



**RICARDO ANDRES CASTILLO ESTEPA**

# **Proposta de Estratégia de Coordenação para Sistemas Holônicos de Manufatura Baseada em Agentes e Stigmergia**

68/2015

**CAMPINAS  
2015**





**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**RICARDO ANDRES CASTILLO ESTEPA**

# **Proposta de Estratégia de Coordenação para Sistemas Holônicos de Manufatura Baseada em Agentes e Stigmergia**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. João Mauricio Rosário  
Coorientador: Prof. Dr. Oscar Fernando Avilés Sanchez

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO  
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO  
RICARDO ANDRES CASTILLO ESTEPA, E  
ORIENTADA PELO PROF. DR. JOÃO MAURÍCIO  
ROSÁRIO

  
ASINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS  
2015**

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** Não se aplica.

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

C278p Castillo Estepa, Ricardo Andres, 1980-  
Proposta de estratégia de coordenação para sistemas holônicos de manufatura baseada em agentes e stigmergia / Ricardo Andres Castillo Estepa. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: João Mauricio Rosário.  
Coorientador: Oscar Fernando Avilés Sanchez.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Automação. 2. Trabalho colaborativo. 3. Inteligência artificial. 4. Robótica. 5. Controle de produção. I. Rosário, João Mauricio, 1959-. II. Avilés Sanchez, Oscar Fernando. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Proposal of coordination strategy based on agents and stigmergy for holonic manufacturing systems

**Palavras-chave em inglês:**

Automation  
Collaborative work  
Artificial intelligence  
Robotics  
Production control

**Área de concentração:** Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

**Titulação:** Doutor em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

João Mauricio Rosário [Orientador]  
Ely Carneiro de Paiva  
Niederauer Mastelari  
Marcius Fabius Henriques de Carvalho  
Francisco Carlos Parquet Bizarria

**Data de defesa:** 30-07-2015

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE SISTEMAS INTEGRADOS**

**TESE DE DOUTORADO**

**Proposta de Estratégia de Coordenação para**  
**Sistemas Holônicos de Manufatura Baseada em**  
**Agentes e Stigmergia**

Autor: Ricardo Andres Castillo Estepa  
Orientador: Dr. João Mauricio Rosário  
Coorientador: Dr. Oscar Fernando Avilés Sanchez

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



**Prof. Dr. João Mauricio Rosário, Presidente**  
**Universidade Estadual de Campinas - DSI / FEM / UNICAMP**



**Prof. Dr. Ely Carneiro de Paiva**  
**Universidade Estadual de Campinas - DSI / FEM / UNICAMP**



**Prof. Dr. Niederauer Mastelari**  
**Universidade Estadual de Campinas – DSI / FEM / UNICAMP**



**Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho**  
**CEATEC - PUC / CAMPINAS**



**Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria**  
**ITA / SÃO JOSE DOS CAMPOS**

Campinas, 30 de Julho de 2015



## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais Julieta Estepa Rodriguez e Reinel de Jesus Castillo



## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de Deus e de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais Julieta e Reinel pelo incentivo e grande apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu Orientador Dr. João Mauricio Rosário, pela sua amizade, conselho e suas sugestões em relação a este trabalho.

Ao meu Coorientador Dr. Oscar Fernando Avilés pela sua colaboração e amizade.

Ao meu amigo Almiro Silveira pela sua grande colaboração e conselho.

A todos os funcionários, professores e colegas do Departamento de Sistemas Integrados da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP e do laboratório LAIR, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.



*O SENHOR é a minha luz e a minha  
salvação; a quem temerei? O SENHOR é  
a força da minha vida; de quem me  
recearei?*

*Salmo 27*



## Resumo

Neste trabalho é proposta e desenvolvida uma estratégia de coordenação baseada em agentes (hólons) para sistemas automatizados de produção compostos por módulos de manufatura colaborativos heterogêneos, a qual permitirá a esses sistemas se adaptarem dinamicamente às mudanças e perturbações do ambiente industrial moderno. Para realizar a validação da estratégia proposta é projetada e simulada uma configuração para um sistema de manufatura flexível formado por: uma mesa hidráulica, um robô articulado, uma mão robótica como sistema de sujeição e um robô móvel. Na estratégia de coordenação proposta é utilizada uma arquitetura do tipo holárquica (ADACOR), dentro da qual os hólons projetados poderão trabalhar tanto de forma independente atingindo objetivos locais quanto de forma integrada cooperando entre si para alcançar objetivos globais de produção. A coordenação e reconfiguração das operações dos hólons dentro do sistema, de maneira que esses possam trabalhar de forma colaborativa (coordenação – cooperação) é desenvolvida utilizando uma técnica de inteligência artificial coletiva conhecida como *Stigmergia*, combinada com redes neurais artificiais auto-organizativas. Dessa maneira o processo de reconfiguração do sistema de manufatura é otimizado disponibilizando de forma local a informação global do sistema, além disso neste trabalho também é acrescentado um componente adaptativo no interior dos hólons da arquitetura híbrida ADACOR, desse modo adicionando flexibilidade, adaptabilidade e rapidez de reconfiguração na obtenção dos planos de manufatura ao lidar com falhas ou perturbações. A estratégia proposta neste trabalho também poderá ser utilizada em outras aplicações que precisem da integração colaborativa de dispositivos mecatrônicos.

### *Palavras Chave*

Automação, Trabalho colaborativo, Inteligência Artificial, Robótica, Controle de produção.



## Abstract

In this work is proposed and developed an agents (hólons) based coordination strategy for automated production systems composed of heterogeneous collaborative manufacturing modules, this strategy will allow these systems dynamically adapt to changes and disturbances of the modern industrial environment. In order to validate the proposed strategy is projected and simulated a configuration for a flexible manufacturing system comprising: a hydraulic table, an articulated robot, a robotic hand as a gripping system, and a mobile robot. In the proposed coordination strategy is used an holarchical type architecture (ADACOR), within this architecture the projected hólons (agents) can work both in an independent manner reaching local objectives or in an integrated manner cooperating each other to achieve the global production objectives. The coordination and reconfiguration between the hólons inside the system in order that these can work in a collaborative form (coordination – cooperation) is developed using a collective artificial intelligence technique known as *Stigmergy* combined with self-organizing neural networks. Therefore, the reconfiguration process of manufacturing system is optimized providing locally the global information of the system, in addition in this work is also added an adaptive component into the hólons of ADACOR hybrid architecture, aiming flexibility, adaptability and speed of reconfiguration in obtaining manufacturing plans to deal with failures or disturbances. The strategy proposed in this work can also be used in other applications that require the collaborative integration of mechatronic devices.

*Keywords:*

Automation, Collaborative work, Artificial intelligence, Robotics, Production Control.



## Lista de Ilustrações

Figura 1. Arquitetura de Sistema Automatizado de Produção (SAP)	11
Figura 2. Conceito de Automação Industrial Colaborativa	16
Figura 3. Abordagens tradicional e distribuída para a tomada de decisões no sistema de controle de manufatura (MARIK, 2005 apud LEITÃO, 2008)	17
Figura 4. Estrutura do Hólon Simples Genérico	19
Figura 5. Níveis Lógicos de Decisão dentro de um hólon	22
Figura 6. Evolução das Arquiteturas para o Controle de Manufatura	23
Figura 7. Níveis da Arquitetura ADACOR	24
Figura 8. Estrutura de um Hólon Operacional Simples	25
Figura 9. Controle Dinâmico de Manufatura	29
Figura 10. Processo de Agendamento Dinâmico da Manufatura	31
Figura 11. Stigmergia – Método de comunicação indireta entre agentes	37
Figura 12. Rede Neural utilizada para adaptação de parâmetros	38
Figura 13. Adaptação de Parâmetros – Algoritmo de Treinamento Supervisionado	39
Figura 14. Estratégia de coordenação Proposta	40
Figura 15. Arquitetura de Coordenação e Controle Proposta	41
Figura 16. Módulos utilizados dentro de um sistema de manufatura genérico	43
Figura 17. Agendamento Dinâmico proposto – Sistema de Controle de manufatura	50
Figura 18. Obtenção de Células de Manufatura no Processo de Alocação de Recursos	52
Figura 19. Representação dos P.Os dentro do espaço de manufatura 3D	54
Figura 20. Possível Trajetória Aleatória Inicial sem hólons e logo considerando três Hólons	56
Figura 21. Planejamento Inicial Utilizando uma Arquitetura Holônica com 3 Hólons Compostos	57
Figura 22. Distribuição aleatória das formigas antes do começo do algoritmo	58
Figura 23. Trajetória na época 1 do algoritmo de Agendamento Dinâmico	59
Figura 24. Distribuição das formigas depois de 900 épocas ( $k = 900$ )	59
Figura 25. Funcionamento do Algoritmo de Agendamento Dinâmico ao longo das Épocas	60
Figura 26. Influência do campo Dissipativo sobre as formigas	62
Figura 27. Valor de Feromônio	62
Figura 28. Valor do Campo Dissipativo	64
Figura 29. Influência do Fator de Autonomia no Campo Dissipativo	65
Figura 30. Trajetória de planejamento nos HO em função das épocas	66
Figura 31. Entradas no Software Desenvolvido	67
Figura 32. Fluxograma do Estado Transiente e uma Época no Agendamento Dinâmico	68
Figura 33. Fluxograma das Etapas Colaborativa e Adaptativa no Algoritmo de Agendamento	69
Figura 34. Valor do Fator de Disponibilidade	71
Figura 35. Fluxograma da Etapa Adaptativa no Algoritmo de Agendamento	71
Figura 36. Tarefas básicas dentro dos hólons da arquitetura ADACOR na Estratégia Proposta	72
Figura 37. Comportamento dos parâmetros no Hólon Operacional	73
Figura 38. Declaração de variáveis Globais no software de simulação	78
Figura 39. Declaração de Objetos dentro do software de simulação	79
Figura 40. Representação esquemática do Robô ABB 1400	82
Figura 41. Representação esquemática do Robô ABB 140	83

