

No Capítulo 5 alguns resultados da experimentação são analisados, o sistema validado, e também são feitas alguns discussões em torno dos resultados conseguidos na experimentação.

As conclusões encontram-se registradas no Capítulo 6, além dos trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos a partir dos resultados desse trabalho de pesquisa.

Capítulo 2

Conceitos

Este capítulo está dividido em várias seções, a saber: a primeira seção identifica o panorama dos paradigmas de produção considerando os períodos conhecidos como 1ª, 2ª e 3ª revoluções industriais, bem como identifica alguns pontos que evidenciam a 4ª Revolução Industrial; a segunda seção apresenta um estudo específico sobre EPS, que é o paradigma deste trabalho; a terceira seção mostra a conceituação teórica de alguns termos importantes para o entendimento do assunto; e a última seção identifica as pesquisas e trabalhos que se configuram como o estado da arte em sistemas baseados no paradigma evolutivo.

2.1 Panorama dos paradigmas de produção até os dias atuais

2.1.1 Revoluções industriais

A Figura 6 ilustra um breve panorama do período iniciado com a primeira revolução industrial até o futuro próximo. Nela, nota-se que, após o período feudal, o nascimento da Primeira Revolução Indústria, onde a produção artesanal (realizada por máquinas artesanais) perde espaço para a produção em massa (produção de lotes grandes e realizada por máquinas mecânicas) da indústria mecânica da Segunda Revolução Industrial. Com o advento da Terceira Revolução Industrial passe a produzir lotes médios através das máquinas flexíveis.

O problema da personalização de produtos surge também nessa época. Para tratar tal problema, surgem máquinas ágeis (baseada nos paradigmas BMS, RMS e HMS, detre outros) e esta fase é aqui identificada com indústria híbrida. Nos dias atuais surge o fenômeno da customização em massa e, para lidar com os lotes pequenos e a alta variabilidade destes, surgem os sistemas emergentes baseados nos paradigmas EAS/EPS e a auto-organização. A chamada Quarta Revolução Industrial, a caminho, é baseada principalmente nos paradigmas ágeis e evolutivos de produção.

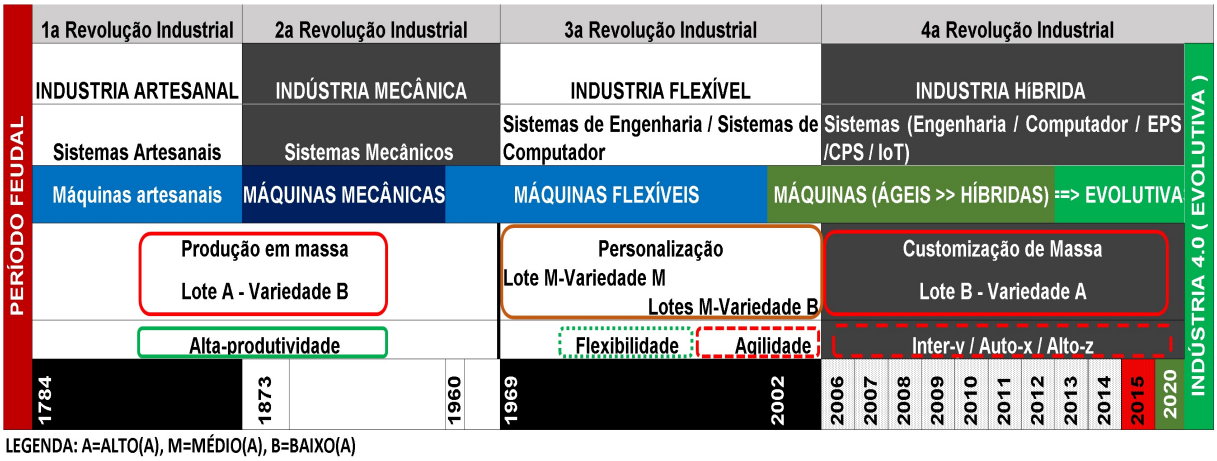


Figura 6 – Revoluções Industriais, problemas e soluções

Nesta seção são evidenciados o surgimento dos paradigmas e comentados alguns conceitos surgidos após esse período.

2.1.2 Da máquina de Heron às máquinas flexíveis

Desde que os processos manuais artesanais foram substituídos por processos industriais, com o advento da Revolução Industrial, avanços tecnológicos têm causado mudanças no sistema de produção (NAHER et al., 2008). Com o advento da *máquina a vapor*, um melhoramento da *Máquina de Heron*, e a criação do tear mecânico, por volta de 1784, teve início o período conhecido como a 1^a Revolução Industrial, período no qual relevantes avanços científicos e sociais foram conseguidos naquela sociedade advinda de um sistema de feudos. Durante esse período a indústria ficou conhecida por suas características ainda artesanais como Indústria Artesanal. Esse período durou até o surgimento da eletricidade em 1873, fato que marcou o início da 2^a Revolução Industrial e a indústria passou de artesanal para mecânica. Nessa Indústria Mecânica, elevados lotes de produção foram conseguidos para atender às massas, que foram uma crescente demanda na Europa e nas Américas (DRATH; HORCH, 2014)

A Indústria Mecânica deu lugar à Indústria Flexível devido aos avanços tecnológicos conseguidos a partir de 1969 no campo da Eletrônica, em especial a produção do primeiro controlador lógico programável (PLC) e significativos avanços na Tecnologia da Informação (NAHER et al., 2008).

2.1.3 O surgimento dos sistemas flexíveis baseados no paradigma FMS

Com a continuidade do desenvolvimento tecnológico, as máquinas flexíveis foram integradas e transformaram-se em sistemas e mostraram uma nova maneira de aumentar a produtividade, isso no ano de 1967 (KOREN et al., 1999).

Na Alemanha, em 1969, os sistemas *Flexible Manufacturing System (FMS)* foram instalados na empresa *Heildlenberger Druckmaschinen* com a cooperação da Universidade de *Stuttgart*. Em 1972 na exposição de *Stanki* os sistemas *FMS* foram demonstrados para os russos. O Japão teve seu primeiro *FMS* em 1985 instalado na *Fuji Xerox* (GROOVER, 2011).

O trabalho desenvolvido por ELMARAGHY (1982) deixou claro como os sistemas *FMS* foram utilizados para resolver o problema da produtividade dos lotes de volume médio mas que começavam a se apresentar recheados de variedades, o que aumentava os custos e reduzia os lucros. Como o sistema produtivo *FMS* podia ser, além de reprogramado, reconfigurado, este permitiu a produção de produtos sob demanda em médias quantidades, com melhores custos, e a indústria passou, então, a colocar no mercado produtos personalizados, ou seja, seguindo as preferências do cliente. Com a constante utilização de sistemas *FMS*, logo se percebeu que a solução proposta para os lotes médios já não tinha a mesma eficácia. Quando essas quantidades tendiam a valores menores, a personalização de produtos passou a ser um problema.

Neste texto, o termo *personalização* é utilizado para representar um nível menor de *customização*. A *customização* é caracterizada por uma produção variada de produtos com curtos ciclos de vida (QUINTELA, 2005).

2.1.4 O surgimento dos sistemas emergentes baseados em BMS, HMS e RMS

Para enfrentar os desafios da agilidade e urgência impostos pela personalização, foi proposto por Ueda o paradigma *Bionic Manufacturing System (BMS)* (UEDA, 1992), que inspirou-se nos sistemas biológicos para realizar analogias com o sistema produtivo e propor uma solução para a personalização.

Ainda na década de 90, surge o paradigma *Holonic Manufacturing System (HMS)* (CHRISTENSEN, 1994; VAN BRUSSEL et al., 1998) que considerou para suas análises, o sistema produtivo como um sistema composto por *holons* que trocavam informações entre si.

Ao final da década de 90, pode-se perceber um novo paradigma: *Reconfigurable Manufacturing System (RMS)* (KOREN et al., 1999), que prometia sistemas capazes de serem reconfiguráveis no chão-de-fábrica, cujos componentes eram máquinas e controladores reconfiguráveis, elaborados com metodologias para uma concepção sistemática e reposta rápida às exigências das bruscas alterações de demanda nos mercados globalizados.

Com o aumento da personalização possibilitado pelos sistemas *FMS*, os consumidores passaram a exigir essa personalização para outros tipos de produtos, refletindo um aumento das exigências dos clientes. A tendência se concretizou e a fabricação de produtos

sob medida, refletindo a preferência do cliente, passou a ser lugar comum nos mercados globalizados, e o fenômeno recebeu o nome de customização em massa (DAVIS, 1997), pois além de produzir o produto, o produtor deveria atender às especificações de qualidade definidas pelo usuário do produto.

Mais recentemente, nos anos 2000 foi proposto, por Onori o paradigma *Evolvable Assembly System (EAS)* (ONORI, 2002; FREI, 2006) que serviu de base para o paradigmas *Evolvable Production System (EPS)* (ONORI; BARATA, 2010). O paradigma *EPS* utiliza o conceito de agentes inteligentes para realizar as operações dentro do sistema produtivo. EPS permite a implementação de um sistema que atende a duas das características desejadas na manufatura: auto-organização e auto-otimização. Estas por sua vez permitem a produção de produtos diferentes, não necessariamente definidos com o processo produtivo, e a otimização do uso de alguns dos recursos do sistema.

2.1.5 O surgimento da IoT, dos CPS e da Indústria 4.0

Além das soluções propostas por pesquisadores europeus para solucionar o problema da personalização, outras iniciativas padronizadas, claras e objetivas de instituições e governos estão sendo realizadas. Por exemplo, os últimos avanços da tecnologia, conseguida pelo *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, configuram um ambiente conhecido como *Internet of Things (IoT)* (STANKOVIC, 2014).

A IoT é um conjunto de princípios e protocolos que visam a interligação de dispositivos ubíquos ao meio. Notadamente, quando aplicada à manufatura, está fazendo surgir a Indústria 4.0 ($i4.0$) (DRATH; HORCH, 2014). A $i4.0$ é, neste momento, um cenário futurista onde as ciberestruturas existirão de fato e os dispositivos estarão preparados, testados e aprovados para funcionar dentro dessa nova realidade.

Algumas importantes conceitos da IoT são:

Plug & Work - Conceito de *plug-and-produce* considerado de um ponto de vista da abordagem IoT. Sua realização no chão de fábrica implica na realização da manufatura ágil.

Manufatura Ágil - uma abordagem de produção fortemente baseada na disponibilidade da tecnologia de fabricação de apoio que pode ser facilmente reconfigurado para responder rapidamente às mudanças do mercado, mas continua a fornecer controle total, de custos e de qualidade da produção. Manufatura ágil é universalmente considerada como o próximo passo após a metodologia de produção enxuta.

Fábricas ágeis na abordagem *IoT* - as fábricas ágeis na abordagem IoT devem ter sistemas produtivos capazes de corrigir falhas, e mudar-se devido a alterações externas relevantes, como por exemplo, a mudança no tipo de produtos para os quais devem ser

produzidos ou no volume de produção. Agilidade pode, pois ser necessária em muitos níveis diferentes, por exemplo, adaptação recursos para falhas de rede ou aumento de carga, ao nível do processo, onde as novas necessidades são imediatamente adaptadas.

2.2 Sistemas Evolutivos de Produção - EPS

Os sistemas evolutivos são baseados em agentes inteligentes e autônomos que são capazes de cooperarem entre si. Esta cooperação leva tais sistemas a possuírem a capacidade de *adaptação* e de *evolução* (ONORI, 2002).

Conforme mostrado na Seção 1.3.1, por *adaptação* entende-se que o sistema é capaz de propor uma configuração alternativa de si mesmo para minimizar os efeitos adversos de perturbações. Adaptação é de curto prazo e, normalmente, implica *auto-reconfiguração* na forma de ajustes de parâmetros. Já o termo *evolução* refere-se ao sistema que é capaz de permitir a introdução ou remoção de módulos existentes sem implicar na perda de performance e/ou quebra do seu funcionamento. A evolução se caracteriza num processo de longo prazo, podendo o sistema evoluir até o limite da tecnologia ou ao da planta fabril.

Como um sistema evolutivo é baseado em agentes autônomos que reconhecem o ambiente físico e são capazes de executar alguma ação sobre este ambiente, EPS apresenta auto-organização, isto é, o sistema é capaz de reconhecer os agentes que estiverem ativos em determinado momento e formar a sociedade de agentes necessária. Então EPS possui algum grau do *plug-and-produce*, isto é, o plugar e produzir, onde cada módulo do sistema pode ser retirado ou colocado no sistema (*on-line*) como parte integrante de seu funcionamento normal.

Uma característica primordial de sistemas baseados no paradigma EPS é que o foco da inteligência do processo produtivo, isto é, o conhecimento de como se faz um determinado produto, é retirada dos módulos que realizam a atividade de montagem do produto e é colocada em um agente inteligente externo àqueles módulos.

Assim, os recursos de produção passam a ter somente a inteligência de seu próprio funcionamento. Como são autônomos, eles são verdadeiros agentes inteligentes, mas como possuem a capacidade de ação no mundo físico, através de seus sensores e atuadores, capacidade de computação própria e capacidade de comunicação com as outras entidades do sistema, são equipamentos mecatrônicos. Tais módulos são as próprias ferramenta de montagem com inteligência, mas não possuem a informação de como um produto específico é montado. Tais módulos são chamados de agentes mecatrônicos.

Sem a inteligência do processo, os recursos de produção não teriam muita utilidade em um processo produtivo, necessitando-se então que tais recursos sejam coordenados para a execução dos objetivos finais. Usando termos derivados da área de agentes, tais recursos

são agentes mecatrônicos e a inteligência do processo reside em um agente de *coalizão* que serve para coordenar e unir em uma sociedade de agentes, aqueles agentes mecatrônicos necessários para se produzir um determinado produto (BARATA; ONORI, 2006).

EPS segue a metáfora do LEGO©, isto é, onde peças pequenas são unidas de uma forma inteligente para se montar elementos bem complexos. Da mesma forma, para se construir um produto usando um EPS, é necessário que o produto seja quebrado em partes suficientemente pequenas, partes essas capazes de ser montadas usando um ou mais recursos do sistema produtivo. Entretanto, também é necessário que tais recursos sejam especificados para realizar as atividades de montagem. Essas atividades são implementadas por agentes mecatrônicos, os quais expõe funcionalidades específicas para o sistema, chamadas de *skills*, justamente por retratar as habilidades que aquele módulo ou agente mecatrônico possui. Se forem suficientemente básicas e gerais essas atividades, um sistema de montagem evolutivo deve ser capaz de montar uma ampla gama de produtos, i.e, o sistema passa a ter a possibilidade de montar uma alta variabilidade de produtos.

Portanto, o paradigma EPS muda o foco da inteligência, no chão de fábrica, dos equipamentos que formam o sistema produtivo para o produto. Por causa da sua arquitetura baseada em agentes inteligentes, que possuem a capacidade de auto-organização, possuem também a propriedade do "plugar e produzir".

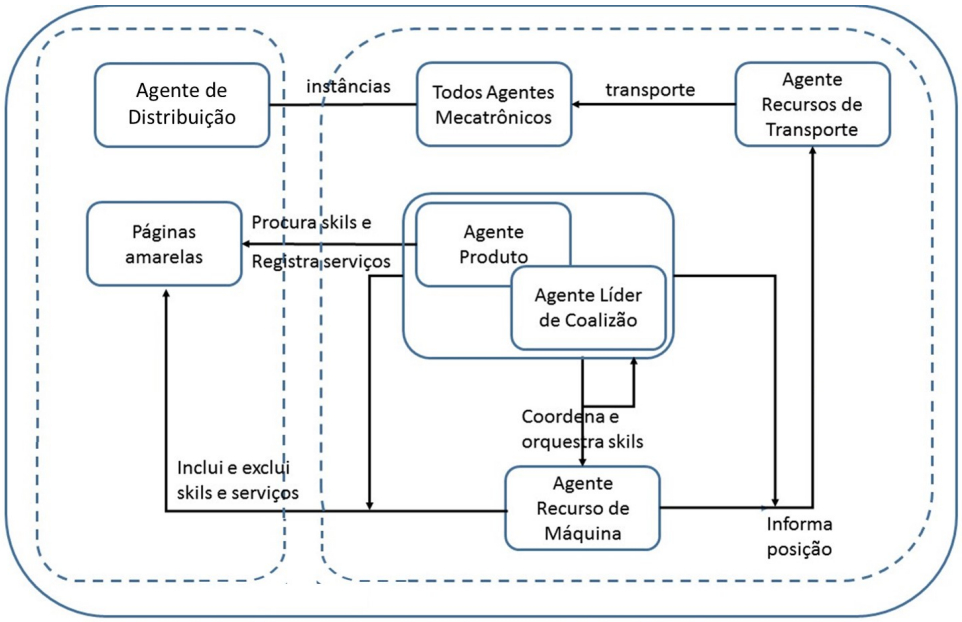


Figura 7 – IADE: Arquitetura de referência EPS

Fonte: (CAVALCANTE, 2012)

Sua arquitetura de referência pode ser vista na Figura 7, que mostra dois tipos de agentes mecatrônicos: agente de recurso e agente de coalizão. Agentes de produtos são um tipo de agente de coalizão. Agentes de transporte são um tipo de agente mecatrônico normal, mas especializado no sistema de transporte.

Tais sistemas estão sendo desenvolvidos e testados objetivando as fábricas inteligentes e a padronização proposta pela Plataforma (GERMAN COMMISSION FOR ELECTRICAL – VDE, 2014) da Indústria 4.0 (DRATH; HORCH, 2014).

Historicamente, EPS é a abordagem mais nova de um movimento que começa a partir da década de 80. A Figura 8 ilustra a evolução dos paradigmas de produção, mostrando também os nomes dos pesquisadores que iniciaram aquele paradigma.

Os EPS possuem algumas características interessantes, pois possuem em um grau elevado, adaptabilidade, evolutibilidade, modularidade e sua granularidade pode ser ajustada conforme a complexidade do sistema. Para este trabalho, estes termos tem os seguintes significados:

Adaptabilidade – o sistema tem de ser capaz de propor uma configuração alternativa para minimizar os efeitos adversos de perturbações. Adaptação é de curto prazo e, normalmente, implica *auto-reconfiguração* na forma de ajustes de parâmetros (ROSA, 2013).

Evolutibilidade – Em relação à *evolução*, o sistema tem de ser capaz de permitir a introdução ou remoção de módulos existentes sem implicar na performance e no funcionamento do sistema. Assim, o sistema evolui a medida que novos produtos são colocados em produção, isto é, conforme o ambiente industrial modifica-se no tempo. A evolução se caracteriza num processo de longo prazo, podendo o sistema evoluir até o limite da tecnologia ou ao limite da planta fabril (ROSA, 2013).

Modularidade – denotada pela noção de independência entre os módulos dos sistema.

Plugabilidade – se o sistema pode inserir ou remover módulos como parte de seu funcionamento normal em tempo de produção.

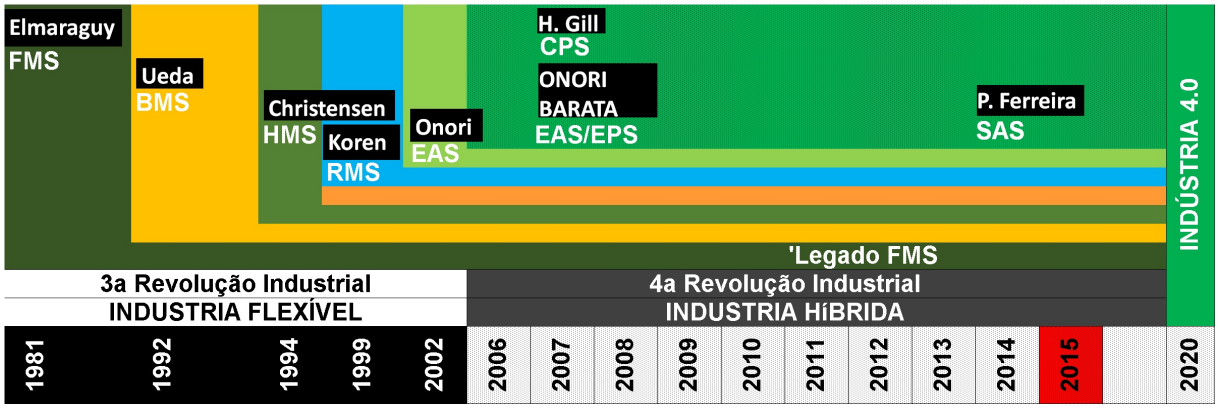


Figura 8 – Evolução do Paradigmas de Produção

Granularidade – que evidencia o quanto de informação um agente deve possuir sobre os demais agentes, e a quantidade destes, a fim de se conseguir um objetivo definido.

Para este texto, **reconfigurabilidade** é a habilidade do sistema de redesenhar seu layout sem comprometer o funcionamento do sistema. Portanto, a plugabilidade é uma espécie de reconfigurabilidade.

Quando um sistema possuir algum grau desses parâmetros, ele é dito possuir a **auto-organização** e o sistema é dito ser **dinâmico**.

2.2.1 Visão geral da arquitetura EPS

EPS é baseado em agentes inteligentes. Nas primeiras arquiteturas havia a definição de muitos tipos diferentes de agentes, capazes de tratar certos aspectos do sistema produtivo, tais como transporte, acesso hardware ou agentes de coalizão.

Simplificações tem sido propostas ao longo do tempo. Atualmente, EPS pode ser descrito como uma abordagem multiagente capaz de auto-organização e execução de processos complexos através da interação entre os agentes que formam o sistema. Há basicamente dois tipos de agentes em EPS: os agentes mecatrônicos e os agentes não mecatrônicos. Dentre os agentes mecatrônicos, pode-se citar a existência de dois subtipos: agentes cognitivos e agentes motores.

Os agentes cognitivos são os responsáveis pela coalizão de outros agentes mecatrônicos: cognitivos ou motores. Os agentes motores são os que possuem acesso ao hardware elétrico e/ou mecânico do equipamento mecatrônico.

Os diversos tipos de funções no sistema produtivo são implementados por meio destes tipos de agentes. Por exemplo, um agente produto é um tipo especial de agente cognitivo que possui a inteligência de como montar a si mesmo através da coalizão dos agentes mecatrônicos (recursos/ferramentas) do sistema produtivo.

Agentes mecatrônicos possuem *habilidades*, isto é, o que eles são capazes de fazer no sistema produtivo. Pode ser algo como `produzirProdutoA()` ou `baixarSugador()` ou ainda como `fecharGarra()`.

Essas habilidade ou serviços que os agentes executam são chamados de *skills*.

Um agente mecatrônico pode possuir um ou mais *skills*, que podem/são disponibilizados para todos os outros agentes do sistema.

Dentre os agentes não mecatrônicos cita-se: o agente intermediador (*gateway*) que tem a função de interligar o sistema de produção EPS com outros sistemas legados e/ou interface homem máquina; e o agente de páginas amarelas (*Yellow Page Agent* - YPA) que é o responsável pelo registro e busca de *skills* por todo o sistema.

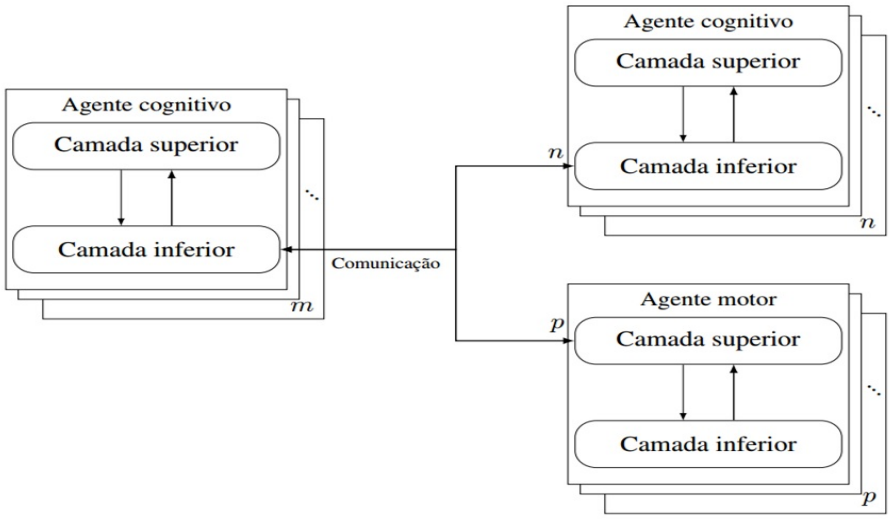


Figura 9 – Visão geral da Arquitetura proposta por Cavalcante

Fonte: (CAVALCANTE, 2012)

2.2.2 Descrição da Arquitetura EPS de Cavalcante

A arquitetura *EPS* proposta por Cavalcante denominada de Arquitetura Baseada em Agentes e Auto-Organizável Para a Manufatura está ilustrada na Figura 9 e é descrita a seguir.

A arquitetura é formada por dois tipos de agentes:

O agente cognitivo é o responsável pela lógica da aplicação empregada na situação e escolhe uma decisão a ser realizada, por outro agente cognitivo ou por um agente motor. A camada superior funciona como aplicação do agente e a camada inferior funciona como interface de comunicação com os outros agentes do sistema, e promove a seleção e as requisições feitas para os outros agentes do sistema.

O agente motor por sua vez, tem sua camada superior funcionando como comunicação e a camada inferior como a aplicação do agente. A camada superior recebe a comunicação das operações a serem realizadas que são enviadas pelo agente cognitivo. A camada inferior além de ter a função da aplicação do agente, funciona como camada de sensoriamento percebendo o ambiente e informando as condições sentidas ao agente cognitivo, para que este tome as decisões necessárias e as realize as tarefas atribuídas ao sistema.

A arquitetura foi dividida para uso em dois tipos de aplicações: em sistemas de montagem e em sistemas de controle. A aplicação para um sistema de montagem é formado por agentes cognitivos, que modelam os produtos a serem montados, e por agentes motores, que modelam os recursos de hardware que realizam operações no processo de montagem. A Figura 10 ilustra a aplicação desta arquitetura para sistemas de produção. Nesta pode-se

identificar o agente produto que é modelado por agentes cognitivos, e agentes motores que modelam os recursos de produção.

Já a Figura 11 ilustra a implementação de referência de EPS conforme o projeto *IDEAS*. Os agentes desta implementação são assim chamados:

DeploymentAgent (DA) representa o agente de distribuição, isto é, o agente que pesquisa serviços de páginas amarelas, os *skills* que devem ser trocados entre agentes para negociação até que se atinja os objetivos propostos pelo sistema. O *DA* também permite que o sistema seja configurado através de ferramentas externas.

YellowPageAgent (YPA) Agente Páginas Amarelas - é o responsável por registrar as habilidades dos agentes que não são mecatrônicos. Ele fornece uma infra-estrutura que permite que outros agentes registrem suas informações e que estas sejam consultadas por outros agentes que estejam necessitando de determinado *skil*.

Resource Agente (RA) são os agentes que externam funcionalidades ao sistema de montagem. Este é o agente básico da biblioteca *IADE* que controla os módulos de hardware que podem ser conectados ou desconectado no hardware do sistema, isto é, este agente é dotado de skills atômicos que são diretamente relacionado com o hardware. Este fato proporciona ao sistema a capacidade de reconfiguração de funcionalidades no nível do controlador.

Coalition Leader Agent (CLA) são agregadores e a base da reutilização de funcionalidades em qualquer nível. É o agente que suporta a composição de competências. Isto significa que o *CLA* é capaz de reagir às perturbações no ambiente, tais como a adição ou remoção de funcionalidades e falhas sob o seu domínio.

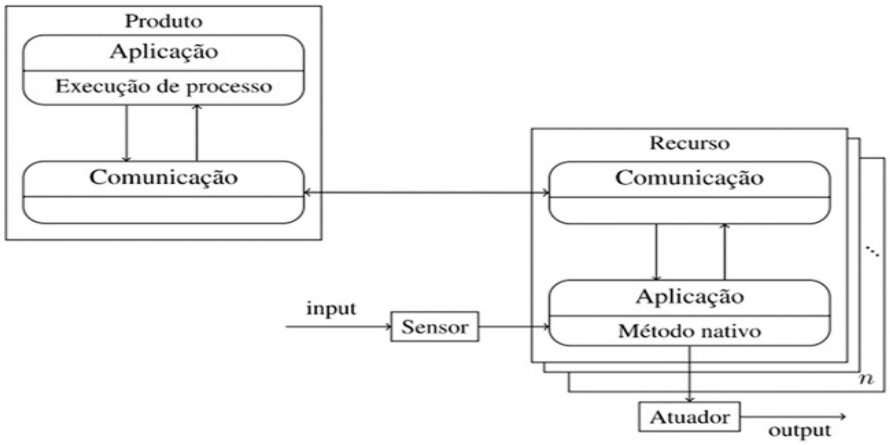


Figura 10 – Arquitetura para uma aplicação em um sistema de montagem

Fonte: (CAVALCANTE, 2012)

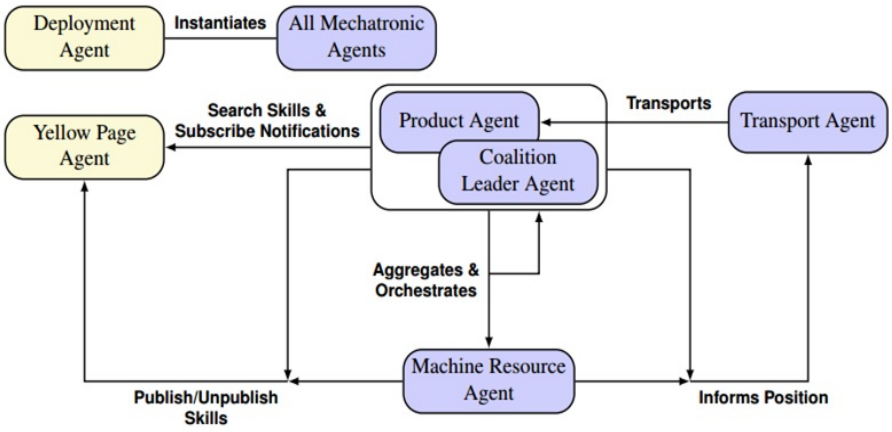


Figura 11 – Implementação de referência EPS

Fonte: (CAVALCANTE, 2012)

Transport Agent (TA) são abstrações do sistema de transporte, isto é, é o agente que abstrai as entidades de transporte por exemplo, transportadores ou *AGV*. É responsável pela computação do custo de transporte entre localizações no sistema.

Considerando a nomenclatura de Cavalcante, os *CLAs e PAs* são agentes cognitivos e *RAs e TSAs* são agentes motores.

2.2.3 A Arquitetura do SIAPE

A Figura 12 ilustra a arquitetura do SIAPE que foi baseada na arquitetura de Cavalcante para um sistema de montagem. Na figura os recursos são agentes cognitivos ou agentes motores que realizam as operações do processo de montagem diretamente nos sensores e atuadores do sistema. O agente motor principal, no SIAPE, recebe o nome de AcHw. Assim como todos os módulos e agentes do SIAPE, o AcHw foi concebido a partir da aplicação do Método de Desenvolvimento de Sistemas Evolutivos (MeDSE), aplicado ao desenvolvimento do SIAPE. O método de desenvolvimento é detalhado no Capítulo 3.

O agente AcHw do SIAPE tem a principal função de identificar, em tempo real, os módulos que estão presentes no sistema e informá-los ao agente *YPA*. Uma vez identificados no *YPA*, os demais agentes tem acesso aos *skills* do AcHW, notadamente o agente Anagram, que usa essas informações para realizar o processo produtivo.

O agente *OrderAgent* instancia agentes Anagram (agente Produto na arquitetura) que conhece todas as etapas de produção que envolve o agente Stamper e o agente Conveyor.

O operador pode se comunicar com o sistema por meio da Interface Homem Máquina (IHM) que acessa diretamente o *OrderAgent*. Este também pode ser usado com a função de *gateway* na comunicação tanto de sistema *i*4.0, isto é, sistemas aderentes à

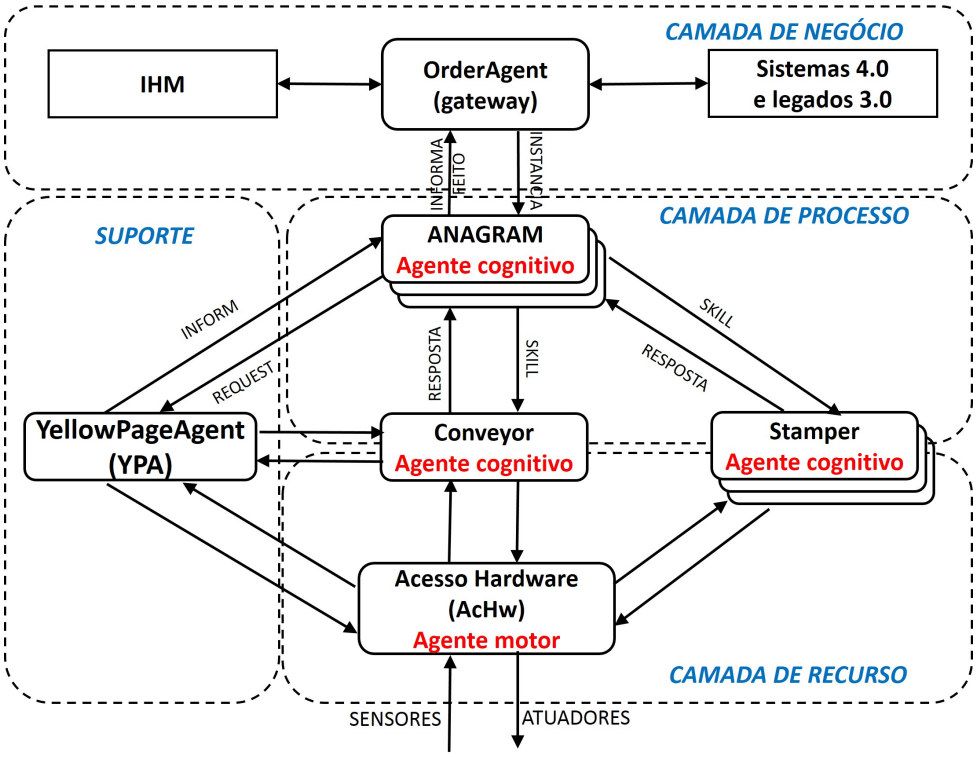


Figura 12 – Aplicação da arquitetura EPS no SIAPE

plataforma *i*4.0, quanto de ambientes *i*3.0, isto é, sistema flexíveis comuns aos sistemas da 3ª Revolução Industrial.

Resumindo, na aplicação de tal arquitetura neste trabalho, tem-se os seguintes agentes:

- YPA - registro e busca de *skills*
- OrderAgent - um *gateway* para a interface homem máquina do EPS; instancia os anagramas de acordo com a ordem de serviço gerada na IHM.
- Anagram - um agente cognitivo que representa um produto a ser produzido.
- AcHw - um agente motor responsável pelo acesso ao hardware eletrônico do sistema.
- Conveyor - um agente cognitivo que representa a esteira do sistema; esconde do agente produto a complexidade do acesso ao hardware para se realizar o transporte.
- Stamper - um agente cognitivo que representa um módulo carimbador do sistema; esconde do agente produto a complexidade do acesso ao hardware para se carimbar letras do anagrama na palete.

A principal contribuição do SIAPE à arquitetura de Cavalcante é o reconhecimento da existência do agente *OrderAgent*, na camanda de negócios, que é um tipo de agente

que permite a comunicação externa com os agentes internos ao sistema, contudo não pode ser enquadrado como um agente cognitivo ou motor da arquitetura. A diferença reside no fato da função *gateway* do agente de ordem de serviço permitir a comunicação com o operador, através da IHM, de uma forma transparente.

O agente Produto e o agente Recurso da arquitetura SIAPE, funcionam conceitualmente exatamente igual à arquitetura de Cavalcante, isto é, o agente cognitivo responsável pela lógica e inteligência do sistema e o agente motor fica responsável por receber as decisões do agente cognitivo e realizar as operações necessárias no processo produtivo.

2.3 Conceituação teórica de termos importantes para a pesquisa

O avanço da fronteira da ciência aproxima cada vez mais as áreas da Engenharia e da Computação. Neste contexto encontramos antigos termos combinados entre si para criar novos significados. O objetivo dessa seção é esclarecer o significado de alguns destes termos que são utilizados na sequência deste trabalho e evitar erros em suas interpretações.

2.3.0.1 Auto-organização e emergência

Sistemas EPS são dito auto-organizáveis e emergentes.

Um sistema é chamado de auto-organizado quando é capaz de mudar a sua organização interna autonomamente, isto é, sem interferências externas, a fim de responder a uma mudança ambiental relevante. A **auto-organização** é, pois, a propriedade de um sistema de adquirir uma estrutura espacial, temporal ou funcional sem interferência externa.

Há várias formas de se fazer tal auto-organização, por exemplo, através de um subsistema que detém toda a informação necessária para realizar a configuração do macrosistema mediante uma análise cuidadosa do ambiente e das perturbações sofridas; esta é a solução centralizada. No entanto, quando o sistema não tem essa entidade centralizadora, pode ainda ser capaz de auto-organização quando os elementos que formam o sistema forem suficientemente inteligentes para se perceberem, interagirem e montarem a topologia mais adequada para a execução de um objetivo (ou múltiplos objetivos). Quando isto ocorre, é dito que o sistema é **emergente**, pois aparecem propriedades e padrões no nível macro, mas a informação de como tais padrões e propriedade devem ser formados não estão descritas *claramente* nos elementos que formam o sistema. Diz-se que tais propriedades emergem da interação dos elementos constituintes do sistema. Do ponto de vista micro, as ações dos agentes são aleatórias, mas resultam em uma propriedade emergente no nível macro.

Um EPS possui auto-organização porque é capaz de autonomamente ajustar-se a variações na demanda, bem como reconhecer os elementos que o forma. Também é dito

que possui **emergência** porque as interações entre os agentes ocorrem de forma dinâmica (não prevista), entretanto, um produto final é montado.

O período atual está sendo marcado pela busca de soluções para o problema recorrente da customização em massa. Esse período é, neste estudo, denominado de Indústria Híbrida devido ao fato da convergência de paradigmas, sistemas, arquiteturas e ferramentas na busca de uma solução ótima para o fenômeno da customização, sem no entanto se chegar a um denominador comum.

Os sistemas evolutivos, com a aplicação de algumas de suas capacidades e propriedades, nesse caso, auto-organização e emergência, apontam para soluções eficazes, vencidas as complexidades, na busca de soluções definitivas para o problema recorrente da customização de massa.

2.3.1 Plataforma da Indústria 4.0

O *white paper* da Indústria 4.0 (BITKOM, 2015) formulou as questões centrais da *i*4.0, a partir de um ponto de vista da pesquisa e inovação. Das recomendações publicadas, quatro são consideradas e descritas neste trabalho, conforme segue:

A integração vertical (IVe) - é caracterizada pela capacidade dos sistemas integrarem os seus processos técnicos aos processos de negócio da empresa, para auxiliar no processo de decisão estratégica empresarial; uma das propriedades relacionadas é a interoperabilidade entre os sistemas;

A integração horizontal (IHo) - é a agregação, em tempo real (GERMAN COMMISSION FOR ELECTRICAL – VDE, 2014) dos elementos de conhecimento que tais sistemas geram no chão–de–fábrica. Para isso relaciona-se a comunicação, o planejamento e a programação de tais sistemas, contendo elementos que serão usados para incorporar raciocínio baseado em casos de uso, evidenciando a capacidade de evoluir com a mudança dos requisitos de produção;

A integração humana (IHu) - é caracterizada pelo uso das capacidades de criação dos seres humanos considerados no desenvolvimento dos sistemas e na recuperação dos sistemas legados *i*3.0;

A engenharia 4.0 (E4.0) é denotada pelos domínios dos conhecimentos de Engenharia durante todo o processo do ciclo de vida do produto, os quais o projetista deverá capturar com base na especificação do produto, desde a concepção ao encerramento do projeto, levando-se em conta as tarefas e habilidade dos agentes mecatrônicos do sistema. Inclui–se aqui o domínio da eletrônica, da mecânica, de software, das redes, entre outros;

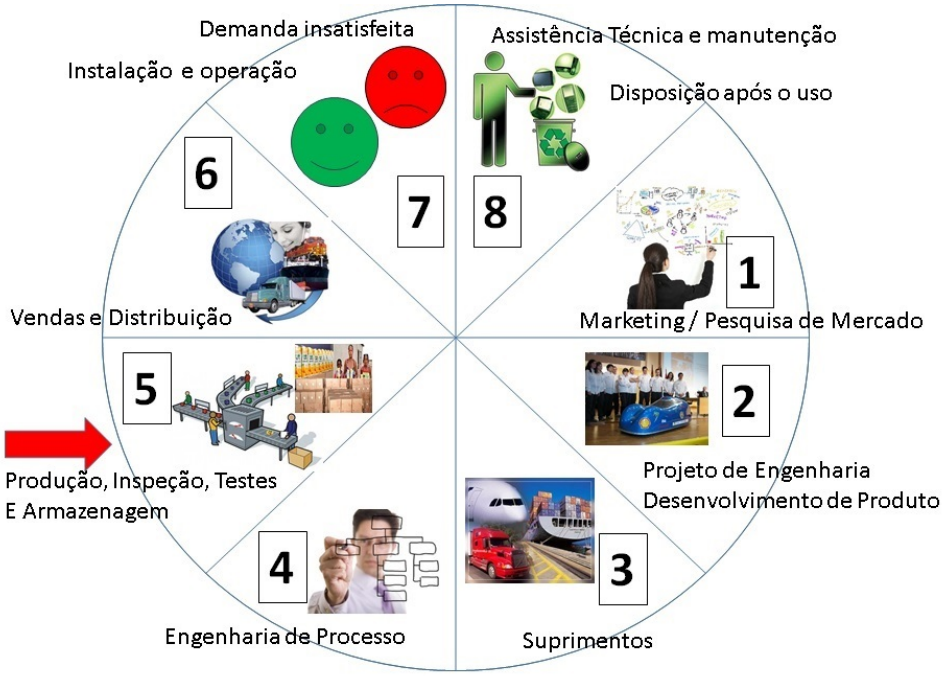


Figura 13 – SIAPE: Ciclo de vida do produto

A Indústria 4.0 representa a situação futura, entretanto, na atualidade, já estão sendo produzida as condições necessária ao seu funcionamento, a saber: os ciberespaços, contendo as ciberestruturas (NITRDGROUPS, 2010) os dispositivos e tecnologias que serão utilizados pela Indústria 4.0, que por sua vez, são baseados nos paradigmas evolutivos e nos (CPS) (LEE; NEUENDORFFER, 2008).

Neste contexto, os grandes centros de desenvolvimento de C&T&I estão tomando iniciativas que visam a implantação da *i*4.0. Por exemplo, o Horizon 2020 (EUROPEAN COMMISSION, 2015) é o maior Programa de Investigação e Inovação da UE. O programa já conta com cerca de 80 bilhões de euros em financiamento disponível ao longo de 7 anos (2014-2020), além do investimento privado que esse dinheiro vai atrair. Ele promete mais avanços, descobertas e estreias mundiais, possibilitando grandes ideias saírem do laboratório para o mercado. Visto como um meio de impulsionar o crescimento econômico e criar empregos na UE tem o apoio político dos líderes europeus e dos deputados do Parlamento Europeu.

2.3.2 Termos do Sistema de Produção

No jargão do ambiente industrial, aparecem alguns termos que igualmente precisam ser aclarados. Neste trabalho, os seguintes termos terão os subsequentes significados:

Ciclo de vida do produto - O ciclo de vida do produto descreve as fases do produto desde o seu nascimento até o seu descarte na sociedade. Tal ciclo é mostrado na

Figura 13. Analisando a figura, tem-se o ciclo iniciado na fase 1, onde a equipe de marketing realiza pesquisas no mercado de demandas não atendidas (fase 7) para que esforços sejam aplicados nessa direção; na fase 2, a necessidade não atendida é transformada num produto a ser produzido; a fase 3, ilustra a compra e a logística dos insumos necessários para a realização do produto; na fase 4, a Engenharia de Processo prepara o produto para produzido em linhas de produção; a fase 5 acontece nas linhas de produção propriamente ditas, onde são efetivamente montados os produtos; na fase 6 o produto é vendido e distribuídos no comércio; a fase 7 ilustra o atendimento da demanda insatisfeita através do atendimento às necessidades do cliente; Na fase 8 tem-se a assistência técnica e a o posterior descarte após o uso do produto finalizado.

Reconfiguração ou tempo de *setup* de linha de produção Tempo de *setup* é o período em que a produção é interrompida para que os equipamentos da linha de produção sejam ajustados, configurados ou reconfigurados. O tempo de setup está diretamente relacionado com as variações do produto e o planejamento da produção realizado pela indústria. Nos sistemas de produção em lotes, as paradas para ajustes estão mais presentes devido à necessidade de se produzir uma grande variedade de produtos, tornando o controle deste período uma necessidade crítica, fundamental para a garantia de uma boa produtividade.

Configuração ou *lead time* de linha de produção É o tempo decorrido desde a concepção do produto até a montagem da linha e sua efetiva entrada em produção com toda a capacidade produtiva.

Curva de crescimento ou *ramp up* de linha de produção *Ramp up* é um termo usado em economia e negócios para descrever um aumento firme na produção. Neste trabalho de pesquisa este termo está restrito à linha de produção. Quando um plano de produção de um novo produto entra em linha, os recursos não conseguem atingir a quantidade ideal planejada e ajustes são realizados para que essas quantidades sejam alcançadas. O período entre o início da produção até que os recursos produtivos consigam atingir a quantidade planejada é definido como o *ramp up*.

Com os volumes altos de produção, as configurações entre produtos eram realizadas em espaços de tempos que não preocupava o setor produtivo, entretanto tal não é mais a realidade atual. A Figura 14 descreve esse processo onde pode ser evidenciado que o produto A, na prática passada de manufatura, produz durante um longo período de tempo, enquanto que atualmente, convivem vários produtos (A,B,C) simultaneamente em produção. Mais ainda, vislumbra-se que a prática futura exija que um tempo de reconfiguração e as paradas de linha tendam a zero.

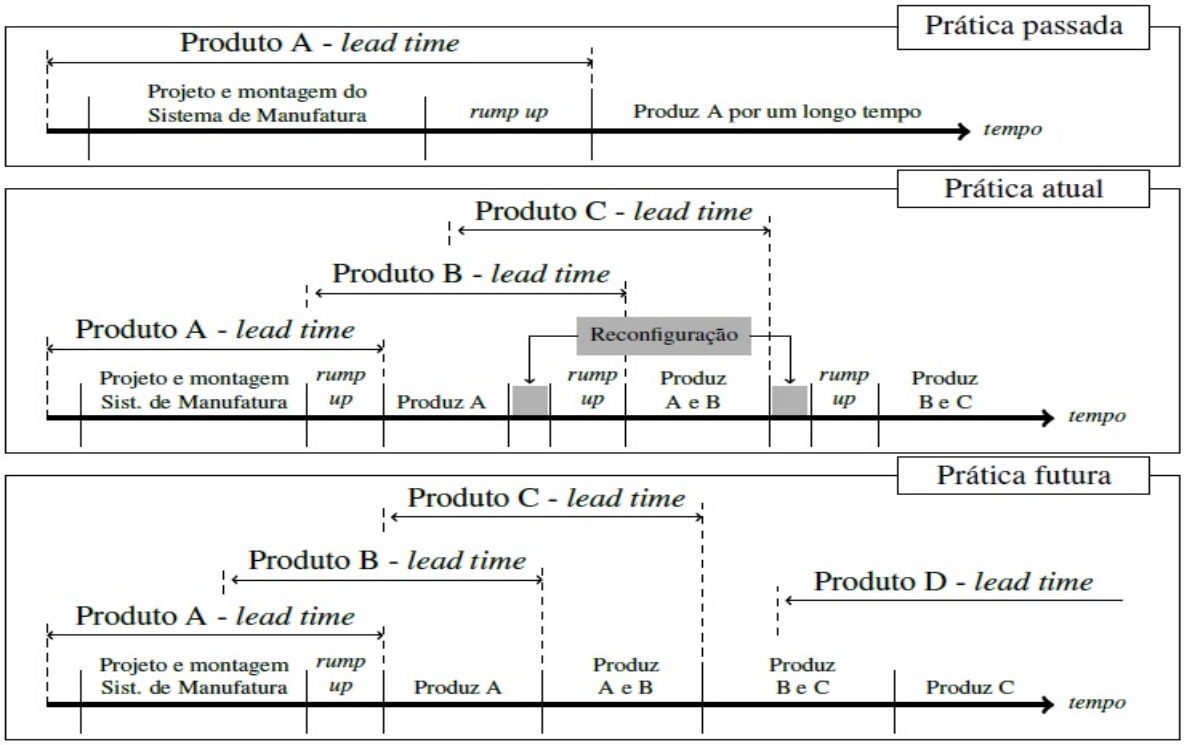


Figura 14 – Redução do Lead time de Produção

Fonte: (KOREN et al., 1999) com adaptações de (CAVALCANTE, 2012)

2.3.3 Agentes e Sistemas Multi-Agentes (MAS)

O termo **agente** continua sem uma definição universalmente aceita, existindo ainda muito debate e controvérsias, contudo para nortear este trabalho, o termo agente foi conceituado como uma entidade abstrata que age no mundo real por meio de sensores que percebem o ambiente e atuadores que alteram esse ambiente para atingir metas estabelecidas. Esse conceito tem suas bases nas seguintes definições:

> *"Um agente é algo capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre esse ambiente por meio de atuadores"* (RUSSELL; NORVIG, 1995).

> *"Um agente é um sistema de computador que está situada em algum meio, e que é capaz de agir autonomamente neste ambiente, a fim de atender seus objetivos de projeto"* (WOOLDRIDGE, 2002; WOOLDRIDGE, 2007)

Agentes conseguem perceber o ambiente e agir sobre ele para alterá-lo. Dentre as diversas características de agentes, neste trabalho foram enfatizadas as seguintes:

1. Autonomia - agentes atuam cumprindo seus objetivos individuais;
2. Sociabilidade - agentes interagem entre si estabelecimento uma sociedade de agentes;

3. Racionalidade - um agente pode raciocinar sobre os dados que ele recebe, através de seus sensores ou de comunicação com outros agentes, a fim de encontrar a melhor solução para atingir o seu objetivo;

4. Reatividade - um agente pode reagir à mudanças no seu meio ambiente;

5. Pró-atividade - um agente pode ativamente agir no seu meio buscando os seus objetivos;

6. Adaptabilidade - um agente é capaz de aprender e mudar seu comportamento quando uma solução melhor é descoberta.

Um sistema formado por agentes de diferentes tipos, ou vários agentes de um único tipo, que interagem entre si, formam um sistema multiagente (MAS). Tais sistemas são por natureza descentralizados e modulares, facilmente adaptáveis ao meio e capazes de resolver problemas complexos.

Agentes são particularmente interessantes para os paradigmas industriais emergentes, pois estes são modulares, descentralizados, e necessitam de adaptação. Utilizando-se MAS nos sistemas evolutivos implica num ambiente de resiliência, sustentabilidade, robustez, tolerância a faltas (RIBEIRO; ROCHA; BARATA, 2013). EPS é baseado em agentes.

2.3.4 O protocolo FIPA – Foundation for Intelligent Physical Agents

A *FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents)* é uma associação internacional de companhias e organizações que juntas unem esforços a fim de produzir especificações para tecnologias de agentes que sejam aceitas de uma forma genérica. A FIPA promove um conjunto de tecnologias para diferentes áreas através de um conjunto de documentos que definiram as regras que permitem a uma sociedade de agente existir, operar e ser gerenciada. Dentre esses documentos encontram-se as especificações *FIPA–ACL (Agent Communication Language)* que definem a comunicação entre os agentes.

A Figura 15 ilustra os protocolos responsáveis pelo mecanismo de negociação e execução de funcionalidades dentro dos protocolos. A parte *a* da figura mostra o Protocolo *FIPA Request Interation Protocol* e a parte *b* mostra o FIPA Contract Net Interation Protocol. Para este trabalho, o *FIPA Request Interation Protocol* atinge os objetivos almejados.

Dentre os campos constantes nos campo definidos nas mensagens FIPA, os seguintes campos podem ser encontrados: 1) A Identificação do agente no sistema (AID); 2) O Conteúdo das mensagens expressas por caracteres; 3) O controle de mensagens, expresso pela

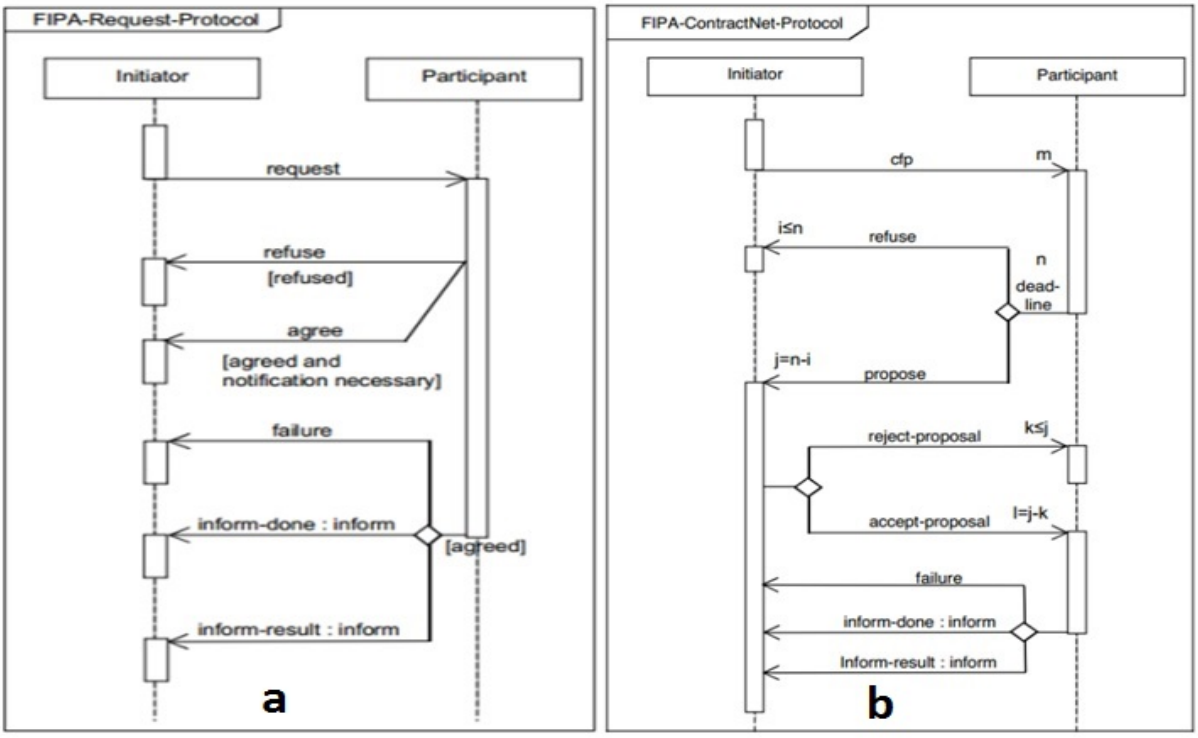


Figura 15 – SIAPE: FIPA – ACL

Fonte: (FIPA, 2002a; FIPA, 2002b)

identificação da conversa, o tipo de mensagem, tempo máximo, entre outros; 4)Ontologia, responsável pelo significado dos termos dentro do contexto de trocas das mensagens.

2.4 As Fases do Paradigma Evolutivo: acadêmica, experimental e holística

Na Figura 16 visualiza-se onde EPS está colocado, em termos históricos, no conjunto dos paradigmas da manufatura. Para uma análise específica das pesquisas realizadas em EPS, dividiu-se estes estudos em três fases distintas, a saber:

1. A Fase Acadêmica: encontraram-se as pesquisas conceituais, simulações e primeiras provas de conceitos. Essa fase foi identificada entre os anos de 2002 quando surge a base dos sistemas evolutivos, o paradigma EAS e se estende até 2006 quando Onori estabelece as bases do paradigma *EPS*;

2. A Fase Experimental: onde o paradigma toma dimensões de testes e experimentos realizados por vários pesquisadores e dura até a prova de conceito do Projeto *IDEAS* em 2012;

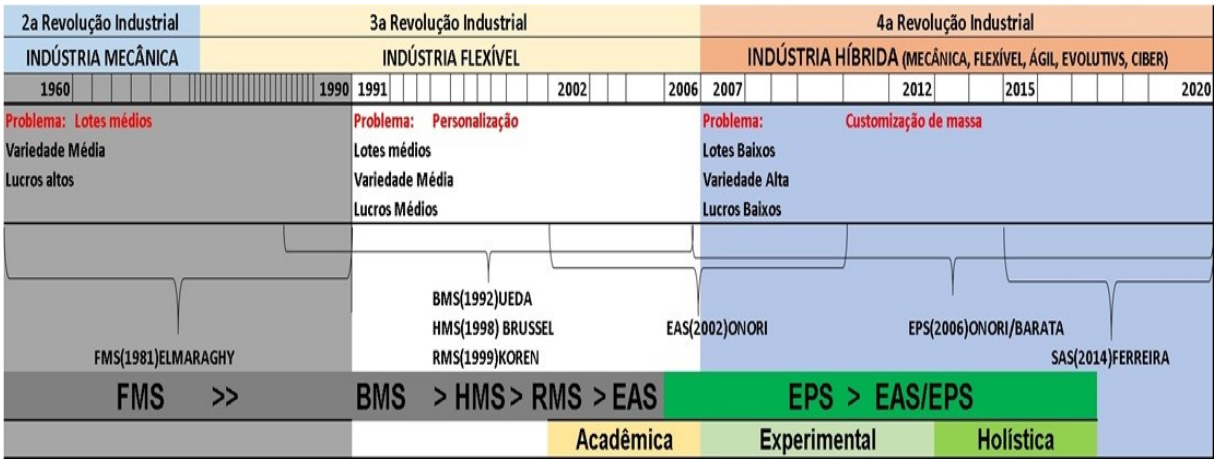


Figura 16 – MeDSE - Fases do paradigma EPS

3. A Fase Holística: o paradigma percebe na prática a complexidade gerada pela interdisciplinariedade, e nesse momento, o foco foi além do chão-de-fábrica e transcendeu os campos Engenharia e da Computação para o campo da Economia, dos Sistemas complexos, da Inteligência Artificial, da Biologia e outros campos do conhecimento humano.

2.4.1 A Fase Acadêmica do Paradigma Evolutivo

Para encarar de frente o problema da personalização, foram criados os paradigmas *BMS* utilizando seus *modelons*, o *HMS* com a ideia de *holons* e o *RMS* que, através da reconfiguração, consegue tratar as mudanças ambientais relevantes.

Na impossibilidade de solução ótima, pois cada tipo de sistema apresenta suas particularidades e desafios próprios, inicia-se a Fase Acadêmica do paradigma *EPS*, no início do século XXI. Com o surgimento do paradigma *EAS*, que utiliza das tecnologias de agentes e avanços no campo das linguagens de programação, modelagem e redes, (ONORI, 2002) expandiram estes conceitos e os aplicaram na manufatura. EAS/EPS, usam módulos inteligentes, que comunicam-se em rede, através dos protocolos FIPA (FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS, 2013), e princípios de Inteligência Artificial (IA) (RUSSELL; NORVIG, 1995). Realizam os conceitos da plugabilidade (*plug and produce*) através da auto-organização e emergência de agentes.

O trabalho desenvolvido por (BARATA; MATOS, 2003) denotou uma arquitetura de referência para avaliar a questão da agilidade no chão de fábrica, e assim dominar as perturbações e incertezas do mercado que atingia o sistema. A composição do sistema e o seu comportamento são estabelecidas através da configuração das relações entre os módulos, usando mecanismos contratuais. A elevada capacidade de reutilização era motivada pelo conceito de módulos que eram facilmente atualizados para posterior reutilização.

2.4.2 A Fase Experimental do Paradigma Evolutivo

Em 2007 o trabalho conjunto de (FREI; BARATA; ONORI, 2007) analisa o contexto e implicações do novo paradigma de produção *EPS*. Neste trabalho Frei reconhece a agilidade, a sustentabilidade e a reatividade como pontos chaves para tratar problemas de sistemas dinâmicos. Os sistemas evolutivos tendem para a solução do problema da customização, no entanto, precisam ser mais amadurecidos e tornados mais robustos para lidar com os distúrbios dos mercados atuais, e para isso, o paradigma *EPS* tem sido evoluído e atualizado o suficiente para realizar essa tarefa.

O trabalho de (MAFFEI; ONORI, 2009) apresenta uma versão simplificada do paradigma *EPS*, em uma forma de metodologia, que permitiu que o conceito de ciclo de vida de um produto e as ferramentas de avaliação de investimento puderam ser integrados. O trabalho identificou, entre outras coisas, as conquistas atuais dentro dos estudos do paradigma EPS que possibilitam às empresas relacionar requisitos de suas necessidade com algumas características de um modelo de negócio aplicável ao modelo atual de desenvolvimento de produto baseado em EPS.

(CANDIDO et al., 2011) apresentaram a associação de *EPS* com a abordagem *Service Oriented Architectures* (SOA), na busca de um objetivo comum, a nível do dispositivo para o domínio da automação industrial, delineando princípios arquitetônicos fundamentais e de um modelo de dispositivo para apoiá-lo. A associação entre SOA e EPS foi demonstrada através de um protótipo que confirmou a sua aplicabilidade num cenário esperado de caso de uso em automação industrial.

(CAVALCANTE, 2012) trazem uma visão geral dos paradigmas de manufatura, realiza uma breve descrição das pesquisas em torno do tema EPS e lança as bases para criação de uma linha de montagem que assimile os conceitos, tecnologias e paradigmas evolutivos que podem ajudar o Brasil nos avanços para a 4^a Revolução Industrial.

Por outro lado, (ALGEDDAWY; ELMARAGHY, 2012) apresentam o modelo para prever o futuro desenvolvimento de novos produtos e sistemas de manufatura. O modelo é inspirado no sistema biológico aplicado aos recursos de produção para prever potenciais alterações nas condições comportamentais do sistema. Uma técnica matemática é aplicada para gerar uma síntese de conhecimento de co-evolução e analisar as relações entre as capacidades de fabricação e as características do produto. Regras são previamente estabelecidas e um sistema de equações lineares é formulado para descobrir o movimento das potenciais alterações nos sistemas.

Também neste ano, (RIBEIRO; ROSA; BARATA, 2012) publicam aplicações de Inteligência Artificial que utilizam os modelos de cadeia ocultas de Markov para realizar as análises estocásticas das respostas dos sistemas. Com as respostas em mãos, as correções de erro são trabalhadas para corrigir as variações dos sistemas e fazê-los

responder com robustez às perturbações (RIBEIRO; ROSA; BARATA, 2012; RIBEIRO; ROCHA; BARATA, 2012); e (CAVALCANTE; PEIXOTO; PEREIRA, 2012) propõe sua arquitetura baseada em agentes que realiza auto-organização, mas também permite auto-otimização em alguns dos recursos do sistema. Em sua arquitetura usa a noção de *skills*, descoberta de serviços e auto-organização de agentes, e foca nas questões mais relevantes do problema da customização no chão de fábrica com o objetivo do *plug and produce*.

2.4.3 A Fase Holística do Paradigma Evolutivo

Nos anos de 2013 e 2014 percebe-se uma acentuada elevação nas pesquisas em torno dos sistemas *EAS* e *EPS*. Agora, de uma forma mais qualitativa, os pesquisadores se valem de novos conceitos, técnicas, teorias e avanços tecnológicos para realizarem, na prática, as pesquisas que foram concluídas com sistemas demonstradores.

Esta fase começa com (ROSA, 2013) que apresenta sua arquitetura na forma de um *framework* probabilístico no paradigma EAS/EPS utilizando-se sistemas multiagentes. Rosa afirma que existe uma falta de métricas para o estudo dos sistemas que exploram os conceitos da auto-organização e respostas autônomas. Seu principal objetivo foi trabalhar com pequenos sistemas que utilizem pequenos volumes de produção de produtos com elevada variabilidade.

Já os trabalhos de (MAFFEI; AKILLIOGLU; FLORES, 2013; MAFFEI; NEVES; ONORI, 2013)vai além do chão de fábrica para desenvolver um sistema que caracteriza os custos e cria estratégias de automação em ambientes que utilizam sistemas evolutivos de produção. O trabalho traz uma abordagem holística, contudo, percebe-se que a efetivação do paradigma EPS nos vários níveis das empresas ainda precisa de muita implementação.

(AKILLIOGLU; FERREIRA; ONORI, 2013) trazem, para o campo da investigação, mais uma questão que faz uma abordagem holística do paradigma EPS, utilizado o conceito de demanda responsiva, denotada como um tipo de planejamento ágil.

(NEVES et al., 2013) apresentam uma arquitetura chamada de *Adaptador* com uma arquitetura genérica que suporta projetos e prospecções de métodos, que servem para suporte de projetos e para a configuração de sistemas mecatrônicos. O projeto se assemelha à modularização e empacotamento de objetos numa abordagem orientada a objetos.

(RIBEIRO; BARATA, 2013) chamam a atenção para os estudiosos que não estão aplicando corretamente os conceitos e ferramentas para realizarem os sistemas baseados nos vários paradigmas. Eles fazem uma revisão nos paradigmas e avanços para explicar a correta aplicação, inclusive com exemplos. O artigo deixa claro que os desempenhos dos paradigmas, incluindo *EAS/EPS*, não estão correspondendo às expectativas, contudo, os autores atribuem essa dificuldade aos estudiosos e pesquisadores que não aplicam

corretamente os procedimentos para uma perfeita atuação das propriedades dos sistemas. Para que haja uma melhor compreensão, um novo conjunto de ferramentas e perspectivas são necessárias e devem refletir os implicações e lógica da auto-organização e da emergência em um contexto de mecatrônica.

(ROCHA; RIBEIRO; BARATA, 2014) apresentam algumas mudanças arquitetônicas em relação ao EPS tradicional e as justificam em uma análise de controle da auto-organização. Os autores voltam ao tema da personalização em massa, explicando a implicação de que o sistema de produção tem que ser extremamente dinâmico ao tratar com o problema do lote de produção, pois a capacidade de reconfigurar rapidamente o sistema é primordial. Isso envolve tanto as estações que realizam processos de produção quanto o sistema de transportes. Segundo os autores, tradicionalmente, questões de reconfiguração de sistema são abordados a partir de um ponto de vista da otimização, implicando que a alocação de um determinado lote de trabalho para máquinas/estações específicas em um cronograma seja ideal. Contudo, o número e a natureza dos seus pressupostos de base são irreais, dado que mesmo uma quantidade pequena de elementos na produção pode gerar uma quantidade enorme de alternativas, não permitindo o uso dos algoritmos em tempo de produção. Aplicando-se a auto-organização ao problema, contudo, tem-se a vantagem de se alcançar uma solução justa, em um ambiente concreto e como uma reação das condições operacionais atuais. Mesmo que não possa ser realmente asseguradas as condições ótimas, as soluções atingem os reajustamentos online e tornam o sistema mais robusto.

É lugar comum entre as pesquisas que o problema de customização de massa ainda é o problema da indústria de transformação do século XXI, e que este problema, segundo as análises apresentadas neste estudo será conseguido com as propriedades presentes nos sistemas evolutivos: resiliência, auto-organização, auto-otimização, escalabilidade, e interoperabilidade.

Os sistemas evolutivos por seu turno denotam na atualidade o que existe de mais promissor para enfrentar o problema da customização, contudo, as tecnologias e ferramentas devem estar num estágio de maturidade ainda não alcançado. Para isso é necessária a utilização, preparação e especialização de ferramentas refinadas no campo. Os desafios são grandes, devido a interdisciplinariedade e complexidade das teorias e demandam pesquisas nas mesmas proporções.

Capítulo 3

Desenvolvimento

Este capítulo descreve o desenvolvimento do Sistema Inteligente Ágil de Processo Evolutivo - SIAPE, o qual segue o paradigma EPS. Para este desenvolvimento foi criado um método de desenvolvimento em que os princípios de EPS foram usados desde as fases mais primordiais do desenvolvimento. O método de desenvolvimento criado foi chamado de Método de Desenvolvimento de Sistemas Evolutivos - MeDSE. Duas seções foram utilizadas para realizar essa descrição:

Na Seção 3.1 são descritas as três fases do método de desenvolvimento, a saber: Fase de Conceitos, Fase de Realizações e Fase de Finalizações. A seu turno, cada fase é composta por um número parcial de etapas, de um total de dez, que facilitam o desenvolvimento de cada fase.

A Seção 3.2 descreve a aplicação do método de desenvolvimento no protótipo SIAPE por meio das descrições dos desenvolvimentos de suas partes mecânica (descrição dos dispositivos definidos para a parte mecânica), eletrônica (a descrição dos circuitos elétricos), de software (descrição dos agentes mecatrônicos e seus *skills*) e comunicação (descrição dos protocolos *FIPA* utilizados na comunicação entre os agentes mecatrônicos do sistema) e suas integrações.

3.1 Visão do Método de Desenvolvimento de Sistemas Evolutivos (MeDSE)

Para realizar o desenvolvimento do (SIAPE) identificou-se a necessidade da criação de um método que contemplasse a noção de agentes inteligentes e suas habilidades, que são denominados de *skills* no paradigma *EPS*, desde as primeiras fases do desenvolvimento. O método foi denominado de Método de Desenvolvimento de Processo Evolutivo (MeDSE).

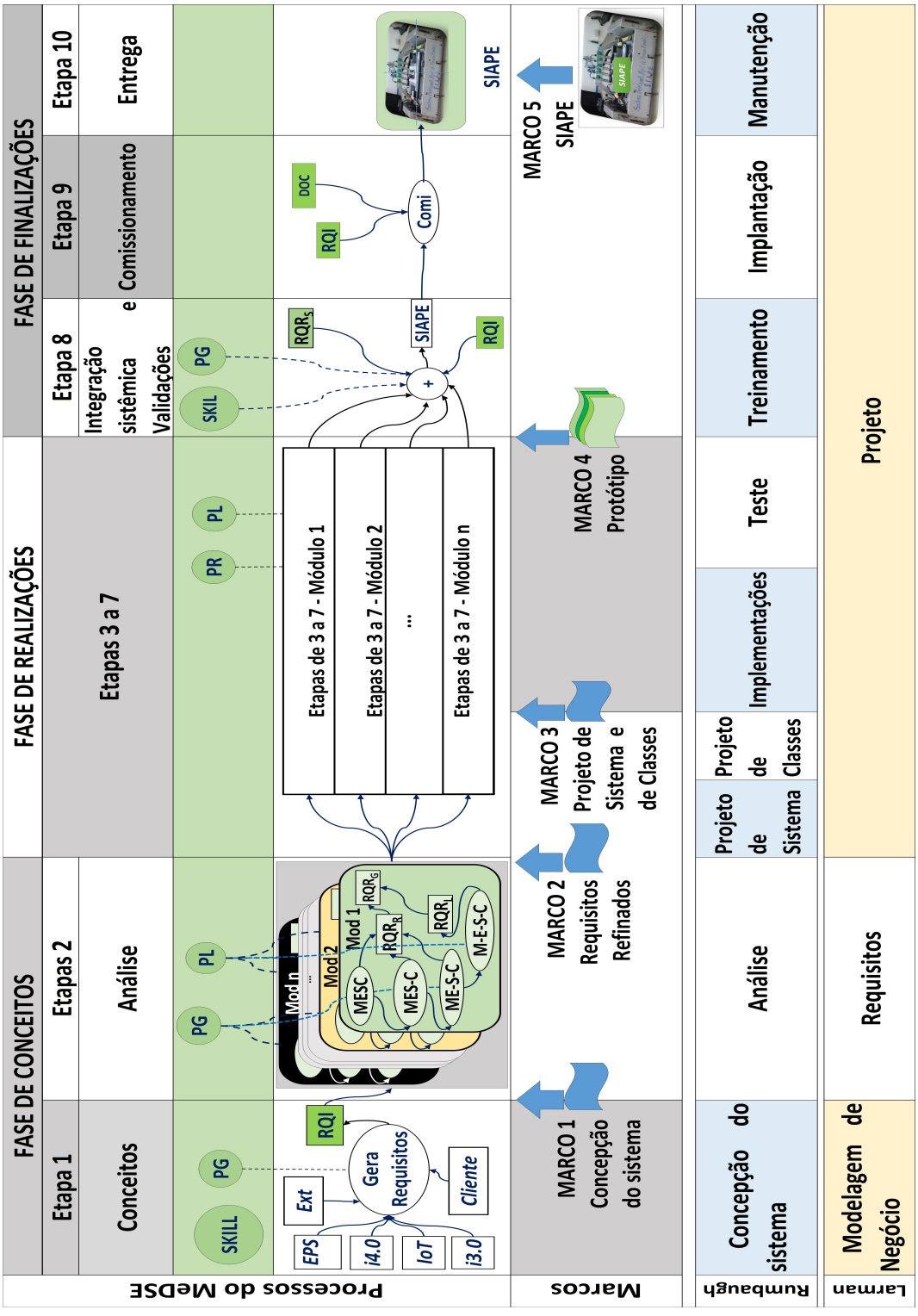


Figura 17 – Método de Desenvolvimento de Sistemas Evolutivos - MeDSE

Depois de criado, o método foi comparado aos métodos utilizados por RUMBAUGH (2006) e LARMAN (2007). A comparação com RUMBAUGH teve como principal objetivo a criação dos marcos do MeDSE. *LARMAN 2007* foi utilizado para melhorar a acurácia na definição de requisitos e seus refinamentos. A Figura 17 ilustra a visão geral do MeDSE na qual pode-se identificar as fases, as etapas, as atividades e os marcos a partir dos métodos comparados. Tais itens são explorado nas subseções seguintes.

3.1.1 Definição de agente mecatrônico, problema global, problema regional e problema local

Uma parte importante do MeDSE são os conceitos de Problema Global (PG), Problema Regional (PR) e Problema Local (PL).

A Figura 18, mostra um esquema de como tais conceitos se relacionam. Nesta figura:

M - denota uma parte mecânica

E - denota uma parte eletrônica

S - denota a parte de software

C - denota a parte de comunicação

ME/MES/MESC - Algum conjunto destas letras - corresponde a uma visão integrada daquelas partes. Ex.: ME é a integração entre a parte mecânica e a parte eletrônica.

Cp - é um componente composto, por exemplo, o SIAPE é uma composição de vários MESC.

At - é um componente visto de forma atômica. Ex.: a parte mecânica pode ser projetada de forma independente, segundo suas propriedades mecânicas, em relação às outras partes do sistema/subsistema/módulo.

? - denota um outro componente que pode ser qualquer um dos aqui discutidos.

Propriedades - uma ou mais característica, ou propriedade, ou atributos da entidade ou do sistema.

Triângulo - representa uma integração (composição) se vista de baixo para cima ou uma especialização (decomposição) vista de cima para baixo no diagrama.

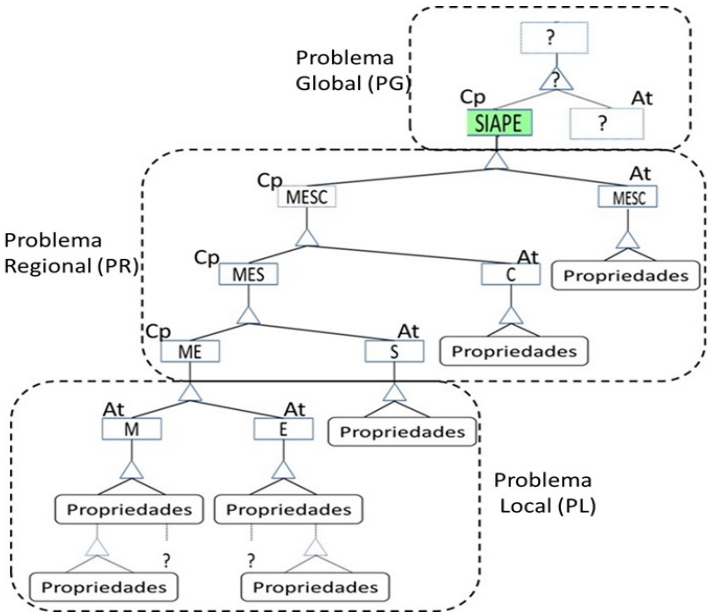


Figura 18 – MeDSE: Dividindo o problema global em regional e local

Definição de agente mecatrônico - Neste trabalho, os agentes mecatrônicos são os módulos do sistema de manufatura e são identificados pela sigla MESC (Mecânica, Eletrônica, Software, Comunicação), indicando um sistema/subsistema/módulo completamente funcional.

Na Figura 3.2, um ou mais destes módulos serão integrados no sistema SIAPE.

Definição de problema global (PG) - Problema global é definido como a identificação do sistema como um todo e todas as partes a serem envolvidas. Essa identificação deve representar o consenso entre os especialistas da parte do cliente e a equipe de desenvolvimento. Por exemplo, um carro acoplado a um motor elétrico é integrado a um controlador, o qual contém um software que tem a capacidade de acelerar e parar o carro conforme ordens vindas pela rede. A Figura 18 corresponde ao SIAPE.

Definição de problema regional (PR) - Problema regional é definido como uma visão do sistema na qual os relacionamentos entre as partes que o formam dependem funcionalmente uma das outras. Na Figura 3.2, por exemplo, ME e MES correspondem a dois problemas regionais. ME contém atributos/propriedades tanto mecânicos quanto eletrônicos, que formam então uma entidade de nível mais alto, integrada. MES, por outro lado, contém atributos/propriedades mecânicas, eletrônicas e de software. Formam uma entidade de nível ainda mais alto, quase um módulo completo. Já MESC é outro problema regional e que denota um módulo completo, um agente mecatrônico.

Definição de problema local (PL) - Problema Local é definido como a visão em que as entidades que formam o sistema são atômicas, isto é, podem ser analisadas e

desenvolvidas sem interferência de outras entidades. Na Figura 18, as entidades M e E, que correspondem aos conjuntos Mecânicos e Eletrônicos, podem ser analisadas individualmente com seus atributos e propriedades eletrônicas e mecânicas separadamente. Por exemplo: no conjunto mecânico, uma especificação possível pode aparecer como: um carro deve movimentar-se sobre um trilho; tanto a largura do carro e a bitola do trilho são especificadas sem nenhuma influência da parte eletrônica e podem ser analisados pela equipe mecânica sem restrições. O motor que faz o carro funcionar, pode igualmente ser especificado em termos de torque e velocidade mecânicos, mas a equipe eletrônica pode fazer análise de seu funcionamento independentemente da mecânica.

Ainda analisando a Figura 18 pode-se perceber que as entidades M e E não conseguem mais ser decompostas em outras entidades, pois encontram-se em suas formas atômicas. Quando uma entidade atinge a sua forma atômica, o projetista chegou ao nível ideal para realizar a modelagem da entidade, pois em sua forma atômica, a entidade não sofre interferências de outra entidade externa. A tentativa de decompor a entidade levará ao nível das propriedades da entidade decomposta, ou seja, levará à desestruturação da mesma, inviabilizando o processo de modelagem.

3.1.2 A Fase de Conceitos

A Fase de Conceitos corresponde à realização conceitual, isto é, a concepção do sistema e a definições dos requisitos conforme RUMBAUGH (2006) e LARMAN (2007). O objetivo dessa fase é estabelecer uma visão comum entre as equipes de desenvolvimento e os representantes do cliente e o escopo básico do projeto. Seus procedimentos partem da consideração de que existe um problema global que deve ser subdividido em problemas menores para serem tratados atomicamente até se tornarem requisitos que são modelados e simulados para que possam garantir a definição das especificações das partes do sistema.

Essa fase é composta por duas etapas ilustrada na Figura 19 e são descritas nas próximas subseções.

Etapa 1 - Conceitos - A Etapa 1 tem como entrada as informações relativas ao sistema e as necessidades do cliente e sua saída é um documento de definição da concepção do sistema que contém os Requisitos Iniciais (RQI). Além da concepção do sistema, que deve ser aprovado por ambas as partes, desenvolvedores e cliente, o documento de expressar o que é o sistema, e quais os problemas a serem tratados pela equipe de desenvolvimento. A realização desta etapa evidencia a entrega do primeiro marco do sistema.

Etapa 2 - Análises - Na Etapa 2 os RQI são analisados como Problemas Globais (PG) e refinados em problemas regionais (PR) até que se consiga um nível atômico

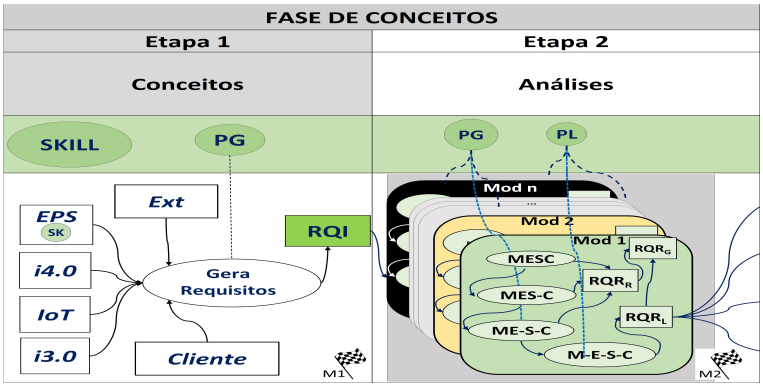


Figura 19 – MeDSE: Fase de Conceitos

denominado de problema local (PL). Esses problemas são analisados considerando os conceitos de skills, que são as habilidades de agentes mecatrônicos, de problema global (PG), problema regional (PR) e problema local (PL). Com a realização desta etapa o segundo marco é entregue.