Figura 42. Representação esquemática da Mesa Hidráulica	84
Figura 43. Eixos e estado de movimento considerados no robô móvel	86
Figura 44. Arquitetura distribuída a ser simulada para validação	88
Figura 45. Peças Utilizadas na Simulação	89
Figura 46. Recursos Físicos dentro do software de simulação	90
Figura 47. Distribuição dos recursos físicos para realizar uma operação	91
Figura 48. Agrupação de Recursos para Formar HO Compostos	95
Figura 49. Representação dos Pontos de Operação dentro do Espaço de Manufatura	96
Figura 50. Iniciação Automática / Aleatória da Trajetória (Operações Impossíveis)	97
Figura 51. Distribuição Inicial das Formigas no Início do Algoritmo	97
Figura 52. Processo de agendamento dinâmico ao longo das épocas	98
Figura 53. Trajetória obtida no processo de agendamento Dinâmico (750 épocas)	99
Figura 54. Visualização do Processo de Agendamento no Interior dos Hólons	101
Figura 55. Influência do Feromônio no Algoritmo de Agendamento	103
Figura 56. Influência do Fator de Autonomia no Algoritmo de Agendamento	104
Figura 57. Influência do Fator de Disponibilidade no Algoritmo de Agendamento	105
Figura 58. Influência do Número de Formigas no Algoritmo de Agendamento	106
Figura 59. Recursos físicos num sistema de manufatura genérico utilizados na Arquitetura ADACOR projetada	109
Figura 60. Hólons Operacionais Simples no Sistema Projetado	110
Figura 61. Mesa hidráulica	111
Figura 62. Robô manipulador ABB 140	111
Figura 63. Câmera IP	112
Figura 64. Mão robótica antropomórfica	112
Figura 65. Robô Móvel ROBOTINO	113
Figura 66. Recursos físicos dentro da área de Usinagem	114
Figura 67. Produto – Processos – Atividades - Operações no sistema projetado	115
Figura 68. Hólons Compostos Projetados com o algoritmo ROC	117
Figura 69. Configuração da Arquitetura ADACOR projetada	118
Figura 70. Hólons Operacionais Compostos no Sistema Projetado	118
Figura 71. Processo de Identificação da linha preta	124
Figura 72. Implementação do Algoritmo de Transporte com o Robotino - FESTO	125
Figura 73. Instrumento Virtual para o Comando da Mesa Hidráulica	127
Figura 74. Exemplo de segmentacao da cor verde na imagem adquirida	127
Figura 75. Cálculo da Forma da Figura Considerando as Propriedades da Região	128
Figura 76. Sujeicao de formas Diferentes (Esferica, Cubica, Cilindrica)	129
Figura 77. Instrumento virtual desenvolvido para o comando da Mão Robótica	129
Figura 78. Diagrama de blocos do instrumento para comando da Mão Robótica	130
Figura 79. Projeto e Implementação Final da Base e Suporte da Mão Robótica	156
Figura 80. Projeto e Implementação da Placa de Controle dos Motores para a Mão Robótica	157

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Estratégias Utilizadas no Problema de Agendamento Dinâmico	35
Tabela 2. Métodos de adaptação dos parâmetros de manufatura dentro do HO e HT	75
Tabela 3. Parâmetros Denavit – Hartenberg Robô ABB 1400	82
Tabela 4. Parâmetros Denavit - Hartenberg Robô ABB 140	84
Tabela 5. Parâmetros Denavit - Hartenberg da mesa hidráulica	85
Tabela 6. Parâmetros do Robô Móvel Omnidirecional	87
Tabela 7. Recursos Físicos utilizados na Simulação da Arquitetura Proposta	88
Tabela 8. Definição de Operações Básicas com os Recursos Físicos	92
Tabela 9. Posições no vetor de comunicação	93
Tabela 10. Pontos de Operação Considerados na Simulação	95
Tabela 11. Parâmetros Ingressados Para o Funcionamento do Algoritmo	98
Tabela 12. Sequência final das Operações na Trajetória Obtida (Plano de Manufatura)	100
Tabela 13. Resultados do Agendamento com Diferentes Valores do Feromônio	102
Tabela 14. Atividades propostas e recursos de manufatura utilizados no sistema	116
Tabela 15. Tarefas Resultantes no Sistema Holônico	119
Tabela 16. Posições Consideradas para o Robô Manipulador ABB 140	126
Tabela 17. Posições consideradas para a mesa Hidráulica	126
Tabela 18. Influência do Feromônio na Distância ( $d$ ) da Trajetória no Agendamento Dinâmico	163
Tabela 19. Influência do Fator de Autonomia na Distância ( $d$ ) no agendamento Dinâmico	164
Tabela 20. Influência do Fator de Disponibilidade na Distância ( $d$ ) no Agendamento Dinâmico	164
Tabela 21. Influência do Número de Formigas na Distância ( $d$ ) no Agendamento Dinâmico (Número de Épocas = 700)	165



## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Letras Latinas*

***a*** - Distância ao longo do eixo *X* para fazer coincidir completamente os sistemas de coordenadas na convenção Denavit - Hartenberg

***d*** - Distância ao longo do eixo *Z* para alinhar os eixos *X* de dois sistemas na convenção Denavit - Hartenberg

***I*** - Matriz identidade

***A*** - Matriz de transformação entre sistemas de coordenadas

### *Letras Gregas*

**$\alpha$**  – Ângulo entre os eixos *x* de dois sistemas de coordenadas

**$\theta$**  – Ângulo entre os eixos *z* de dos sistemas de coordenadas

### *Subscritos*

***k*** - Iteração

### *Abreviações*

**ADACOR** - ADAPtive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems

**AI** - Inteligência Artificial

**CAD** - Projeto Assistido por Computador

**CAI** - Instrução Assistida por Computador

**CAT** - Teste Assistido por Computador

**CIM** - Manufatura Integrada por Computador

**CLP** - Controlador Lógico Programável

**CMM** - Gerenciamento de Manufatura Colaborativa

**CNC** – Controle Numérico Computadorizado

**CNP** – Contract-net Protocol

**ComC** - Componente de Comunicação

**CPS** - Sistema de Produção Colaborativo

**CSAP** - Sistema Automatizado de Produção Colaborativo  
**DAI** – Inteligência Artificial Distribuída  
**DeC** - Componente de Decisão  
**D-H** – Denavit Hartenberg  
**DSI** – Departamento de Sistemas Integrados  
**EAD** - Educação a distância  
**EAP** - Estrutura Analítica de Projeto  
**EDD** - Earliest Due Date  
**GL** - Grau de Liberdade  
**GRAFCET** - Grafo Funcional de Comando Estado - Transição  
**HMS** - Sistema de Manufatura Holônico  
**HO** - Hólon Operacional  
**HP** - Hólon de Produto  
**HS** - Hólon de Supervisão  
**HT** - Hólon de Tarefa  
**IMS** - Sistema Inteligente de Manufatura  
**JSP** - Job Shop Shedulling Problem  
**LAN** - Rede de Área Local  
**LCD** - Dispositivo Lógico de Controle  
**MAS** – Sistemas Multi Agentes  
**MLP** – Multi Layer Perceptron (Perceptron Multi-camada)  
**NP** – Problemas NP difíceis ou NP complexos  
**OLE** - Vinculação e Incorporação de Objetos  
**PC** - Parte de Comando  
**PIC** - Componente de Interface Física  
**PFA** – Matriz de Incidência do Análise de Fluxo de Produção  
**P.O.** – Ponto de Operação  
**POA** – Programação orientada a Agentes  
**POO** – Programação orientada a Objetos  
**PROSA** – Product-Resource-Order-Staff Architecture  
**RNA** – Redes Neurais Artificiais

**SA** - Sistema Automatizado

**SAP** - Sistema Automatizado de Produção

**SCADA** - Supervisão, Controle e Aquisição de Dados

**SI** - Sistema inteligente

**SOM** – Self Organizing Map (Mapa Auto Organizativo)

**SPT** – Heurística Tempo de Processamento mais curto

**TIC** - Tecnologias da Informação e das Comunicações

**VI** - Instrumento Virtual

### ***Siglas***

**AFCET** – Associação Francesa de Cibernética Econômica e Técnica

**DSI** – Departamento de Sistemas Integrados

**FEM** – Faculdade de Engenharia Mecânica

**IEC** – Comissão Internacional de Eletrotécnica

**LAIR** – Laboratório de Automação Integrada e Robótica

**UNICAMP** – Universidade Estadual de Campinas



# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>VII</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMO</b>	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	<b>XVII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XIX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	<b>XXI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>1</b>
1.1. Justificativa	2
1.2. Objetivo Geral	4
1.3. Objetivos Específicos	4
1.4. Metodologia Proposta	5
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>9</b>
2.1. Conceitos Básicos	9
2.1.1. Sistemas de Manufatura	9
2.1.1.1. Evolução dos Sistemas de Manufatura	10
2.1.2. Sistemas Automatizados de Produção (SAP)	10
2.1.2.1. Arquitetura de um SAP	11
2.2. Sistemas de Controle de Manufatura	12
2.2.1. Arquiteturas Tradicionais de Sistemas de Controle de Manufatura	12
2.2.2. Abordagem Tradicional do Controle de Manufatura (Centralizado - Hierárquico)	13
2.2.3. Sistemas de Controle de Manufatura Distribuídos e Colaborativos	15
2.2.3.1. Definição de Agente	17
2.2.4. Sistemas de Controle de Manufatura baseados em Agentes	17
2.2.5. Sistemas de Controle de Manufatura Inteligentes (IMS)	18
2.2.5.1. Definição de Hólon	19
2.2.6. Sistemas de Controle de Manufatura Híbridos - Holônicos (HMS)	19
2.2.6.1. Comparação entre os modelos Baseados em Agentes e HMS	21

<b>2.3.</b>	<b>Arquitetura de Controle Híbrida – Holônica ADACOR</b>	<b>22</b>
2.3.1.	Níveis na Arquitetura ADACOR	24
2.3.2.	Níveis Físico e Operacional - Hólon Operacional (HO)	24
2.3.3.	Nível de Coordenação - Hólon de Supervisão (HS)	25
2.3.4.	Nível de Gerenciamento - Hólon de Tarefa (HT)	26
2.3.5.	Nível de Planejamento – Hólon de Produto (HP)	26
2.3.6.	Comunicação Inter-Hólon entre os LCD	27
<b>2.4.</b>	<b>Conclusões do Capítulo</b>	<b>27</b>
<b>3.</b>	<b>ABORDAGENS DO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO E CONCEPÇÃO DA ESTRATÉGIA PROPOSTA</b>	<b>29</b>
<b>3.1.</b>	<b>Posicionamento do problema de Planejamento Dinâmico da Produção</b>	<b>29</b>
3.1.1.	Planejamento Inicial da produção e alocação de recursos	29
3.1.2.	Problema de Agendamento de tarefas (JSP)	30
3.1.3.	Abordagens Atuais para Solução do Agendamento Dinâmico de Manufatura	31
3.1.3.1.	Market – Based Resource Allocation	32
3.1.4.	Abordagens do Planejamento da Produção Utilizando Agentes e Hólons	32
3.1.5.	Aplicações do Planejamento da Produção Baseado em Agentes e Sistemas Holônicos	33
<b>3.2.</b>	<b>Coordenação e Planejamento Dinâmico Baseados em Stigmergia</b>	<b>36</b>
3.2.1.	Adaptação e Aprendizado em Sistemas de Controle Multiagente	37
<b>3.3.</b>	<b>Proposta de Estratégia de Coordenação para Sistemas de Manufatura Colaborativos</b>	<b>40</b>
<b>3.4.</b>	<b>Proposta de Arquitetura de controle baseada em Arquitetura Híbrida ADACOR</b>	<b>41</b>
3.4.1.	Projeto do nível Operacional	41
3.4.1.1.	Projeto dos componentes lógicos (decisão e interface física) dos hólons operacionais	42
3.4.2.	Projeto do nível de Supervisão	42
3.4.3.	Projeto do nível de Coordenação	42
3.4.4.	Seleção dos tipos de Hólons - Agentes utilizados dentro da Arquitetura proposta ADACOR	43
3.4.5.	Projeto dos Módulos ou Recursos Físicos dentro de um Sistema Colaborativo ADACOR	44
3.4.5.1.	Módulo de Posicionamento e Orientação	44
3.4.5.2.	Módulo de Identificação de forma	45
3.4.5.3.	Módulo de Manipulação e Usinagem	45
3.4.5.4.	Módulo de Sujeição	45
3.4.5.5.	Módulo de Transporte	46
<b>3.5.</b>	<b>Conclusões do Capítulo</b>	<b>46</b>
<b>4.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO PARA SISTEMAS COLABORATIVOS</b>	<b>49</b>
<b>4.1.</b>	<b>Etapa de Planejamento Inicial da Produção e Alocação de Recursos – HP</b>	<b>51</b>
4.1.1.	Leitura e Preparação de dados	51
4.1.1.1.	Pontos de Operação (P.O.)	53
4.1.2.	Fator de Rejeição	54
4.1.3.	Fator de Redundância	55
<b>4.2.</b>	<b>Etapa de Agendamento Dinâmico Baseada em Stigmergia - HT</b>	<b>56</b>

4.2.1.	Tempo de Reestabelecimento	58
4.2.2.	Utilização de Agentes Móveis Tipo Formiga	58
4.2.3.	Proposta de Sinais variáveis para comunicação indireta - HO	60
4.2.4.	Feromônio	61
4.2.5.	Desenvolvimento do Algoritmo de Propagação de Informação (Campo Dissipativo)	63
4.2.6.	Fator de Autonomia	65
<b>4.3.</b>	<b>Desenvolvimento do Algoritmo de Agendamento Dinâmico no HT para Implementação Software</b>	<b>67</b>
4.3.1.	Implementação Software da Etapa Competitiva	69
4.3.2.	Implementação Software de Etapa Colaborativa	69
4.3.3.	Implementação Software da Etapa Adaptativa	70
4.3.4.	Fator de Disponibilidade	70
<b>4.4.</b>	<b>Comportamento dos Parâmetros dentro do HO no Estado Transiente e Estado Estacionário</b>	<b>72</b>
4.4.1.	Supervisão da Execução do Plano de Manufatura - HS	74
<b>4.5.</b>	<b>Parâmetros Adaptativos no Algoritmo de Planejamento Dinâmico e Coordenação</b>	<b>74</b>
<b>4.6.</b>	<b>Conclusões do Capítulo</b>	<b>75</b>
<b>5.</b>	<b>PROJETO E VALIDAÇÃO SOFTWARE DA ESTRATÉGIA DE COORDENAÇÃO</b>	<b>77</b>
<b>5.1.</b>	<b>Projeto para simulação software de agentes num Sistema Descentralizado</b>	<b>77</b>
5.1.1.	Projeto de Agentes/Hólons para um Sistema de Manufatura colaborativo	79
5.1.2.	Representação da Estrutura Interna dos Agentes no Software de Simulação	80
5.1.2.1.	Controlador - Software	80
5.1.3.	Modelagem Cinemática dos Módulos ou Recursos Físicos	81
5.1.3.1.	Cinemática Direta Robô ABB 1400	81
5.1.3.2.	Cinemática Direta Robô ABB 140	83
5.1.3.3.	Cinemática Direta Mesa Hidráulica	84
5.1.3.4.	Cinemática Diferencial Robô Móvel Omnidirecional	85
<b>5.2.</b>	<b>Proposta e Simulação de Arquitetura para Sistema de Manufatura Colaborativo ADACOR</b>	<b>87</b>
5.2.1.	Projeto de Arquitetura Híbrida de Controle ADACOR a ser Simulada	89
5.2.2.	Representação Software da Arquitetura Descentralizada / Heterárquica	89
5.2.3.	Distribuição de Recursos Físicos dentro de arquitetura holônica	90
5.2.4.	Simulação de Recursos Físicos Dentro da arquitetura proposta	91
<b>5.3.</b>	<b>Proposta e Simulação de Sistema de Comunicação entre Agentes</b>	<b>93</b>
5.3.1.	Agente Supervisor	93
<b>5.4.</b>	<b>Planejamento Dinâmico de Atividades Baseado em Stigmergia na Simulação Proposta</b>	<b>94</b>
5.4.1.	Preparação de Dados	94
5.4.2.	Agendamento Dinâmico Baseado em Stigmergia	97
5.4.3.	Influência da Modificação dos Parâmetros Adaptativos no Algoritmo de Agendamento Proposto	102
5.4.3.1.	Variação do parâmetro Feromônio Inicial	102
5.4.3.2.	Variação do parâmetro Fator de Autonomia	103
5.4.3.3.	Variação do parâmetro Fator de Disponibilidade Inicial	104
5.4.3.4.	Variação do parâmetro Número de Formigas	106
<b>5.5.</b>	<b>Conclusões do Capítulo</b>	<b>107</b>

<b>6. IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE OPERAÇÕES BÁSICAS DENTRO DO SISTEMA DE MANUFATURA COLABORATIVO</b>	<b>109</b>
<b>6.1. Configuração de Sistema de Manufatura segundo uma arquitetura Holônica ADACOR</b>	<b>109</b>
6.1.1. Seleção de Recursos Físicos e HO utilizados e distribuição inicial	110
6.1.1.1. Sistema de Posicionamento e Orientação - Mesa Hidráulica	110
6.1.1.2. Sistema de Usinagem - Manipulador Robótico	111
6.1.1.3. Sistema de Controle de Qualidade - Módulo de Visão Artificial	112
6.1.1.4. Sistema de Sujeição - Módulo de Mão Robótica	112
6.1.1.5. Sistema de Transporte – Robô Móvel	113
6.1.2. Definição dos Processos, Atividades e Subprocessos no Sistema Projetado	113
6.1.2.1. Produtos	114
6.1.2.2. Processos, Tarefas ou Ordens de Manufatura	114
6.1.2.3. Atividades ou Ações de Manufatura	114
6.1.2.4. Operações de manufatura ou Subprocessos	115
<b>6.2. Implementação do Algoritmo de Planejamento e Coordenação</b>	<b>115</b>
6.2.1. Implementação da Etapa de Planejamento Inicial e Alocação de Recursos	115
6.2.2. Descrição das Tarefas dentro dos Hólons Operacionais Compostos	119
6.2.3. Descrição das Atividades dentro dos Hólons Operacionais Compostos	119
6.2.3.1. Atividade F – Hólón 3	120
6.2.3.2. Atividade A – Hólón 1	120
6.2.3.3. Atividade D – Hólón 2	120
6.2.3.4. Atividade E – Hólón 2	121
6.2.3.5. Atividade B – Hólón 1	122
6.2.3.6. Atividade C – Hólón 1	123
6.2.3.7. Atividade G – Hólón 3	123
6.2.4. Especificação e Implementação das Operações básicas a serem realizadas com os Recursos Físicos	123
6.2.4.1. Especificação da Operação de Seguimento de Trajetória com o Robô Móvel Robotino	124
6.2.4.2. Especificação das Operações com o robô ABB 140	125
6.2.4.3. Especificação das Operações com a mesa Hidráulica	126
6.2.4.4. Especificação das Operações com a Câmera	127
6.2.4.5. Especificação das Operações com a Mão Antropomórfica	128
<b>6.3. Conclusões do Capítulo</b>	<b>130</b>
<b>7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS</b>	<b>133</b>
<b>7.1. Conclusões Gerais</b>	<b>133</b>
<b>7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>135</b>
7.2.1. Projeto e Implementação de Sistemas Baseados em Agentes Homogêneos	135
7.2.2. Metodologia de Aplicação do Algoritmo para Adaptação dos Parâmetros	135
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>137</b>
<b>PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO A – MODELO CINEMÁTICO DO ROBÔ ABB 1400</b>	<b>145</b>

<b>ANEXO B – MODELO CINEMÁTICO DO ROBÔ ABB 140</b>	<b>149</b>
<b>ANEXO C – MODELO CINEMÁTICO DA MESA HIDRÁULICA</b>	<b>151</b>
<b>ANEXO D – MODELO CINEMÁTICO DIFERENCIAL DO ROBÔ MÓVEL OMNIDIRECIONAL</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO E – PROJETO MECÂNICO, ACIONAMENTO E CONTROLE DA MÃO ANTROPOMÓRFICA</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO F – IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE DE AGRUPAMENTO DE RECURSOS</b>	<b>159</b>
<b>ANEXO G – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS ADAPTATIVOS NO ALGORITMO DE AGENDAMENTO</b>	<b>163</b>

# 1. INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Nas últimas décadas têm se apresentado mudanças no ambiente de manufatura industrial, o qual tem evoluído desde uma economia local para uma economia global e muito mais competitiva, caracterizada por produtos de alta qualidade, menor custo e menor ciclo de vida; isso reflete numa necessidade dos sistemas de produção para esses se adaptarem dinamicamente e rapidamente às mudanças e perturbações do entorno (LEITÃO; RESTIVO, 2006). Dessa forma e para manter a competitividade, as indústrias requerem da implementação de sistemas de manufatura integrados e controlados utilizando uma abordagem colaborativa, distribuída e inteligente que possa oferecer flexibilidade e reconfigurabilidade mantendo sua produtividade e qualidade (COLOMBO et al., 2004), (SHEN et al., 2006).