3.1.3 A Fase de Realizações

A Fase de Realizações corresponde aos processos práticos do desenvolvimento, isto é, à realização das etapas de Projeto de Sistema, Projeto de Classes, Implementações e Testes, conforme RUMBAUGH (2006) e à Etapa de Projeto de LARMAN (2007). Nesta fase os requisitos refinados são modelados, simulados, transformados em projetos a partir das especificações técnicas, integrados e validados modularmente. Ao final dessa fase é entregue um protótipo funcional que evidencia o quarto marco.

Esta fase é formada pelas Etapas 3 a 7, mostradas de forma geral para n módulos na Figura 3.1, e que são mostradas em detalhes na Figura 20. As seções seguintes descrevem cada uma destas etapas.

Etapa 3 - Simulações - Na Etapa 3 os requisitos refinados do sistema em forma de problema global (RQRs), na forma regional (RQRr) e local (RQRl) são modelados e simulados (SimM, SimE, SimS e SimC) até que estes possam ser garantidos para serem confirmados como Especificações Técnicas (Et) de cada problema local, a saber: Especificação Técnica Mecânica (EtM), Especificação Técnica Elétrica (EtE), Especificação Técnica de Software (EtS) e Especificação Técnica de Comunicação (EtC).

Etapa 4 - Projetos - Na Etapa 4 as especificações técnicas são realinhadas na forma de projetos parciais para formarem o Projeto de Sistema e de Classes de cada problema local (PscM, PscE, PscS e PscC). Nesta etapa cada problema local tem

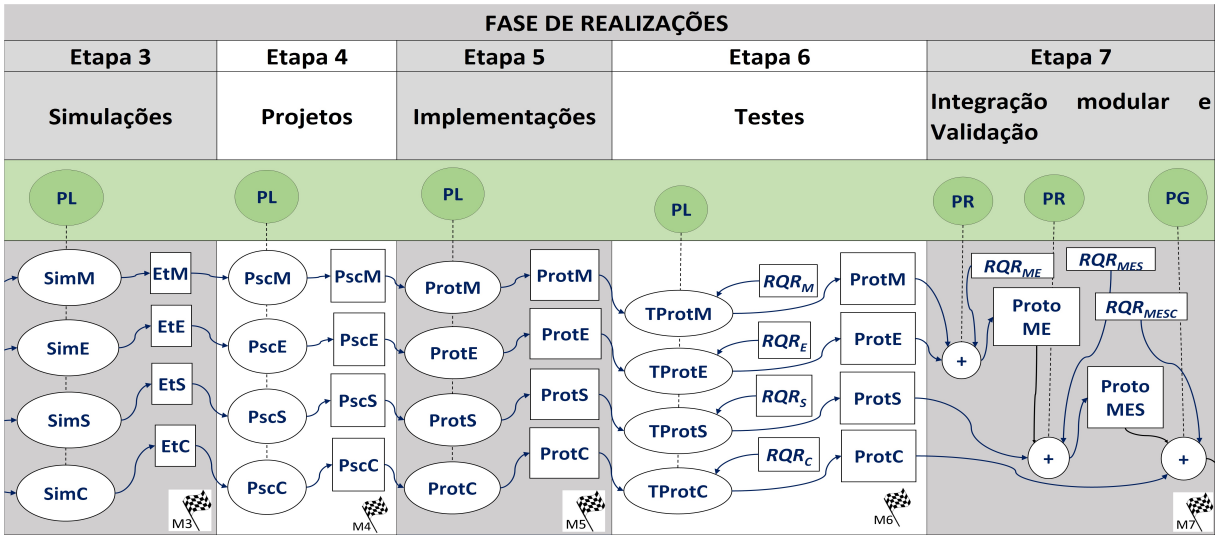


Figura 20 – MeDSE - Fase de Realizações

suas especificações refinadas e incluídas no documento de projeto do sistema e entregue como evidência do quarto marco.

Etapa 5 - Implementações - Nesta etapa os projetos de cada problema local são implementados, marcando as realizações iniciais dos protótipos locais: Os protótipos da parte mecânica (ProtM), da parte eletrônica (ProtE), da parte de software (ProtS) e da parte de comunicação (ProtC) tornam-se plantas reais dos projetos locais.

Etapa 6 - Testes - Nesta fase os protótipos construídos são submetidos aos processos de teste (TProtM, TProtE, TProtS e TProtC) contra os requisitos refinados de cada problema local (RQRm, RQRe, RQRs e RQRc). Após a aprovação são levados à condição de protótipos testados e aprovados para o processo de integração.

Etapa 7 - Integração e validação modular - Na Etapa 7 os protótipos testados são submetidos ao processo de integração e validação modular:

1. O protótipo mecânico (ProtM) é integrado ao protótipo eletrônico (ProtE) o qual denomina-se protótipo ME (ProtoME);
2. O Protótipo ME é então submetido ao processo de validação modular contra os requisitos refinados da entidade ME (RQRme) que representa a realização da solução para a problema regional (ME);
3. O ProtoME é integrado ao protótipo da parte de software (ProtS) e a essa integração denomina-se por MES (ProtoMES);
4. O protótipo MES é então submetido ao processo de validação modular contra os requisitos refinados da entidade MES (RQRmes) que representa a realização da solução para o problema regional MES;

5. O ProtoMES é então integrado ao protótipo da parte de comunicação (ProtC) e com essa integração chega-se à realização da solução do problema global MESC;

   O protótipo MESC é, então, enviado à próxima etapa para ser submetidos aos testes de integração e validação sistêmica.

Ao final das cinco etapas da fase de realizações, o módulo mecatrônico é concluído.

Tais etapas devem ser realizadas para cada um dos módulos do sistema, que compõem a solução ao PG.

Em todas as etapas do MeDSE existem realimentações de registros que informam se as atividades realizadas estão sendo cumpridas e se as metas de cada etapa foram alcançadas. Caso não se atinja o desempenho esperado, a etapa é revista objetivando o alcance das metas e a entrega dos marcos do sistema. A Figura 21 ilustra as realimentações do sistema.

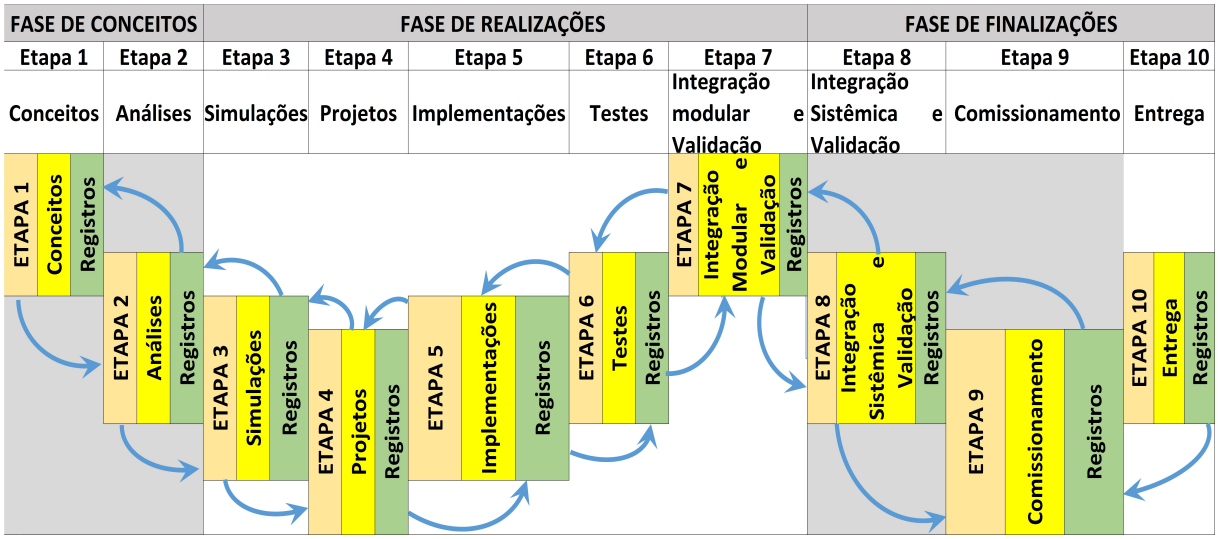


Figura 21 – MeDSE: Realimentações do método

3.1.4 A Fase de Finalizações

A Fase de Finalizações tem o principal objetivos de verificar e validar a integração sistêmica do sistema desenvolvido para posterior comissionamento e entrega. A verificação neste trabalho é entendida como a atividade que analisa se os requisitos funcionais e não-funcionais foram atendidos, enquanto a validação analisa se as necessidades do cliente foram atendidas. A verificação e a validação aplicadas nesta fase se justifica devido ao fato do sistema estar totalmente integrado, isto é, antes que o sistema seja entregue ao cliente, a equipe de desenvolvimento deve certificar-se da eficácia das operações do sistema, para que este, possa então, ser submetido ao comissionamento, etapa na qual os documentos técnicos e de usuário deverão ser validados. De uma forma simplificada, o manual técnico

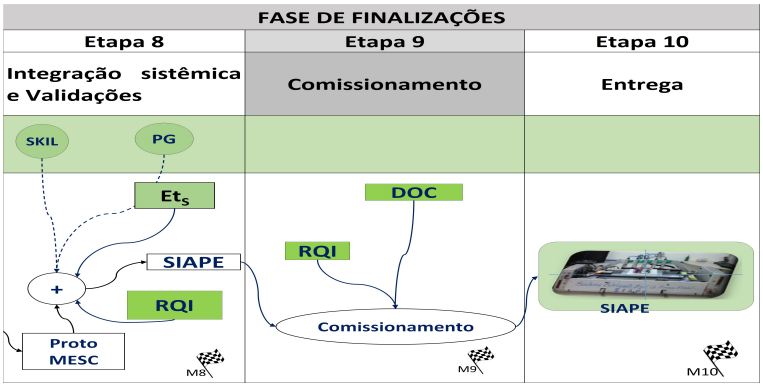


Figura 22 – MeDSE: Fase de Finalizações

é derivado da verificação e o manual de usuário derivado da validação. Após a realização dessa atividades, o sistema deve estar preparado, por exemplo, a realizar um plano de produção que será solicitado por um usuário do sistema utilizando o manual técnico. Ao se cumprir a meta (a realização do plano) os agentes mecatrônicos do sistema estarão realizando suas habilidades (skills) evidenciando - juntamente com o restante das atividades desta Fase de Finalizações - que os requisitos do cliente foram atendidos.

Essa fase é composta por três etapas ilustrada na Figura 22 e são descritas nas próximas subseções.

Etapa 8 - Integração e validação sistêmica - Nesta fase o sistema modular integrado na Etapa 7 é submetido ao processo de integração sistêmica para que seja validado contra os RQI e contra as Ets. Nesta fase o sistema é solicitado a realizar um pedido de usuário que represente uma situação normal de produção. A realização do pedido evidenciará, neste projeto, as atividades dos agentes inteligentes mecatrônicos que se utilizam de seus *skills* para atingir as metas impostas pelo usuário (a realização do pedido). Ao final deste processo têm-se o SIAPE que representa a solução para o problema global identificado pela equipe de desenvolvimento, e que atende aos requisitos do solicitados pelo cliente.

Etapa 9 - Comissionamento - Na Etapa 9 a documentação técnica, e do usuário, é finalizada e o sistema é comissionado contra o manual de operação técnica, e contra o manual de usuário. É importante notar, que mesmo nesta etapa, os registros que identificam se as metas foram alcançadas utilizam-se dos RQI para elucidar qualquer potencial inconsistência surgida.

Etapa 10 - Entrega - Na Etapa 10 o sistema é demonstrado ao cliente e entregue oficialmente, encerrando a fase de desenvolvimento. Na comparação ilustrada na Figura 17, RUMBAUGH (2006) propõe, após a implantação, a fase de manutenção do sistema. Como o foco desse trabalho de pesquisa é o de sistemas evolutivos, a

fase de manutenção faz parte da evolução e adaptação do sistema e é realizada pela equipe de desenvolvimento de acordo com o tempo definido em contrato para esse fim.

3.2 Aplicação do MeDSE ao SIAPE

Esta seção descreve a aplicação do MeDSE na realização do SIAPE, por meio das descrições dos procedimentos práticos realizados no desenvolvimento de cada etapa do método. Para que a descrição reflita os passos e facilite entendimento dos mesmos, cinco itens foram definidos e encontram-se ilustrados na Tabela 12.

Folha	**Linha**	**Onde se lê**	**Leia-se**
1	10	auto-conclavo	autoconclavo

Tabela 1 – Itens processados em cada etapa

Item	**Descrição**
1.Objetivos	Descrição do objetivo da etapa
2.Entradas	Identificação das entradas no processo de transformação da etapa
3.Processo	Processo que transforma as entradas em saídas
4.Saídas	Resultado da realização do processo de transformação. Igual ao marco da etapa
5.Registros	Documentos gerados na etapa e, se necessário geram realimentações

Essa tabela é utilizada no procedimento padrão adotado para descrever as etapas, e este foi seguido durante todo o desenvolvimento do SIAPE. A Figura 23 ilustra o procedimento que é dividido em duas parte e sua explicação é feita a seguir:

Primeira parte - Em todas as etapas os cinco itens definidos são descritos numa tabela;

Segunda parte - A etapa é descrita textualmente, e onde aplicável, figuras são ilustradas.

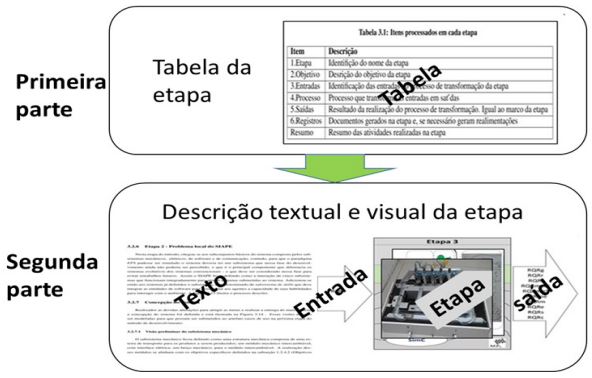


Figura 23 – MeDSE: Descrição da atividades nas etapas

A descrição textual e visual da etapa expande, resumidamente, os títulos relacionados na tabela. A visualização evidencia pontos relevantes através de fotos, diagramas, esquemas ou figuras.

Realizadas as explanações sobre o MeDSE e definido o procedimento padrão, espera-se que o projetista esteja habilitado para seguir a aplicação do MeDSE e realizar o SIAPE.

3.2.1 ETAPA 1 - CONCEITOS

Tabela 2 – Tabela da etapa 1 - Conceitos

Item	Descrição
1. Objetivos	Elaborar a concepção do sistema
2. Entradas	1 – As necessidades do cliente 2 – Referenciais específicos do Paradigma EPS 3 – Referenciais externos relacionados ao sistema
3. Processo	Gerar requisitos
4. Saídas	Documento de Concepção do sistema contendo os requisitos iniciais (RQI) e o problema global (PG)
5. Registros	1 –Documento de Concepção do sistema 2 – Diagrama de Requisitos Pai 3 – Diagrama de Requisitos filhos

Descrição textual e visual da etapa - Os conceitos, requisitos e restrições foram esquematizados para que o Problema Global fosse elaborado, A Figura 24 ilustra a sintetização que gerou o Problema Global (PG). O PG também pode ser representado pelas partes do sistema M, E, S, C e SK (Skills).

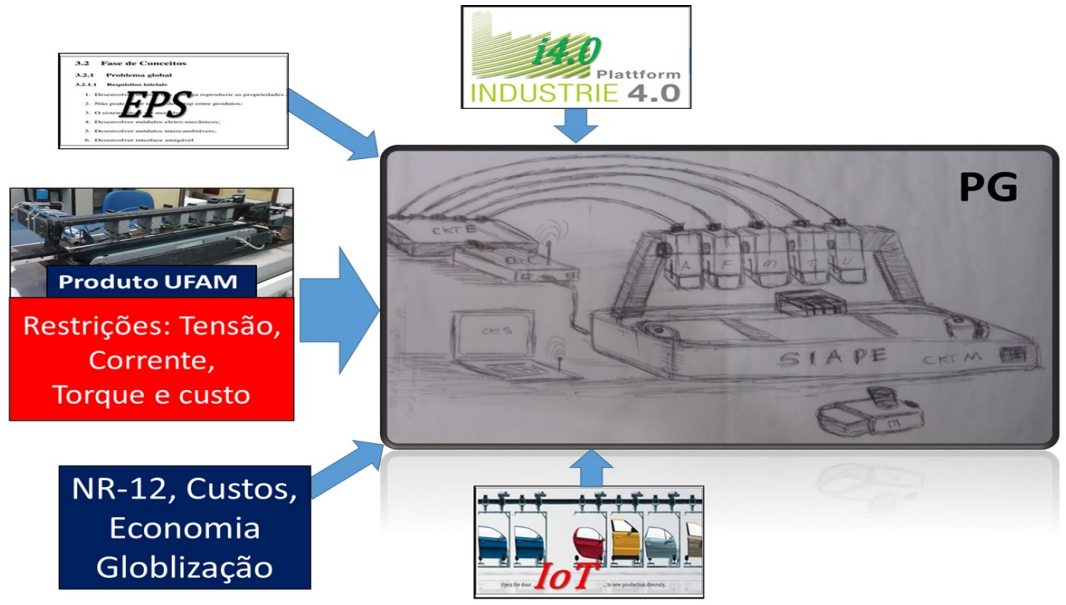


Figura 24 – SIAPE: Problema Global

Para desenvolver a concepção do sistema, as necessidades do cliente são consideradas, a saber:

a. Desenvolver um sistema que consiga expressar as características dos sistemas evolutivos e evidenciar potenciais capacidades para reduzir o problema da customização de massa. Além disso, o sistema deve considerar alguma recomendações da Plataforma da

Indústria 4.0 (i4.0) e capturar algum conceito da arquitetura Internet das Coisas (IoT) no tocante Manufatura Ágil.

b. O sistema deve ser baseado no Produto UFAM com as devidas alterações de melhorias;

c. O sistema deve carimbar as 5 letras A, F, M, T e U;

d. Deverá ser criado um módulo para letra que seja exigido em nova palavra;

e. O sistema de carimbar as palavras UFAM, UTAM e UEA;

f. O sistema deveria ser baseado no Produto UFAM.

Somam-se às necessidades do cliente, os referenciais específicos do Paradigma *EPS*. Das características básicas do Paradigma *EPS* extraiu-se capacidade de *adaptação*, implicando que o sistema deve ser capaz de propor uma alternativa de configuração para minimizar os efeitos de perturbarções externas, e a capacidade de *evolução*, implicando que o sistema deve ser capaz de aceitar a troca de módulos em tempo de produção.

Para realizar as principais características as propriedades da Modularidade, Granularidade, Plugabilidade e Reconfigurabilidade devem estar presente no sistema.

Além dos referenciais do cliente e de EPS são considerados os referenciais externos relacionados ao sistema:

Academia - O sistema deve refletir o estado da arte em paradigmas de manufatura.

Globalização - O sistema deve evidenciar potenciais soluções para a questão da customização de massas.

Indústria 4.0 - A integração horizontal definida como a agregação, em tempo real dos elementos de sistemas no chão–de–fábrica, relacionando a comunicação, o planejamento e a programação desses sistemas, contendo elementos que serão usados para incorporar raciocínio baseado em casos de uso, evidenciando a capacidade de evoluir com a mudança dos requisitos de produção, deverá estar presente no sistema.

Internet das Coisas - O conceito plugar e trabalhar *Plug & Work* é definido como a capacidade de dispositivos e componentes de rede para auto-configurar-se de acordo com as necessidades das aplicações da automação. *Plug & Work* deve trabalhar em ambientes 4.0 e reduzir maciçamente as ações manuais e reduzirá tanto o tempo de inatividade global quanto o número de erros do sistema.

Governo - Para atender a exigência de segurança, o governo editou a Norma Regulatória número 12 (NR-12) que de acordo com o item 12.56, as máquinas devem ser

equipadas com um ou mais dispositivos de parada de emergência, por meio dos quais possam ser evitadas situações de perigo latentes e existentes.

Economia - Por meio da redução de custos no processo produtivo incrementa-se o nível de competitividade dos produtos originados nesse processo. Portanto, as vantagens comparativas entre o SIAPE e os sistemas de produção vigentes tendem a se transformar em ganhos de competitividade, e deverão ser mensurados e quantificados no processo evolutivo.

As necessidades do cliente, os referenciais internos e os referenciais externos foram sintetizados na geração dos RQI conforme ilustra a Figura 25.

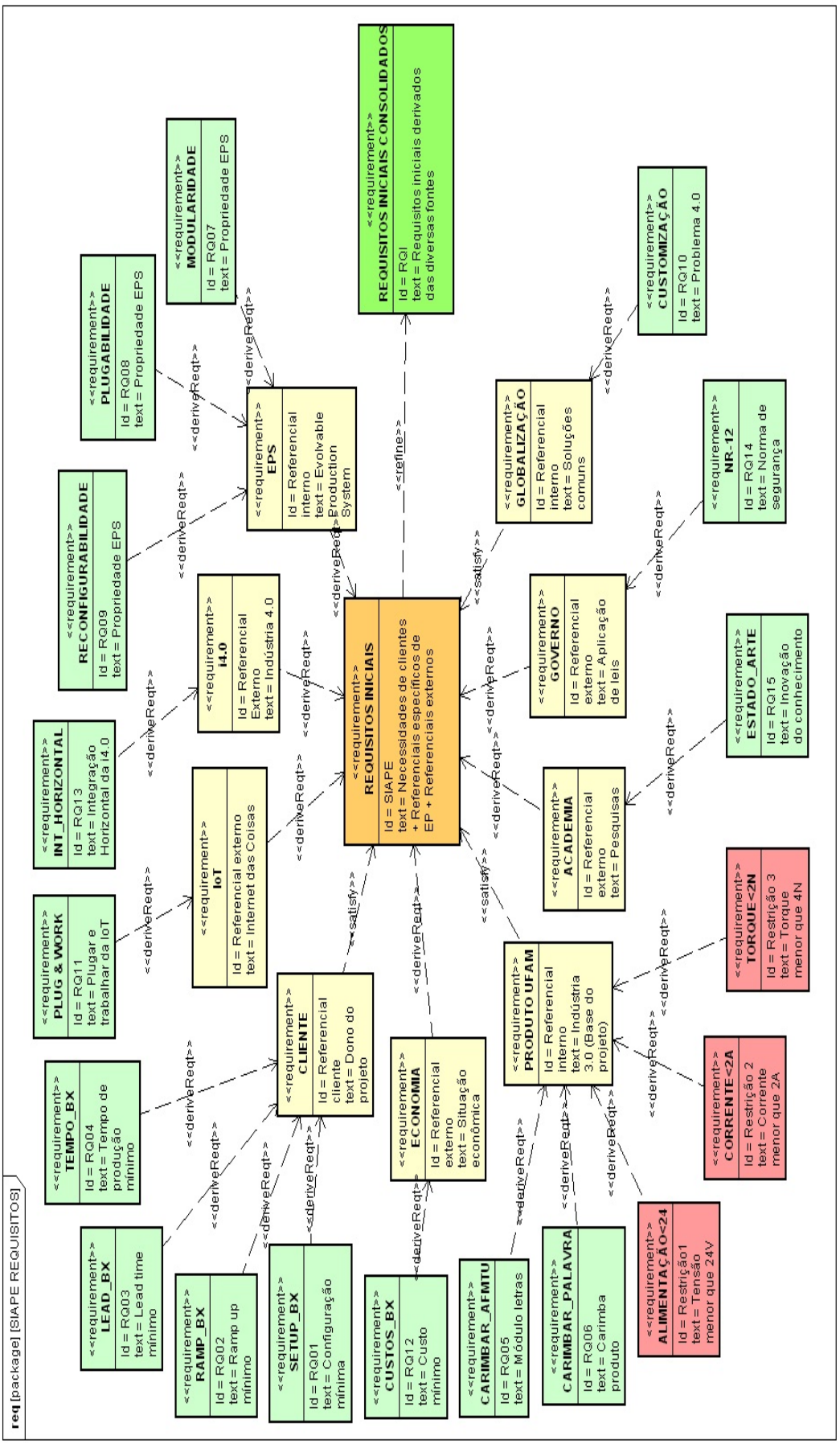


Figura 25 – SIAPE: Requisitos

A Figura 25 ilustra o processo de agregação dos requisitos do sistema em tipos de requisitos. Tais agregações são filtradas produzindo em sua saída uma relação de requisitos, denominados de requisitos iniciais que serão submetidos ao processamento da próxima etapa.

Na saída do processo têm-se o Documento de Concepção do sistema contendo os requisitos iniciais (RQI) e o problema global (PG).

A ilustração da Figura 26 detalha a visão da concepção do sistema. Nesta figura está montado o cenário para as verificações e validações finais realizadas na Fase de Finalizações do método de desenvolvimento. Quando um pedido é realizado por clientes, estes pedidos são inseridos por um operador na Interface Homem Máquina (IHM). A partir da inserção dos pedidos na IHM, o agente Order solicita ao agente YPA os nomes dos módulos que estão presentes no sistema. Com a informação fornecida o agente Order cria o plano de produção e envia ao agente Anagrama. O Anagrama realiza o plano enviando os comandos ao agente AcHw (Acesso Hardware). O AcHw envia os comando através do *Raspberry Pi* à parte elétrica, que ativa os atuadores e realiza os produtos solicitados pelos clientes. O operador entrega os produtos a seus respectivos clientes e o ciclo se fecha.

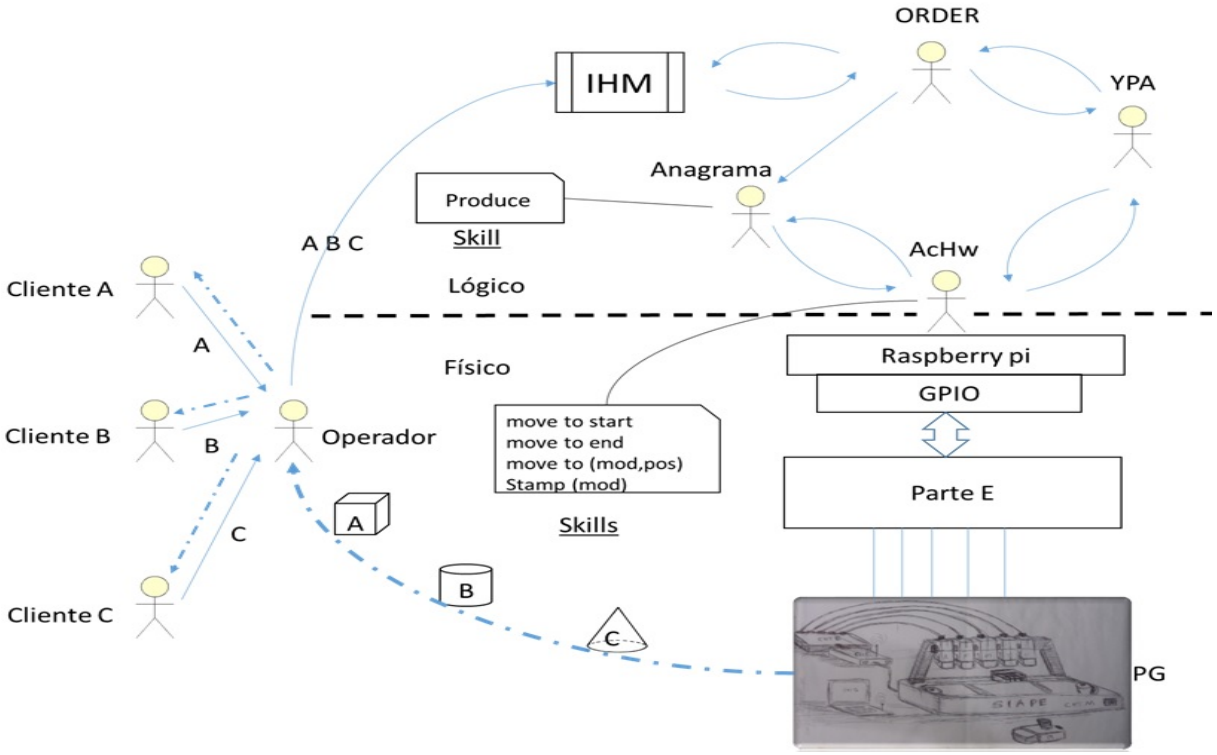


Figura 26 – SIAPE: Cenário concepção do sistema

O entendimento das funções de parte do sistema é fundamental para a realização da Etapa 2. Para compatibilizar alguns parâmetros entre Produto UFAM e SIAPE foi assumido como restrição que a alimentação máxima do sistema deveria ser < 24V, com

uma corrente < 2A e um custo máxima da ordem de dez vezes o valor investido no Produto UFAM.

Os RQI e o PG originaram o documento de Concepção do Sistema que contém as informações de entrada para a próxima etapa. A Figura 27 ilustra a inclusão do RQI e PG no documento de Concepção do Sistema SIAPE e evidencia a realização do segundo marco: Entrega do Documento de Concepção do Sistema.

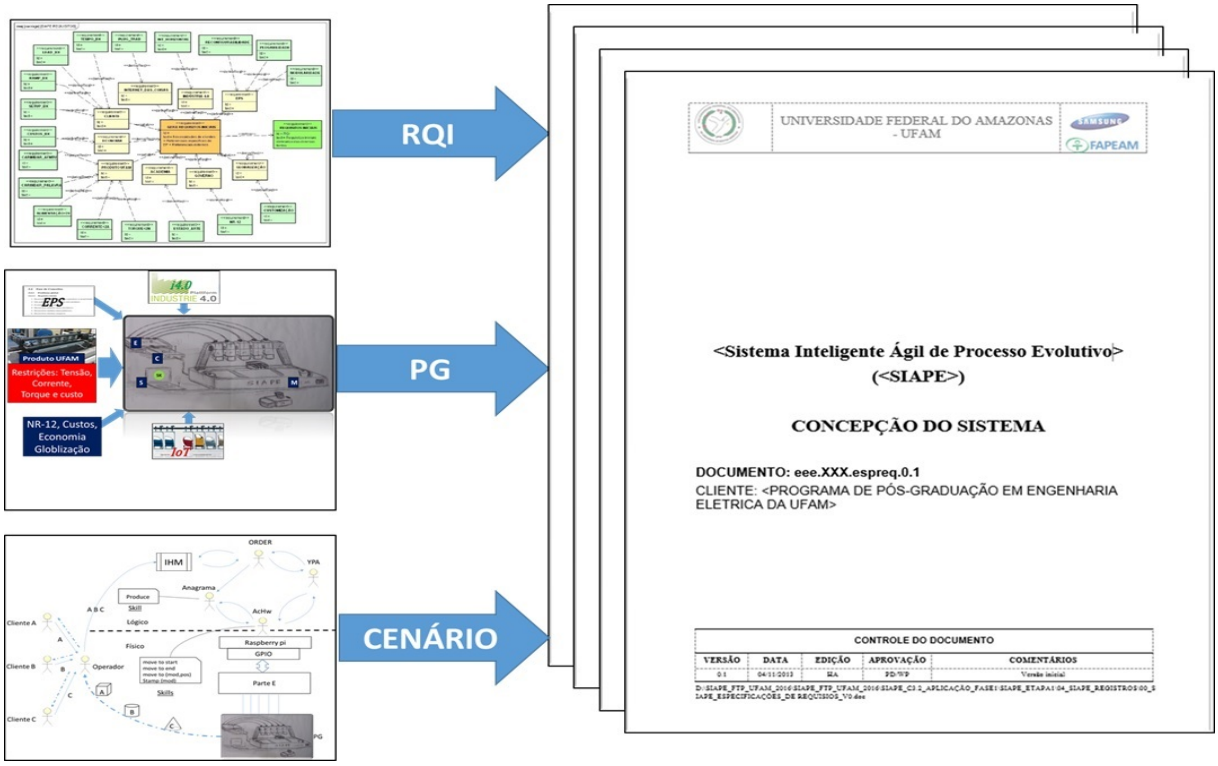


Figura 27 – SIAPE: Geração do documento de concepção do sistema

Ao entregar o Documento de Concepção do Sistema contendo os Requisitos Iniciais (RQI), a definição do Problema Global (PG) e o Cenário que deverá ser utilizado para validar o sistema (na Fase de Finalizações), o objetivo da etapa é atingido.

3.2.2 ETAPA 2 - ANÁLISES

Tabela 3 – Tabela da etapa 2 - Análises

Item	**Descrição**
1.Objetivo	Refinar os requisitos inciais do cliente (RQI)
2.Entradas	Documento de Concepção do sistema contendo os requisitos iniciais (RQI) e o problema global (PG)
3.Processo	Refinar RQI
4.Saídas	Requisitos refinados (RQR): RQRmesc, RQRmes, RQRme, RQRm, RQRe, RQRs, RQRc, RQRa, RQRf, RQRm, RQRt RQRu
5.Registros	Planilha de requisitos refinados do sistema

Descrição textual e visual da etapa - A Etapa de Análises tem o objetivo de refinar os requisitos inicias e especificá-los para cada parte do Problema Global em sua forma MESC.

Os requisitos iniciais (RQI) e o problema global (PG) contidos no Documento de Concepção do Sistema são divididos para serem refinados. O Problema Global (PG) é convenientemente dividido em Problema Regional (PR) e Problema Local (PL) e são relacionados com as partes do sistema mecatrônico MESC: MESCmain, MES, ME, M, E, S, C, MESCA, MESCF, MESCM, MESCT e MESCU e MESCE. Onde:

Definição dos agentes baseada na Arquitetura SIAPE - Para a definição da quantidade e do tipo de agentes a serem utilizados na proposta de solução ao PG foram definidos os seguintes agentes da arquitetura aserem implementados:

01 YPA - Para registrar os agentes existentes na plataforma e buscar seus *skills*.

01 OrderAgent - Com a função de*GATEWAY* para a interface homem máquina do EPS e instanciar os anagramas de acordo com a ordem de serviço gerada na IHM.

01 Anagram - Para representar os produtos (ANAGRAMA) a serem produzidos.

01 AcHw - Para detectar e informar os módulos disponíveis no sistema.

01 Conveyor - Para representar a ESTEIRA do sistema que realizar o transporte dos produtos.

01 Stamper - Para representar os MÓDULOS CARIMBADORES do sistema e carimbar as letras do anagrama na palete.

A Figura 28 mostra os agentes da arquitetura SIAPE aplicados ao caso do PG. Essa aplicação, neste momento do desenvolvimento, torna-se necessária para evidenciar

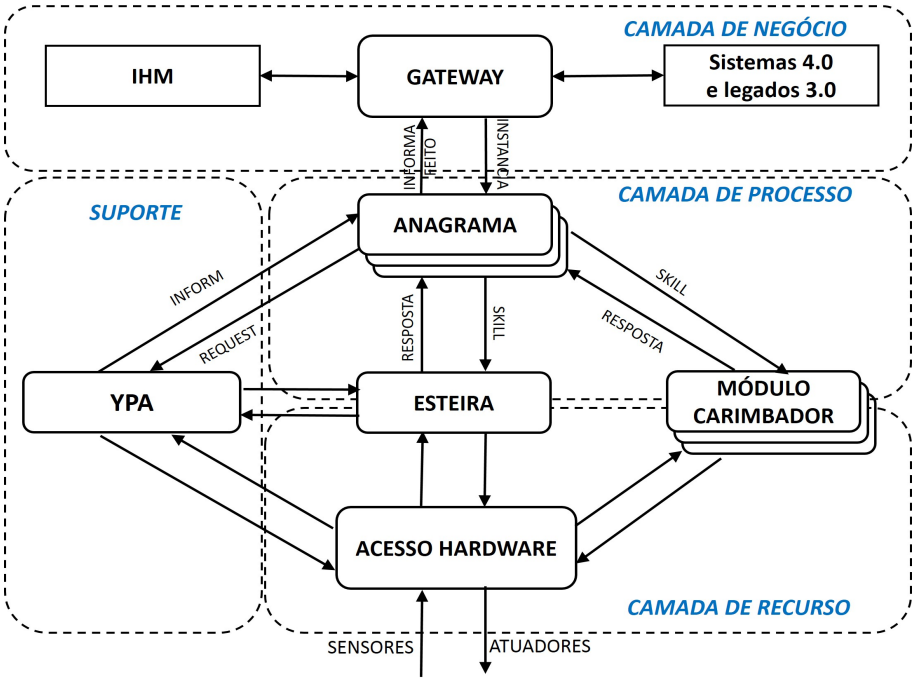


Figura 28 – SIAPE: Arquitetura SIAPE aplicada ao PG

um exemplo prático da arquitetura que foi implementado neste etapa, e experimentado e validado nos Capítulos 4 e 5.

MESCmain - representa a parte do MESC principal do sistema contendo a integração das partes M, E, S e C e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRmesc;

MES - representa a parte do MESC contendo a integração das partes M, E e S do MESC principal e tem seus requisitos refinados o rotulados como RQRmes;

ME - representa a parte ME do MESC contendo a integração das partes M e E e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRme;

M - representa a parte mecânica do MESC principal e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRm;

E - representa a parte eletrônica do MESC principal e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRe;

S - representa a parte de software do MESC principal e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRs;

C - representa a parte comunicação do MESC principal e tem seus requisitos refinados e rotulados como RQRc;

MESCa - representa o módulo mecatrônico que realiza a letra A e tem seus requisitos rotulados como RQRA;

MESCf - representa o módulo mecatrônico que realiza a letra F e tem seus requisitos rotulados como RQRF ;

MESCm - representa o módulo mecatrônico que realiza a letra M e tem seus requisitos rotulados como RQRM;

MESCt - representa o módulo mecatrônico que realiza a letra T e tem seus requisitos rotulados como RQRT;

MESCu - representa o módulo mecatrônico que realiza a letra U e tem seus requisitos rotulados como RQRU;

MESCe - representa o módulo mecatrônico que realiza a letra E e tem seus requisitos rotulados como RQRE.

O resultado na saída do processo é o conjunto de documentos relacionados a seguir e que servem como registros das atividades realizadas.

MESCmain - Documento de requisitos refinados do MESC principal;

RQRmes - Documento de requisitos refinados das integrações MES e ME;

RQRm - Documento de requisitos refinados da parte atômicas M, E, S e C do MESC principal;

RQRA - Documento de requisitos refinados dos módulos mecatrônicos A, F, M, T, U e E;

A Fase de Conceitos que realiza a Concepção do Sistema define uma ideia de sistema baseado na solicitação do cliente, nas exigências internas, nas exigências externas e nas restrições. O segundo marco registra essa ideia por meio da entrega dos Requisitos Refinados. O conteúdo produzido até este momento deve ser confirmado, para que possa ser garantido como especificação e assumido como um projeto a ser realizado. A Figura 29 ilustra os módulos de hardware e software que foram definidos para serem simulados ou verificados para que possam ser confirmados como especificações técnicas.

Dos módulos definidos, três não precisaram ser modelados e simulados:

1. Módulo Fonte, devido à restrição de 24V e 2A, foram adquiridas fontes que não ultrapassaram esses limites;
2. Módulo Roteador por estar dentro da faixa de wireless de 2,4Ghz (B+G+N) com uma velocidade de 150 Mbps e uma potência de 700mW;

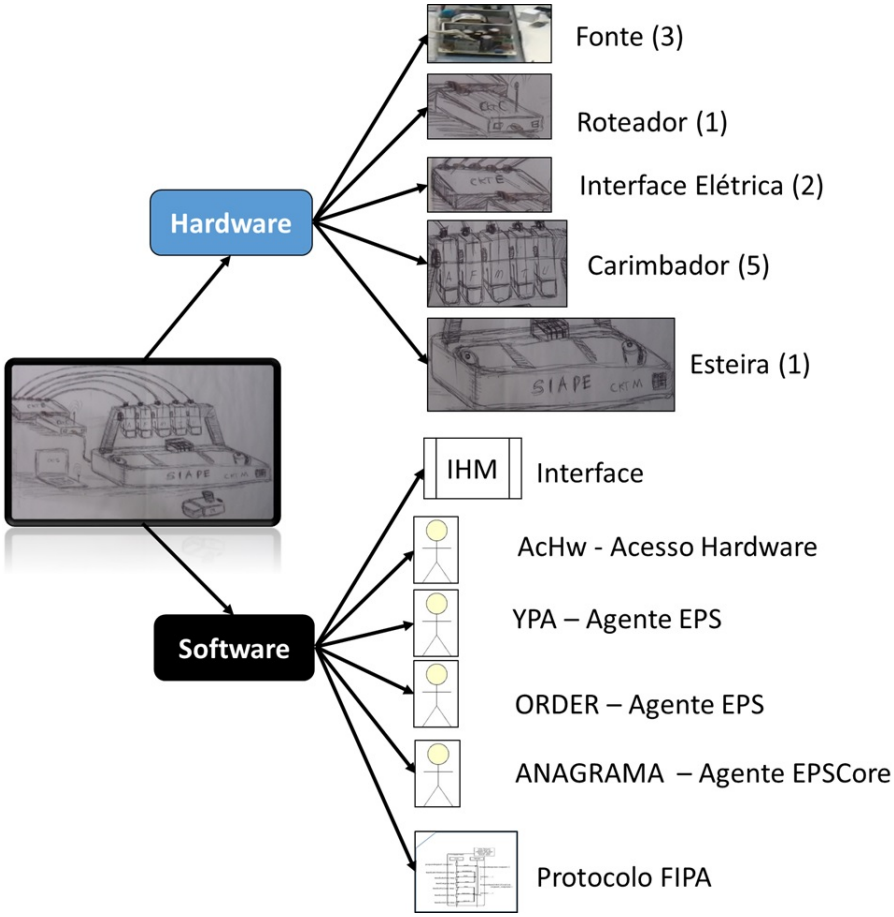


Figura 29 – SIAPE: Módulos de Hardware e Software

3. Módulo Interface Elétrica devido à Placa Raspberry Pi Versão B+ ser aderente à linguagem de programação Java e, portanto, suportar o Framework Jade e compatível à Platafoma Linux. O único quesito não atendido pela Raspberry foi a quantidade de I/Os, e para resolver este problema tornou-se necessária a modelagem e desenvolvimento de uma extensão de I/Os. Essa extensão e os outros módulos encontram-se modelados e simulados na próxima etapa.