Portanto novos paradigmas como a Gestão da Manufatura Colaborativa (CMM) surgem como uma evolução e uma resposta à necessidade de adaptação às emergências que não satisfazia completamente o conceito original CIM (Computer Integrated Manufacturing) no qual os Sistemas Automatizados de Produção (SAPs) apresentam uma integração de hardware e software baseada em uma arquitetura de controle fortemente hierárquica<sup>1</sup> e centralizada, e em uma estrutura de funcionamento (planejamento, agendamento, execução) sequencial e rígida. Assim, embora essa arquitetura de controle possibilite aos sistemas CIM uma otimização na produção, acarreta grandes complicações precisando da interrupção do sistema completo quando ocorre uma falha em qualquer ponto da hierarquia (COLOMBO, 2006 apud LEITÃO, 2008), conseqüentemente essa estrutura rígida e hierárquica também não permite a esses sistemas se adaptarem com eficiência nem efetividade às mudanças do ambiente.

Dentro desse contexto, surgem os sistemas de controle de manufatura *Inteligentes e Distribuídos*, caracterizados por apresentarem uma arquitetura de controle descentralizada a qual lhes permite ser robustos e adaptáveis a mudanças e perturbações. Dentro dessa abordagem o paradigma tecnológico conhecido como *Sistemas Baseados em Agentes*, permite a implementação de outro paradigma: os *Sistemas Holônicos*, os quais utilizam a tecnologia de

---

<sup>1</sup> Hierárquica = Ordenada ou organizada (verticalmente) de acordo a determinados critérios.

agentes. Os sistemas baseados em agentes e conseqüentemente os sistemas holônicos além de satisfazer as necessidades descritas anteriormente, acrescentam ainda vantagens como: modularidade, reconfigurabilidade, autonomia, escalabilidade e reusabilidade (LEITÃO, 2009a).

Uma das aplicações da tecnologia de agentes nos sistemas de manufatura é sua implementação em problemas relacionados com o agendamento e controle da produção (Problema de otimização JSP<sup>2</sup>) acrescentando também adaptabilidade e capacidade de aprendizagem aos sistemas de manufatura para esses modificarem seu funcionamento de acordo com as necessidades (MONOSTORI; CSÁJI; KÁDÁR, 2004). Esse processo de coordenação e controle da produção considerado neste trabalho consiste na obtenção de um plano de manufatura “alternativo” quando aparece uma perturbação ou uma falha num dos recursos físicos do sistema, e na coordenação dos recursos ainda disponíveis de forma a continuar com a fabricação dos produtos requeridos. Esse problema pode ser considerado como um problema de otimização, o qual pode ser solucionado com uma abordagem baseada em agentes, que utilize a coordenação - cooperação para lidar com a resolução de conflitos.

## 1.1. Justificativa

Com o desenvolvimento deste trabalho vai ser proposta e implementada uma estratégia de coordenação para sistemas de manufatura colaborativos baseada em três componentes (arquitetura do sistema de controle, algoritmo de planejamento dinâmico e configuração de parâmetros adaptativos), diferente das estratégias existentes na atualidade baseadas em apenas dois componentes. Essa estratégia será validada através da simulação software em 3D e posterior implementação num sistema de manufatura existente no Laboratório de Automação Integrada e Robótica (LAIR) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Os módulos tecnológicos que compõem este sistema (uma mesa hidráulica, um robô articulado IRB-ABB 140 integrado a uma mão robótica e um robô móvel omnidirecional) junto com os módulos de controle e gerenciamento vão ser representados por meio de um conjunto de agentes (hólons) que se comunicam e interagem entre si. Dessa forma vai se permitir um trabalho colaborativo (coordenação e cooperação) destes recursos de manufatura por meio do controle distribuído

---

<sup>2</sup> JSP = Job Shop Shedulling Problem (Problema de agendamento da produção)

(descentralizado) e inteligente possibilitado pela arquitetura de controle holônica ADACOR (ADaptive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems).

Levando em consideração que embora as arquiteturas distribuídas baseadas em agentes possam oferecer as vantagens descritas anteriormente, para obtê-las é necessário garantir uma *Coordenação e Cooperação* adequadas entre os diferentes agentes de modo a esses alcançar os objetivos globais de produção, tendo cada um somente uma visão local do sistema. Devido a que o sistema é implementado através de uma arquitetura holárquica<sup>3</sup> não totalmente centralizada, com o intuito de alcançar então um comportamento previsível e eficaz do sistema holônico proposto, é desenvolvido um método de coordenação indireta entre os hólons baseado em disponibilizar de maneira local a informação e dinâmica global do sistema (stigmergia).

Considerando que o problema JSP é computacionalmente classificado como um problema de otimização *NP – difícil*<sup>4</sup>, não existe um algoritmo que garanta a obtenção da sua solução “ótima” em um tempo polinomial (MONOSTORI; CSÁJI; KÁDÁR, 2004). Assim sendo, uma estratégia baseada em stigmergia poderá ser utilizada então como uma forma de negociação entre os objetivos muitas vezes conflitantes dos diferentes hólons visando minimizar e/ou maximizar alguma medida de rendimento do sistema de manufatura. Essa técnica (Stigmergia) está baseada em considerar as modificações ao entorno do trabalho como uma forma de comunicação indireta com o intuito de coordenar as ações dos hólons nos processos de agendamento e controle da produção, e sua implementação visa alcançar uma solução sub-ótima do problema JSP utilizando uma arquitetura holárquica e aplicando métodos de inteligência artificial distribuída (VALCKENAERS et al., 2006), de forma a obter menores tempos e custos computacionais que os alcançados com a implementação de abordagens tradicionais (arquiteturas centralizadas e métodos baseados em mercados) para solucionar esse problema.

Além disso, nesta tese também é proposto um componente de aprendizagem utilizando parâmetros adaptativos dentro do módulo de controle (LCD) de cada hólón, isso fará com que o sistema além de responder somente de maneira reativa reconfigurando-se e adaptando-se física e logicamente, também possa “aprender” cada vez que é submetido a imprevistos, melhorando

---

<sup>3</sup> Holárquica = Arquitetura híbrida (hierárquica – heterárquica) baseada em hólons.

<sup>4</sup> Problema NP-Difícil: O tempo computacional de solução do problema não está determinado.

assim a sua velocidade de resposta e tornando-se mais robusto, flexível e ágil (WEISS, 1999), (SHEN et al., 2006).

Com a proposta e implementação da estratégia de coordenação descrita neste trabalho, o sistema de manufatura associado mesmo sendo um protótipo de laboratório estará capacitado para responder às perturbações ou falhas de recursos físicos no sistema, as quais também podem se apresentar no ambiente industrial real. Além disso, com a estratégia desenvolvida se possibilitará a coordenação de um sistema de manufatura que integra diferentes subsistemas ou módulos tecnológicos em uma arquitetura flexível e aberta a modificações (hardware – software) que poderão ser implementadas facilmente sem requerer uma nova iniciação do sistema. A estratégia de coordenação baseada em agentes proposta neste trabalho também poderá ser utilizada em outras aplicações que integram sistemas mecatrônicos de forma colaborativa.

## **1.2. Objetivo Geral**

O principal objetivo deste trabalho de pesquisa é: Propor e desenvolver uma estratégia de coordenação inteligente e distribuída (baseada em agentes) para sistemas de manufatura holônicos, utilizando conceitos de inteligência coletiva (stigmergia) e sistemas colaborativos.

## **1.3. Objetivos Específicos**

Para cumprir o objetivo proposto, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

1. Realizar uma revisão e estudo das principais arquiteturas de controle hierárquicas, heterárquicas e híbridas, e das estratégias utilizadas na atualidade para a implementação de sistemas de planejamento da produção.
2. Projetar uma configuração para um sistema de manufatura colaborativo composto por vários agentes (hólons) heterogêneos controlada por uma arquitetura híbrida e holônica ADACOR, visando flexibilidade e adaptabilidade no processo de planejamento da produção.

3. Propor e desenvolver uma estratégia de coordenação para sistemas de manufatura holônicos, que permita lidar com falhas (dos recursos físicos nos pontos de operação) ou perturbações em ambientes dinâmicos.
4. Desenvolver e implementar um algoritmo adaptativo baseado em inteligência artificial colaborativa (stigmergia) e Redes Neurais Artificiais (RNA), para automatizar o processo de agendamento dinâmico de operações dentro do sistema.
5. Propor parâmetros de manufatura adaptativos dentro dos hólons no algoritmo de agendamento, de forma que o plano de manufatura obtido possa alcançar soluções sub-ótimas quando varia o número de recursos de manufatura.
6. Validar a estratégia de coordenação proposta, utilizando software de simulação 3D e implementação de operações num sistema de manufatura colaborativo real (estudo de caso).

## **1.4. Metodologia Proposta**

O desenvolvimento deste trabalho será realizado no LAIR (Laboratório de Automação Integrada e Robótica), Departamento de Sistemas Integrados (DSI) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. A validação da proposta de coordenação desenvolvida levará em consideração tanto a modelagem, e simulação do funcionamento de cada hólón projetado quanto a sua implementação real num sistema de manufatura cuja estrutura também é configurada segundo uma arquitetura holônica ADACOR. O trabalho é desenvolvido levando em consideração várias etapas organizadas segundo a Estrutura Analítica de Projeto (EAP) apresentada a seguir:

### **1. Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica**

Nesta etapa são apresentados os conceitos básicos dos sistemas de manufatura e dos seus sistemas de controle, desde o modelo centralizado CIM (Manufatura Integrada por Computador) até os modelos inteligentes e distribuídos baseados em agentes. Os quais possibilitam a implementação de sistemas de controle holônicos que permitem aos sistemas de manufatura se

adaptar rapidamente às mudanças do ambiente. Também é apresentado o paradigma de coordenação baseado em stigmergia a qual permite uma comunicação indireta entre os hólons do sistema utilizando as modificações no entorno de trabalho ou nos produtos. Além disso, são estudados os modelos de aquisição automática de conhecimento que permitiram aos hólons uma melhor adaptação às mudanças do entorno, fazendo com que um sistema holônico possa executar um processo de aprendizagem adaptativo de forma a melhorar o seu desempenho.

## **2. Desenvolvimento de estratégia de coordenação para sistemas de Manufatura Holônicos ADACOR**

Nesta etapa será estudado o processo de agendamento da produção nos sistemas de manufatura com arquitetura de controle não centralizada, identificando-o como um problema de otimização que pode ser resolvido por meio de computação evolutiva, aplicando uma abordagem de inteligência artificial coletiva conhecida como stigmergia, com o intuito de coordenar os objetivos dos diferentes agentes envolvidos no processo. Esta estratégia de coordenação é implementada como parte da programação do componente de decisão dentro do módulo de controle lógico de cada hólón, e será integrada e direcionada pelos quatro níveis de controle da arquitetura ADACOR desde o hólón de gerenciamento até os hólons operacionais, de forma a obter uma arquitetura de controle que possa se comportar de forma centralizada ou descentralizada dependendo da situação. As atividades a serem realizadas são as seguintes:

- Estudo do problema de agendamento e controle da produção (JSP).
- Proposta de módulos de manufatura genéricos para sistemas de manufatura colaborativo.
- Proposta de arquitetura híbrida baseada em arquitetura holônica ADACOR.
- Identificação das técnicas de inteligência coletiva aplicáveis a sistemas baseados em agentes.
- Desenvolvimento da estratégia de coordenação de agentes baseada em stigmergia.

## **3. Desenvolvimento e Implementação do algoritmo adaptativo de Planejamento Dinâmico e Coordenação**

Nesta etapa serão desenvolvidos os algoritmos para a implementação do Planejamento da Produção em um software de alto nível, levando em consideração as etapas de: Planejamento inicial e alocação de recursos, Agendamento Dinâmico baseado em Stigmergia e redes neurais

SOM, e uma Adaptação automática de parâmetros propostos dentro dos hólons da arquitetura ADACOR. Essa adaptação possibilitará um funcionamento dos hólons não somente reativo, mas adaptativo, de tal forma que esses possam melhorar seu rendimento (individual e coordenado) na medida em que novos conhecimentos são agregados aos inicialmente programados, isso sem necessidade de ter que reiniciar o sistema. As atividades a serem realizadas nesta etapa serão:

- Desenvolvimento de algoritmo de planejamento inicial e agrupamento automático de recursos;
- Desenvolvimento de algoritmo de Agendamento dinâmico de atividades;
- Proposta de parâmetros e seus algoritmos de adaptação dentro dos hólons na arquitetura proposta;
- Desenvolvimento dos comportamentos nos estados Estacionário e Transiente quando o sistema é reconfigurado.

#### **4. Validação Software da estratégia de coordenação desenvolvida**

Nesta etapa será validada a estratégia de coordenação desenvolvida, através da sua implementação numa linguagem de alto nível e depois através da sua simulação de funcionamento utilizando um software especializado para simulação 3D. As atividades a serem realizadas nesta etapa são as seguintes:

- Descrição e configuração de um sistema de manufatura utilizado para validação;
- Implementação software dos módulos (hólons) genéricos propostos;
- Implementação software de operações básicas dentro dos hólons operacionais utilizados no sistema;
- Implementação da lógica do algoritmo de coordenação e planejamento dinâmico de atividades de forma a calcular um plano de manufatura possível para o sistema;
- Implementação e simulação 3D de funcionamento do plano de manufatura obtido.

## **5. Validação da estratégia de coordenação desenvolvida utilizando sistema de manufatura colaborativo**

Nesta etapa será validada a estratégia de coordenação desenvolvida através da sua implementação selecionando e utilizando recursos de manufatura reais configurados para formar um sistema de manufatura colaborativo (composto por quatro módulos tecnológicos) segundo uma arquitetura ADACOR. Nesta etapa serão implementadas operações básicas com esses recursos agrupados por meio de hólons de forma a compor tarefas que exemplifiquem um processo de manufatura colaborativo simples. As atividades a serem realizadas nesta etapa são apresentadas a seguir:

- Seleção de Recursos de manufatura para implementar os módulos projetados.
- Agrupamento de recursos para formar Hólons Operacionais Compostos.
- Concepção de Tarefas e Atividades com o sistema projetado.
- Concepção de operações básicas a serem realizadas com os recursos físicos.
- Implementação e programação de operações e tarefas para formar um processo completo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Conceitos Básicos**

A automação surge da substituição de operadores humanos em atividades de controle de máquinas e processos, empregando para isso diferentes elementos tecnológicos mecânicos e/ou eletrônicos para obter as informações necessárias (sensores), processá-las (elemento de decisão) e efetuar as ações calculadas sobre o processo (atuadores). O conceito de Automação é diferente do conceito de Automatização, esse último está ligado à realização de movimentos mecânicos e repetitivos dos atuadores sem levar em consideração informações do meio sobre o qual esses estão atuando (ação cega e sem capacidade de correção), portanto é sinônimo de mecanização. Na automação o sistema é capaz atuar levando em conta as informações dos sensores (realimentação) podendo então executar ações corretivas e aumentando a eficiência do processo, sendo assim capaz de se comportar como um operador humano (AIHARA, 2000). Atualmente as aplicações da automação não só estão focadas no setor industrial, mas também nos setores comercial, residencial e financeiro.

#### **2.1.1. Sistemas de Manufatura**

A automação assim definida aplicada ao setor de manufatura nas linhas de produção denomina-se Automação Industrial, sendo essa uma área multidisciplinar que envolve linguagens de programação (computação), plataforma de comando (eletrônica) e dispositivos de atuação (mecânica). A Automação Industrial pode ser dividida em três categorias segundo o volume de produção e a flexibilidade da linha de produção devida à informatização: rígida, flexível e programável (AIHARA, 2000). Os sistemas de manufatura envolvem atividades de produção de bens utilizando recursos de manufatura e conhecimento, levando em consideração demandas externas e sendo sujeitos ao contexto social e econômico.

Entre os elementos que constituem os Sistemas Automatizados além dos sensores e atuadores estão: os sistemas de transmissão e coleta de dados e aplicações de software para a programação do funcionamento do processo. A automação também pode proporcionar um fluxo

contínuo de informação entre os diferentes departamentos de uma empresa, requerendo a conectividade adequada entre esses; visando dessa forma uma maior produtividade e, sobretudo, uma maior flexibilidade (MARTINS, 1998) alcançando assim uma integração entre a gestão e a produção.

#### **2.1.1.1. Evolução dos Sistemas de Manufatura**

Devido à mudança de uma perspectiva econômica local para uma economia global, desde a última década do século XX os ambientes de manufatura também têm evoluído nas suas dimensões econômica, técnica e organizacional; fazendo com que as tendências na automação industrial tenham que se adaptar a uma necessidade de produção em pequenos e medianos lotes, com uma incrementada diferenciação de famílias de partes e/ou produtos, sendo esses quase customizados às necessidades de cada cliente e acrescentando também valor ao componente intangível dos produtos (software, serviços de ajuda incluídos, suporte on-line etc).

Dentro desse contexto, a aplicação e modernização da automação nas indústrias são para essas a única possibilidade de sobrevivência, fazendo com que os sistemas de manufatura se tornem mais eficientes (menor consumo de recursos energéticos, materiais, humanos e financeiros) e possibilitando um maior controle de qualidade, repetibilidade, velocidade na produção, facilidade de manipulação e alívio nas condições de trabalho dos operários, segurança, confiabilidade e produtividade do processo; melhorando assim a competitividade dos produtos manufaturados no mercado atual onde as exigências dos consumidores são cada vez mais importantes e os produtos são muito diferenciados e com um menor ciclo de vida (ARAUJO, 1997), (LEITÃO, 2009a).

#### **2.1.2. Sistemas Automatizados de Produção (SAP)**

Quando se aplica a Automação para transformar e modernizar os Sistemas de Produção a fim de automatizar não só tarefas ou processos individuais, mas conjuntos de processos integrados e, além disso, é associado um sistema de supervisão e controle ao sistema de manufatura surgem os SAP, como uma evolução dos Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS). Os SAP tiveram sua origem com o aparecimento da filosofia de Manufatura Integrada por Computador (CIM) a qual associa as atividades de supervisão e gestão à produção obtendo-se dessa forma uma maior

flexibilidade e produtividade do Sistema de Produção. Assim, em um SAP existe fluxo de produtos, energia, informações e matéria prima (BAFFI, 2001).

### 2.1.2.1. Arquitetura de um SAP

Visando uma padronização a IEC (International Electrotechnical Commission) estabeleceu uma nomenclatura internacional para a correta especificação dos Sistemas Automatizados (SA). A norma internacional IEC 61131-3 considera os SA compostos de duas partes (AIHARA, 2005), como se observa na Figura 1.

**Parte Operativa (PO):** Corresponde à parte física do sistema a automatizar, que opera sobre a matéria prima e o produto. Ela é constituída pelos atuadores (pistões, motores, bombas, etc) que realizam operações agindo sobre os materiais para transformá-los, transportá-los ou armazená-los.

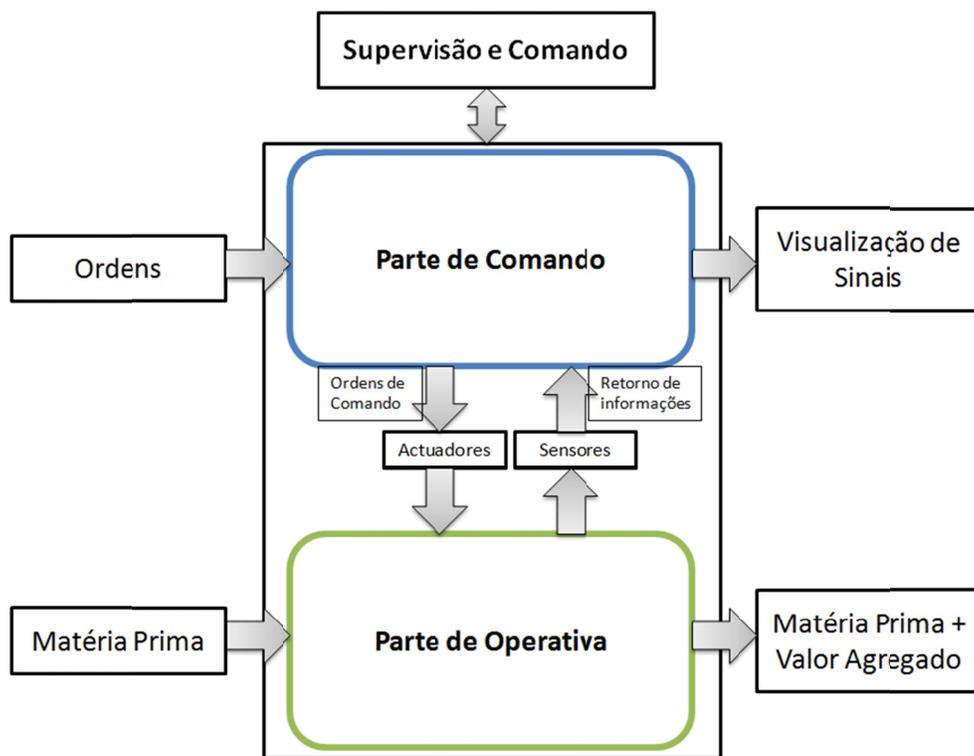


Figura 1. Arquitetura de Sistema Automatizado de Produção (SAP)

**Parte de comando (PC):** É a responsável pelo controle do sistema. Recebe as informações vindas do processo a ser controlado e/ou do operador, e as processa gerando sinais de aviso e enviando informações (Ordens de Comando) aos atuadores coordenando assim as ações da parte operativa (PO), (ROSARIO, 2005).