3.2.3 ETAPA 3 - SIMULAÇÕES

Os documentos de requisitos refinados relacionam os Problemas Globais(PG), Regionais (PR) e Locais (PL) com os requisitos refinados. Esses documentos refinados servirão de base para a modelagem e simulação de todas as partes do MESC, a saber: RQRmesc, RQRmes , RQRme, RQRm, RQRe, RQRs, RQRc, RQRA, RQRF, RQRT, RQRU e RQRE.

As partes atômicas do MESC são submetidas ao processo de modelagem e depois ao processo de simulação. Após a realização desses processos o requisito pode ser aceito como especificação ou pode ser excluído da relação de requisitos refinados.

Para melhorar o entendimento da visão definida na Etapa 2, com o objetivo de melhorar a realização do processo de modelagem, foi idealizado o caso de uso *realizar um plano*, um diagrama de sequência, um diagrama de atividades e um diagrama de estados para o SIAPE. As Figuras 30, 31, 32 e 33 ilustram, respectivamente, esses diagramas. Suas descrições encontram-se a seguir.

A Figura 30 mostra o caso de uso "Realizar Plano", onde o Operador insere um pedido no sistema, o agente Order recebe o pedido e solicita informações ao agente YPA para a montagem do agente Anagrama responsável pelo processo produtivo do anagrama. O YPA responde ao Order, este monta o plano com o pedido e instancia o agente Anagrama. Este, por sua vez executa o plano realizando chamadas ao agente AcHw. O AcHw realiza as atividades, *skill* a *skill* e informa o término de cada qual ao Anagrama. O Anagrama, ao seu final, informa ao Order, e morre. O Order, por sua vez, confirma para o Operador a realização do pedido.

A Figura 31 ilustra uma sequência do ponto de vista do operador. O Operador liga o sistema, o led vermelho é ligado. Em seguida o operador insere o pedido no sistema, carrega o palete na esteira e clica no botão de início de produção. O sistema liga a esteira. O sistema identifica a passagem do palete por meio do sensor, para a esteira e carimba o palete através do acionamento do atuador. Depois, volta a ligar a esteira e prossegue até o fim do plano. O sistema identifica o fim do plano e para a esteira. O operador retira o produto e desliga o sistema.

A Figura 32 ilustra o diagrama de atividades. Esse diagrama também auxilia no entendimento e desenvolvimento do software do sistema. É apenas uma outra visão para os mesmos procedimentos acima descritos.

A Figura 33 ilustra o diagrama de estado do SIAPE que é baseado visão de OMAC para IEC 61131–3 (ARENS et al., 2006), o qual descreve uma visão sistêmica e padronizada para equipamentos mecatrônicos, quer se trate de parte de uma linha de produção ou de uma máquina completa. Tal diagrama visa mostrar a funcionalidade e dinâmica do sistema.

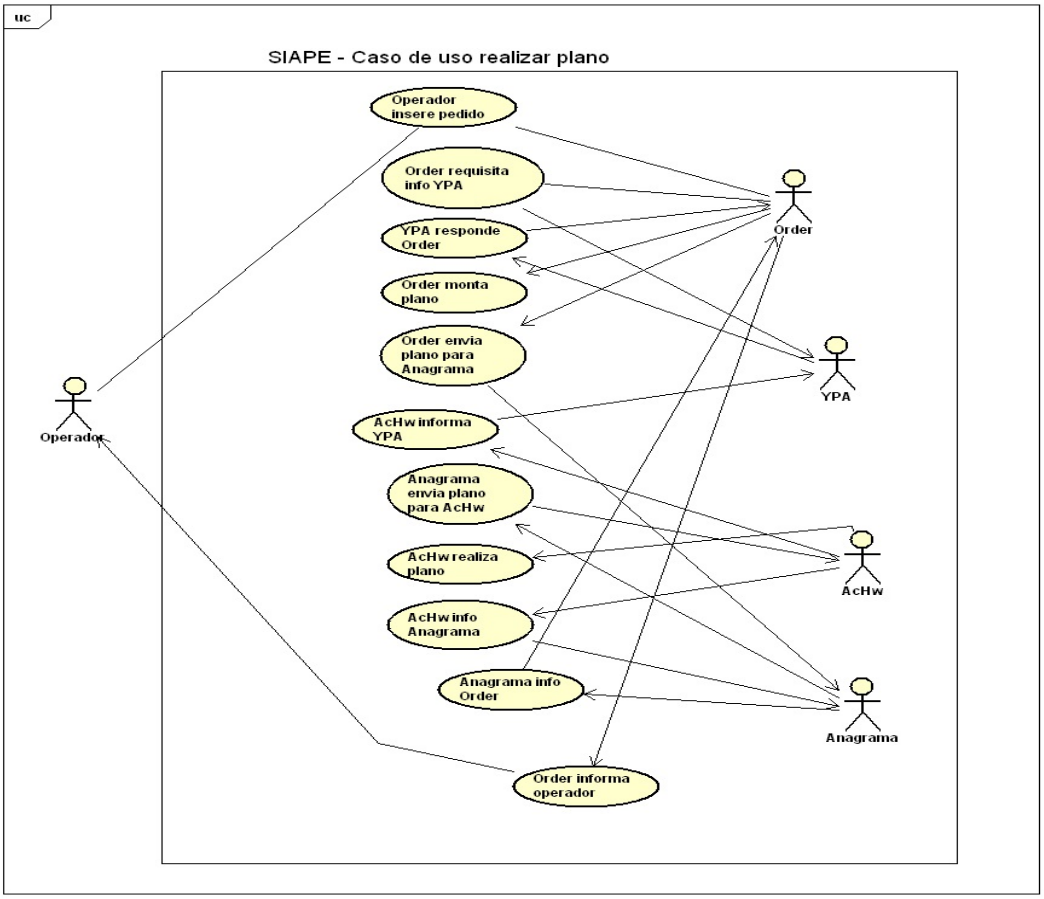


Figura 30 – Caso de uso: Realizar plano

O diagrama de estado define completamente o estado corrente de uma máquina. As transições entre estados podem ser originados como resultado de uma intervenção do operador, de uma resposta ao estado de um ou mais objetos de controle ou como resposta de modo completo, definido como a conclusão de todas as etapas que operam dentro de um estado definido. O processo é iniciado com a ligação do sistema e configuração dos dispositivos envolvidos na operação. Uma vez configurado, o sistema entra no modo inativo aguardando que o operador inclua um ou mais pedidos para que um plano de produção seja montado e disponibilizado para a produção. Uma vez que o plano é montado, entra no estado que é responsável por iniciar a produção do plano. O plano pode ser totalmente realizado ou pode ser suspenso para que se inicie outro plano, ou seja, suspenso para alimentação dos recursos de produção na linha. Havendo a suspensão o sistema, pode-se retornar no mesmo ponto de produção onde foi suspenso, ou reiniciado para o início de um novo plano. Também pode ser reiniciado evidenciando que o plano foi totalmente produzido e a operação trata-se de um novo plano sendo produzido. O diagrama também prevê a ocorrência de possíveis erros que são tratados por um processo que aborta a operação, limpa o sistema, pára o processo e uma nova operação pode ser iniciada.

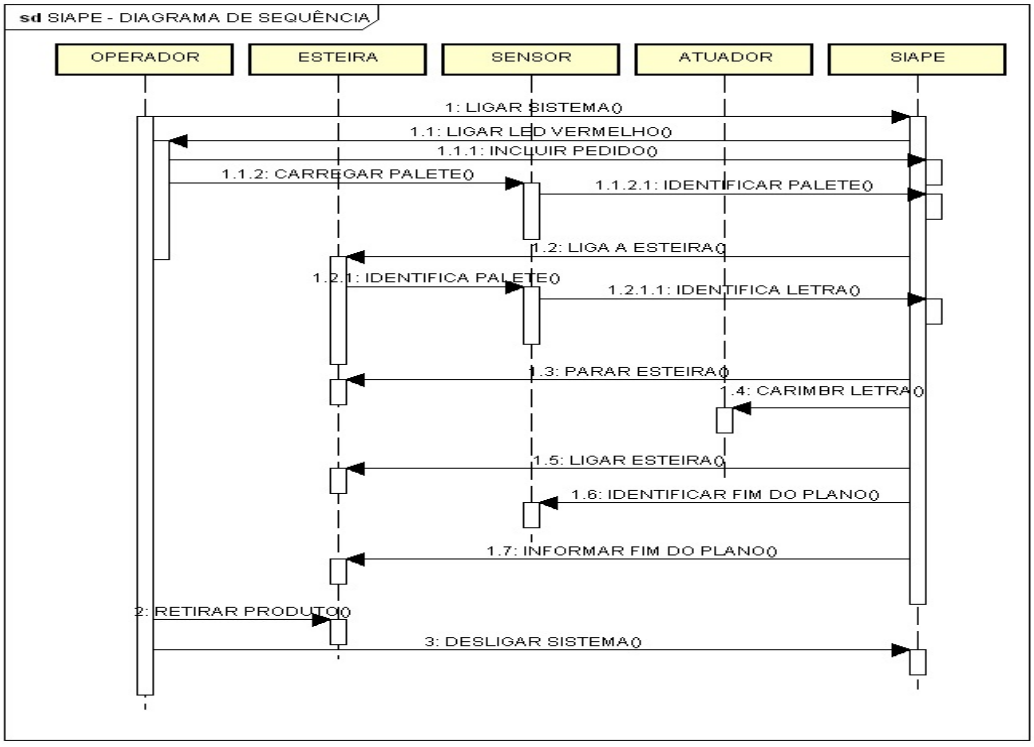


Figura 31 – SIAPE: Diagrama de sequência

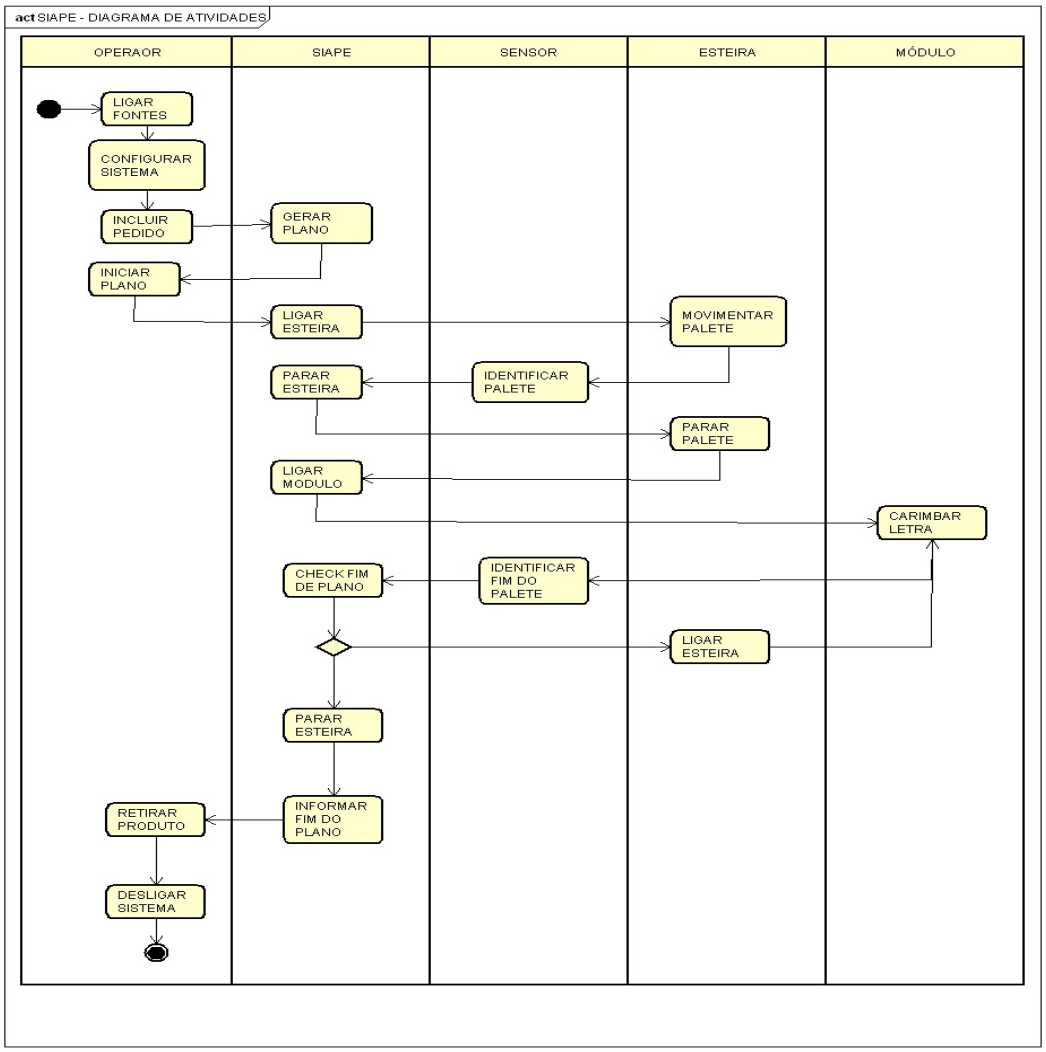


Figura 32 – SIAPE: Diagrama de atividades

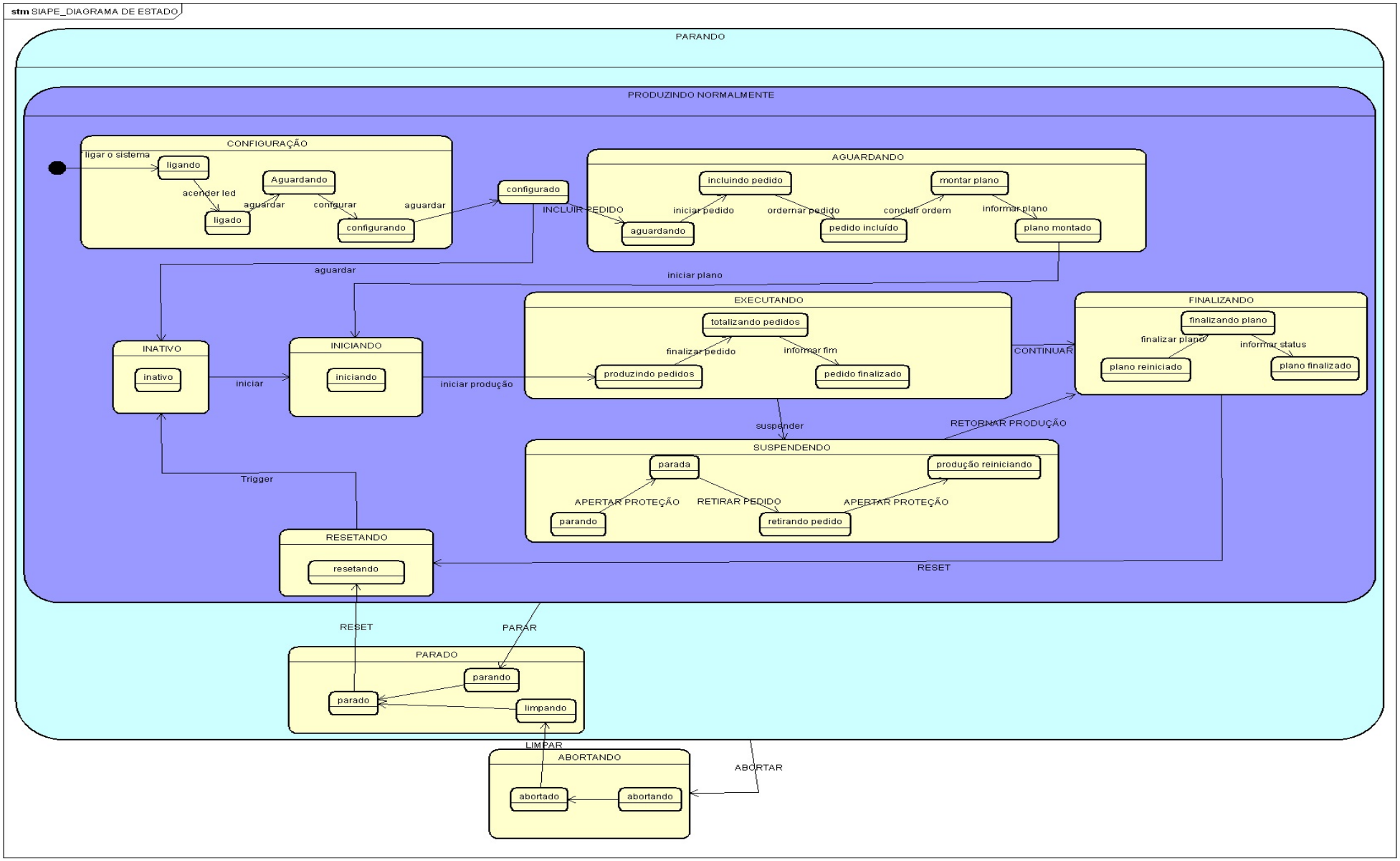


Figura 33 – SIAPE: Diagrama de estados

A seguir são realizadas breves descrições dos processos de modelagem e simulação para facilitar o entendimento do processo:

1. **Esteira -** O Módulo Esteira foi modelado seguindo as Leis de *Kirchoff* para a parte elétrica, e as Leis de *Hooke* para a parte mecânica. Após a modelagem eletro-mecânica definiu-se a forma da esteira e realizou-se a montagem experimental das partes e mecânica. A simulação foi realizada e os resultados permitiram a inclusão dos requisitos refinados como especificações técnicas relativas às partes elétricas e mecânicas do módulo. A Figura 34 ilustra esse processo.

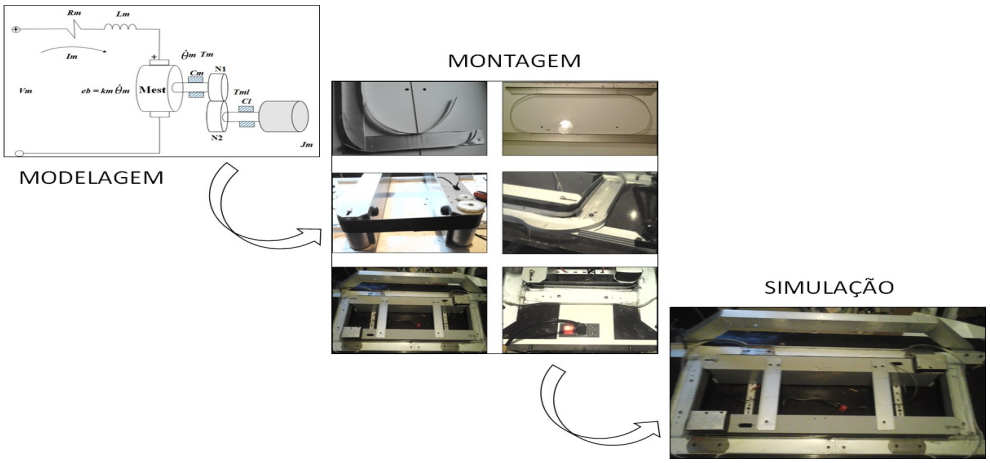


Figura 34 – Esteira: Da modelagem à simulação

2. **Carimbador -** Da mesma forma que a esteira, o Módulo Carimbador foi modelado seguindo as Leis de *Kirchoff* para a parte elétrica, e as Leis de *Hooke* para a parte mecânica. Após a modelagem eletro-mecânica definiu-se a forma de um módulo para que fosse realizada a montagem experimental de um módulo. A simulação foi realizada e os resultados permitiram a inclusão dos requisitos refinados como especificações técnicas relativas às partes elétricas e mecânicas do módulo. A Figura 35 ilustra esse processo.

3. **Agente AcHw -** A classe Acesso Hardware foi modelada com a principal função de identificar os módulos que estão presentes no sistema e disponibilizar para o agente YPA. A Figura 36 ilustra a criação do código da classe e posterior simulação que evidenciou o seu funcionamento e aprovou sua inclusão como especificação técnica de software.

4. **Agente YPA -** A classe YPA foi modelada com a principal função de registrar os módulos que estão presentes no sistema e disponibilizar para o agente Order. A Figura 37 ilustra a criação do código da classe e posterior simulação que evidenciou o seu funcionamento e aprovou sua inclusão como especificação técnica de software.



Figura 35 – Carimbador: Da modelagem à simulação



Figura 36 – Classe AcHw

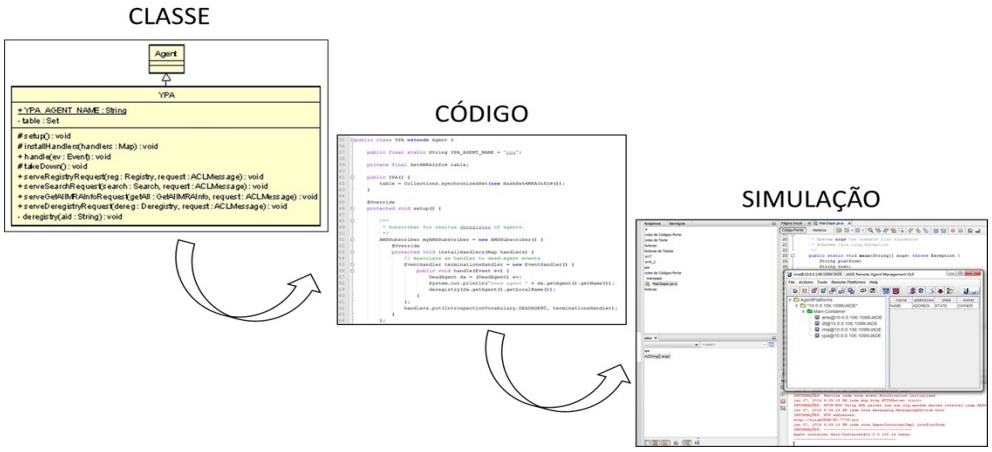


Figura 37 – Modelagem Classe YPA

5. Agente Order - A classe Order foi modelada com a principal função de montar o plano com os módulos que estão presentes no sistema e enviar para o agente Anagrama realizar a produção. A Figura 38 ilustra a criação do diagrama UML e o

código da classe e posterior simulação que evidenciou o seu funcionamento e aprovou sua inclusão como especificação técnica de software.

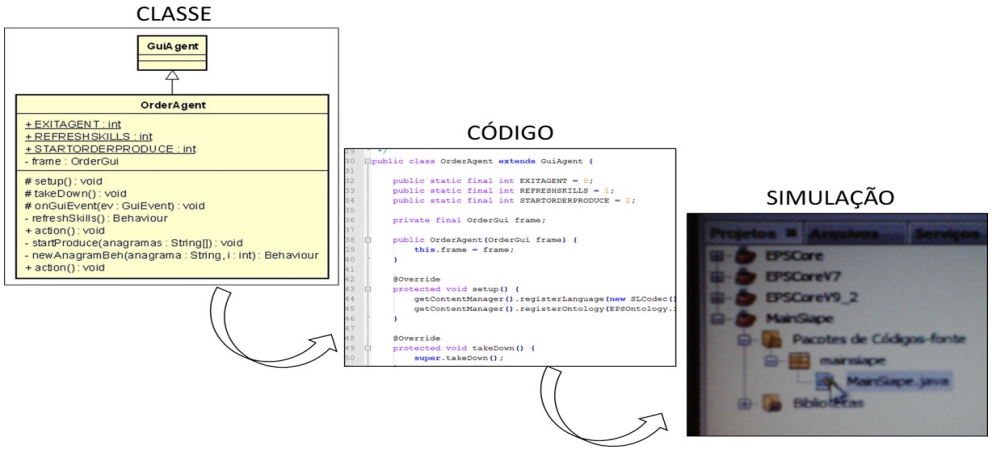


Figura 38 – Modelagem classe Order

6. Agente Anagrama - A classe Anagrama foi modelada com a principal função de realizar a produção do plano de produção com os módulos presentes no sistema. A Figura 39 ilustra a criação do código da classe e posterior simulação que evidenciou o seu funcionamento e aprovou sua inclusão como especificação técnica de software.

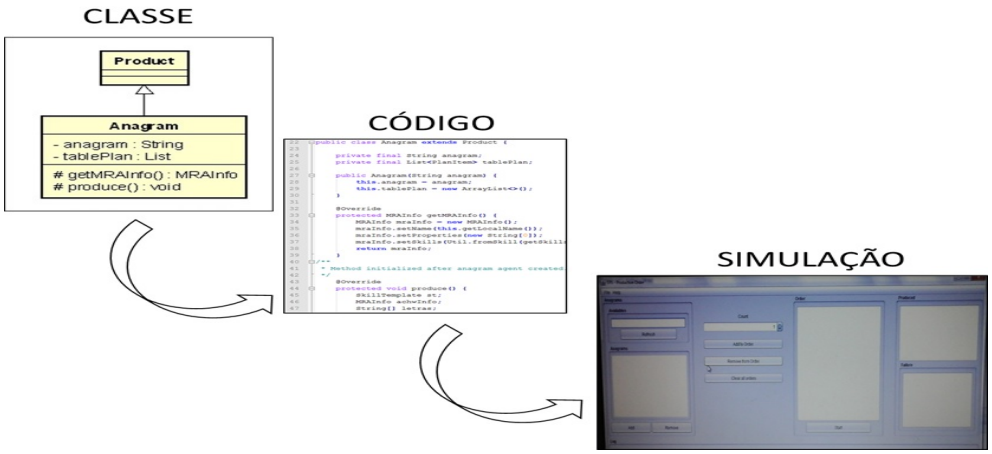


Figura 39 – Modelagem classe Anagrama

7. Protocolo FIPA - O principal objetivo do Protocolo FIPA é a comunicação entre os agentes do sistema. A Figura 40 ilustra a criação da classe OrderAgent, um trecho do código e a troca de mensagens capturada pelo agente Sniffer do Framework Jade.

Nesta etapa os requisitos refinados do sistema em forma de problema global (RQRg), na forma regional (RQRr) e local (RQRl) são modelados e simulados (SimM, SimE, SimS e SimC) até que estes possam ser garantidos como Especificações Técnicas

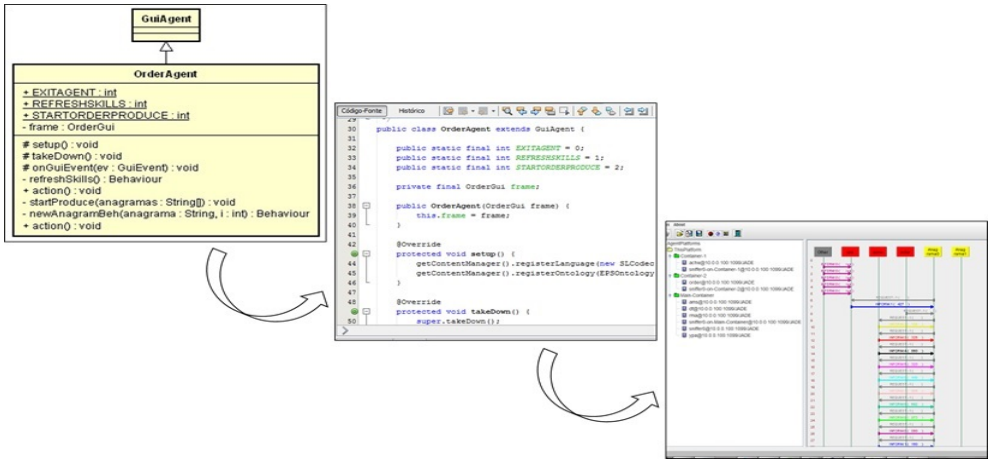


Figura 40 – Modelagem Mensagens FIPA

(Et) de cada problema local, a saber: Especificação Técnica Mecânica (EtM), Especificação Técnica Elétrica (EtE), Especificação Técnica de Software (EtS) e Especificação Técnica de Comunicação (EtC).

A Figura 41 ilustra esse processo para a parte de hardware. Os módulos selecionados com características de hardware foram modelados e rotulados conforme a sua funcionalidade dentro sistema. Esses módulos foram simulados e seus status foram elevados à categoria de especificações. O significado de cada sigla é explicado a seguir e suas descrições serão realizadas na próxima etapa.

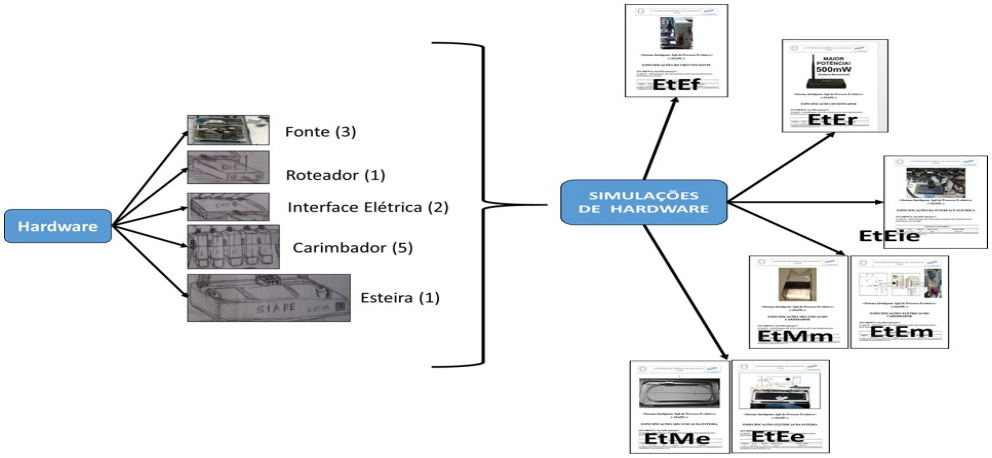


Figura 41 – Simulação de Hardware

1. **EtMm** - Especificação técnica mecânica do módulo;

2. **EtMe** - Especificação técnica mecânica da esteira;

3. **EtEe** - Especificação técnica elétrica da esteira;

4. **EtEf** - Especificação técnica elétrica das fontes;

5. EtEr - Especificação técnica elétrica do roteador;

6. EtEie - Especificação elétrica da interface elétrica;

7. EtEm - Especificação elétrica do módulo;

8. EtSis - Especificação técnica da interface de software.

A Figura 42 ilustra esse processo para a parte de software. Os módulos selecionados com características de software foram modelados e rotulados conforme a sua funcionalidade dentro do sistema. Esses módulos foram simulados e seus status foram elevados à categoria de especificações. O significado de cada sigla é explicado a seguir e suas descrições serão realizadas na próxima etapa.

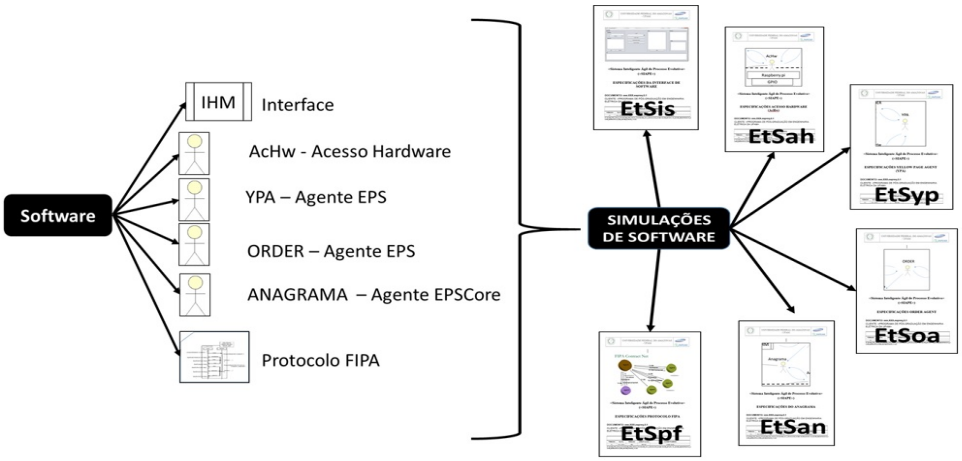


Figura 42 – Simulação de Software

9. EtSah - Especificação técnica de software do agente acesso hardware;

10. EtSyp - Especificação técnica de software do *Yellow Page Agent(YPA)*;

11. EtSao Especificação técnica de software o agente Order;

12. EtSan - Especificação técnica de software do agente Anagrama;

13. EtSpf - Especificação técnica de software dos protocolos FIPA.

Estas especificações técnicas evidenciam o terceiro marco e servirão de base para do Projeto do Sistema. Na próxima etapa essas especificações serão organizadas no formato de projeto do sistema a ser implementado.

3.2.4 ETAPA 4 - PROJETOS

Tabela 4 – Tabela da etapa 4 - Projetos

Item	Descrição
1. Objetivos	Integrar as especificações técnicas do sistema no documento de projeto.
2. Entradas	EtM - Especificações técnicas da parte mecânica, EtE - Especificações técnicas da parte elétrica, EtS - Especificações técnicas da parte de software e EtC - Especificações técnicas da parte de comunicação.
3. Processo	As especificações técnicas de hardware e software são organizadas no documento denominado de projeto de sistema.
4. Saídas	**Documento de Projeto de Sistema contendo as especificações técnicas de hardware, software e requisitos não-funcionais.**
5. Registros	Casos de uso, resultados das simulações, requisitos refinado, requisitos iniciais, requisitos funcionais e não-funcionais.

Descrição textual e visual da etapa - Para integrar as especificações técnicas - resultado das simulações da Etapa 3 - ao documento de projeto, essas são verificadas por meio dos diagramas de sequência, atividade e estado, pois esses diagramas são partes integrantes do projeto e fazem parte do projeto de classes do sistema. Definidos esses diagramas, eles são consolidados no documento do sistema.

As especificações técnicas das partes mecânica, elétrica, de software e de comunicação que servirão de base para a definição dos diagramas a serem desenvolvidos são submetidos ao processo que as transformarão em diagramas de sequência, de atividades e de estado. O resultado é inserido no documento de projeto juntamente com as especificações técnicas de cada parte do sistema.

O resultado é evidenciado pelo documento de projeto de sistema que serve como evidência da entrega do quarto marco.

A Figura 43 ilustra a consolidação das especificações de hardware e software no documento do Projeto de Sistema. As descrições das especificações são relacionadas a seguir:

1. **EtMm** - Especificação técnica mecânica define as medidas que deverão ser realizadas no material especificado para transformá-lo no protótipo mecânico do módulo;

2. **EtMe** - Especificação técnica mecânica da esteira de define a forma que deverá ser desenvolvida para que o palete trafegue sem interferências;

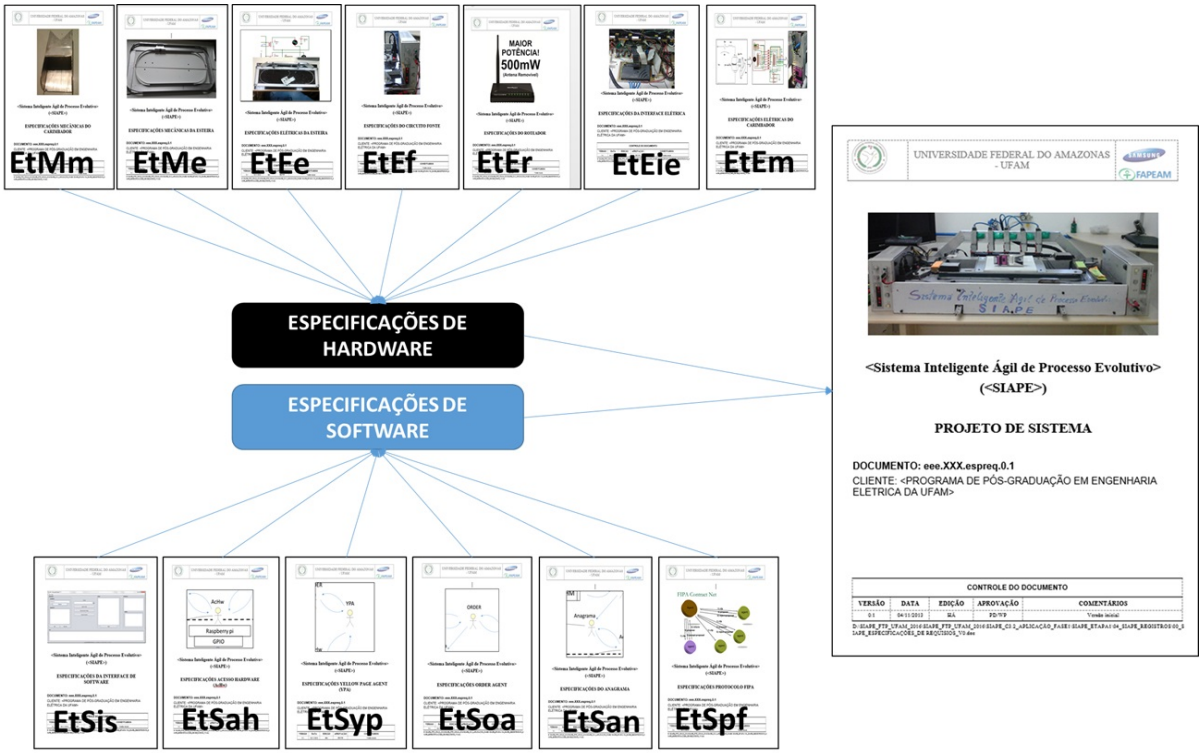


Figura 43 – Projeto de Sistema

3. **EtEe** - Especificação elétrica da esteira define a alimentação do motor em valores de tensão e corrente que não devem ultrapassar os valores definidos como restrições para o projeto;

4. **EtEf** - Especificação técnica elétrica das fontes especifica os valores de tensão e corrente para todos todo os módulos do sistema, e que atendem às restrições;

5. **EtEr** - Especificação elétrica do roteador descreve os dados técnicos do roteador que serão utilizados para conectar os dispositivo do SIAPE;

6. **EtEie** - Especificação elétrica da interface elétrica define todos os componentes e circuitos elétricos que deverão ser implementados no sistema;

7. **EtEm** - Especificação elétrica do módulo define os circuitos elétricos e que deverão ser implementados;

8. **EtSis** - Especificação técnica de software da interface de software do sistema descreve os campos que devem ser implementados no sistema.

9. **EtSah** - Especificação técnica de software descreve as características e habilidades do agente de acesso hardware;

10. **EtSyp** - Especificação técnica de software descreve as características e habilidades do agente de Yellow Page Agent (YPA);

11. **EtSao** - Especificação técnica de software descreve as características e habilidades do agente Order;

12. **EtSan** - Especificação técnica de software descreve as características e habilidades do agente Anagrama;

13. **EtSpf** - Especificação técnica de software descreve todos os protocolos utilizados no SIAPE.

O Projeto de Sistema evidencia o quarto marco e contém as especificações que expressam o resultado de estudos que iniciaram com as necessidades do cliente, os referenciais internos e externos. Esses foram transformados em requisitos refinados, modelados e simulados para que as especificações pudessem ser garantidas como tal. Na Etapa 5 o Projeto de Sistema é implementado.

3.2.5 ETAPA 5 - IMPLEMENTAÇÕES

Tabela 5 – Tabela da etapa 5 - Implementações

Item	Descrição
1.Objetivos	Implementar os projetos definidos na Etapa 4.
2.Entradas	Projeto de hardware contendo os módulos mecânicos e elétricos. Projeto de software contendo os módulos de software e de comunicação.
3.Processo	Os projetos são implementados e transformados em protótipos das partes do sistema.
4.Saídas	Protótipo elétrico, protótipo mecânico, códigos do software e de comunicação.
5.Registros	Diagramas de classe, diagrama de sequência, diagrama de atividades, diagrama de estado, esquema elétrico e especificações técnicas.

Descrição textual e visual da etapa - A partir das especificações técnicas são desenvolvidos circuitos que atendam às especificações. Desses circuitos são originados os esquemas elétricos, as placas de circuito impresso (PCI) e são acoplados aos seus respectivos módulos.

1. EtMm - A especificação técnica mecânica define as medidas que deverão ser realizadas no material especificado para transformá-lo no protótipo mecânico do módulo;

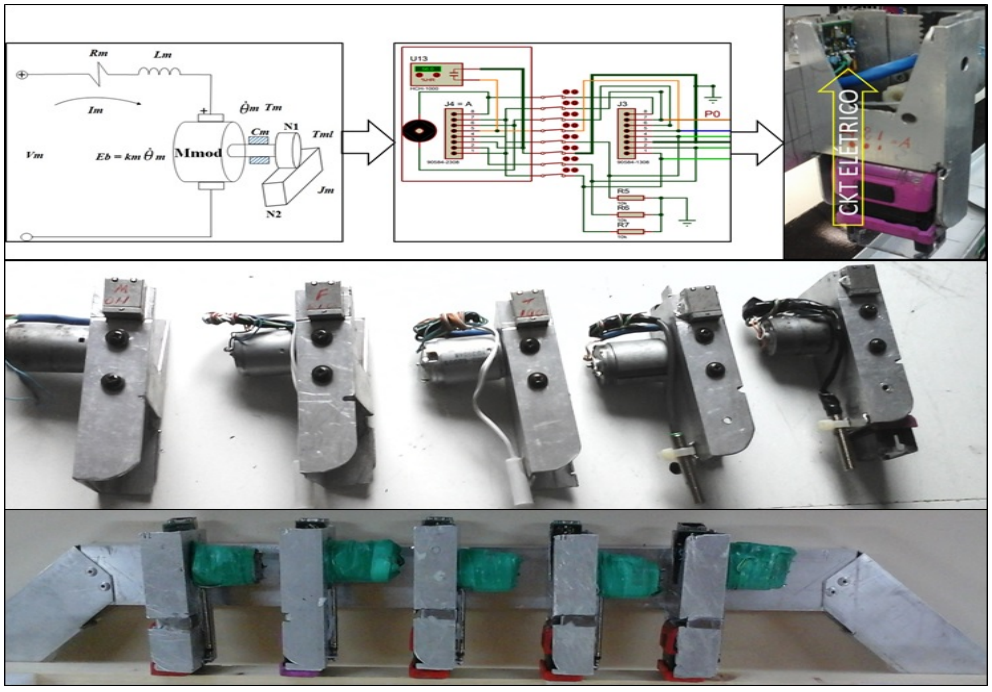


Figura 44 – Evolução dos módulos: do circuito elétrico aos módulos

2. EtMe - A especificação técnica mecânica da esteira de define a forma que deverá ser desenvolvida para que o palete trafegue sem interferências;

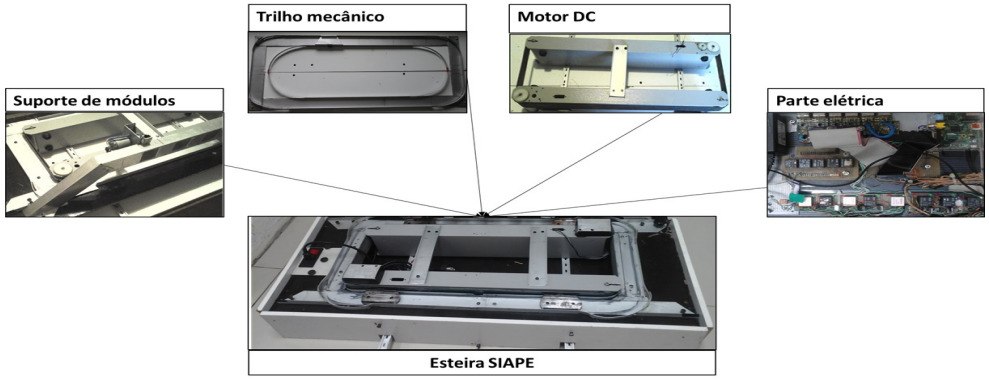


Figura 45 – Evolução da esteira: do modelo ao protótipo

3. EtEe - A especificação elétrica da esteira define a alimentação do motor em valores de tensão e corrente que não devem ultrapassar os valores definidos como restrições para o projeto;

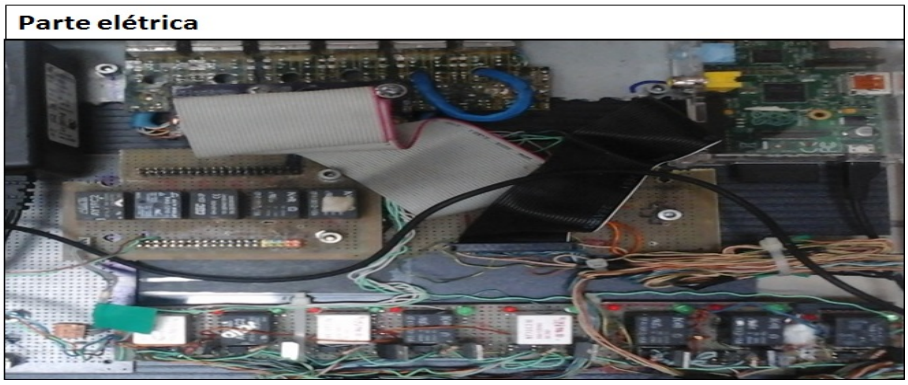


Figura 46 – SIAPE : Parte elétrica

4. EtEf - A especificação técnica elétrica das fontes especifica os valores de tensão e corrente para todos todo os módulos do sistema, e que atendem às restrições;

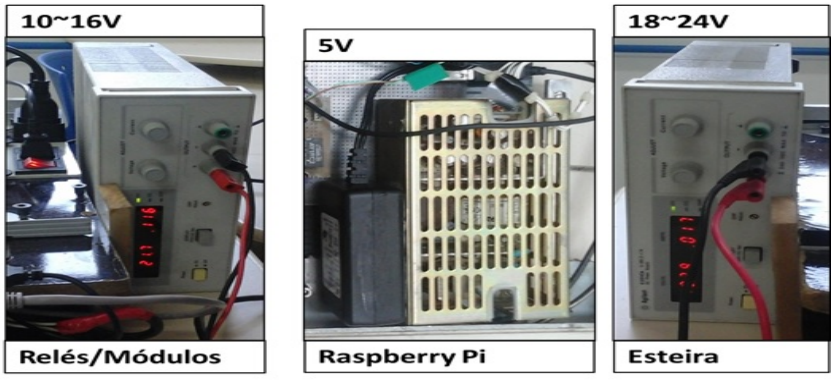


Figura 47 – SIAPE : Fontes

5. EtEr - A especificação elétrica do roteador descreve os dados técnicos do roteador que serão utilizados para conectar os dispositivo do SIAPE;



Figura 48 – SIAPE : Roteador

6. EtEie - A especificação elétrica da interface elétrica define todos os componentes e circuitos elétricos que deverão ser implementados no sistema;

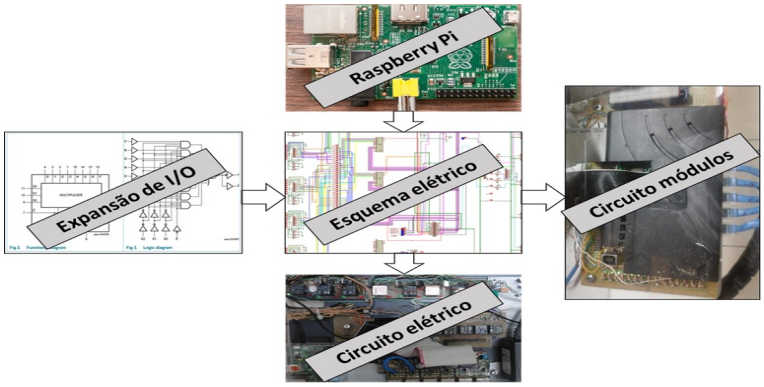


Figura 49 – SIAPE : Interface elétrica

7. EtEm - A especificação elétrica do módulo define os circuitos elétricos e que deverão ser implementados;

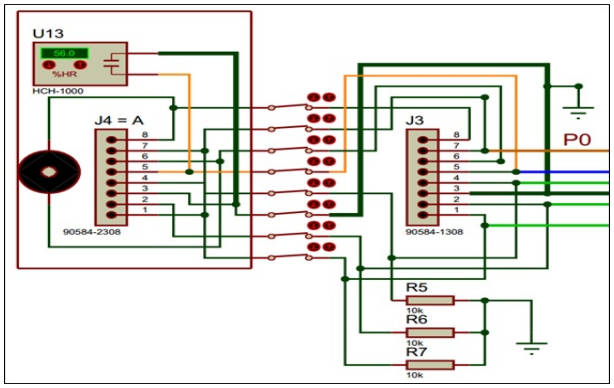


Figura 50 – SIAPE : Circuito elétrico módulo

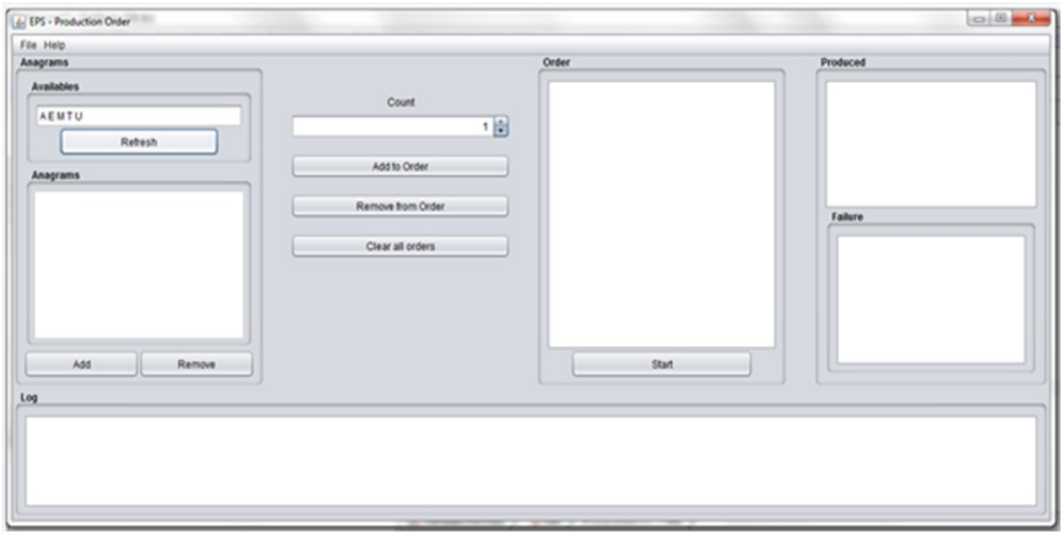


Figura 51 – SIAPE : Interface

8. EtSis - A especificação técnica de software da interface de software do sistema descreve os campos que devem ser implementados no sistema.

9. EtSah - A especificação técnica de software descreve as características e habilidades do agente de acesso hardware;

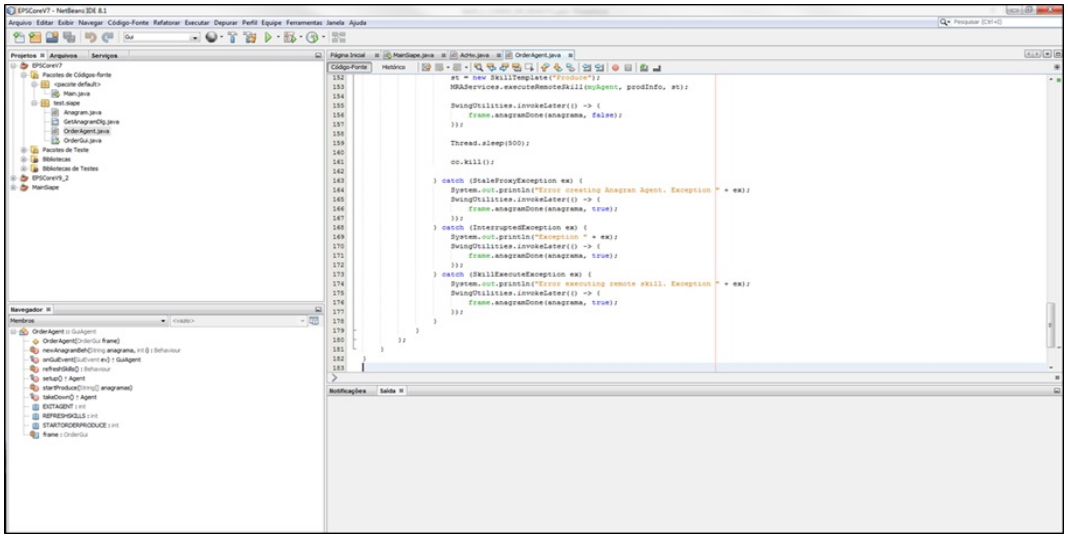


Figura 52 – SIAPE : Acesso Hardware

10. EtSyp - A especificação técnica de software descreve as características e habilidades do agente de Yellow Page Agent(YPA);

11. EtSao - A especificação técnica de software descreve as características e habilidades do agente Order;

12. EtSan - A especificação técnica de software descreve as características e habilidades do agente Anagrama;

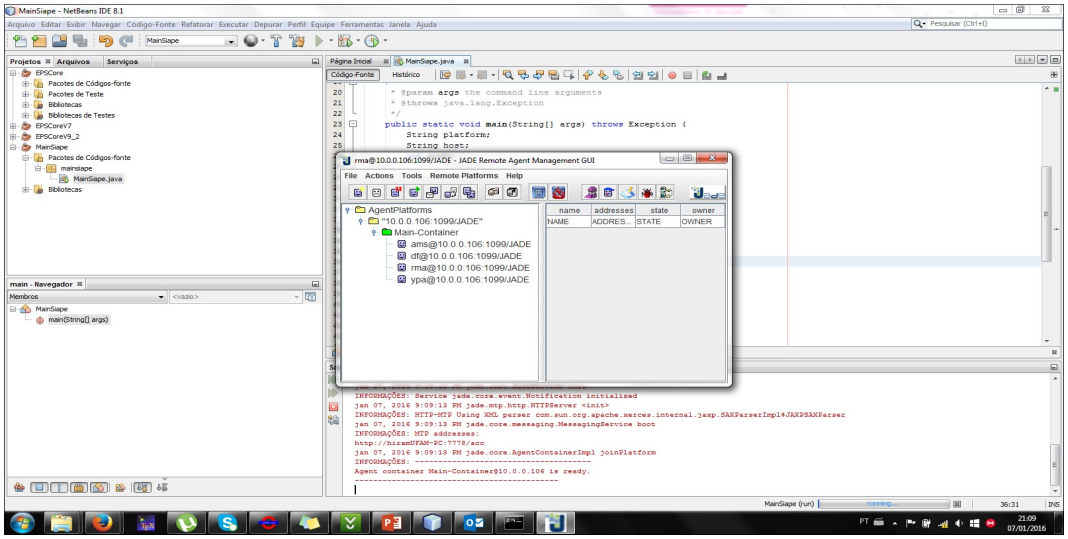


Figura 53 – SIAPE: YPA

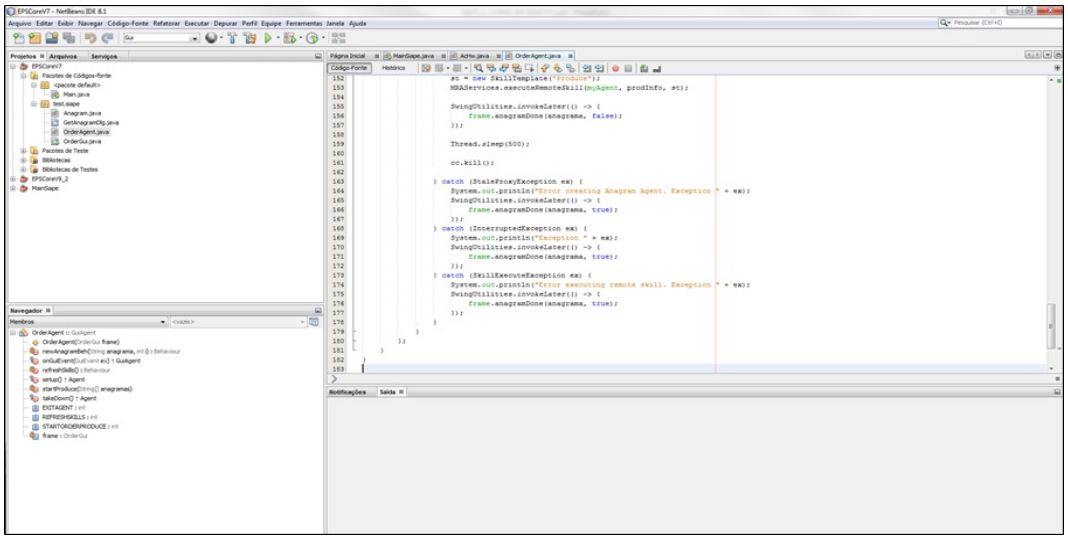


Figura 54 – SIAPE: ORDER

13. EtSpf - A especificação técnica de software descreve todos os protocolos utilizados no SIAPE.

Cada módulo é denominado com um nome de protótipo da parte específica do sistema. Estes módulos seguem para a Etapa 6 onde deverão ser testados contra as especificações técnicas e requisitos refinados.

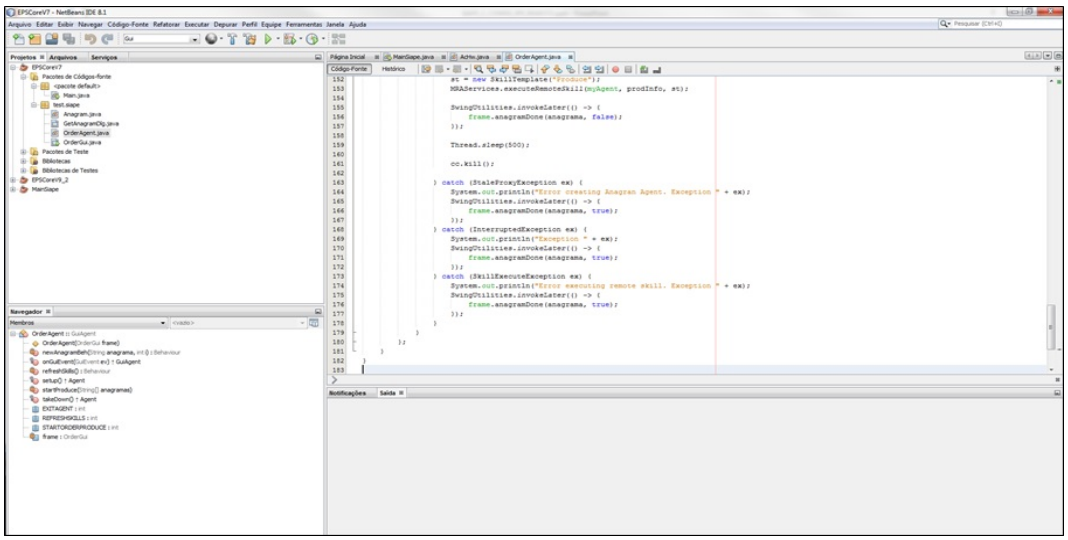


Figura 55 – SIAPE: ANAGRAMA

3.2.6 ETAPA 6 - TESTES

Tabela 6 – Tabela da etapa 6 - Testes

Item	Descrição
1.Objetivos	Testar os protótipos implementados na Etapa 5.
2.Entradas	Protótipo mecânico, protótipo elétrico, códigos do software, protocolos de comunicação FIPA.
3.Processo	Os protótipos funcionais implementados na Etapa 5 são submetidos aos testes especificados nos RQRs e Ets.
4.Saídas	Protótipo mecânico testado, protótipo elétrico testado, códigos do software testados, protocolos de comunicação FIPA testados.
5.Registros	RQRs, Ets, resultados dos testes.

Descrição textual e visual da etapa - Os protótipos funcionais são submetidos aos testes especificados, individualmente, com o objetivo de testar sua funcionalidade contra os requisitos refinados e contra as especificações.

Havendo a aprovação dos testes, os protótipos assumem o status de protótipos aprovados e preparados para serem integrados.

Na Figura 56 pode ser visualizado um resumo dos testes aplicados às partes ou ao todo durante a Etapa. As descrições encontram-se a seguir de acordo com a numeração:

Número 1 - Este teste objetiva testar a funcionalidade do motor, o trajeto da esteira e a robustez do módulo mecânico da esteira. A alimentação de corrente é aplicada diretamente ao motor DC, neste caso variando a tensão entre os limites de 10V a 16V.

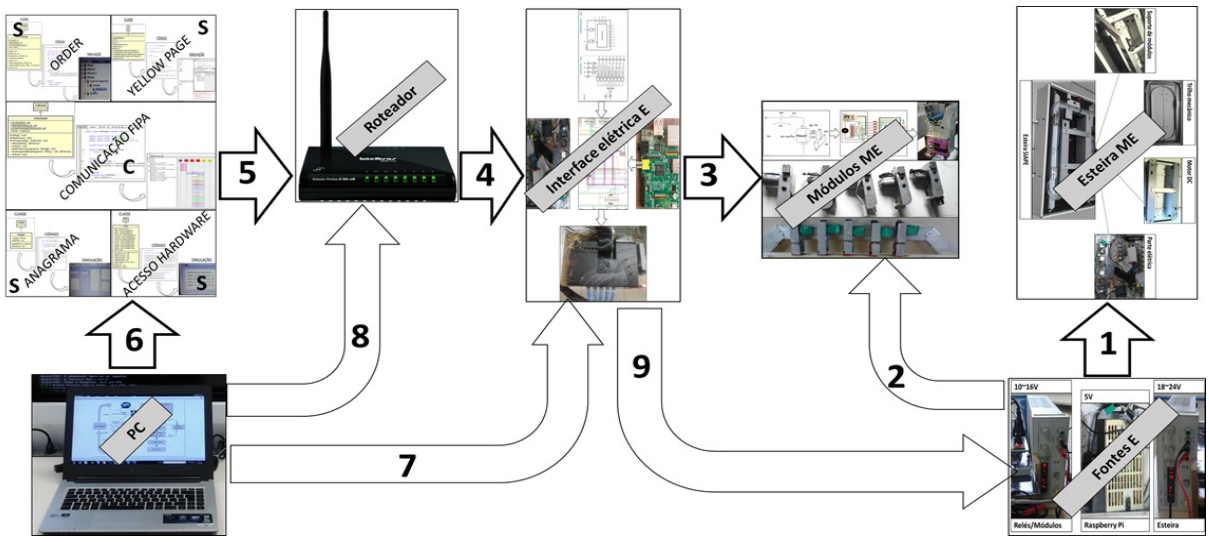


Figura 56 – Etapa de testes

Número 2 - Da mesma forma que foi aplicado à esteira, este teste objetiva testar a funcionalidade do motor, o trajeto do carimbo e a robustez do módulo mecânico das letras. A alimentação de corrente é aplicado diretamente ao motor DC, neste caso variando a tensão entre os limites de 16V a 24V;

Número 3 - Este teste objetiva testar a funcionalidade do módulo eletro-mecânico através do comando do software. Três maneiras podem ser utilizadas para realizar este teste: Utilizar os comando por meio do PC (Número 7) aplicados diretamente à interface elétrica, ou por meio dos números 6, 5, 4, e 3, ou ainda por meio dos números 8, 4 e 3. Percebe-se uma entidade MES é realizada;

Número 4 - O PC acessa a interface elétrica via roteador e manda os comandos para o módulo ME. Há que se perceber que, também neste caso, uma entidade MES é realizada;

Número 5 - O PC acessa a interface elétrica via roteador e protocolo FIPA, e manda os comandos para o módulo ME. Há que se perceber que, neste caso, uma entidade MESC é realizada;

Número 6 - O PC acessa a interface elétrica via roteador e manda os comandos para o módulo ME. Idêntico ao teste número 6;

Número 7 - O PC acessa a interface elétrica e manda os comandos para o módulo ME. Há que se perceber que, também neste caso, uma entidade MES é realizada;

Número 8 - O PC acessa a interface elétrica via roteador e manda os comandos para o módulo ME. Há que se perceber que, também neste caso, uma entidade MESC é realizada;

Número 9 - O PC acessa a interface elétrica e manda os comandos para o módulo ME da esteira. Há que se perceber que, também neste caso, uma entidade MES é realizada;

A entrega dessas partes testadas evidencia a entrega do sexto marco.

O resultado dessa etapa é o conjunto de partes individuais do sistema testadas e aprovadas para serem submetidas ao processo de integração na Etapa 7.

3.2.7 ETAPA 7 - INTEGRAÇÃO MODULAR E VALIDAÇÃO

Tabela 7 – Tabela da etapa 7 - Integração modular e validação

Item	**Descrição**
1.Objetivos	Integrar as partes aprovadas e e validar a integração.
2.Entradas	Protótipo mecânico testado, protótipo elétrico testado, códigos testado e protocolos testados.
3.Processo	Protótipos testados são submetidos ao processo de integração e validação.
4.Saídas	Partes M, E, S e C integradas e validadas e preparadas para validação sistêmica.
5.Registros	Resultados dos testes e validações realizadas.

Descrição textual e visual da etapa - Os protótipos testados e aprovados são submetidos ao processo de integração de suas partes atômicas.

Os protótipos M e E originam a parte integrada ME com suas características específicas, por exemplo, a parte mecânica é móvel e pode ser movida manualmente. A parte elétrica montada fornece as tensões para alimentar o motor. Ao se integrar essas partes, M e E produz-se uma entidade que pode ser alimentada eletricamente para que seja gerado um movimento eletro-mecânico. Ao se integrar a parte S à entidade ME, têm-se uma entidade ME automatizada. E finalmente, ao se integrar a parte C, ter-se-á uma entidade mecatrônica com suas características específicas.

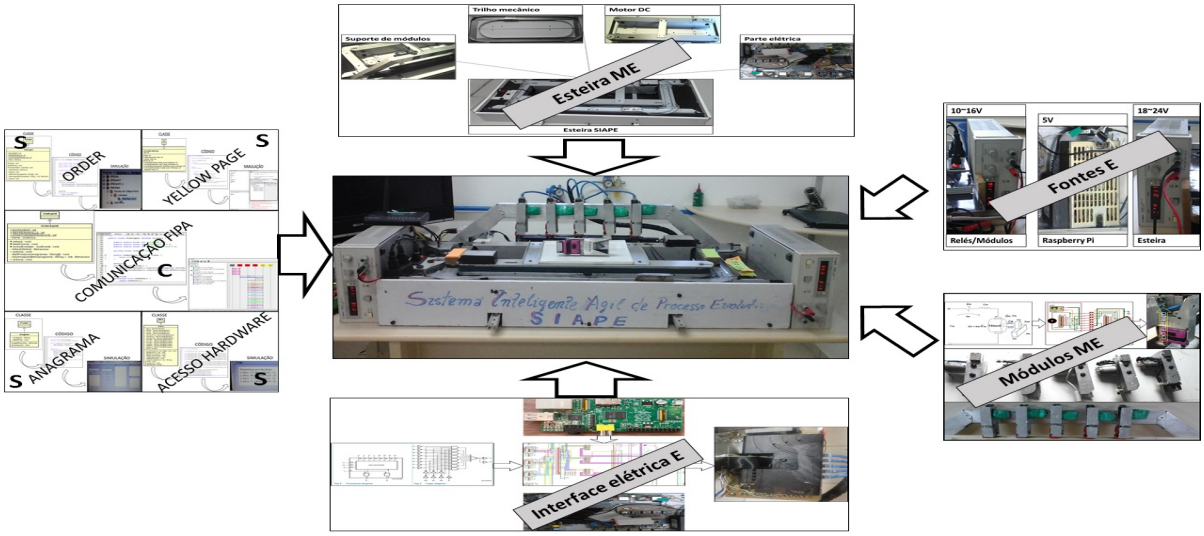


Figura 57 – Etapa de integração modular e validação

A Figura 57 ilustra a integração das partes Mecânicas, Eletrônicas, de Software e de Comunicação e a realização do MESC. Essa integração modular é validada por meio da aplicação dos testes de números 1 a 9 da etapa anterior (Etapa 6). A diferença é que agora os módulos encontram-se integrados e todos os comandos são realizados no PC, e

todos os dispositivos devem ser ligados à rede para que o protótipo MESC seja validado modularmente. Outra questão a ser observada é que os requisitos e especificações, neste estágio, são mais rígidos e devem ser tratados antes que o sistema siga para a integração validação sistêmica.

Uma das validações é ilustrada na Figura 58 que valida tanto a parte de software quanto a parte de hardware na detecção de desconexão de módulos. Essa atividade é fundamental para a evidência do conceito *plug and produce* durante a aplicação do estudo de caso no Capítulo 4. No detalhe tem-se do lado esquerdo, o sistema funcionando com todos os módulos, e a interface IDE retornando com todos as letras, no centro, tem-se desconexão do módulo. Do lado direito, em tempo real tem-se o sistema identificando a atividade e retornando a informação N.C. (não conectado).

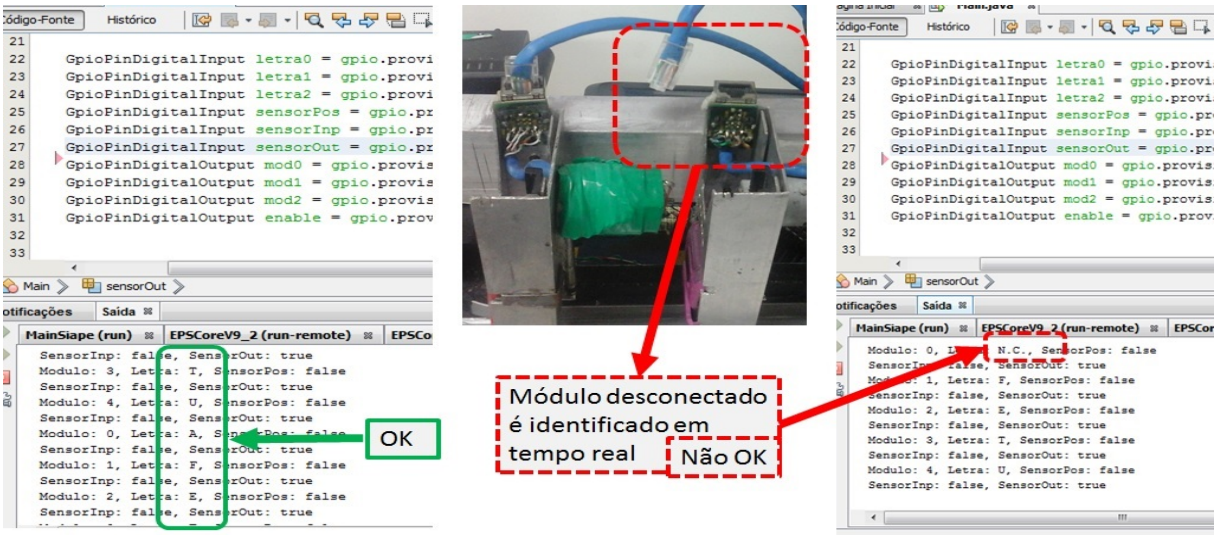


Figura 58 – Detecção de desconexão de módulos

Além da rigidez na realização da validação modular, este também é o momento para organizar o material que será disponibilizado para o cliente e para os especialistas que irão ficar responsáveis pelo sistema, isto é, é o momento de finalizar os manuais técnico e de usuário. Esses manuais deverão ter suas eficácias postas à prova durante a Etapa de Comissionamento, isso para que potenciais erros possam ser identificados e evitem interferências no sistema quando da sua utilização pelos usuários do sistema.

A entrega do sistema validado modularmente evidencia o sétimo marco.

3.2.8 ETAPA 8 - INTEGRAÇÃO E VALIDAÇÃO SISTÊMICA

Tabela 8 – Tabela da etapa 8 - Integração e validação sistêmica

Item	**Descrição**
1.Objetivos	Validar sistemicamente o protótipo modular do sistema.
2.Entradas	Protótipo MESC integrado modularmente, requisitos iniciais co cliente, requisitos refinados e especificações técnicas.
3.Processo	O MESC é submetido ao processo de integração sistêmica contra as especificações e requisitos inciais.
4.Saídas	SIAPE validado sistemicamente. **S1**
5.Registros	Especificações técnicas, requisitos iniciais, requisitos refinados, manuais do sistema.

Descrição textual e visual da etapa - O protótipo MESC validado modularmente é submetido ao processo de validação sistêmica, aqui entendida como a validação que realiza um estudo de caso preparado pela equipe de desenvolvimento com o objetivo de evidenciar as funcionalidades e performance do sistema e deverá ser reproduzida em parte ou no todo na próxima etapa com a presença do cliente e de seus especialistas.

O estudo de caso deverá evidenciar tanto o atendimento das necessidades do cliente expressas no RQI quanto o atendimento aos requisitos refinados originados a partir dos RQI.

A Figura 59 esboça a etapa de integração e validação sistêmica. Os documentos para esta etapa devem ser:

1 - DRQI - Documento de Requisitos iniciais o SIAPE

2 - DPS - Documento de Projeto de Sistema

3 - MT - Manual técnico do SIAPE

4 - MU - Manual de usuário do SIAPE

Esses documentos são as referências que deverão ser consideradas para evidenciar o atendimento, ou não das necessidades do cliente, e nesta validação e estudo de caso deverá ser exaustivamente verificadas com o objetivo de comprovar a realização de todas as solicitações feitas pelo cliente e seus especialistas.

O DRQI contém o cenário que foi previamente criado para ser utilizado nesta fase como o estudo de caso que evidenciará as funcionalidades e performances do sistema.

O estudo de caso não é relatado aqui por ser é o objeto do Capítulo 4.

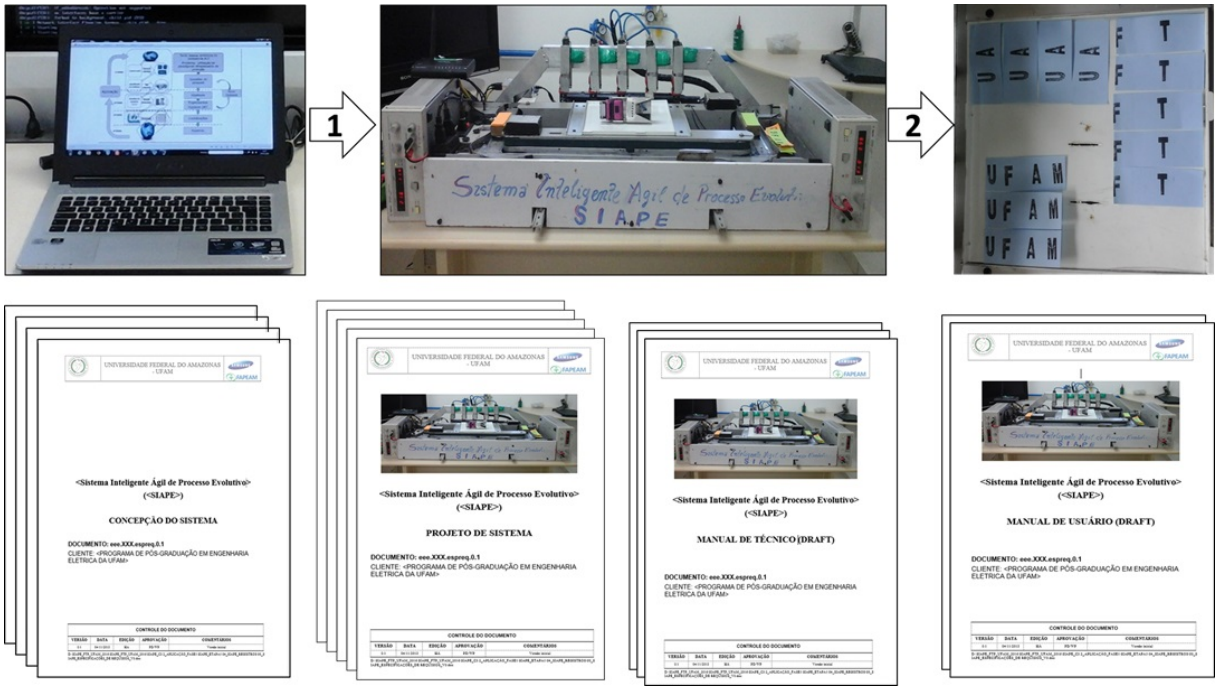


Figura 59 – Etapa de integração e validação sistêmica

Havendo a aprovação de todos os itens especificados e solicitados pelo cliente, o sistema é aprovado e liberado para a etapa de Comissionamento.

3.2.9 ETAPA 9 - COMISSIONAMENTO

Tabela 9 – Tabela da etapa 9 - Comissionamento

Item	**Descrição**
1.Objetivos	Realizar o comissionamento do sistema contra os requisitos iniciais do cliente e contra o manual de usuário.
2.Entradas	SIAPE validado, RQI, manual de usário e manual técnico.
3.Processo	O SIAPE validado sistemicamente é submetido ao processo de comissionamento.
4.Saídas	A saída do processo de comissionamento é o produto denominado de Produto SIAPE que é o sistema evolutivo realizado, validado e comissionado, e pronto para ser submetido ao processo de entrega. **S1**
5.Registros	Manual de usuário, Manual técnico contendo a especificações do produto e os requisitos iniciais do cliente.

Descrição textual e visual da etapa - Nesta etapa o SIAPE é submetido ao processo de comissionamento, aqui definido como o processo que objetiva assegurar que as partes do sistema estejam projetados, instalados, testados, operando e mantidos de acordo com as necessidades e requisitos operacionais do cliente.

Por meio destes testes é que o equipamento será liberado para a etapa de entrega ao cliente final. Os testes aqui realizados objetivam evidenciar a operacionalidade do sistema.

A partir dos requisitos iniciais, das especificações, e do próprio sistema são realizados testes de aceitação para evidenciar a operacionalidade do sistema. Neste momento, o estudo de caso é realizado e os ajustes e correções podem ser processados nos manuais de usuários e manuais técnicos visando as operações dos usuários.

Na Figura 60 os componentes desse processo são ilustrados: O mesmo caso de uso deve ser repetido até que se elimine qualquer dúvida sobre a operacionalidade do sistema e sua eficácia comprovada. Na figura vê-se que o controle do sistema é via PC e que o resultado deve ser os pedidos do cliente inseridos num plano de produção que é concluído com sucesso.

A Etapa de Comissionamento é fundamental para a realização de testes finais onde possa mapear as entradas e saídas de dados para incluí-las nos manuais técnicos e de usuário. Esse mapeamento deve ser consolidado e incluído, se ainda não foi, nos documentos que serão entregues ao cliente.

O fechamento do nono marco é evidenciado pela entrega dos documentos técnicos e de usuários concluídos aso responsáveis em realizar a Etapa de Entrega junto ao cliente e seus especialistas. É sempre uma boa prática acompanhar as verificações e participar, na prática, das operações de comissionamento. Isso dará mais segurança no trato com o cliente.

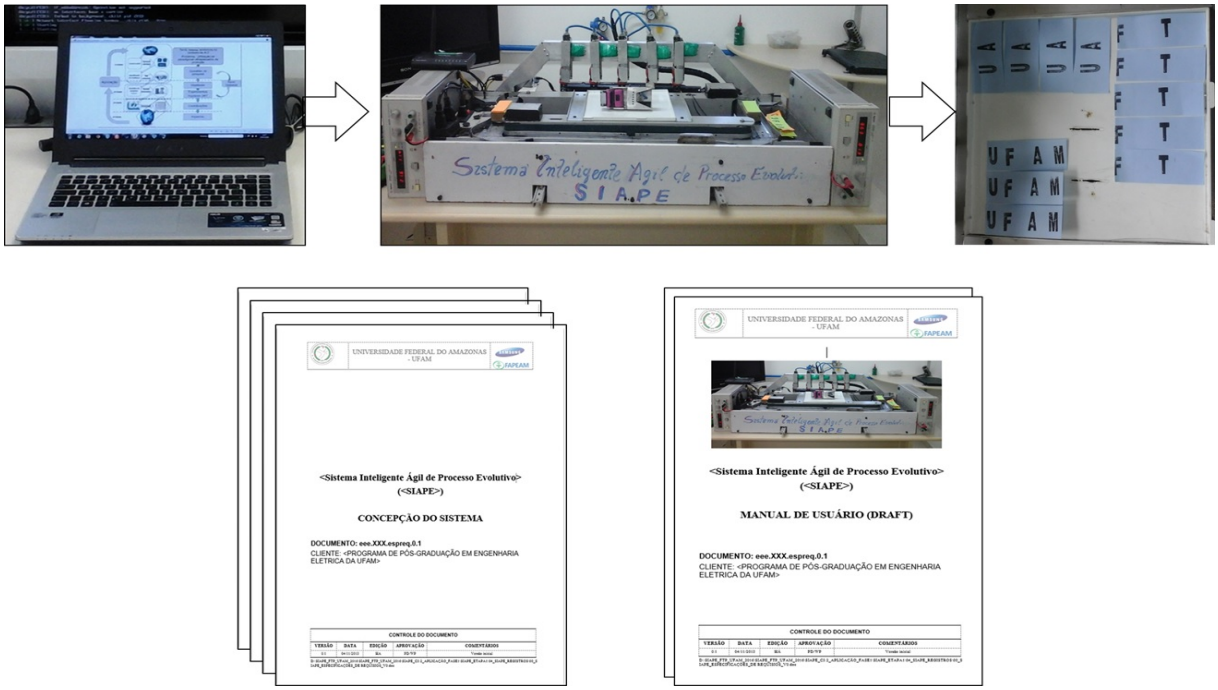


Figura 60 – Etapa de Comissionamento

3.2.10 ETAPA 10 - ENTREGA

Tabela 10 – Tabela da etapa 10 - Entrega

Item	Descrição
1.Objetivos	Realizar a entrega oficial do SIAPE, agora com o status de produto, ou seja, é o teste de aceitação do produto desenvolvido realizado pelo cliente sob a orientação da equipe de desenvolvimento.
2.Entradas	Produto SIAPE, Manual de usuário, Manual técnico com especificações técnicas e Requisitos iniciais do cliente.
3.Processo	O produto SIAPE é submetido aos testes de aceitação do cliente.
4.Saídas	A saída do processo é o produto SIAPE aprovado pelo teste de aceitação do cliente.
5.Registros	Manual de usuário, Manual técnico e Requisitos iniciais do cliente.