Levando-se em consideração que os sinais de saída de todos os sensores e os sinais de entrada que vão para todos os atuadores são conectados à parte de comando, pode se perceber a importância da comunicação de dados nos SA (MARTINS, 1998).

Os Sistemas Automatizados podem ser classificados como:

- **Automatismos Combinatórios:** O estado das saídas depende do estado atual das entradas;
- **Automatismos Sequenciais:** O estado das saídas além do estado atual das entradas no instante ( $t$ ) depende também do estado das entradas no instante ( $t-1$ ).

## 2.2. Sistemas de Controle de Manufatura

Um sistema de manufatura seria de pouca utilidade sem a presença de um sistema de supervisão e controle apropriado. Além disso, a confiabilidade, agilidade e o grau de flexibilidade de um sistema de manufatura não é só condicionado pela confiabilidade, agilidade e flexibilidade dos seus componentes mecatrônicos individuais (estações de trabalho, robôs, sistemas de transporte), mas depende fundamentalmente da confiabilidade e flexibilidade do sistema de controle associado (LEITÃO, 2009a).

O controle de manufatura está relacionado com o gerenciamento e controle das atividades físicas de manufatura, é direcionado a executar os planos provenientes da etapa de planejamento de manufatura e monitorar o progresso na elaboração do produto enquanto esse está sendo processado, montado, movimentado e inspecionado na fábrica. Os algoritmos dos sistemas de controle atendem a determinados critérios tais como: o que produzir, quanto tem que ser produzido, o prazo máximo para finalizar a produção, como e quando utilizar os recursos ou disponibilizá-los, quando programar trabalhos na fábrica e como realizar o sequenciamento dos mesmos (BAKER, 1998),(LEITAO, 2008).

### 2.2.1. Arquiteturas Tradicionais de Sistemas de Controle de Manufatura

Segundo Dilts (DILTS; BOYD; WHORMS, 1991) apud (LEITÃO, 2009a) há quatro arquiteturas bem conhecidas para sistemas de controle de manufatura:

- **Arquitetura centralizada:** Caracterizada por ter só um nó de decisão (planejamento e processamento de informação). Apresenta otimização no controle, mas baixa velocidade de resposta, não tolerância a falhas e difícil expansibilidade.
- **Arquitetura hierárquica:** Caracterizada pela existência de vários níveis de controle, permitindo a distribuição dos processos de decisão entre os diferentes níveis hierárquicos, introduzindo robustez, previsibilidade e eficiência. Porém a aparição de perturbações no sistema ainda reduz o rendimento do mesmo. Os sistemas hierárquicos garantem uma otimização na produção e fazem previsível o comportamento do sistema de manufatura (MONOSTORI; CSÁJI; KÁDÁR, 2004).
- **Arquitetura hierárquica modificada:** Essa arquitetura tenta melhorar a resposta aos distúrbios mantendo uma estrutura hierárquica, mas acrescentando interação entre módulos no mesmo nível hierárquico. A escalabilidade do sistema é também melhorada através da interação dentro do mesmo nível de controle.
- **Arquitetura heterárquica:** não existem relações fixas (cliente – servidor) entre os componentes, possibilitando assim uma alta robustez contra os distúrbios. Nesse caso a otimização global é reduzida já que as decisões são tomadas de forma local e autônoma sem levar em consideração uma visão global do sistema. A escalabilidade do sistema é facilitada só sendo necessário: modificação do funcionamento de alguns componentes e/ou adição de novos componentes ao sistema de controle (COLOMBO et al., 2004).

### 2.2.2. Abordagem Tradicional do Controle de Manufatura (Centralizado - Hierárquico)

Devido ao grande número de interações entre os diferentes componentes e à variedade de funções executadas, os sistemas de controle de manufatura são tradicionalmente implementados utilizando uma estrutura *Centralizada e/ou Hierárquica*, considerando os seguintes componentes: Planejamento, Agendamento de tarefas, Execução (encaminhamento, monitoramento, diagnóstico e recuperação desde um erro) e Controle de máquinas e dispositivos; cada um desses dentro de uma faixa de tempo específica desde semanas no planejamento até segundos no chão de fábrica.

Os planos de produção são encaminhados para o componente de agendamento de tarefas desde a etapa de planejamento de produção a qual tem um horizonte de dias ou semanas. A etapa de agendamento está relacionada com a assinação “ótima” de tarefas (ordens) aos recursos de manufatura, levando em consideração um critério específico (data ou prioridade de entrega) e um conjunto de restrições que representam: a capacidade de recursos existentes e a ordem na execução das tarefas. Essa etapa é um problema complexo de natureza combinatória e não polinomial (NP) que pode ser resolvido por métodos que vão desde heurísticas (Earliest Due Date – EDD, Shortest Processing Time – SPT) até técnicas computacionais de satisfação de restrições, como: técnicas de busca em vizinhanças e algoritmos genéticos.

A etapa de execução é relacionada com o cumprimento final da assinação das ordens aos recursos baseado no estado atual do sistema de manufatura e no plano de manufatura. O algoritmo de encaminhamento decide como utilizar um recurso de manufatura levando em conta somente a disponibilidade dos recursos físicos da fábrica (COURTOIS et al., 1999). A regra de expedição determina em qual tarefa o recurso de manufatura vai trabalhar a continuação, essa decisão de sequência está baseada na data de prazo da tarefa, prioridade do cliente, minimização de Set-Ups, processamento baseado em SPT (MOSHEIOV; ORON, 2004) ou qualquer outra possível regra ou heurística.

Um aspecto importante na operação da fábrica é possuir com um conhecimento on-line sobre o progresso dos planos de manufatura e o estado do processo, nesse sentido o componente de monitoramento proporciona essa informação e a envia para os componentes do nível superior, os quais, caso seja necessário, poderão reformular os seus planos. A execução dos planos de manufatura sempre está sujeita a perturbações as quais diminuem a produtividade do sistema (falhas nas máquinas, ausência de operadores, ordens para produzir mais depressa, demora dos fornecedores). Neste caso o sistema deve responder dinamicamente e rapidamente, executando uma ação corretiva de forma a completar as ordens de produção dentro do tempo programado minimizando assim o impacto dessas perturbações, por meio de uma reformulação de planos ou executando uma manutenção corretiva. Caso um erro seja detectado é necessário fazer um diagnóstico de forma a identificar a causa da falha ou das condições incertas de funcionamento; esse tratamento das perturbações durante a execução dos planos faz ao controle de manufatura um

problema complexo e interessante. O controle de máquinas e dispositivos é o nível mais baixo na hierarquia de controle envolvendo iniciação, coordenação e monitoramento das diferentes funções das máquinas (LEITÃO; RESTIVO, 2006).

### **2.2.3. Sistemas de Controle de Manufatura Distribuídos e Colaborativos**

A abordagem tradicional para o sistema de controle de manufatura baseado em uma estrutura centralizada e hierárquica apresenta boas características em termos de produtividade devido a sua capacidade intrínseca de otimização; contudo não satisfaz os requerimentos modernos de adaptação dinâmica às mudanças do ambiente (em termos de: flexibilidade, escalabilidade, agilidade e reconfigurabilidade), a qual na atualidade se constitui como a característica chave para a competitividade e sobrevivência das empresas (SHEN et al., 2006), (LEITÃO, 2009).

Os sistemas de manufatura inteligentes e distribuídos surgem como uma evolução e uma resposta às novas necessidades não satisfeitas completamente pelo conceito original e centralizado CIM, estando baseados no paradigma de Gestão da Manufatura Colaborativa (CMM) / Sistemas de Produção Colaborativo (CSAP). Esses sistemas além de melhorar as características anteriores (flexibilidade e possibilidade de integração) acrescentam agilidade, modularidade, tolerância a falhas, possibilidade de reutilização, interação entre componentes e gestão da rentabilidade aos Sistemas de Produção. Desta forma os CSAP podem atingir os objetivos globais e locais de manufatura, baseados em uma estrutura já não hierárquica, mas *Heterárquica*.

Esta nova abordagem está baseada no desenvolvimento e integração de tecnologias emergentes como: Controle orientado a objetos, Inteligência Artificial e Mecatrônica, Figura 2. As características de controle e arquitetura modular, distribuída e descentralizada destes CSAP exigem também a implementação de capacidades de coordenação e controle locais e remotas. (COLOMBO et al., 2004).

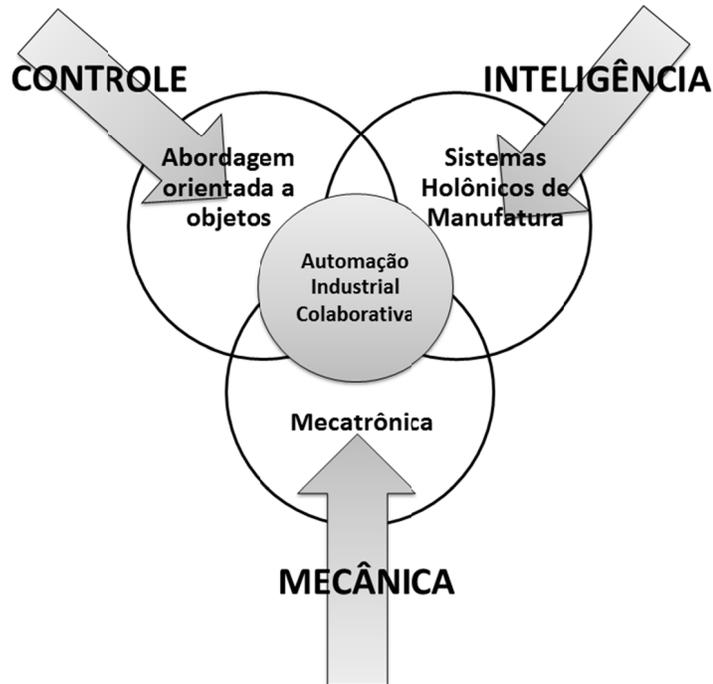


Figura 2. Conceito de Automação Industrial Colaborativa

Associados a esse conceito aparecem os sistemas de controle de manufatura inteligentes e distribuídos (Figura 3), os quais apresentam redundância de funções e responsabilidades (MONOSTORI; VÁNCZA; KUMARA, 2006) e cujo funcionamento é baseado em atividades paralelas e distribuídas realizadas por entidades ou unidades autônomas. Esses sistemas possuem as seguintes características:

- Usando uma abordagem distribuída um problema complexo pode ser dividido em vários problemas simples, cada um deles desenvolvido dentro de um módulo ou unidade de controle.
- Cada unidade de controle é autônoma, tendo os seus próprios objetivos, conhecimentos e competências e encapsulando funções inteligentes, sem possuir um conhecimento geral do sistema.
- As decisões de controle global (agendamento, monitoramento e diagnóstico) são determinadas por um conjunto de unidades de controle que interatuam de forma colaborativa;
- Algumas das unidades de controle podem estar conectadas a dispositivos físicos como robôs ou máquinas CNC.
- As unidades de controle devem exibir características tais como: reconfigurabilidade, robustez, plugabilidade, aprendizado e reusabilidade (LEITÃO, 2009a).