Descrição textual e visual da etapa O Produto SIAPE aprovado é submetido à Etapa de Entrega. Essa etapa se configura pela realização do teste de aceitação do cliente sob a orientação da equipe de desenvolvimento. No momento da realização dos testes, todos as observações e solicitações devem ser anotadas para que se verifique a possibilidade de inclusão, se a observação estiver dentro do escopo do projeto, ou não, se estiver fora do escopo, neste último caso, uma nova negociação deve ser realizada.

A Figura 61 ilustra a finalização do processo de desenvolvimento por meio da entrega do Produto SIAPE ao cliente. Neste momento, o estudo de caso utilizado na Fase de Finalização é realizado pelo cliente, e seus especialistas, sob a orientação da equipe de desenvolvimento. O manual de usuário é explicado e realizado em sua íntegra para que não hajam dúvidas de sua aplicabilidade ao produto desenvolvimento.

É importante notar que, ao término da Etapa de Comissionamento, o sistema não é apenas um projeto de sistema realizado, mas atingiu o status de produto com seus manuais, especificações e requisitos atendidos e prontos para serem submetidos à validação do cliente.

Esse produto realizado trata-se do sistema evolutivo, denominado de SIAPE, que foi desenvolvido durante as dez etapas de desenvolvimentos contidas no Método de Desenvolvimento de Sistemas Evolutivos (MeDSE), elaborado especificamente parar suprir a necessidade de desenvolvimento de sistemas que são baseados no paradigma evolutivo de produção (EPS), aderentes aos ambientes da $i4.0$ e preparado para a IoT.

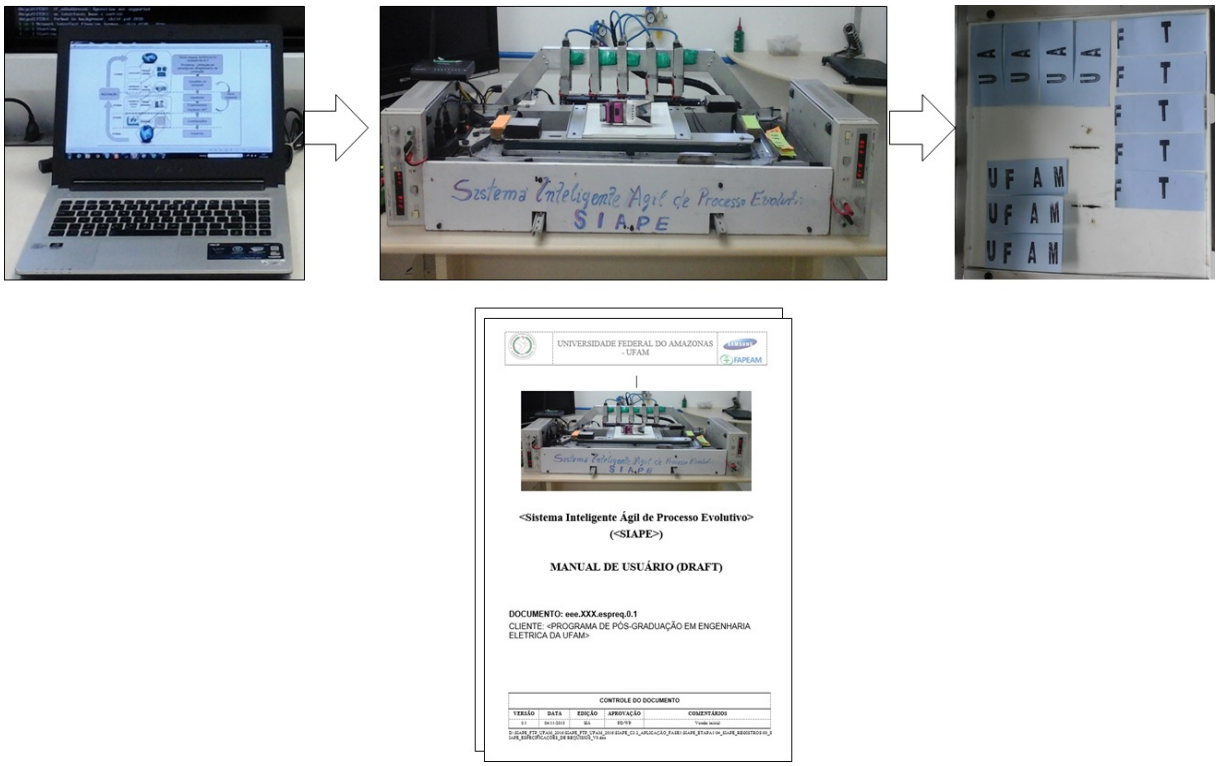


Figura 61 – Etapa de Entrega

Capítulo 4

Experimentação

Este capítulo descreve a realização de um experimento que visa evidenciar a operacionalidade do SIAPE e sua aderência à *i*4.0. Além disso, mostra algumas comparações com o protótipo chamado Produto UFAM, o qual sintetiza o sistema flexível *i*3.0.

Primeiramente descreve-se as características e funcionamento do produto UFAM. Por fim, são descritos o cenário e a configuração do SIAPE e a experimentação é realizada. Os resultados são então registrados para uma posterior comparação (Capítulo 5) com o Produto UFAM.

4.1 Produto UFAM

4.1.1 Descrição do Produto UFAM

O Produto UFAM é um sistema de carimbos de letras para a montagem de anagramas a partir de um CLP e módulos pneumáticos, tal como os sistemas de montagem atuais, isto é, *i*3.0.

O Produto UFAM originou a parte de hardware do SIAPE com as devidas melhorias e restrições impostas pelo cliente. Então, as características do SIAPE são herdadas tanto de ambientes *i*3.0, quanto de ambientes *i*4.0.

O Produto UFAM é o resultado da integração entre seis subsistemas: um sistema microcontrolado, que utiliza entradas analógicas e digitais como entradas e saídas do sistema; um sistema de atuadores, composto por um motor DC alimentado com 24V DC, lâmpadas de 24V DC, uma lâmpada de 127V AC, e eletroválvulas de 6bar que são controladas por solenóides de 24V DC; um sistema de sensores composto por 6 sensores magnéticos e 1 sensor de presença; um sistema de ar comprimido com cinco ramificações de 6 bar. Esses sistemas são alimentados com por uma fonte elétrica que fornece 127V DC e 24V DC e tem a sua inicialização dada por um operador humano que liga o sistema



Figura 62 – Produto UFAM

e insere um palete para que seja processado pelo sistema de manufatura. A Figura 62 mostra o Produto UFAM.

4.1.1.1 Descrição de funcionamento do Produto UFAM

A Figura 63 ilustra o Diagrama em bloco do Produto UFAM e a Tabela 11 identifica a legenda dos componentes constantes no diagrama neste diagrama em blocos.

Para que o sistema seja energizado o operador necessita acionar a chave 1 (CH1: on-off) para a alimentação da rede 127/220VAC ser aplicada ao sistema elétrico do hardware do Produto UFAM. O código Ladder do Produto UFAM está configurado para realizar a energização sequencial das eletroválvulas no tempo de 0,5 segundos entre as mesmas. Assim sendo, tem-se como resultado o posicionamento das eletroválvulas iniciando por SL1 e finalizado por SL5. O palete, ao ser detectado pelo sensor 0 (S0) aciona o motor DC que movimenta a esteira conduzindo o bloco na direção do sensor 1 (S1).

A lâmpada LP6 identifica o status do sensor 0 (S0). O palete, ao ser detectado por S1, interrompe a alimentação do motor DC. Neste momento, a alimentação da eletroválvula correspondente a S1 é interrompida e o ar comprimido na eletroválvula, pressiona-a sobre o palete estampando a letra M. Após a estampagem, a alimentação da eletroválvula e do motor retorna, movendo a eletroválvula para a posição inicial e movimenta a esteira para frente.

O palete, agora com a letra M estampada, move-se em direção aos demais sensores que repete a ação de estampagem para as demais letras até completar a palavra do UFAM. Ao chegar no fim da esteira, o bloco estampado é captado por S6 que interrompe a alimentação do sistema e aciona o sinalizador (LP7) para que o operador retire o produto UFAM da esteira e insira um novo palete. O processo então reinicia até que a produção seja atingida.

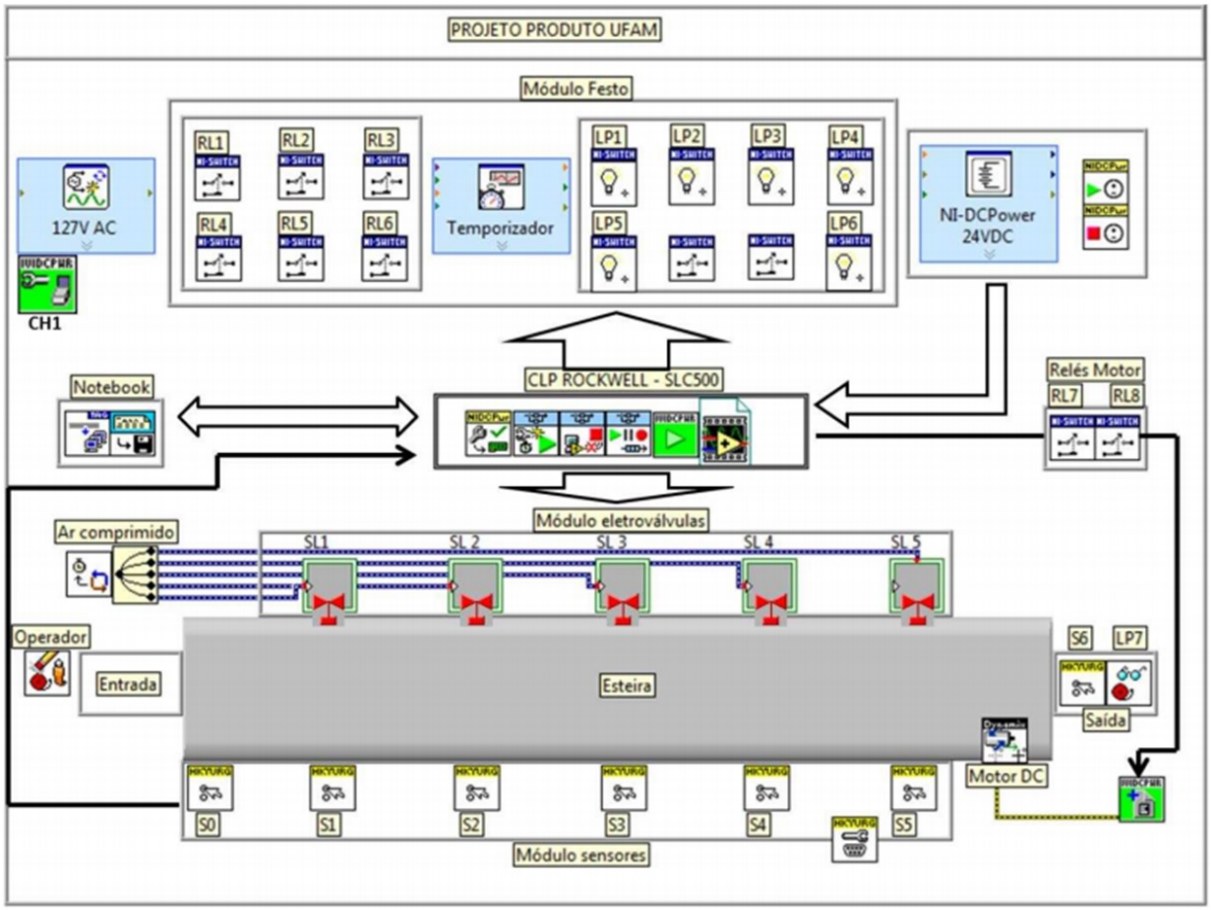


Figura 63 – Diagrama em bloco do Produto UFAM

4.2 Experimentação - Configurações do SIAPE

Esta seção trata da descrição de um experimento com o SIAPE e suas configurações para produção.

4.2.1 Objetivos da configuração para a experimentação

Dentre os principais objetivos da configuração para a experimentação pode-se se destacar os seguintes:

1 possibilitar que todos os dispositivos especificados estejam funcionando em rede;

2 conseguir fazer com os equipamentos estejam interligados para alimentar os circuitos quando necessário;

3 monitorar as operações de uma forma que o software possa funcionar com o tempo correto;

4 possibilitar as realizações das habilidades dos agentes nas operações necessárias à realização do plano.

Tabela 11 – Legenda da planta do produto UFAM

Item	Tipo	Descrição
1	LP1 a LP5	Lâmpada correspondente ao solenóide SL1 a SL5
2	LP6	Lâmpada correspondente ao sensor 0
3	LP7	Lâmpada correspondente ao sensor 6
4	RL1 a RL6	Relé correspondente aos sensores S0 a S5
5	RL7	Relé do motor DC
6	RL8	Relé do motor DC
7	S0	Sensor de Entrada
8	S1	Sensor correspondente à letra M
9	S2	Sensor correspondente à letra A
10	S3	Sensor correspondente à letra F
11	S4	Sensor correspondente à letra T
12	S5	Sensor correspondente à letra U
13	S6	Sensor de Saída
14	SL1	Solenóide correspondente à letra M
15	SL2	Solenóide correspondente à letra A
16	SL3	Solenóide correspondente à letra F
17	SL4	Solenóide correspondente à letra T
18	SL5	Solenóide correspondente à letra U
19	CH1	Chave on-off

4.2.2 A configuração para a experimentação

A Figura 64 ilustra uma visão simplificada do estudo de caso que será evoluída até que a configuração do sistema seja atingida.

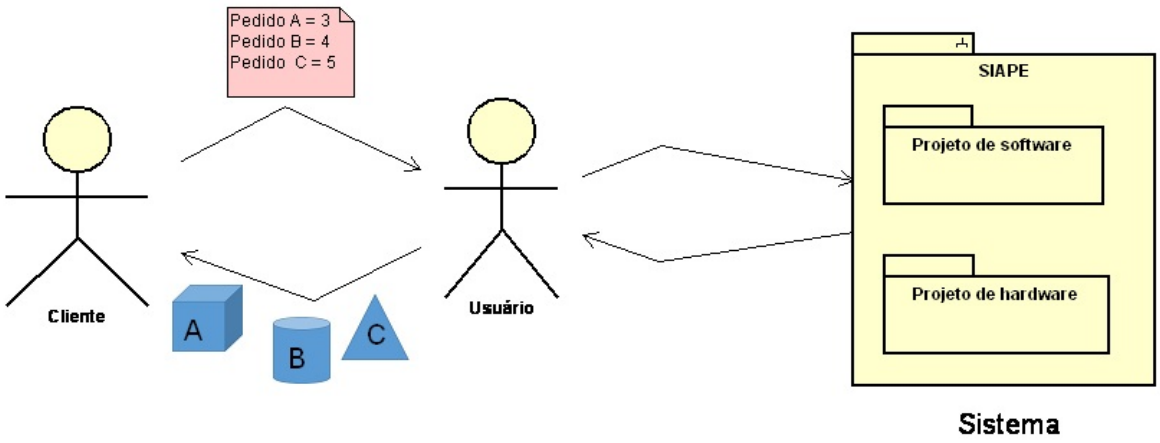


Figura 64 – SIAPE - Experimentação

O estudo de caso é composto por uma solicitação de um cliente. Essa solicitação é composta por três pedidos de produção conforme segue:

Pedido 1 - Produto A: A palavra UFAM; Quantidade = 03 unidades

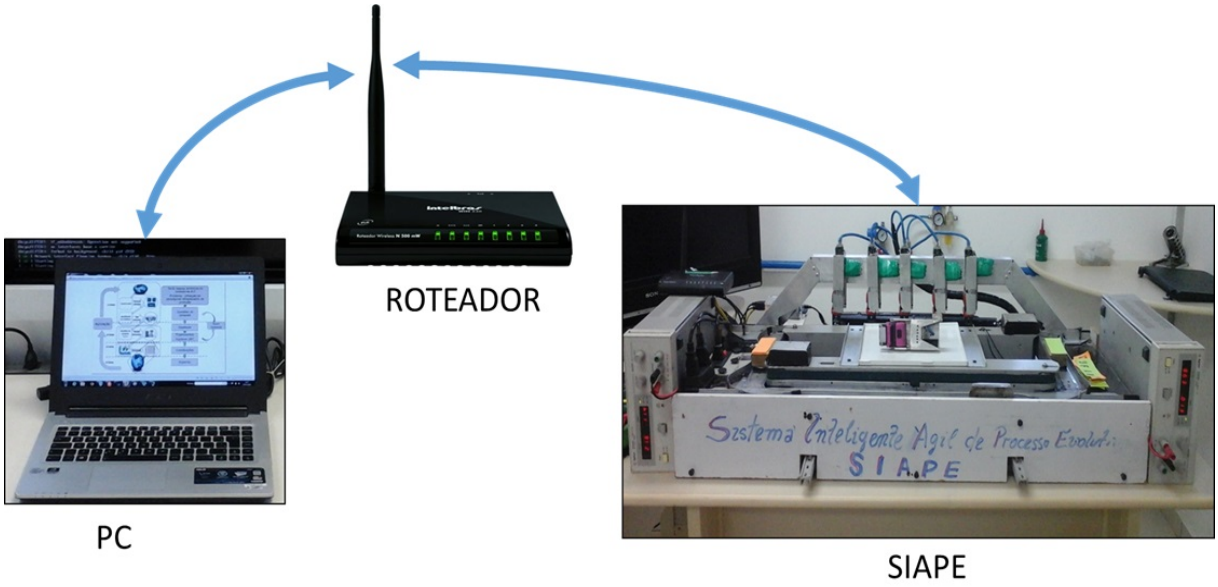


Figura 65 – Ambiente de produção para o estudo de caso

Pedido 2 - Produto B: A palavra UTAM; Quantidade = 04 unidades

Pedido 3 - Produto C: A palavra UEA; Quantidade = 05 unidades

A Realização da solicitação é processada seguindo os passos a seguir:

1. O Cliente solicita os pedidos de produção ao operador.
2. O Operador insere os pedidos no sistema.
3. O Sistema realiza os pedidos e retorna os produtos para o operador.
4. O Operador finalmente atende à solicitação do cliente e entrega os produtos solicitados ao cliente.

4.2.3 Descrições de software e hardware do ambiente de produção.

O cenário é desenvolvido no ambiente denominado de Ambiente de Produção. A Figura 65 ilustra os componentes básicos do sistema e suas descrições de hardware e de software são feitas nas tabelas a seguir.

O PC deve estar preparado com as características de hardware e software descritas nas Tabelas 12 e 13 para se conectar à rede existente no roteador:

O roteador deve ter as características de hardware e software descritas nas Tabelas 14 e 15:

O SIAPE deve ter as características de hardware descritas na Tabela 16:

Tabela 12 – PC - Itens características de software

Item	Descrição
1. Java	Linguagem Java instalada e configurada
2. IDE	O Interface do Ambiente de Desenvolvimento dor NetBeans instalada e configurada
3. Jade	Framework Jade feito em Java
4. Raspberry pi	Placa Raspberry Pi configurada interface elétrica
5. pi4j	Biblioteca para trabalhar com as entradas e saídas de comunicação com sensores e atuadores
6. Swing	Biblioteca para interface feita em Java
7. EPSCore	Biblioteca desenvolvida para a aplicação no SIAPE
8. MainSiape	Código para criar plataforma Jade e o agente YPA
9. AcHw	Código para criar o agente Acesso Hardware
10. Order	Código para criar o agente Order

Tabela 13 – PC - Itens características de hardware

Item	Descrição
1. Arquitetura	AMD 64 bits
2. Processadores	4 Processadores Lógicos
3. Sist. Operac	Windows e Linux
4. Processador	Intel(R) Core(TM) i7-4510U CPU @ 2.00GHz, 2001 Mhz, 2 Núcleo(s)
5. Memória	Memória Física (RAM) Instalada 8,00 GB

Tabela 14 – Roteador - Itens características de software

Item	Descrição
1. Rede	MeDSE siape 2
2. IP	10.0.0.1
3. Interface	150 Mbps operando dentro dos padrões IEEE802.11b/g/n
4. Processador	Intel(R) Core(TM) i7-4510U CPU @ 2.00GHz, 2001Mhz, 2 Núcleo(s)
5. Modo repetidor	DHCP cliente e servidor

Tabela 15 – Roteador - Itens características de hardware

Item	Descrição
1. Chipset	Realtek RTL8196C
2. Memória Flash	2 MB
3. Antena	5 dBi
4. Potência	700mW (27dBm) via hardware
5. Modo repetidor	DHCP cliente e servidor
6. Portas	01 porta WAN RJ45 e 04 portas LAN RJ45

Tabela 16 – SIAPE - Itens características de hardware

Item	Descrição
1. M	Módulo mecânico
2. E	Módulo eletrônico
3. EEm	Entidade eletro-mecânica das letras
5. EEe	Entidade eletro-mecânica da esteira

4.2.4 Configuração do ambiente de produção.

Para que o cenário seja realizado no ambiente de produção, este deve ser configurado seguindo os procedimentos relacionados de 1 a 6 que são descritos a seguir e devem ser acompanhados pela ilustração da Figura 66.

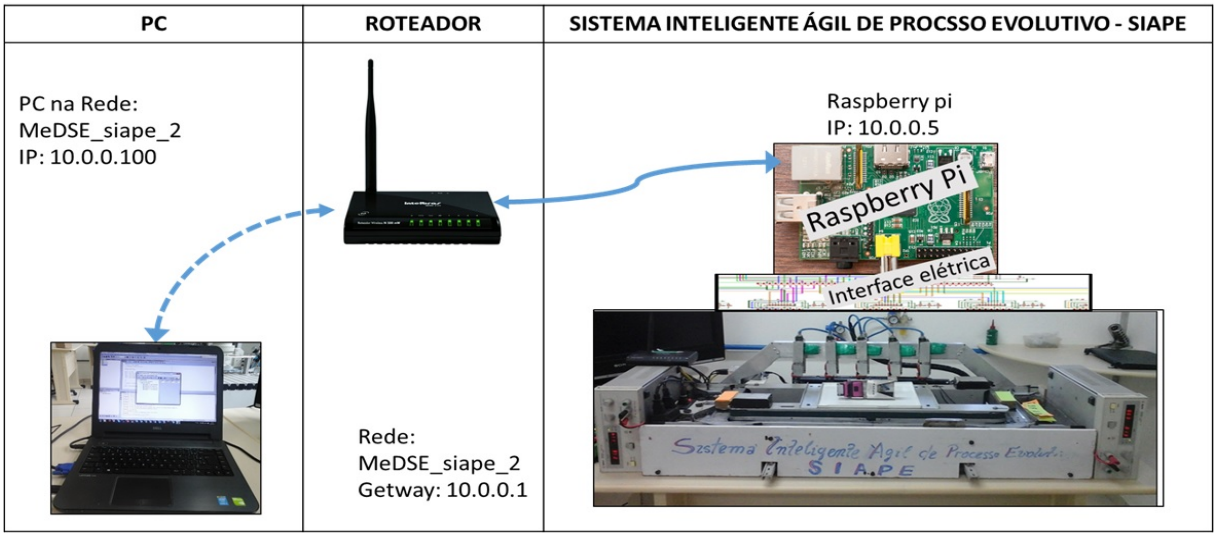


Figura 66 – Configuração do Ambiente de produção para a experimentação

1. Ligar o sistema - Ao ligar a chave *power* do sistema os dispositivos PC, Roteador e SIAPE são energizados e estarão preparados para serem configurados.



Figura 67 – Power dos dispositivos

2. Configurar o roteador - Uma rede é estabelecida no roteador com o nome de MeDSE siape com o IP:10.0.0.1. Esta rede será acessada pelo Raspberry Pi e pelos agentes via Protocolos FIPA que são codificados em Java.

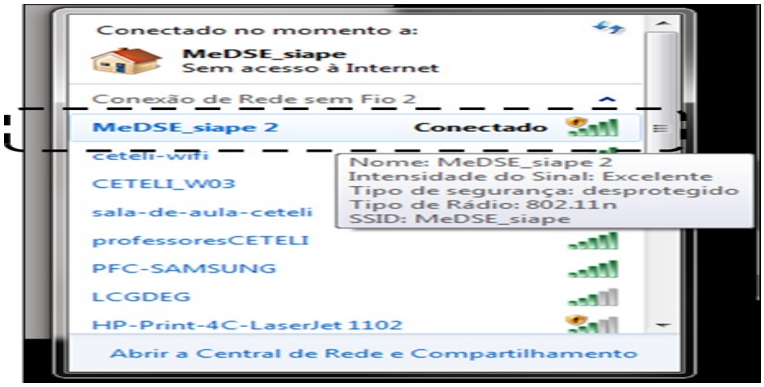


Figura 68 – Rede MeDSE siape - ip:10.0.0.1

3. Configurar o Raspberry Pi - O Raspberry Pi é configurado com um IP fixo de número 10.0.0.5 e acessa a Rede MeDSE siape via cabo RJ45. O Raspberry é conectado diretamente à interface elétrica e fornecerá ao agente YPA a informação dos módulos presentes na interface elétrica;

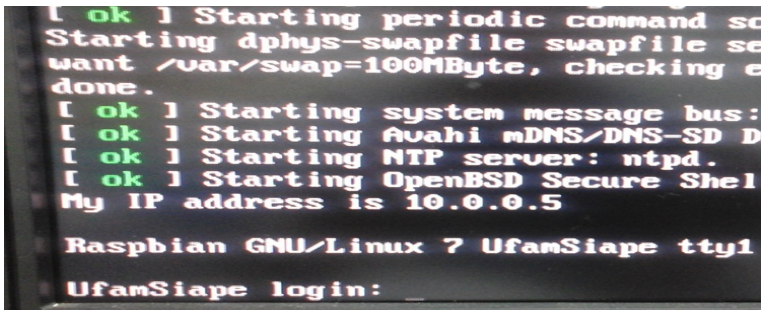


Figura 69 – Rede MeDSE siape - Raspberry Pi - 10.0.0.5

4. Criar uma plataforma Jade - No PC acessar o IDE Netbeans e criar uma plataforma Jade, dentro do main container criar um agente YPA. Essas ações são conseguidas por meio codificação Java no arquivo mainsiape.java;

5. Criar um agente AcHw - Ainda dentro da plataforma Jade, criar um container, e dentro dele criar um agente AcHw. O agente Acesso Hardware é o responsável por fornecer os módulos presentes na interface elétrica ao YPA;

6. Criar um agente Order. Criar um segundo container, e dentro desse criar um agente Order. O agente Order é o agente que instancia a interface anagrama responsável em receber as informações do cliente, e depois que receber o plano do agente Order, realizar esse plano.

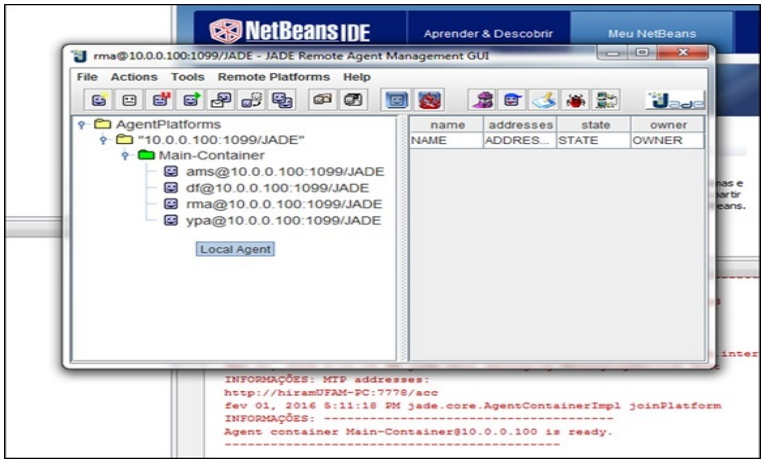


Figura 70 – Plataforma Jade - Agente YPA

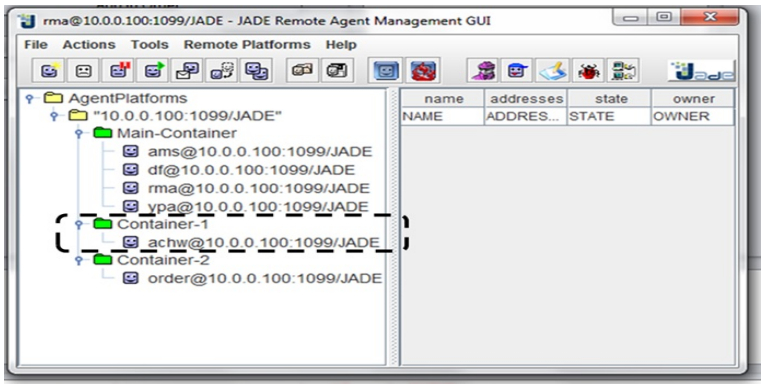


Figura 71 – Plataforma Jade – Agente AcHw

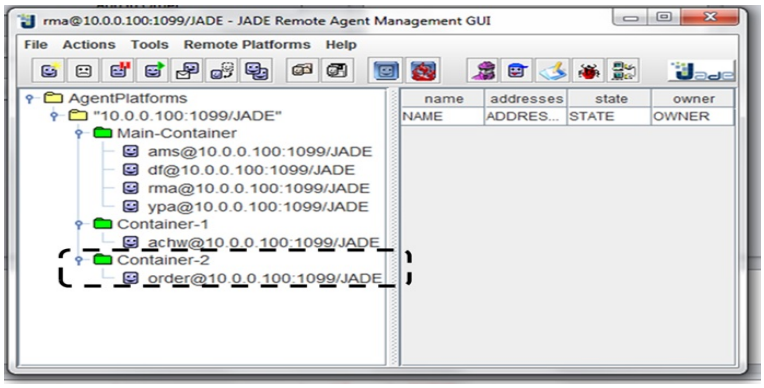


Figura 72 – Plataforma Jade - Agente Order

Quando o agente Order é criado, ele instancia o agente Anagrama que fica acessível ao operador por meio da interface gráfica. O operador deverá inserir os pedidos do cliente na interface, essa atividade inicia o estudo de caso propriamente dito, e este é descrito na próxima seção deste capítulo.

4.3 Realização da experimentação

Nesta seção o estudo de caso é realizado, isto é, a solicitação do cliente é inserida no sistema pelo operador, o sistema realiza a produção e retorna ao operador os pedidos do cliente na forma de produtos. Esses produtos são entregues ao cliente, atividade que conclui o estudo de caso. Além da realização, os resultados são registrados para que possam ser analisados na próxima seção.

Da mesma forma que foi feito na seção anterior, os procedimentos de 7 a 11 serão realizados e podem ser acompanhados com as ilustrações de cada atividade e pela ilustração da Figura 66.

7. O operador insere os pedidos do clientes na Interface gráfica Anagrama.

O operador segue os procedimento para inserir anagramas na interface gráfica, conforme ilustrado na Figura 73. Na ilustração pode-se evidenciar dois pedidos do cliente inseridos na interface gráfica. Note-se que a letra E não está presente no sistema e a palavra UEA não foi inserida no plano de produção. Isso se deve ao fato do sistema não permitir que um recurso inexistente no processo seja utilizado no plano, evitando assim erro do operador.

Pedido 1 - Produto: A palavra UFAM; Quantidade = 03 unidades

Pedido 2 - Produto: B palavra UTAM; Quantidade = 04 unidades

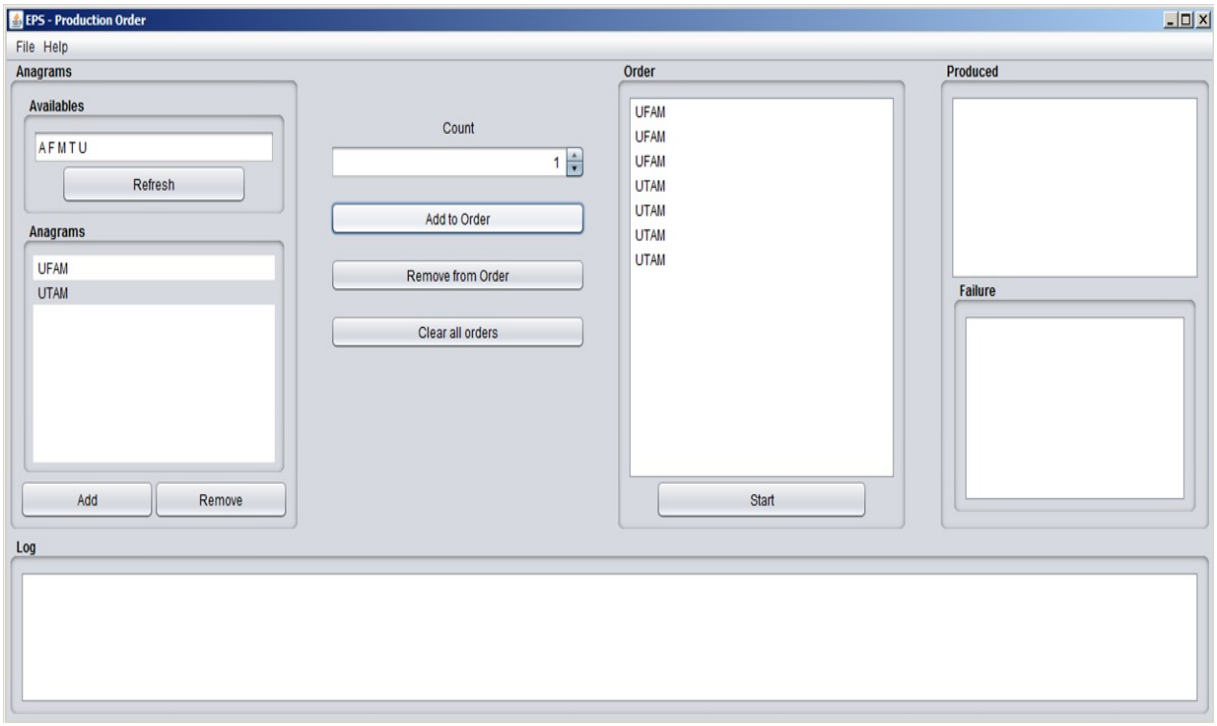


Figura 73 – Plano de produção montado

8. - O operador inicia o plano de produção.

No momento em que o operador inicia o plano de produção, o agente Anagram extende do agente Produto as informações para a realização de um produto, neste caso, a palavra UFAM. A Figura74 ilustra um trecho do código.

```
public class Anagram extends Product {

    private final String anagram;
    private final List<PlanItem> tablePlan;

    public Anagram(String anagram) {
        this.anagram = anagram;
        this.tablePlan = new ArrayList<>();
    }
```

Figura 74 – SIAPE: trecho extends

Neste momento o agente Produto instancia o agente Anagram com os parâmetros necessários à produção da palavra UFAM e o seguinte método é realizado:

1) É definido o agente AcHw com os parâmetros que deverão ser configurados para realizar a produção conforme ilustrado na Figura 75:

```
achwInfo = new MRAInfo();
achwInfo.setName("achw");
achwInfo.setProperties(new String[0]);
achwInfo.setSkills(new SkillTemplate[0]);
```

Figura 75 – SIAPE: trecho achw

2) As letras disponíveis no sistemas ficam acessíveis para ser utilizadas no processo de montagem de acordo com as solicitações do operador. A Figura 76 ilustra o trecho desse código.

```
st = new SkillTemplate("GetLetters", "void", new String[0]);
String result = MRAServices.executeRemoteSkill(this, achwInfo, st);
letras = result.split(",");
```

Figura 76 – SIAPE: trecho GetLetters

3) A Figura 77 ilustra o plano de produção que é criado utilizando-se as letras disponíveis que são organizadas conforme a sequência, primeiramente, da posição do módulo e depois, da posição da letra no palete.

```
for (int pos = 0; pos < anagram.length(); pos++) {
    String letra = anagram.substring(pos, pos + 1);
    for (int mod = 0; mod < letras.length; mod++) {
        if (letra.equals(letras[mod])) {
            tablePlan.add(new PlanItem(mod, pos + 1, letra));
        }
    }
}
Collections.sort(tablePlan);
for (int i = 0; i < tablePlan.size() - 1; i++) {
    for (int j = i+1; j < tablePlan.size(); j++) {
        if (tablePlan.get(j).mod == tablePlan.get(i).mod) {
            tablePlan.get(j).pos = tablePlan.get(j).pos - tablePlan.get(i).pos;
        }
    }
}
```

Figura 77 – SIAPE: trecho tablePlan

4) Uma vez que as letras são organizada o plano é executado por meio dos skills MoveToStart do agente AcHw. Esse trecho do código está ilustrado na Figura 78:

```
st = new SkillTemplate("MoveToStart", "void", new String[0]);
MRAServices.executeRemoteSkill(this, achwInfo, st);
```

Figura 78 – SIAPE: trecho MoveToStart

5)O palete é movido até o módulo do sistema especificado para a posição definida no palete. Esse método é repetido até que a produção da palavra definida seja concluída, no caso do exemplo do experimento, a palavra UFAM. A Figura 79 ilustra o trecho do código.

```
for (PlanItem item : tablePlan) {
    st = new SkillTemplate("MoveTo", "void", new String[]{"int", "int"});
    st.setArgsValues(new String[]{
        String.valueOf(item.mod),
        String.valueOf(item.pos)
    });
    MRAServices.executeRemoteSkill(this, achwInfo, st);
    System.out.println(String.format("Letra: %s | MoveTo(%d, %d)", item.letter, item.mod, item.pos));

    st = new SkillTemplate("Stamp", "void", new String[]{"int"});
    st.setArgsValues(new String[]{String.valueOf(item.mod)});
    MRAServices.executeRemoteSkill(this, achwInfo, st);
}

st = new SkillTemplate("MoveToEnd", "void", new String[0]);
MRAServices.executeRemoteSkill(this, achwInfo, st);
```

Figura 79 – SIAPE: trecho MoveToEnd

6) Após realização da produção a situação da produção é informada na tela – conforme Figura 80 – o resultado é mostrado no tela:

```
MRAServices.executeRemoteSkill(this, achwInfo, st);
System.out.println(String.format("Letra: %s | MoveTo(%d, %d)", item.letter, item.mod, item.pos));
```

Figura 80 – SIAPE: trecho Status

A Figura 81 mostra um instantâneo da finalização da produção da palavra UFAM e início da palavra UTAM. Note-se que a diferença entre as duas palavras é a letra que se encontra na segunda posição do palete, ou seja, para a letra F, têm-se o seguinte skill MoveTo(1,2), indicando a atuação do módulo 1 (letra F) na posição 2 do palete. Para a letra T, têm-se o seguinte skill MoveTo(3,2), indicando a atuação do módulo 3 (letra T) na posição 2 do palete.

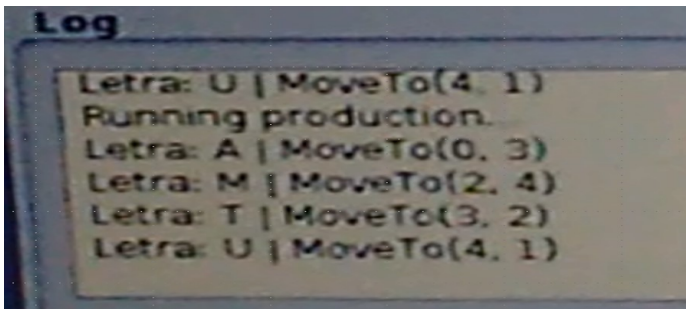


Figura 81 – Log passagem UFAM para UTAM

Do ponto de vista do operador quando a tecla *start* é pressionada o plano começa a ser produzido obedecendo a sequência definida no plano de produção. Na Figura 82 pode ser evidenciado que os dois primeiros lotes de produção, relativos aos pedidos A e B já foram produzidos e o terceiro lote será o próximo a ser produzido. Note-se que os produtos A e B usam recursos diferentes (letras T e F) e, nem por isso, houve a necessidade de se parar o sistema para que o recurso fosse trocado de posição. Importante também notar que as quantidades dos produtos também são diferentes (A=3 e B=4) e não houve qualquer parada para a alteração da quantidade, isto é, tanto o tipo de recurso quanto a quantidade dos lotes foram alterados em tempo real durante a produção dos produtos A e B.