Ao introduzir técnicas de inteligência artificial os sistemas inteligentes e distribuídos adquirem a capacidade de se adaptar rápida e apropriadamente às emergências ou imprevistos sem necessidade de intervenção externa. Atualmente existem duas abordagens que exemplificam esse conceito: os sistemas de controle baseados em agentes e os sistemas holônicos, considerando-se os agentes como uma tecnologia e os sistemas holônicos como uma metodologia de implementação desta tecnologia (SHEN et al., 2006).

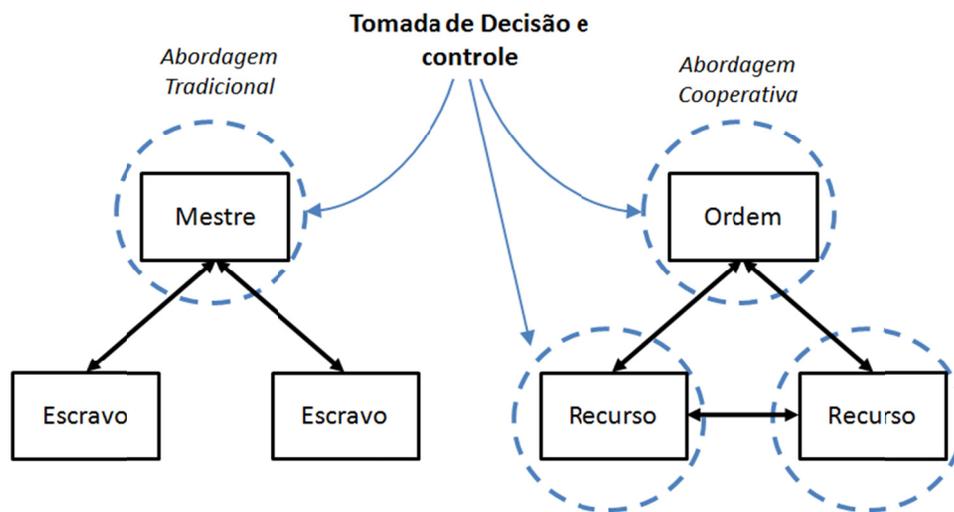


Figura 3. Abordagens tradicional e distribuída para a tomada de decisões no sistema de controle de manufatura (MARIK, 2005 apud LEITÃO, 2008)

### 2.2.3.1. Definição de Agente

É um componente de software autônomo que atua num ambiente dinâmico e que pode representar um objeto lógico ou físico dentro do sistema, o qual é capaz de atuar de forma a atingir os seus objetivos particulares, podendo também interagir com outros agentes quando o mesmo não possui nem o conhecimento nem as capacidades para alcançar seus objetivos por si só (MONOSTORI; VÁNCZA; KUMARA, 2006), (LEITÃO, 2009a). Segundo Shen (2001 apud (SHEN et al., 2006) as características mais importantes de um agente de manufatura são: *Autonomia, Pro-atividade, Adaptação e Cooperação.*

### 2.2.4. Sistemas de Controle de Manufatura baseados em Agentes

Estes sistemas (Sistema Multi Agentes – MAS) derivam do conceito de Inteligência Artificial Distribuída (DAI), um MAS pode ser definido como um conjunto de agentes

representando recursos de um sistema de manufatura (SHEN et al., 2006), sendo organizados através de uma arquitetura heterárquica caracterizada por um alto nível de *Autonomia* e *Coordenação*. A coordenação necessária para os agentes colaborar e/ou cooperar entre si, requer um fluxo de informação regulado entre os agentes e seu ambiente. Essa Comunicação entre os agentes a qual é um requerimento constante nesses sistemas pode ser indireta (utilizando o ambiente) ou direta (troca de informações entre agentes específicos) através de uma linguagem com uma sintaxe e semântica determinadas (MONOSTORI; VÁNCZA; KUMARA, 2006). Estes sistemas de controle apresentam facilidade para serem expandidos, sendo necessário somente modificar o funcionamento de alguns agentes ou acrescentar novos agentes ao sistema de controle (LEITÃO, 2009a).

Em um ambiente volátil e dinâmico onde é impossível prever os eventos futuros, os agentes devem aprender a adaptar o seu comportamento para melhorar assim seu rendimento, essas capacidades de aprendizado contribuem à inteligência do agente de forma a esse adquirir novos conhecimentos e habilidades, as quais poderá usar no futuro para funcionar de uma forma mais apropriada. Os sistemas baseados em multiagentes têm sido muito utilizados em sistemas de transporte, telecomunicação e saúde além da sua aplicação em manufatura (MONOSTORI; VÁNCZA; KUMARA, 2006), (AGENTLINK, 2005 apud LEITÃO, 2008). No campo da manufatura um agente pode representar tanto um recurso físico (máquinas CNC, robôs ou produtos) quanto uma entidade lógica como uma ordem. Utilizando algoritmos de controle distribuído adequados os agentes representando produtos ou máquinas podem tomar decisões de manufatura próprias relacionadas com a alocação e coordenação de recursos utilizando uma espécie de “negociação automática”.

### **2.2.5. Sistemas de Controle de Manufatura Inteligentes (IMS)**

Na década dos noventa, na área de controle de manufatura aparecem os IMS (Sistemas de Controle de Manufatura Inteligentes) dentro da qual por sua vez podem se encontrar diferentes abordagens dependendo de como sejam consideradas as unidades de controle; assim existem os sistemas de manufatura biônicos (Bionic Manufacturing Systems – BMS) inspirados na biologia (OKINO, 1993), sistemas de manufatura fractais (Fractal Manufacturing Systems – FMS) inspirados na matemática (WARNECKE, 1997) e sistemas de manufatura holônicos (Holonics)

Manufacturing Systems – HMS) inspirados nas organizações sociais (VAN BRUSSEL et al., 1998).

### 2.2.5.1. Definição de Hólon

Um hólon é um módulo *autônomo*, mas com capacidade de *cooperação* quando integrado para formar (construir ou integrar) um sistema de controle de manufatura. Cada hólon pode representar um componente de manufatura que pode ser físico (máquinas de Controle Numérico Computadorizado - CNC, robôs, produtos, sistemas flexíveis de manufatura, humanos) ou uma entidade lógica (ordem etc.). Um hólon (Figura 4) está formado por um componente de processamento de informação e também por um componente físico (recurso físico) quando representa um dispositivo real. Um hólon também pode ser parte de outro hólon (VAN BRUSSEL et al, 1998) contribuindo com seu funcionamento local aos objetivos globais de controle (LEITÃO; COLOMBO; RESTIVO, 2006).

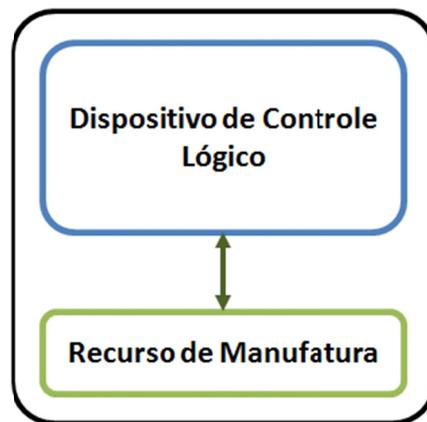


Figura 4. Estrutura do Hólon Simples Genérico

### 2.2.6. Sistemas de Controle de Manufatura Híbridos - Holônicos (HMS)

Os Sistemas de controle de Manufatura Holônicos (HMS) têm uma estrutura não centralizada que faz com que os CSAP possuam uma grande modularidade (hardware - software), isso permite tanto a Autonomia quanto a Cooperação entre os distintos hólons, os quais são controlados de forma distribuída, essas características são exibidas na arquitetura holônica genérica PROSA (VAN BRUSSEL et al., 1998). O paradigma HMS tem sua origem nos estudos de Arthur Koesler sobre as organizações sociais dos seres vivos (KOESLER, 1969 apud LEITÃO, 2008), assim foi proposta a palavra hólon para representar unidades que podem apresentar um

comportamento híbrido (autônomo – cooperativo), podendo ser consideradas tanto como partes quanto como um todo (PANESCU; VARVARA, 2009). Levando em consideração esses hólons, os HMSs possuem capacidades de autoconfiguração e facilidades de ampliação e modificação. No entanto, dentro desses sistemas também tem que ser desenvolvida uma hierarquia que possa garantir a ausência de conflitos na relação entre os hólons, mantendo a coerência e a objetividade geral do sistema. LEITÃO, 2009a)

A arquitetura dos sistemas de manufatura holônicos responde ao conceito de *Holarquia*, definida como um sistema de hólons organizados em uma estrutura hierárquica, podendo cooperar entre si para alcançar os objetivos globais do sistema, combinando os conhecimentos e habilidades dos hólons individuais (a holarquia é uma arquitetura entre a heterarquia e a hierarquia); cada holarquia tem regras e diretivas fixas. Ao contrário de uma hierarquia tradicional, em uma holarquia um hólón pode pertencer simultaneamente a mais de uma hierarquia (ESMAEILI; MOZAYANI; JAHED MOTLAGH, 2014), assim as arquiteturas holônicas podem conter hierarquias temporais e permanentes. Assim um hólón embora integrado em uma holarquia não perde sua autonomia nem individualidade. Assim sendo, um HMS pode ser definido como uma holarquia na qual as atividades dos hólons são determinadas através da cooperação entre eles e não por um mecanismo centralizado.

Desta forma, os sistemas de controle de manufatura HMS combinam a adaptação aos imprevistos (distúrbios) do controle heterárquico e a previsibilidade e alto desempenho do controle hierárquico (BONGAERTS, 1998 apud LEITÃO, 2008), (VARVARA, 2014). Levando isso em conta, os HMS refletem uma reconfigurabilidade e agilidade fundamentada em um funcionamento de abaixo para cima (Bottom-Up), no qual o controle de manufatura é desenvolvido através da integração de componentes de manufatura autônomos (hólons), facilitando também a depuração e manutenção do sistema, nos HMSs é necessário desenvolver independentemente cada hólón de controle e também a interação entre eles. Em contraste, o funcionamento convencional de acima para abaixo (Up-Bottom) centraliza as tarefas de planejamento, agendamento de tarefas e controle.