O instantâneo mostrado na Figura 82 também registrou a presença do recurso E (letra E). Isso se deve ao procedimento do operador trocar o módulo da letra T pelo módulo da letra E e atualizar o sistema sem ter que desligar sistema. Uma vez atualizado, o módulo foi imediatamente incluído no plano de produção e realizado no processo de produção.

Pedido 3 - Produto: C palavra UEA; Quantidade = 05 unidades

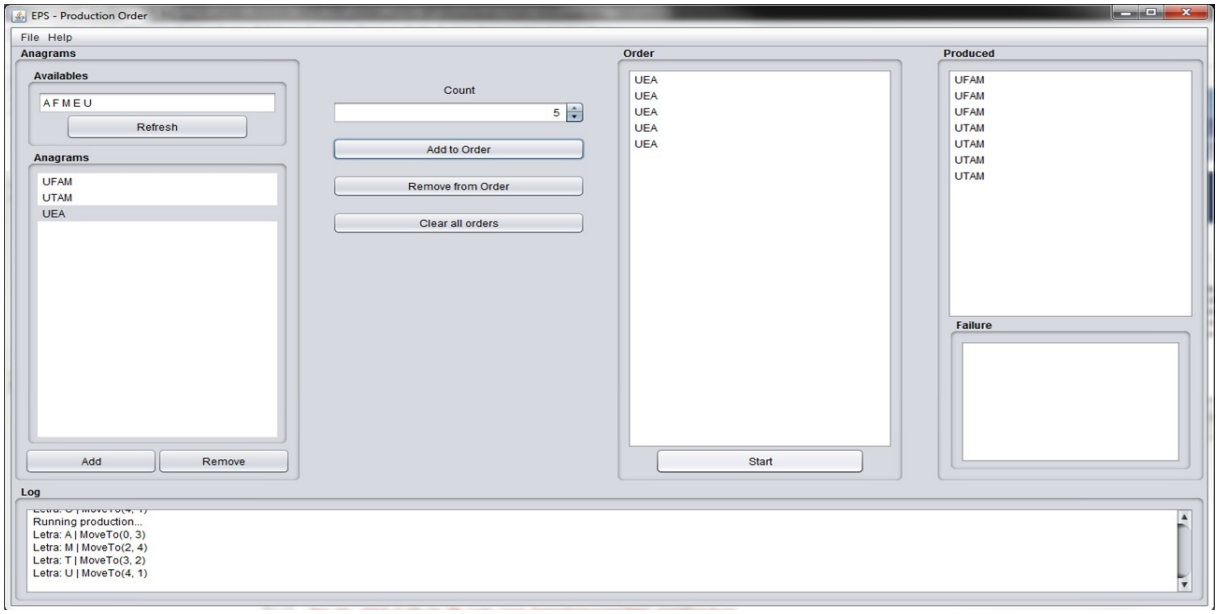


Figura 82 – Realizando Plano de produção

Um olhar mais atento às Figuras 73 e 82 e às operações realizadas, percebe-se a realização do conceito *plug and produce* pois o tempo necessário para realizar a troca de módulos entre os produtos B e C, a atualização e a inserção do produto C no plano de produção foi em média de 42,25 segundos, que na prática, esta operação representa a troca de um produto com o sistema em funcionamento sendo praticamente nula comparada aos tempos praticados hoje em dia que ficam em torno de 30 a 45 minutos, dependendo do número de recursos que compõem produto. É claro que há de se considerar o nível reduzido da experimentação realizada, contudo, como as operações realizadas foram possibilitadas devido às características do sistema que são dinâmicas, esses ganhos tendem a se repetir em plantas reais, pois a dinâmica que reconhece e atualiza o sistema se dá no nível de software.

Outro detalhe importante a ser notado é que o sistema não permite que um recurso (letra) seja inserido no plano sem que o mesmo esteja presente no sistema. Caso ocorra uma falha, como, por exemplo, a retirada de um módulo durante o processo produtivo, o erro é identificado e o sistema não permite que o produto seja produzido. Para que o sistema continue, o recurso pode ser reinserido para que a produção do produto continue.

9. O operador recebe a confirmação da realização do plano. Por meio da Figura 83 pode-se evidenciar que o plano foi totalmente realizado sem nenhuma falha. Note-se que o campo failure está vazio, indicando que que a performance do sistema nesse plano foi 100%.

10. O operador entrega os produtos e desliga o sistema.

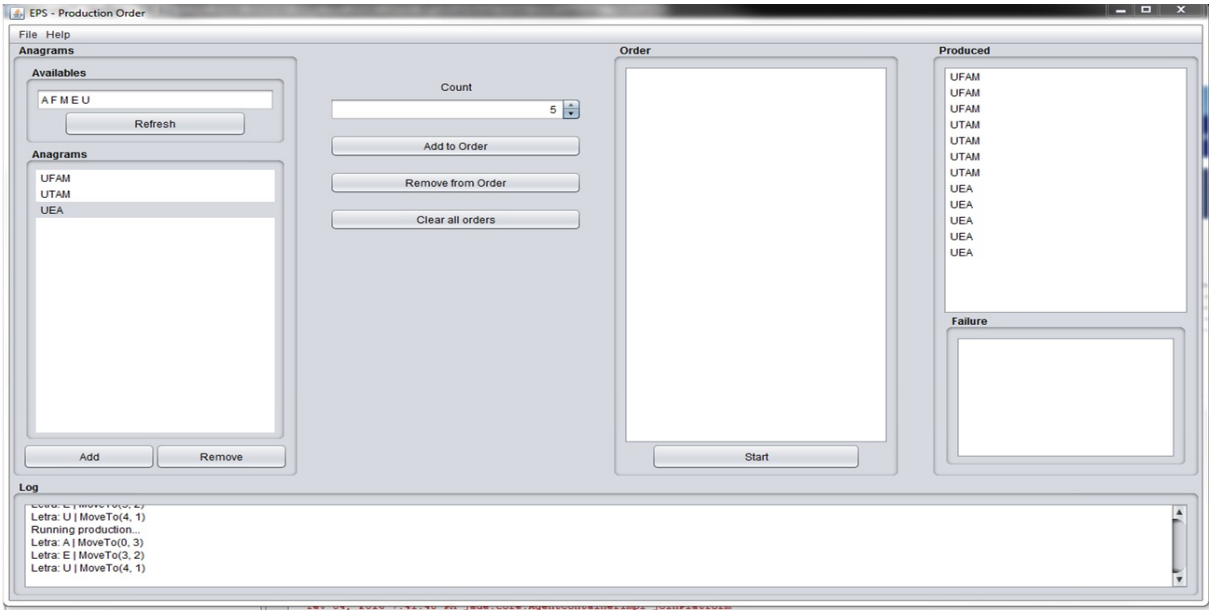


Figura 83 – Interface gráfica com Plano de produção

Após a confirmação da realização da experimentação de produção no SIAPE, o operador desliga o sistema e separa os lotes para serem entregues conforme os pedidos dos produtos e suas respectivas quantidades. Entregues os lotes a experimentação está concluída.

A próxima seção analisa os resultados registrados nesta seção e discute os processamentos realizados pelos agentes do sistema.

A realização da experimentação evidenciou de uma forma simplificada e operacional a funcionalidade do SIAPE, isto é, as funcionalidade que interessam especificamente ao cliente, pois com o sistema, as necessidades do cliente tendem a ser atendidas e os seus problemas solucionados.

Além de evidenciar as funcionalidades do sistema, foi possível utilizar o manual de instruções e realizar os passos necessários para realizar os pedidos solicitados, neste casos, o plano de produção contendo os produtos ilustrados na Figura 84. Nos detalhes, visão dos lotes e a finalização de um produto.

Ao final da experimentação o sistema foi ligado, configurado, operado para realizar os produtos. O resultado da produção foi finalmente, entregue ao cliente. Contudo, existem outras questões que devem ser melhor detalhadas e discutidas como por exemplo:

1. Como se comportaram os valores temporais e a performance do sistema?

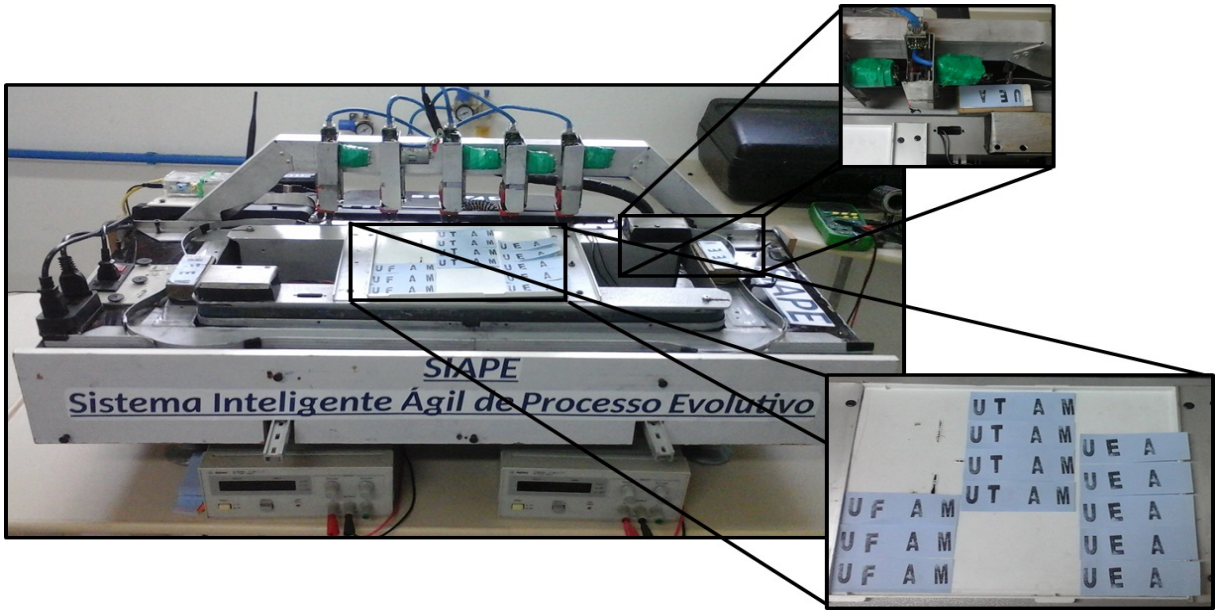


Figura 84 – Plano de produção realizado

2. A questão do paradigma evolutivo como potencial solução da customização de massa, ficou evidenciada com a experimentação?

3. Como ficou a relação entre os referenciais internos e externos e suas implicações sobre a ciência, a tecnologia e a inovação?

Essas questões são abordadas no Capítulo 5, a seguir, que analisa os resultados da pesquisa.

Capítulo 5

Análise de resultados e validação

O documento de Concepção do Sistema, entregue na Etapa 1 do MeDSE (Capítulo 3), contém os Requisitos Iniciais e o cenário que foi montado para a realização da experimentação (Capítulo 4). A partir dos Requisitos Iniciais, foram processados seguidos refinamentos que culminaram na elaboração do projeto de sistema. O projeto de sistema foi transformado em simulações que foram transformadas em protótipos, e esses foram testados e validados, modular e sistemicamente, contra as especificações técnicas e requisitos. O estudo de caso realizou três pedidos de clientes. Essa realização produziu os resultados que são analisados neste capítulo.

Duas seções são utilizadas para processar a análise e a validação. Na primeira seção é elaborado um modelo estático, contudo mais detalhado da produção de um produto usando os recursos do SIAPE. Esse exemplo de produção é usado conjuntamente com os resultados da experimentação para evidenciar que as restrições, os requisitos e as capacidades constantes na Tabela 17, foram alcançadas evidenciando a validação do SIAPE contra os requisitos propostos.

Na segunda seção esse mesmo modelo é utilizado para evidenciar comparações de performance contra o sistema denominado de Produto UFAM que serviu de base para o desenvolvimento do Produto SIAPE. A partir das comparações são realizadas algumas discussões em torno dos resultados para concluir a validação do SIAPE como um sistema evolutivo.

Como forma de organizar a análise a sequência da Tabela 17 é seguida, e cada tipo de requisito é tratado conforme a separação definida a seguir:

Análise de resultado para os requsitos de RQ1 a RQ6 e restrições de RS1 a RS3 - Essa análise evidencia o atendimento das necessidades do cliente expressos pelos requisitos RQ1 a RQ6 e restrições RS1 a RS3. Com a expansão da análise consegue-se evidenciar que os objetivos específicos da proposta de pesquisa também foram atendidos. Isso, quando se enquadra a realização do sistema como prova de conceito,

Tabela 17 – SIAPE - REQUISITOS / RESTRIÇÕES /CAPACIDADES

Item	**Tipo**	**Descrição**	**Código**
01	Restrição	tensão DC1	RS01
02	Restrição	corrente DC	RS02
03	Restrição	Força módulo - elétrica	RS03
04	Cliente-Performance	ciclo de produção mínimo	RQ01
05	Cliente-Performance	setup simplificado	RQ02
06	Cliente-Performance	ramp up mínimo	RQ03
07	Cliente-Performance	lead time mínimo	RQ04
08	Cliente-Produto Ufam	carimbar A,F,M,T,U	RQ05
09	Cliente-Produto Ufam	carimbar palavra a partir do RQ5	RQ06
10	Interno-EPS	modularidade	RQ07
11	Interno-EPS	plugabilidade	RQ08
12	Interno-EPS	reconfigurabilidade	RQ09
13	Enterno-Globalização	Customização	RQ10
14	Externo-Governo	NR-12 (Segurança)	RQ11
15	Externo-Economia	Custos	RQ12
16	Externo-IoT	Plug & Work	RQ13
17	Externo-i4.o	Integração Horizontal	RQ14
18	Externo-Academia	Estado da arte	RQ15

tanto do método de desenvolvimento utilizado, quanto da funcionalidade do SIAPE. Considerando essa abordagem, os requisitos RQ1 a RQ6 e as restrições RS01 a RS03 - identificados na Tabela 17 - são discutidos em maior profundidade.

Análise de resultado para os requisitos de RQ7 a RQ12 e capacidades de CP1 a CP3 - Aqui, a questão recorrente do problema da customização em massa é tratada pelas principais capacidades dos sistemas evolutivos: capacidade de se adaptar e a capacidade de evoluir. Juntam-se às capacidades, as principais propriedades dos sistemas evolutivos para tratar o problema recorrente da customização de uma forma robusta que proporcione os níveis de competitividades para os produtos produzidos por esses tipos de sistemas. Essa análise envolve os requisitos RQ07 a RQ12, conforme descritos na Tabela 17.

Análise de resultado para os requisitos de RQ13 a RQ15 - Essa análise objetiva evidenciar a relação próxima que tem o estado da arte em paradigmas de produção, aqui considerado o paradigma evolutivo com a fronteira do conhecimento, aqui consideradas a Internet das Coisas e a Indústria 4.0 conforme descrito na Tabela 17.

Antes de iniciar o processo de análise torna-se necessário relembrar alguns conceitos já mencionados nos Capítulos 1 e 2. A Figura 13 foi refeita convenientemente na horizontal e está ilustrada na Figura 85. Esta figura identifica as fases do ciclo de vida do produto. Relembrando as fases do ciclo de vida do produto na fase 1, a equipe de marketing (MKT)

realiza pesquisas para identificar as demandas não atendidas. Na Fase 2, a Engenharia de Desenvolvimento (END) transforma as necessidades não atendidas em produto a ser produzido; a área de Suprimentos (SUP) realiza a compra e a logística dos insumos necessários para a realização do produto; a Engenharia de Processo (ENP) na Fase 4, prepara o produto para ser aplicado às linhas de produção; a Produção acontece nas linhas de produção - que são desenvolvidas a partir de sistemas de Engenharia e de Computação usando métodos da Automação Industrial (foco da análise deste capítulo); a área de Vendas e Distribuição (VDI) realiza as vendas e distribui os produtos no Comércio; a área de Instalação e Operações (IOP) realiza a instalação do produto e outras operações junto ao cliente; a Assistência Técnica (ATD) dá suporte ao cliente e ajuda no descarte após a finalização do ciclo de vida do produto.

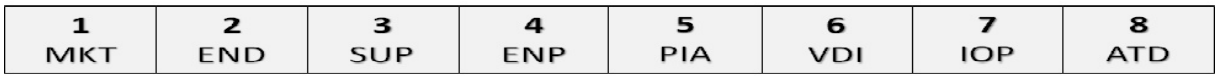


Figura 85 – SIAPE - Ciclo de vida do produto

5.1 Análise de resultados das restrições, requisitos e capacidades

A partir do ciclo de vida do produto, a fase de produção é explodida para facilitar o entendimento da análise dos resultados. Os componentes do sistema estão identificados, conforme pode ser visualizado na Figura 86, foram explicados no Capítulo 2, e são utilizados na análise de cada tipo de requisito nesta subseção.

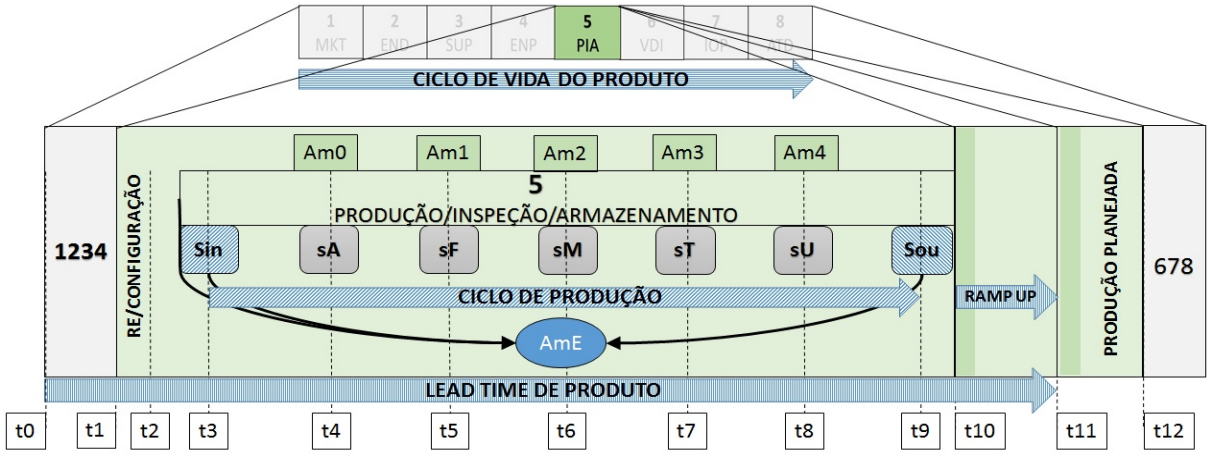


Figura 86 – Ciclo de vida do produto: Fase Produção

As fases iniciais do ciclo de vida do produto (1234) preparam as atividades da fase de produção, isto é, quando o operador recebe o pedido para ser processado, o SIAPE

já está realizado tanto na parte de software quanto na parte de hardware. Essas fases acontecem entre t0 e t1.

É plenamente compreensível para o leitor entender que entre os tempos (ti) podem ou não haver interrupções no processo que aqui não são consideradas.

Quando o operador recebe o pedido de produção, em t1, o SIAPE é configurado e a linha alimentada. Em t2 o operador inicializa a esteira que carrega o palete na direção dos módulos. O agente acesso hardware que monitora os módulos presentes no sistema já tem informado ao OrderAgent todos os módulos do sistema. O OrderAgent por sua vez já incluiu no plano os recursos (letras) solicitadas pelo operador durante a configuração do plano de produção. Caso o recurso faça parte de um dos produtos solicitados, a esteira é movida exatamente para o local do recurso. O Stamper por sua vez realiza seu skill carimbar letra para imprimir a letra sobre o papel que encontra-se no palete. Uma vez carimbada a letra, a esteira é movida para o próximo recurso constante no plano de produção.

O processo se repete até que o produto esteja totalmente produzido (a palavra completamente impressa no papel) e o sensor de saída (Sou), no tempo t9, identifique o palete e registre sua saída do ciclo de produção. De t1 até t9 são percorridas todas as operações de produção necessárias para a realização de uma unidade de produto. De t9 a t10 o produto é armazenado. No período compreendido entre os tempos t10 e t11 encontram-se as atividades relativas à curva de crescimento (ramp up), e de t11 a t12, o período de produção normal, onde todos os recursos de produção estão ajustados e atingiram a produção planejada. As áreas (678) que envolvem a área de Vendas e Distribuição (VDI), a área de Instalação e Operações (IOP) e a Assistência Técnica não são consideradas nestas análises. A Figura 87 relaciona a Figura 13 com a Figura 86 para facilitar o entendimento do conceito de lead time.

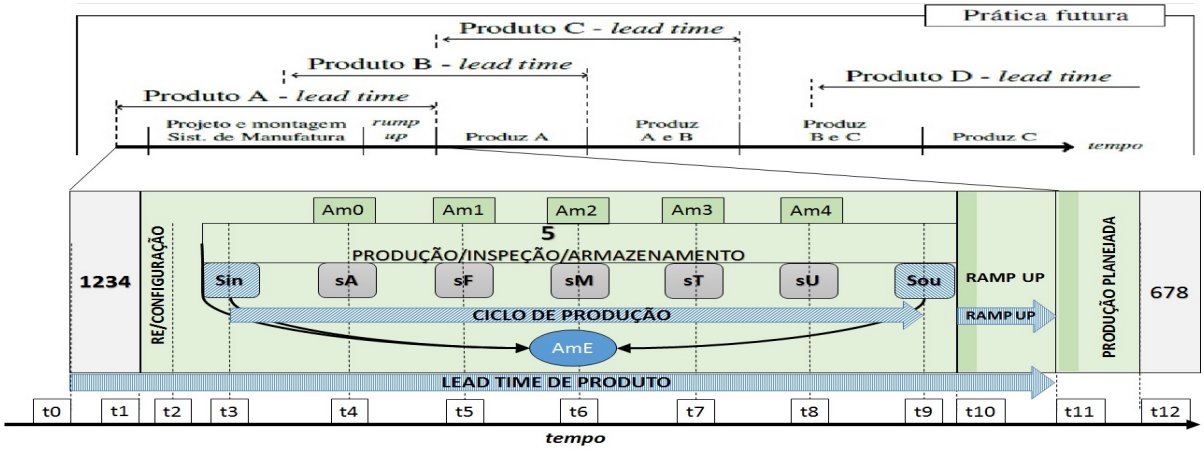


Figura 87 – Ciclo de vida do produto: Lead time.

A Figura 88 ilustra o palete de produção. Quatro posições são codificadas lateralmente no corpo do palete. A localização exata de uma letra é realizada pela posição primeiramente do módulo (Am0 a Am4) e depois pela posição codificada no palete (p1 a p4).

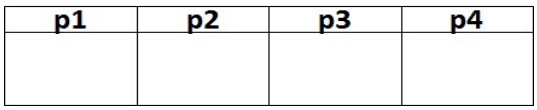


Figura 88 – SIAPE- Palete

O exemplo a seguir produz um anagrama de quatro letras (A, F, M, U) para realizar a palavra UFAM e deve ser acompanhado pela Figura 89 que ilustra passo-a-passo o processo de produção para uma palavra processando o seguinte *skill*:

Letra: A | MoveTo(0, 3) | stamp('A') Letra: F | MoveTo(1, 2) | stamp('F') Letra: M | MoveTo(2, 4) | stamp('M') Letra: U | MoveTo(4, 1) | stamp('U')

Para carimbar a letra A: primeiro o palete é movido:

Letra: A | MoveTo(0, 3)

implicando que a esteira levará o palete para a posição (0) que corresponde ao módulo A, e o atuador do módulo A (Am0) carimbará a letra A na posição p3 (3) do palete.

Essa operação**(1-Carimba A)**) ocorre no tempo t4, e o processo de detecção - quando necessário - é realizado pelo sensor do módulo A(sA), conforme ilustrado na Figura 89

Para carimbar a letra F: primeiro o palete é movido:

Letra: F | MoveTo(1, 2)

implicando que a esteira levará o palete para a posição (1) que corresponde ao módulo F, e o atuador do módulo F (Am1) carimbará a letra F na posição (2) do palete.

Essa operação **(2-Carimba F)** ocorre no tempo t5, e o processo de detecção - quando necessário - é realizado pelo sensor do módulo F(sF), conforme ilustrado na Figura 89.

Para carimbar a letra M: primeiro o palete é movido:

Letra: M | MoveTo(2, 4)

implicando que a esteira levará o palete para a posição (2) que corresponde ao módulo M, e o atuador do módulo M (Am2) carimbará a letra M na posição (4) do palete.

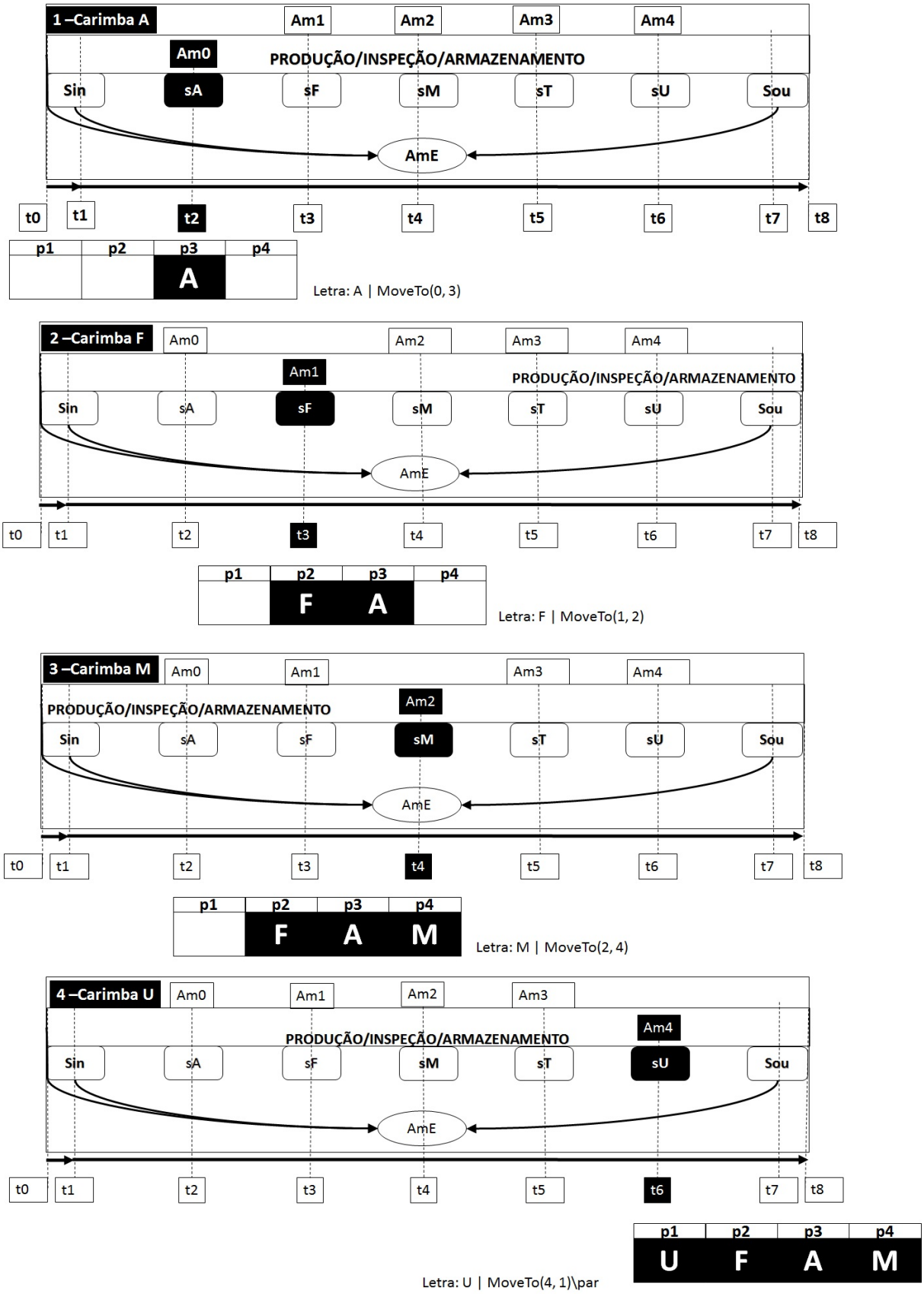


Figura 89 – SIAPE- ANAGRAMA UFAM

Essa operação **(3-Carimba M)** ocorre no tempo t6, e o processo de detecção é realizado pelo sensor do módulo M(sM), conforme ilustado na Figura 89;

Para carimbar a letra U. Essa é movida para a seguinte posição

```
Letra: U | MoveTo(1, 2)
```

implicando que a esteira levará o palete para a posição (4) que corresponde ao módulo U, e o atuador do módulo U (Am4) carimbará a letra U na posição (1) do palete.

Essa operação **(4-Carimba U)** ocorre no tempo t8, e o processo de detecção é realizado pelo sensor do módulo U(sU), conforme ilustrado na Figura 89;

5.1.1 Análise das restrições de RS1 a RS3

O atendimento às restrições impostas pelo cliente no tocante à voltagem (RS1), corrente (RS2) e força (RS3) utilizada pelo SIAPE pode ser evidenciada desde das etapas realizadas na Fase de Realizações do MeDSE, onde os circuitos, componentes e dispositivos utilizados foram especificados e implementados dentro dos limites das restrições, foram registradas no Projeto de Sistema e encontram-se ilustradas nas Figuras 45 a 49. De uma forma geral os circuitos elétricos alimentam o motor DC (esteira) com tensões que podem variar entre de 10 a 24V/2A. No estudo de caso, os módulos das letras foram configurados para trabalharem com 23V DC limitados por uma corrente de 2 A. A Figura 90 parte A capturou um instantâneo em que um módulo é acionado realizando a tarefa do módulo com uma tensão de 19,9V e um consumo de 1,824A. O lado B da Figura 90 registra 12,09V com um consumo de 603 mA no momento em que a esteira carrega o palete na direção dos módulos. Os relés de 24V, o roteador (12V) e o Raspberry Pi (5V) são alimentados com valores menores que os especificados para a esteira e para os módulos.

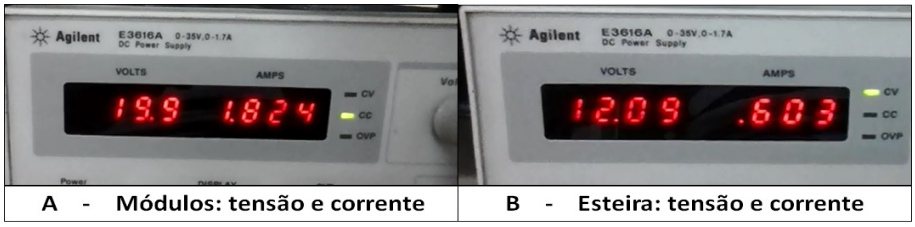


Figura 90 – SIAPE- Tensão e corrente

5.1.2 Análise e validação dos requisitos RQ1 a RQ6

Requisito RQ01 - Ciclo de produção: O ciclo de produção é o tempo gasto nas atividades produtivas para produzir uma unidade de produto. Considerando a ilustração da Figura 86 o ciclo de produção é realizado entre os tempos t1 a t9, momentos em

que a esteira e os atuadores são acionados pelo SIAPE. Nesse momento a esteira é parada e o módulo é acionado para carimbar o papel sobre o palete. O tempo de ciclo de um produto depende das quantidades de operações aplicados em sua produção, isto é o número de letras que são utilizadas para formar uma palavra. Assim para os produtos realizados na experimentação, foram registrados os seguintes tempos de ciclo:

1. Produto A = palavra UFAM: ciclo de 10,53 segundos
2. Produto B = palavra UTAM: ciclo de 10,63 segundos
3. Produto C = palavra UEA: ciclo de 10,12 segundos

O Produto UFAM realizando os mesmos produtos obteve os seguintes ciclos de produção:

1. Produto A = palavra UFAM: ciclo de 15,42 segundos
2. Produto B = palavra AFM: ciclo de 10,55 segundos
3. Produto C = palavra UTAM: ciclo de 15,33 segundos

Requisito RQ02 - setup de produção é o tempo gasto com a configuração ou reconfiguração do sistema do produção. Na Figura 86, o setup ocorre entre os tempos t1 e t2. Na experimentação foram produzidos três produtos e realizado dois setups de produção, no início do produto A e entre o produto B e C. Há que se enfatizar que o tempo de setup gasto entre os produtos B e C se deve à realização do conceito do plug and produce. Isso se deve à colaboração entre os agentes inteligentes que processam as alterações de produto e de quantidade entre os produtos A e B em tempo de processamento, não interferindo assim na produção. A Figura 91 ilustra o ganho reduzido de setup identificado no estudo de caso.

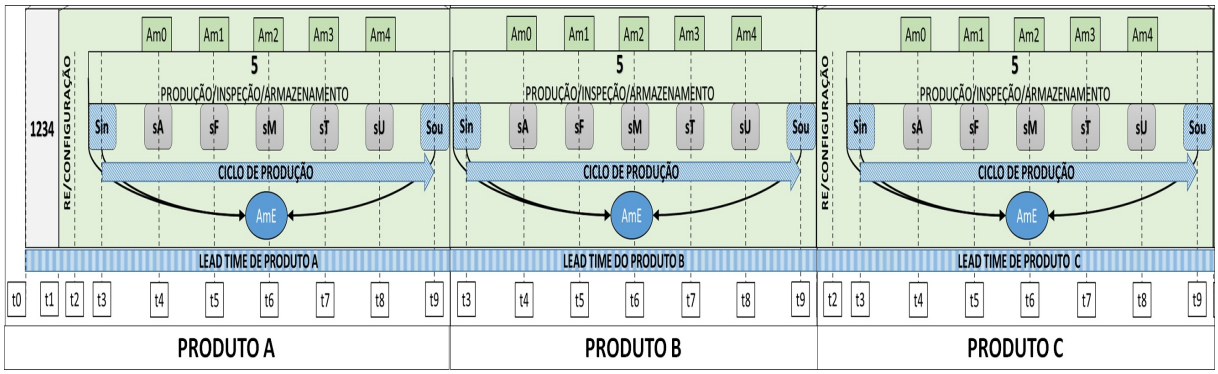


Figura 91 – SIAPE: Setup e Ramp up

Requisito RQ03 - ramp up de produção é o tempo gasto para que os recursos e operações na linha de produção sejam ajustados e se atinja a produção planejada. Na Figura

86 esse tempo encontra-se entre os tempos t10 e t11. O SIAPE não gasta tempo com ramp up, pois os recursos do sistema são ajustados durante o tempo de setup para a produção planejada, não necessitando assim, do referido tempo. A eliminação de ramp up também está ilustrada na Figura 91.

Requisito RQ04 - Lead time de produto é considerado como o tempo gasto por todas as fases do ciclo de vida do produto até que se produza uma unidade do produto da produção solicitada pelo cliente. Assim os tempos t0 a t11 cobrem o lead time de produto para este trabalho de pesquisa. É importante notar que os tempos t11 a t12 cobrem um período em que não há mais desenvolvimento e os recursos e operações estão plenamente ajustadas.

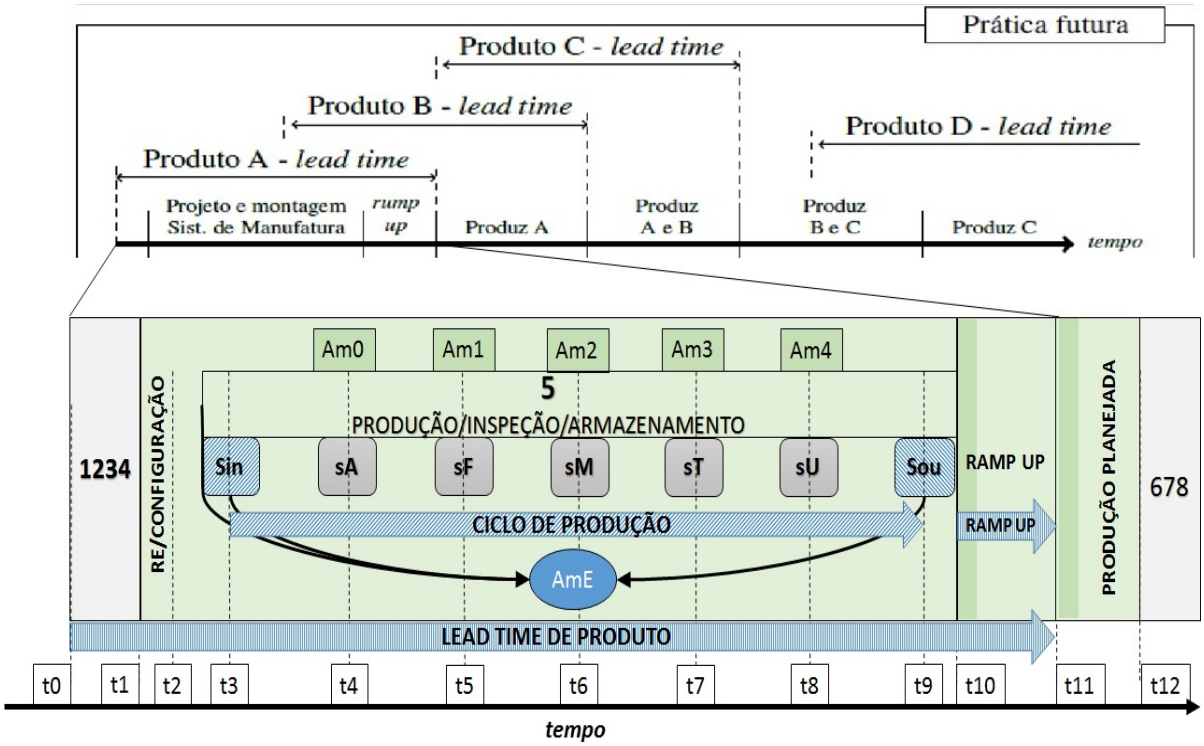


Figura 92 – SIAPE: Lead time

Requisito RQ05 - O quinto requisito especificado pode ser evidenciado por meio da realização tanto do experimento quanto pelo exemplo ilustrado na Figura 89. Os módulos que carimbam as letras A, F, M, T e U foram desenvolvidos para atender esse requisito.

Requisito RQ06 - O sexto requisito especificado pelo cliente determina que palavras sejam originadas das letras disponíveis nos módulos. Mais uma vez é evidente o atendimento desse requisito pelo resultado do estudo de caso. A Figura 93 ilustra a identificação do módulo com relação à palavra onde o mesmo foi utilizado.



Figura 93 – SIAPE: Anagramas, módulos e palavras

5.1.3 Análise e validação dos requisitos RQ07 a RQ12

Requisito RQ07 - O requisito modularidade foi tratado desde a fase inicial do método de desenvolvimento MeDSE. Ao se refinar o problema global, em problema regional e depois em problema local tinha como principal objetivo refinar o problema até que ele chegasse ao nível atômico. Uma vez atingido esse nível, os problemas foram modelados, simulados especificados, implementados e validados modularmente, antes dos mesmos serem integrados e validados sistemicamente. É fácil perceber por meio da verificação, primeiro, da Figura 17 na Fase de Realizações (etapas de 3 a 7) o desenvolvimento dos n módulos necessários para cada tipo de sistema. No caso do SIAPE, foram desenvolvidos cinco módulos para as letras A, F, M, T e U. Segundo, por meio da verificação das Figuras 34 e 35 o desenvolvimento dos módulos esteira e carimbador que realizaram a parte hardware do sistema, e na sequencia, a verificação das 36 a 39 e 40 o desenvolvimento dos módulos de software a partir das classes AcHw, YPA, Order, Anagrama e mensagens FIPA até que sejam simuladas. Nas Figuras 41 e 42 esses módulos são integrados às suas especificações que realizaram o projeto de sistema e o estudo de caso realiza a funcionalidade do sistema aplicado à produção de três produtos com qualidades e quantidades diferentes.

Requisito RQ08 - A plugabilidade no paradigma EPS é a propriedade que lida com a introdução de novos módulos, enquanto o sistema está em funcionamento. A eficiência do sistema nos tempos t4 a t8 é mantida por meio da reconfiguração dinâmica dos módulos, momento em que o sistema é rapidamente atualizado ao perceber que houve mudanças na disponibilidade de módulos no sistema. No estudo de caso a plugabilidade foi evidenciada na passagem da produção do produto B para o produto C, pois o módulo da letra T - realizou a palavra UTAM - foi conectado após a sua inclusão na interface gráfica. Essa propriedade é melhor detalhada durante a análise do processo que evidencia o conceito plug-and-produce (Plugar e produzir) explicado

como uma das capacidades que o SIAPE tem e que o permite adaptar-se e evoluir com o tempo.

Requisito RQ09 - Uma análise entre os produtos A e B percebe-se que existe uma diferença entre os anagramas UFAM e UTAM que é a letra T no lugar da letra F, implicando que o layout da linha deve ser alterado para que a produção dos anagramas sejam realizados. Contudo, a produção dos dois produtos foi realizada sem que houvesse qualquer interrupção na produção. Isso se deveu à reconfiguração do sistema originada pela negociação entre os agentes no mundo lógico – conforme mostra a Figura 94 – que foi externada para o mundo real por meio do agente AcHw que atuou diretamente nos atuadores do hardware. Importante também perceber que a negociação foi realizada em paralelo à movimentação do produto A para o produto B, isto é, enquanto a esteira se movia no intervalo entre os produtos A e B, os agentes negociaram, e realizaram a negociação por meio das mensagens FIPA, e promoveram as mudanças necessárias à mudança de produto sem alterar a funcionalidade do sistema.

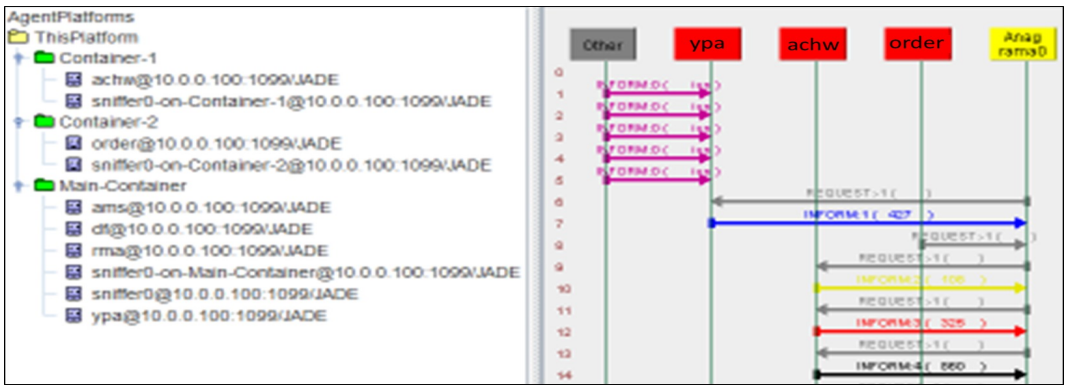


Figura 94 – SIAPE: Negociação de agentes

Requisito RQ10 - A customização conforme definida neste trabalho é caracterizada por uma produção variada de produtos com curtos ciclos de vida. Os lotes de produção são reduzidos para atender às solicitações personalizadas dos clientes. O experimento se enquadra nesse tipo de produção, pois realiza a produção de três produtos diferentes (UFAM, UTAM e UEA) com quantidades diferentes (3,4 e 5). A produção do produto A ocorre dentro dos padrões usuais atuais da indústria, contudo, na passagem do produto A para o produto B já percebe-se diferenças significativas na forma de produzir devido à ausência de reconfiguração e ramp up. Entre o produto e B e C, outra diferença é percebida por haver a inclusão de um módulo no sistema e o tempo gasto com essa operação durar menos de 20% do tempo normalmente gasto nesse tipo e operação. Isso utilizando sistema que não são baseados nos sistemas evolutivos, como o exemplo utilizado aqui denominado de Produto UFAM.

O tratamento realizado no estudo de caso evidencia um potencial promissor em tratar com a questão recorrente da customização de massa. É claro que tanto o tamanho da amostra quanto a própria forma do sistema aqui desenvolvido - em escala reduzida - e a forma e quantidade dos produtos, não favorecem análises mais acuradas, contudo da mesma forma é inegável que os dois sistemas tanto o produto UFAM baseado em ambientes 3.0 quanto o Produto SIAPE baseado no paradigma evolutivo, portanto em sistemas 4.0, são válidos por serem desenvolvidos por um método sistemático de desenvolvimento, o MeDSE, que possibilita a criação de sistemas que podem ser validados e realizados, a exemplo do SIAPE.

Requisito RQ11 - Este requisito foi solicitado para que se evidenciasse a presença do Governo influenciando no desenvolvimento e realização de sistemas de produção no território brasileiro. Assim foram incluídos circuitos que torna o sistema seguro baseado o nas normas NR-12 no item de Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamento que estabelece os procedimentos obrigatórios nos locais destinados a máquinas e equipamentos. Neste item estabelece que as máquinas devem ser equipadas com um ou mais dispositivos de parada de emergência, por meio dos quais possam ser evitadas situações de perigo latentes e existentes. As chaves podem cortar o processamento ao nível de software ou alimentações específicas a nível de hardware.

A exemplo no nível de hardware a Figura 95 ilustra alguns trechos de códigos e de partes do esquema elétrico do SIAPE para evidenciar a atuação da chave SNR–12. A explicação dessa figura deve ser acompanhada com a visualização da Figura 89. Na parte inferior (A) da Figura 95 a linha de código evidenciada ilustra o comando que aciona a esteira. Quando a chave $\mathrm{SRN}-12_1$ está fechada o exemplo ilustrado na Figura 89 funciona sem interrupção. Considere agora que na passagem do módulo M para o módulo U o operador necessite parar o processo. Ele aciona a chave colocando-a na posição aberta. Na parte de software a informação sai do Raspberry Pi (RPI) e polariza o fotoacoplador (U9) e este, chaveia o transistor Q1, contudo o relé RL1 não consegue ser acionado porque a alimentação de 24V foi interrompida pela RN–12. Quando o operador fechar novamente a chave, o sistema volta a funcionar normalmente e a letra U é carimbada. Isso se deve à linha de código na parte superior (A) da Figura 95 acionar o motor do módulo somente após a detecção do palete do módulo U (sU) nos limites do módulo U.

O exemplo demonstra um dos circuitos utilizados para evidenciar o atendimento desse requisito no experimento.

Requisito RQ12 - O requisito Custos nessa análise está relacionado à área da Economia para expressar a necessidade do cliente em ter os seus produtos competitivos no mercado local e global. Dois fatores são aqui considerados para que o produto seja competitivo: preço e entrega. Os ganhos de tempo nas operações de configuração

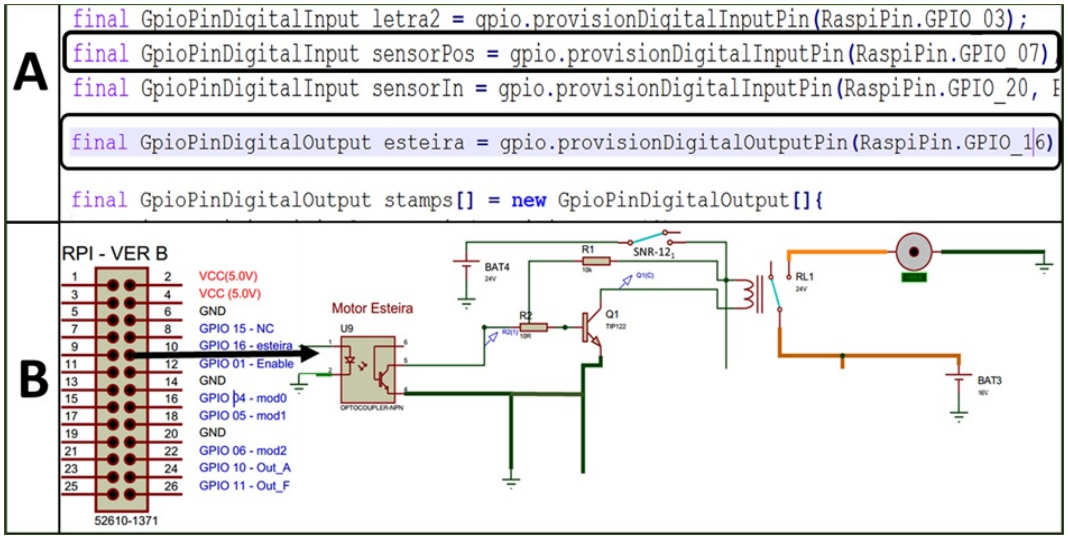


Figura 95 – SIAPE: NR-12 Segurança

e ramp up, levarão a reduções de tempo que implicarão na redução dos fatores de produção e o fato do sistema ser evolutivo o capacita a atender pequenas quantidades de produtos e consequentemente, aumentando a competitividade dos produtos produzidos por esse produtor. A agilidade dos sistemas evolutivos em responder às mudanças da demanda não afetam a produção aos níveis praticados hoje por sistemas de ambientes 3.0.

5.1.4 Análise e validação dos requisitos RQ13 a RQ15

Requisito RQ13 - Os primeiros trabalhos de Especificação para a arquitetura da Internet das Coisas *(IoT)* procurou evidenciar especificamente a atualização do estado da arte para questões relacionadas com a Plug & Play, a partir de um ponto de vista de Internet de Coisas, na fabricação e automação, bem como na aquisição de requisitos funcionais. Essa primeira iteração teve o objetivo de coletar os aspectos mais centrais e críticos de Plug & Work (Plugar e trabalhar) no ambiente industrial, isto é, num sistema em funcionamento, pode-se incluir um módulo do sistema e esse iniciar imediatamente o seu funcionamento sem causar a necessidade de parar o sistema para realizar essa operação.

A análise relatada no documento identificou três cenários principais diferentes. Aqui neste trabalho considerou-se especificamente as questões relacionadas no Apêndice B que trata a manufatura ágil. Como Manufatura Ágil o apêndice define uma produção fortemente baseada na disponibilidade da tecnologia de fabricação que pode ser facilmente reconfigurada para responder rapidamente às contínuas mudanças do mercado e continua a fornecer controle total da produção custos e qualidade.

Como pode ser entendido pela redação o conceito de *plug-and-produce* vai além do conceito de *plug & work* pois além de plugar e produzir, *plug-and-produce* prevê tanto a inclusão quanto exclusão de um módulo no sistema sem reduzir a performance do mesmo. Esse conceito foi evidenciado na passagem do produto B para o produto C.

Requisito RQ14 - A Indústria 4.0 é um conceito que se transforma em realidade com a realização de mudanças no mundo da produção industrial. O aumento exponencial da capacidade dos computadores possibilita a realização de muitos algoritmos até então não realizados pela capacidade das máquinas, a grande quantidade de informação digitalizada e as novas estratégias inovadoras de pessoas, pesquisas e tecnologia concretizam rapidamente esse novo ambiente no globo terrestre.

Uma empresa com características da Indústria 4.0 dispõe em sua planta fabril de dispositivos que são reconhecidos de duas formas: A primeira forma por sua estrutura física por meio das máquinas equipamentos e recursos utilizados no mundo real. A outra forma é por sua estrutura virtual, ou seja, por seus IDs ao entrarem no domínio de uma rede de comunicação. Esses dispositivos uma vez reconhecidos, podem ser configurados e utilizados em sistemas evolutivos com níveis elevados de flexibilidade, plugabilidade, modularidade, escalabilidade, interoperabilidade, agilidade, auto-organização, precisão e outras propriedades comuns aos dispositivos que sofreram a influência da 4a Revolução Industrial. Uma planta formada por módulos mecatrônicos, por dispositivos eletromecânicos, mecânicos e eletrônicos comandados por sistemas de computação baseados em paradigmas de multi-agentes inteligentes pode desempenhar atividades que denotam a inteligência necessária e suficiente para atender às alterações de demanda de produtos dentro de um sistema de manufatura. Somando-se ao atendimento da demanda, o fato da redução de setup a nível que tendem a zero, através da modularidade das partes do sistema, consegue-se a escalabilidade a níveis que atendam a urgência de produção da Customização e tem-se a concretização de sistemas evolutivos como potencial solução do problema de lotes pequenos que tem inviabilizado os atuais sistemas de produção.

Num futuro próximo, a instalação de produção reconhecerá por si própria (a esteira e o palete codificado acionado pelo agente AcHw) o que terá de fazer em cada nova peça ou produto. A forma de codificação utilizada poderá variar de acordo com o avanço da tecnologia, no SIAPE a codificação utilizada foi a marcação lateral com hastes metálicas que são detectadas por sensores magnéticos (sA, sF, sM, sT e sU) mas poderia ser na forma de um chip eletrônico, uma identificação para leitura RFID ou até mesmo código de barras. Cada vez mais o produto será fabricado de acordo com os desejos individuais do cliente.

Em outras palavras isto quer dizer, para cada objeto real tem de haver uma imagem virtual para que possa comunicar-se posteriormente com outras máquinas ou peças.

As partes real e virtual poderão comunicar-se apenas no nível virtual. No nível virtual são realizadas as operações complexas e tomadas as decisões que demandem inteligência e raciocínio. O resultado é comunicado à parte real que realiza a decisão correta a ser realizada, por exemplo, a produção do estudo de caso. A expansão do mundo virtual cria a possibilidade de comunicação com outras máquinas e sistemas que realizam finalmente o conceito da integração Horizontal recomendada pela Plataforma da Indústria 4.0.

Requisito RQ15 - O estado da arte originado da relação com a Academia foi incluído como forma de evidenciar que os sistemas evolutivos, baseados no paradigma evolutivo é na atualidade, o que existe de mais promissor como solução para o problema da indústria que trata da customização de massa.

A Academia em todo o mundo faz as pesquisas na busca da realização da Indústria 4.0 que requer respostas e soluções para diferentes tópicos como cyber-segurança, padrões aceitáveis e interoperabilidade entre máquinas e sistemas, e sustentabilidade.

Tabela 18 – SIAPE X PRODUTO UFAM: TEMPO DE PRODUÇÃO (s)

Palavra	**UFAM**		**UTAM**		**UEA**	**AFM**
Item	**SIAPE**	**PUFAM**	**SIAPE**	**PUFAM**	**SIAPE**	**PUFAM**
01	10,16	14,70	10,66	15,70	10,20	10,67
02	10,17	16,68	10,71	14,66	9,92	10,44
03	10,88	15,59	10,49	16,50	10,30	10,56
04	10,07	15,55	10,57	15,03	10,20	10,67
05	10,04	15,60	10,64	15,55	10,10	10,66
06	10,72	15,60	10,72	15,04	10,10	10,45
07	10,72	15,55	10,72	15,58	10,19	10,34
08	10,94	14,90	10,44	14,97	15,10	10,45
09	10,91	14,94	10,71	14,95	10,20	10,67
10	10,73	15,11	10,73	15,30	10,10	10,56
Média	10,50	15,42	10,60	15,33	9,10	10,55

5.1.5 Comparações SIAPE versus Produto UFAM

O plano de produção realizado na experimentação foi expandido para uma quantidade de 10 unidades de produtos. Os tempos decorridos na produção estão registrados na Tabela 18. Todos os tempos em segundos **(s)**. O tempo médio de palavras com quatro letras realizadas no SIAPE (por exemplo UFAM e UTAM) foi de 10 segundos enquanto a mesma produção realizada no Produto UFAM apresentou uma média de 15 segundos. Para palavras com três letras o SIAPE registrou o tempo de respectivamente de 9 e 10 segundos. O incremento representa um aumento no tempo decorrido de 32% a mais no Produto UFAM para realizar a mesma produção realizada no SIAPE.

Existem alguns motivos que explicam essa vantagem no desempenho do SIAPE em relação ao Produto UFAM. Dois desses motivos estão registrados na Tabela 19 e são explicados na sequência.

Na segunda coluna da Tabela 19 estão registrados os dados coletados no SIAPE quando o agente Stamper realiza seu skill carimbar letra. O tempo médio da realização deste skill é de 1 segundo contra 3 segundos registrados na operação das válvulas pneumáticas do Produto UFAM. A diferença em torno de 2 segundos é explicada pelo fato do circuito elétrico do motor DC, utilizado nos módulos do SIAPE, reagir com maior eficácia quando comparado ao circuito eletro-pneumático do Produto UFAM, pois o circuito só reage, primeiramente com os solenóides, e depois os solenóides liberam as válvulas pneumáticas que realizam a operação carimbar letra. Esses tempos reduzem o desempenho do produto UFAM para esse nível de produção nas condições aqui consideradas.

Outro motivo que reduz também o desempenho do Produto UFAM para as condições apresentadas é o fato do sistema ter sido projetado para que o operador aguarde a finalização do produção de um produto e reinsira o palete na entrada do sistema. Essa operação registrou um tempo médio de 3 segundos contra 1 segundo do SIAPE. No SIAPE os paletes

já encontram-se agregados à esteira, cabendo ao operador apenas retirar os produtos realizados.

As colunas 6 e 7 da Tabela 19 registra os tempos com a troca de módulos com o SIAPE em funcionamento. O tempo médio para realizar a troca de um módulo pelo operador, com a detecção deste pelo agente AcHw e posterior inclusão do novo recurso no plano de produção alcançou a média de 45 segundos. Vale registrar que esse tempo iniciou-se em torno de 4 minutos que foi reduzido para 2 minutos até alcançar o tempo atual registrado. Apesar do tempo reduzido este processo que realiza o *plug and produce* pode ser reduzido ainda mais por meio de melhorias no hardware. A sétima coluna registra o fato dessa mesma operação ser realizada no Produto UFAM, dado que os procedimentos exigiriam a parada do sistema elétrico e do sistema pneumático para posterior troca mecânica da válvula pneumática.

Tabela 19 – SIAPE X PRODUTO UFAM: STAMPER, OPERADOR e TROCA(s)

Item	**SIAPE Stamper**	**PUFAM Stamper**	**SIAPE Operador**	**PUFAM Operador**	**SIAPE Troca**	**PUFAM Troca**
01	1,79	3,30	1,89	3,06	48,73	Impraticável
02	1,87	2,86	1,89	2,83	46,25	
03	1,64	3,50	1,86	3,20	49,25	
04	1,72	4,19	1,62	3,39	50,25	
05	1,88	3,42	1,95	3,50	42,65	
06	1,76	3,50	1,98	4,01	43,25	
07	1,67	3,51	1,87	3,09	44,50	
08	1,54	3,80	1,89	3,55	46,20	
09	1,67	3,86	1,87	2,86	43,25	
10	1,88	3,64	1,88	3,22	44,30	
Média	1,74	3,56	1,90	3,27	45,86	

A Tabela 20 registra o melhor desempenho do Produto UFAM no trato do *bootstrap* do sistema. Conforme explicado no Capítulo 4 o ambiente deve ser configurado seguindo os procedimentos relacionados nos itens de 1 a 6 e que foram ilustração na Figura 66. Essa configuração foi registrada no SIAPE com uma média de 2,5 minutos contra os 9 segundos do Produto UFAM. Vale lembrar que essa configuração é feita apenas uma vez durante um dia de produção.

A Tabela 21 registra os tempos médios totais dos produtos realizados no plano de produção durante a experimentação realizada que foi descrita no Capítulo 4. Esses tempos foram medidos de acordo com os parâmetros definidos na primeira subseção deste capítulo e a Figura 89 auxilia no entendimento da discussão.

Nas colunas 2 e 3 estão identificados os tempos totais gastos (montante e percentual) nos lotes dos produtos A, B e C durante a experimentação. Os dados registrados são importantes para evidenciar os desempenhos de ambos os sistemas de acordo com a situação desejada :

Tabela 20 – SIAPE X PRODUTO UFAM: TEMPO DE BOOTSTRAP (s)

Item	**BOOTSTRAP**	
	SIAPE	**PUFAM**
01	150	**9,53**
02	150	**9,63**
03	150	**9,50**
04	150	**9,39**
05	150	**9,36**
06	150	**9,39**
07	150	**9,36**
08	150	**9,36**
09	150	**9,39**
10	150	**9,36**
Média	150	**9,43**

Produto A O tempo total gasto na produção de 3 produtos do tipo A foi registrado com 46 segundos no Produto UFAM e 31 segundos no SIAPE, representando uma diferença de 33% do tempo gasto a mais pelo Produto UFAM comparado ao desempenho do SIAPE. Esse valor representa um tempo de 15 segundos gastos pelo Produto UFAM contra 10 segundos gastos pelo SIAPE para produzir uma unidade do produto A. Esses tempos evidenciam que os módulos realizam operações na faixa de 5 segundos no Produto UFAM e 3 segundos no SIAPE.

Produto B O tempo total gasto na produção de 4 produtos do tipo B foi registrado com 61 segundos no Produto UFAM e 42 segundos no SIAPE, representando uma diferença de 31% do tempo gasto a mais pelo Produto UFAM comparado ao desempenho do SIAPE. Esse valor ainda representa um tempo de 15 segundos gastos pelo Produto UFAM contra 10 segundos gastos pelo SIAPE para produzir uma unidade do produto B. Esses tempos evidenciam que os módulos realizam operações na faixa de 3 segundos no Produto UFAM e 2 segundos no SIAPE.

Produto C O tempo total gasto na produção de 5 produtos do tipo C foi registrado com 53 segundos no Produto UFAM e 50 segundos no SIAPE, representando uma diferença de apenas 4% do tempo gasto a mais pelo Produto UFAM comparado ao desempenho do SIAPE. Esse valor representa um tempo de 10 segundos gastos pelo Produto UFAM contra 10 segundos gastos pelo SIAPE para produzir uma unidade do produto B. Esses tempos evidenciam que os módulos realizam operações na faixa de 2 segundos tanto para o Produto UFAM quanto para o SIAPE.

A análise da Tabela 21 evidencia que o aumento de lotes de produção têm vantagens consideráveis para serem realizadas no Produto UFAM. Isso se deve ao fato do produto UFAM não utilizar uma plataforma de agentes inteligentes como ocorre com o SIAPE. Não

Tabela 21 – SIAPE X PRODUTO UFAM: TEMPO DE PRODUÇÃO(s)

Item		**PUFAM**	**SIAPE**	**PUFAM**	**SIAPE**	**PUFAM**	**SIAPE**	Δ%
PROD	**QTD**	**t_TOTAL**		**t_CICLO_P**		**t_CICLO_O**		
A	3	46,97	31,21	15,657	10,403	5,219	3,468	33,55
B	4	61,89	42,43	15,473	10,608	3,860	2,652	31,44
C	5	53,00	50,65	10,600	10,130	2,120	2,026	4,43

utilizando agentes, não há necessidade do uso de protocolos de comunicação FIPA. Não havendo comunicação, o tempo reduz-se consideravelmente, refletindo em vantagens para o uso do Produto UFAM. Assim para lotes médios e altos os sistemas flexíveis ainda são uma alternativa rentável, contudo, para pequenos lotes com alta variedade de produtos, os sistemas ágeis e evolutivos são realmente uma excelente alternativa, principalmente, para tratar o problema da customização em massa.

5.1.6 Considerações finais

O SIAPE, desenvolvido pelo Método de Desenvolvimento de Sistemas Evolutivos - MeDSE trilhou um procedimento sistematizado para ficar aderente ao paradigma *EPS*, e por conseguinte, aderente à Plataforma da Indústria 4.0. O fato de ser baseado no Produto UFAM com características de sistemas utilizados no parque industrial brasileiro, evidenciou a possibilidade de transformar um sistema de ambiente 3.0 num sistema ágil evolutivo com as principais características do paradigma EPS que promete tratar o problema da customização de massa.

Desde as etapas mais básicas do MeDSE, o conceito de *skill* foi considerado. O problema Global foi gradativamente refinado em problemas regionais e locais, com características atômicas, necessárias para a modelagem dos módulos com a granularidade adequada ao sistema desenvolvido, que no caso do SIAPE optou-se por uma granularidade grossa por definir anagramas completos a serem realizados e não partes desses. A granularidade fina para o caso do SIAPE implicaria na implementação de um grupo de agentes que ficasse responsável por partes de uma letra, por exemplo para realizar a letra E dois agentes cognitivos que acionassem dois módulos com os símbolos '|' e '_' seriam necessários. A granularidade grossa, de fato, foi o suficiente para atingir as metas do SIAPE.

Da modelagem seguiu-se as simulações que garantiram os circuitos e modelos como especificações que foram organizadas e receberam o status de projeto de sistema. O projeto foi realizado seguindo o restante das etapa definidas no MeDSE e sistema foi transformado num produto. Com a experimentação e as comparações evidenciou-se, entre outros, os parâmetros que classificam o SIAPE como um sistema evolutivo, e com melhor desempenho que o Produto UFAM nas situações que demandam maior agilidade e flexibilidade em tempo real. É importante notar também que o paradigma EPS é melhor para aplicações

em contextos que demandem maior agilidade e robustez para lidar com alterações na demanda. Essas alterações são tratadas imediatamente pela capacidade do sistema da adaptação, no longo prazo tendem à evolução dos sistemas que detém tais características. Não fossem essas necessidades os sistemas flexíveis dos ambientes 3.0 ainda seriam uma solução robusta e satisfatória para tratar o problema da produção mundial.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa ficou evidente a ausência de dispositivos que pudessem ser utilizados para o estudo, a análise e a pesquisa dos sistemas baseados no paradigma evolutivo. Também verificou-se a necessidade de uma metodologia de pesquisa.

Essa conclusão deveu-se a partir de um estudo sistemático em cinco etapas: a Etapa 1 contribuiu com uma visão mais realista do contexto global e identificou o problema para ser tratado no projeto de pesquisa; a Etapa 2 permitiu identificação dos sistemas, das ferramentas e das metodologias que estavam, naquele momento realizando sistemas evolutivos; na Etapa 3 chegou-se à visão da influência dos sistemas evolutivos, e suas propriedades, para o problema da customização em massa, e tais propriedades puderam ser estudadas e entendidas; na Etapa 4, os estudos realizados até então foram transformados em questões de pesquisa e hipóteses, as quais, por sua vez, foram transformadas em objetivos; na Etapa 5, os objetivos foram refinados em requisitos para EPS e notou-se a ausência de uma metodologia para desenvolvimento de sistemas evolutivos, o que levou ao desenvolvimento do MeDSE e, na sua aplicação, ao desenvolvimento do SIAPE, objeto principal deste trabalho.

A primeira questão de pesquisa investigou a característica de sistemas ágeis, que no curto prazo, pudesse evidenciar um sistema evolutivo de produção e a hipótese formulada foi que a adaptabilidade conseguida através da reconfiguração de parâmetros do sistema conseguiria evidenciar um sistema evolutivo de produção.

Na análise da experimentação, quando o SIAPE finalizou o produto A e iniciou o produto B, todas as alterações para realizar a operação de troca de produto aconteceu na parte virtual do sistema, isto é, o agente Order instanciou o agente Anagrama adequado, e a operação foi realizada com a devida agilidade e flexibilidade de um sistema evolutivo.

Na segunda questão de pesquisa foi investigada a característica de sistemas que, no longo prazo, identificasse a realização de um sistema evolutivo. A hipótese formulada

foi que a evolutividade seria, nos sistemas evolutivos, realizada por meio da inclusão ou exclusão de módulos no sistema sem comprometer a eficiência e o funcionamento do sistema.

Na análise do experimentação, quando o SIAPE finalizou o produto B e teve inicio o produto C, a letra E não estava disponível no hardware do SIAPE. Para tratar esse problema foi realizado o conceito de *plug-and-produce*, isto é, foi inserido o módulo da letra E no hardware do SIAPE, a interface com o operador atualizada e a letra E disponibilizada para o sistema. O agente Order, com essa informação, instanciou o agente Anagrama adequado e este, em conjunto com o agente Acesso Hardware realizaram o produto C (a palavra UEA). Percebe-se aqui que, com a repetição deste *skill*, pode-se trocar todas as letras do sistema, os circuitos elétricos, formas dos módulos, até mesmo evoluir todo o sistema para um novo sistema detentor de uma melhor performance ou melhor tecnologia, admitindo somente que a comunicação entre os módulos não seja quebrada.

Outro importante conceito evidenciado com o SIAPE foi o conceito da auto-organização, o que se deu em dois momentos.

O primeiro momento foi evidenciado quando o SIAPE realizou os produtos A e B, ou seja, realizou uma autoconfiguração sem qualquer interferência externa. Importante o leitor visualizar as negociações realizadas no mundo virtual dos agentes e as decisões sendo tomadas para que o agente Acesso Hardware realizasse no mundo real, em tempo real as operações necessárias para atingir as metas do sistema.

O outro momento foi quando os agentes negociam para realizar o produto C (UEA) pois o recurso E foi inserido em tempo de produção e houve a necessidade de negociação entre agentes que já existiam para que o sistema se auto-organizasse e continuasse a produção do plano de produção.

Por sua vez a auto-organização remete à emergência do SIAPE pois tanto no caso da produção dos produtos A e B quanto na produção do produto C, o sistema exibiu emergência, pois emergentes coerentes surgiram no nível macro (a produção dos produtos A, B e C) das interações dinâmicas ocorridas no nível micro (as negociações entre agentes). Deste ponto de vista micro, não há informações suficientes, em nenhum dos agentes, para se montar completamente um produto, e a interação entre os agentes parece aleatória; entretanto esta interação consegue produzir emergentes coerentes no nível macro.

Observar que um sistema em que o agente AcHw detenha o conhecimento de como se gera um produto determinado é voltar ao paradigma tradicional. Se o software puder ser atualizado, teríamos um sistema flexível ($i3.0$). Entretanto, da maneira como determinado pelo paradigma, os agentes foram implementados de tal forma que, nenhum deles tendo a informação completa, mas as suas interações executam o plano de produção,

tem capacidade de auto-organização, em especial o *plug-and-produce*, o que corresponde a um sistema ágil ($i4.0$).

Com a análise comparativa realizada, ficou evidente que o SIAPE teve como base o Produto UFAM, que foi desenvolvido para demonstrar uma planta fabril automatizada simplificada, comum ao parque industrial brasileiro.

Com esse sentimento de melhoria do SIAPE propõe-se como desafio para trabalhos futuros, primeiramente, a realização do SIAPE em escala normal para que possíveis melhorias sejam implementadas no hardware atual, incluindo entre outras características, a detecção de falhas. Num segundo projeto, a realização de uma planta fabril aplicada a um produto do parque industrial brasileiro para a realização dos conceitos e operações de sistemas evolutivos, fato que será acompanhado de outros estudos e pesquisas que evidenciarão a eficácia do paradigma EPS na parte real do sistema, e iniciando uma nova fase nas pesquisas de sistemas evolutivos, dando continuidade à recomendação de Cavalcante na criação de um grupo de pesquisa no Brasil em torno do paradigma evolutivo que alavanque as pesquisas e inovações na Academia Brasileira em torno do tema.

Referências

ABELE, E. et al. (Ed.). *Global Production - A Handbook for Strategy and Implementation*. Berlin–Heidelberg: Springer Verlag, 2008. 401 p. ISBN 978-3-540-71652-5.

AKILLIOGLU, H.; FERREIRA, J.; ONORI, M. Demand responsive planning: workload control implementation. *Assem. Autom.*, v. 33, n. 3, p. 247–259, 2013. ISSN 0144-5154.

ALGEDDAWY, T.; ELMARAGHY, H. A Co-Evolution Model for Prediction and Synthesis of New Products and Manufacturing Systems. In: *Journal of Mechanical Design*. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2012. v. 134, n. 5, p. 51008. ISSN 10500472.

ARENS, D. et al. *Packaging Machine Language V3.0 Mode & States*. USA, 2006. Disponível em: <https://www.isa.org/pdfs/microsites1158/packml-definition-document-v3-0-final/>. Acesso em: 27 set 2015.

ATKINS, D. *Revolutionizing Science and Engineering Through Cyberinfrastructure: Report of the National Science Foundation Blue-Ribbon Advisory Panel on Cyberinfrastructure*. USA, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10150/106224>. Acesso em: 27 set 2015.

BARATA, J.; ONORI, M. Evolvable Assembly and Exploiting Emergent Behaviour. In: *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium*. USA: IEEE, 2006. v. 4, p. 3353–3360. ISBN VO - 4.

BARATA, J. A.; MATOS, L. C. *Coalition Based Approach for Shop Floor Agility: A Multiagent Approach*. 329 p. Tese (Doutorado) — Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2003.

BITKOM, V. . Z. Whitepaper FuE-Themen. In: . Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015. p. 59, n. April. Disponível em: <http://www.plattform-i40.de/blog/industrie-40-whitepaper-fue-themen-stand-7-april-2015>. Acesso em: 27 set 2015.

CANDIDO, G. G. et al. Service-Oriented Infrastructure to Support the Deployment of Evolvable Production Systems. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 4, p. 759–767, 2011.

CAPES - Volume I. Programa Nacional Pós-Graduação (Pnpg) 2010-2020. CAPES, Brasil, I, p. 309, 2011.

CAVALCANTE, A.; PEIXOTO, J.; PEREIRA, C. When agents meet manufacturing: Paradigms and implementations. *cricte2004.eletrica.ufpr.br*, 2012. Disponível em: <http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2012/Artigos/98902.pdf>. Acesso em: 27 set 2015.

CAVALCANTE, A.-L. D. Arquitetura Baseada Em Agentes E Auto-Organizável Para a Manufatura Arquitetura Baseada Em Agentes E Auto-Organizável Para a Manufatura. 2012.

CHRISTENSEN. Holonic Manufacturing ystem: Initial architecture and standards directions - Presented at First European Conference on Holonic Manufacturing Systems, Hannover, Germany, 1 December 1994. p. 1–20, 1994.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. Mapa Estratégico 2013 – 2022. In: . Brasil: CNI, 2013. ISBN 9788579570957.

DAVIS, S. *Future perfect*. Addison-Wesley Publishing, 1997. ISBN 9780201590456. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=5RJZAAAAYAAJ>. Acesso em: 27 set 2015.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or hype– [Industry Forum]. v. 8, n. June, p. 56–58, 2014. ISSN 19324529.

ELMARAGHY, H. A. Simulation and graphical animation of advanced manufacturing systems. In: *Journal of Manufacturing Systems*. Ontario, Canada: Journal of Manufacturing Systems, 1982. v. 1, n. 1, p. 53–63. ISSN 02786125. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612582800678>. Acesso em: 27 set 2015.

EUROPEAN COMMISSION. Horizon 2020 work programme 2014 – 2015 Leadership in enabling and industrial technologies Information and Communication Technologies Revised Consolidated version following (European Commission Decision C (2015) 2453 of 17 April 2015). v. 2015, n. April, 2015.

FERREIRA, P.; DOLTSINIS, S.; LOHSE, N. Symbiotic assembly systems - A new paradigm. In: *Procedia CIRP*. UK: Elsevier B.V., 2014. v. 17, p. 26–31.

FIPA. FIPA Interaction Protocol Library Specification . 2002. Disponível em: <http://www.fipa.org/specs/fipa00025/DC00025F.pdf>. Acesso em: 27 set 2015.

FIPA. FIPA Request Interaction Protocol Specification. 2002. Disponível em: <http://www.fipa.org/specs/fipa00026/SC00026H.pdf>. Acesso em: 27 set 2015.

FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS. The foundation for intelligent physical agents. *IEEE Computer Soceity*, 2013. Disponível em: <http://www.fipa.org/>. Acesso em: 27 set 2015.

FREI, R. Evolvable Assembly Systems - Basic Principles. In: . European Comission: KTH, 2006. p. 1–12. Disponível em: <http://dl.ifip.org/db/conf/ifip5-3/basys2006/OnoriBF06.pdf>. Acesso em: 27 set 2015.

FREI, R.; BARATA, J.; ONORI, M. Evolvable production systems context and implications. In: *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. USA: 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007. p. 3233–3238. ISSN 2163-5137.

GERMAN COMMISSION FOR ELECTRICAL – VDE, E. . I. T. o. D. DKE standardization the german standardization roadmap. v. 0, p. 1–60, 2014.

GILL, H. Challenges for critical embedded systems. In: *Proceedings - International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems, WORDS*. VA, USA: National Sci. Found, 2005. p. 7–9. ISBN 0769523471.

GROOVER, M. P. *Automação Industrial e Sistemas de Manufatura*. São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall, 2011. 581 p. ISBN 978-85-7605-871-7.

KOREN, Y. et al. Reconfigurable Manufacturing Systems. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. [s.n.], 1999. v. 48, n. 2, p. 527–540. ISBN 0007-8506. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607632326>. Acesso em: 27 set 2015.

LARMAN, C. *Utilizando UML e padrões: Uma introdução à anáįlise e ao projeto orientados a objetos e ao desenvolvimento iterativo. Tradução de Rosana Vaccare Braga [et al.]*. 3a. ed.. ed. Porto Alegre: [s.n.], 2007.

LEE, E.; NEUENDORFFER, S. Heterogeneous Concurrent Modeling and Design in Java: Introduction to Ptolemy II). In: . USA: EECS Department, University of California, Berkeley, 2008. v. 1.

MAFFEI, A.; AKILLIOGLU, H.; FLORES, L. Characterization of Costs and Strategies for Automation in Evolvable Production Systems. In: *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2013 IEEE International Conference on*. USA: IEEE, 2013. p. 4866–4871.

MAFFEI, A.; NEVES, P.; ONORI, M. Identification of the value proposition of an evolvable production system. In: *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2013 9th International Symposium on*. USA: ISMA, 2013. p. 1–6.

MAFFEI, A.; ONORI, M. A preliminary study of business model for evolvable production systems. In: *Assembly and Manufacturing, 2009. ISAM 2009. IEEE International Symposium on*. USA: IEEE, 2009. p. 402–407.

NAHER, E. A. A. M. et al. Global Production: A Handbook for strategy and implementation. In: . Berlin Heidelberg: Springer, 2008. p. p. 410. ISBN 9783540716525.

NEVES, P. et al. Prospection of Methods to Support Design and Configuration of Self-Organizing Mechatronic Systems. In: *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2013 IEEE International Conference on*. USA: IEEE, 2013. p. 3854–3861.

NITRDGROUPS. *Cybersecurity Game-Change Research & Development Recommendations*. USA, 2010.

NITRDGROUPS(CPS). Cyber Physical Systems (CPS) Vision Statement.pdf. 2003. ISSN 1505-1773.

ONORI, M. Evolvable Assembly Systems – A New Paradigm – Proc. 33rd Int. Symp. Robot., pp. 617–622, 2002.,. In: . Stockholm, Sweden: International Symposium on Robotics, 2002.

ONORI, M.; BARATA, J. Evolvable Production Systems: New domains within mechatronic production equipment. p. 2653–2657, 2010.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Decreto 8269 - Plataformas de Conhecimento - Presidência da República. In: . [S.l.: s.n.], 2014. p. 2–5.

QUINTELA, H. M. D. J. B. P. C. P. Aplicação da tecnologia da informação na customização em massa no setor de telecomunicaões. p. p. 20, 2005.

RIBEIRO, L.; BARATA, J. Self-organizing multiagent mechatronic systems in perspective. *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, p. 392–397, 2013. ISSN 19354576. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6599026/6622844/06622916.pdf>.

RIBEIRO, L.; ROCHA, A.; BARATA, J. A product handling technical architecture for multiagent-based mechatronic systems. In: *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. USA: IEEE, 2012. p. 4342–4347. ISBN 1553-572X.

RIBEIRO, L.; ROCHA, A.; BARATA, J. A study of JADE's messaging RTT performance using distinct message exchange patterns. In: *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*. USA: IEEE, 2013. p. 7410–7415. ISBN 1553-572X.

RIBEIRO, L.; ROSA, R.; BARATA, J. A structural analysis of emerging production systems. In: *Industrial Informatics (INDIN), 2012 10th IEEE International Conference on*. USA: IEEE, 2012. p. 223–228.

ROCHA, A.; RIBEIRO, L.; BARATA, J. A Multi Agent Architecture to Support Self-organizing Material Handling. In: *Technological Innovation for Collective –*. Springer Berlin Heidelberg, 2014. v. 423, p. 93–100. ISBN 978-3-642-54733-1. Disponível em: <http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-54734-8_11>.

ROSA, R. Assessing self-organization and emergence in Evolvable Assembly Systems (EAS). 2013.

RUMBAUGH, J. e. a. t. D. V. *Modelagem e objetos baseados em projetos*. Brasil: Elsevier, 2006.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence A Modern Approach*. New Jersey – USA: Prentice-Hall Inc., 1995. ISBN 0-13-103805-2.

STANKOVIC, J. A. Research Directions for the Internet of Things. In: *IEEE Internet of Things Journal*. USA: Internet of Things Journal, IEEE, 2014. v. 1, n. 1, p. 1–1. ISSN 2327-4662. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm--arnumber=6774858>.

UEDA, K. A Concept for Bionic Manufacturing Systems Based on DNA-type Information, PROLAMAT Conference, Man in CIM. Tokyo, Japan, 24-26 June 1992.- pp. 853-863, 1992. In: *Proceedings of the IFIP TC5 / WG5.3 Eight International PROLAMAT Conference on Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing*. Tokyo – Japan: PROLAMAT Conference, 1992. p. 853–863.

VAN BRUSSEL, H. et al. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. In: *Computers in Industry*. UK: Elsevier, 1998. v. 37, p. 255–274. ISBN 0166-3615. ISSN 01663615.

WOOLDRIDGE, M. An Introduction to MultiAgent Systems. 2002.

WOOLDRIDGE, M. Developing Multi-Agent Systems with Jade. 2007.