A robustez do sistema é baseada na distribuição, não estando o controle centralizado em um só elemento a perda de um desses não significa na inoperabilidade, parada ou reinício do sistema, dessa forma a produção pode ser reorganizada mesmo utilizando componentes diferentes. Além disso, é possível também adicionar, subtrair ou modificar facilmente módulos de hardware e software enquanto o sistema continua funcionando.

### **2.2.6.1. Comparação entre os modelos Baseados em Agentes e HMS**

Embora esses dois paradigmas levam em consideração os conceitos de Autonomia e Cooperação através da descentralização das entidades e as funções, podem ser destacadas três grandes diferenças entre eles, as quais são descritas a seguir:

Levando em consideração sua origem os agentes surgiram na ciência da computação especificamente na inteligência artificial (AI) e os hólons na manufatura integrada por computador (CIM) e os sistemas flexíveis de manufatura. Em termos conceituais um hólón pode ser composto de outros hólons enquanto um agente não. Desde uma perspectiva de capacidade de representação, os agentes representam componentes de software não estando focados na integração com dispositivos físicos, enquanto os hólons permitem essa integração para representar dispositivos industriais, podendo-se então considerar um hólón como um agente que pode acrescentar uma conexão com um dispositivo físico e, portanto, também pode satisfazer restrições “on-line” de forma a alcançar um funcionamento fiável do sistema de manufatura. A Figura 5 mostra tanto a comunicação dentro de um sistema de controle de manufatura holônico quanto a utilização da tecnologia de agentes no desenvolvimento da parte lógica dos hólons.

Uma das arquiteturas propostas na literatura de modo a exemplificar a abordagem HMS é a arquitetura colaborativa ADACOR (ADaptive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems) (LEITÃO; RESTIVO, 2006) a qual é descrita a seguir.

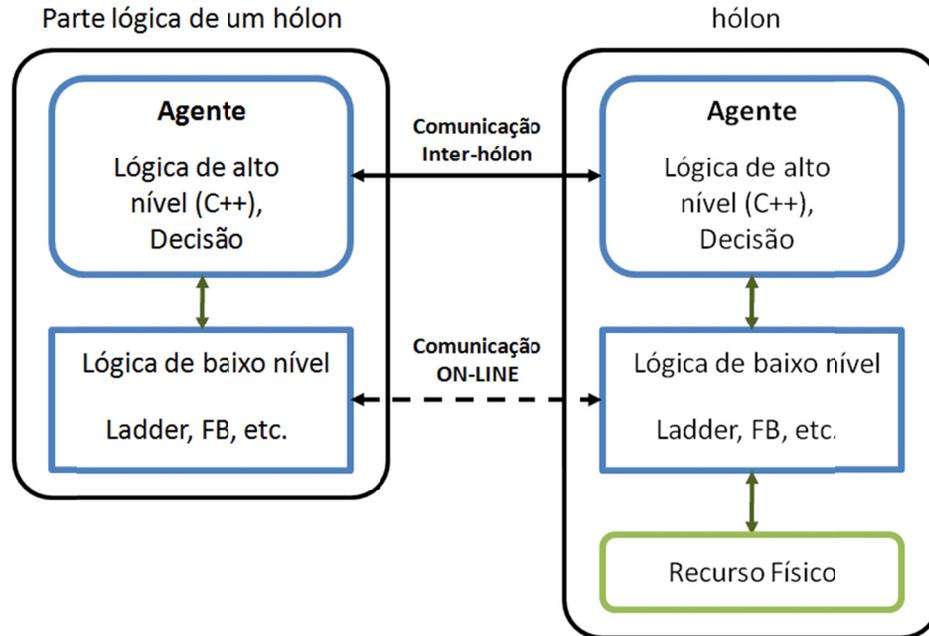


Figura 5. Níveis Lógicos de Decisão dentro de um hólón

### 2.3. Arquitetura de Controle Híbrida – Holônica ADACOR

Um CSAP com arquitetura ADACOR organiza a utilização dos seus módulos-hólons sincronizando a utilização de recursos, sendo dinamicamente reconfigurável e, portanto, capaz de produzir um grande número de produtos e/ou famílias de peças com mínimo esforço na mudança dos seus componentes físicos (flexibilidade). Dessa forma um CSAP / ADACOR poderá se adaptar facilmente a um ambiente industrial estocástico, caracterizado pela ocorrência frequente de perturbações inesperadas (LEITÃO; COLOMBO; RESTIVO, 2005). A arquitetura de controle colaborativa ADACOR foi proposta, desenvolvida e implementada no Instituto Politécnico de Bragança (Portugal).

A arquitetura ADACOR adiciona o hólón de supervisão e controle, e os elementos de auto-organização e capacidade de aprendizado à arquitetura holônica genérica PROSA (VAN BRUSSEL et al., 1998), (MONOSTORI; VÁNCZA; KUMARA, 2006), (LEITÃO, 2009a). O hólón de supervisão introduz coordenação, formação de grupos e otimização, definindo dessa forma na sua arquitetura quatro classes com o intuito de criar objetos (hólons): Hólón de Produto

(HP), Hólon de Tarefa (HT), Hólon Operacional (HO) e Hólon Supervisor (HS), esse último introduz cooperação e otimização global dentro do controle descentralizado (PASCAL; PANESCU, 2014). A evolução e posicionamento da arquitetura ADACOR dentro das arquiteturas de controle de manufatura é apresentada na Figura 6.

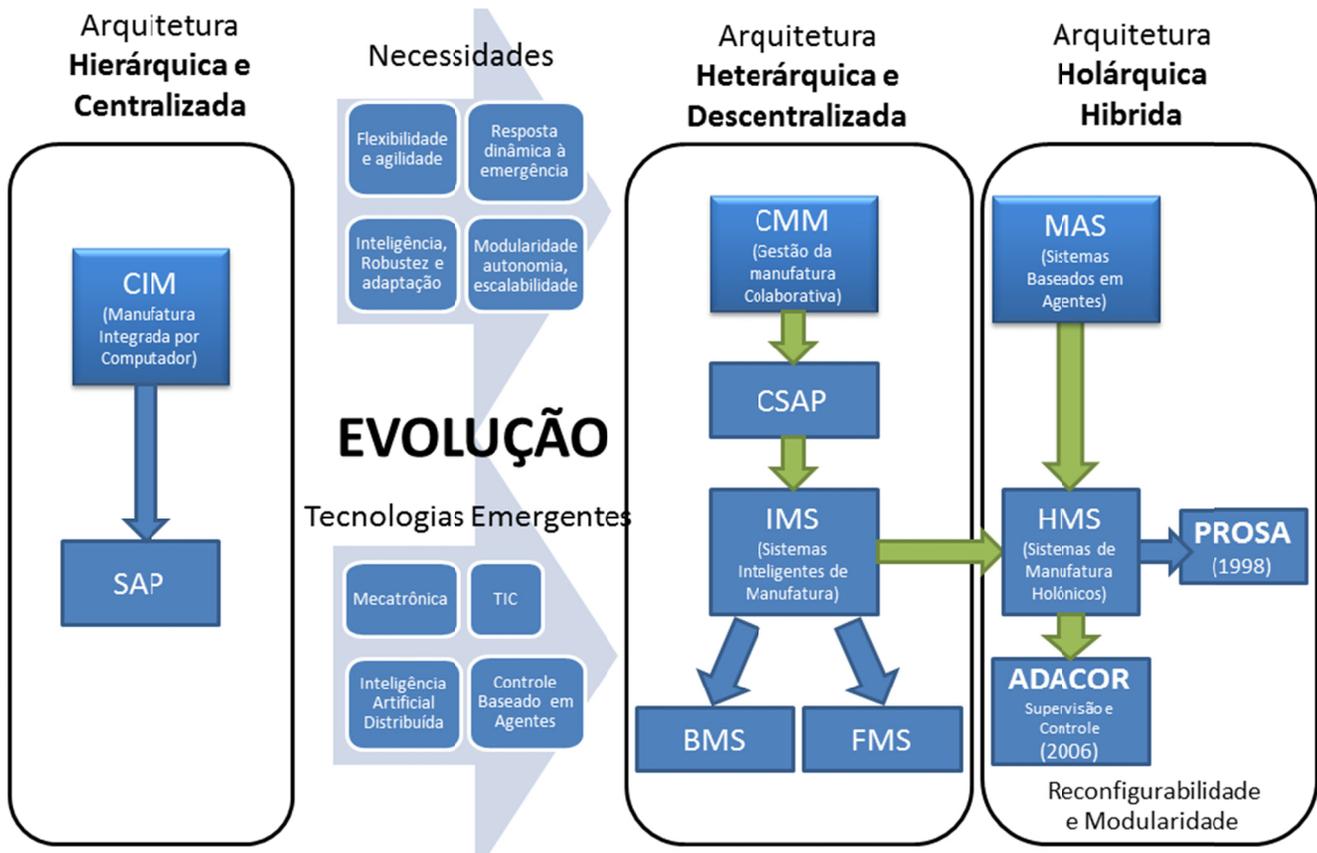


Figura 6. Evolucao das Arquiteturas para o Controle de Manufatura

Os CSAP / ADACOR não são completamente descentralizados nem hierárquicos, mas possuem um equilíbrio dinâmico entre a centralização e a total distribuição. Esses sistemas podem mudar seu estado entre estacionário ou transiente dependendo da aparição de perturbações, em cujo caso a sua arquitetura vai se tornar heterárquica enquanto o sistema voltar a seu estado original, se adaptando assim às perturbações de um ambiente volátil. Uma arquitetura ADACOR faz com que o sistema permita uma fácil e rápida integração de qualquer novo dispositivo assim como a melhora de hólons existentes, sem ter que reiniciar ou reprogramar o processo completo.

significando em uma maior flexibilidade e reconfigurabilidade do sistema projetado (LEITÃO; COLOMBO; RESTIVO, 2005), (COLOMBO et al., 2004).

### 2.3.1. Níveis na Arquitetura ADACOR

Nesta arquitetura proposta são considerados quatro níveis, de forma ascendente estes são:

- a) Nível operacional com o Hólon Operacional (HO).
- b) Nível de coordenação com o Hólon de Supervisão (HS).
- c) Nível de Gerenciamento considerando o Hólon de Tarefa (HT).
- d) Nível de Planejamento considerando o Hólon de Produto (HP), (ver Figura 7).

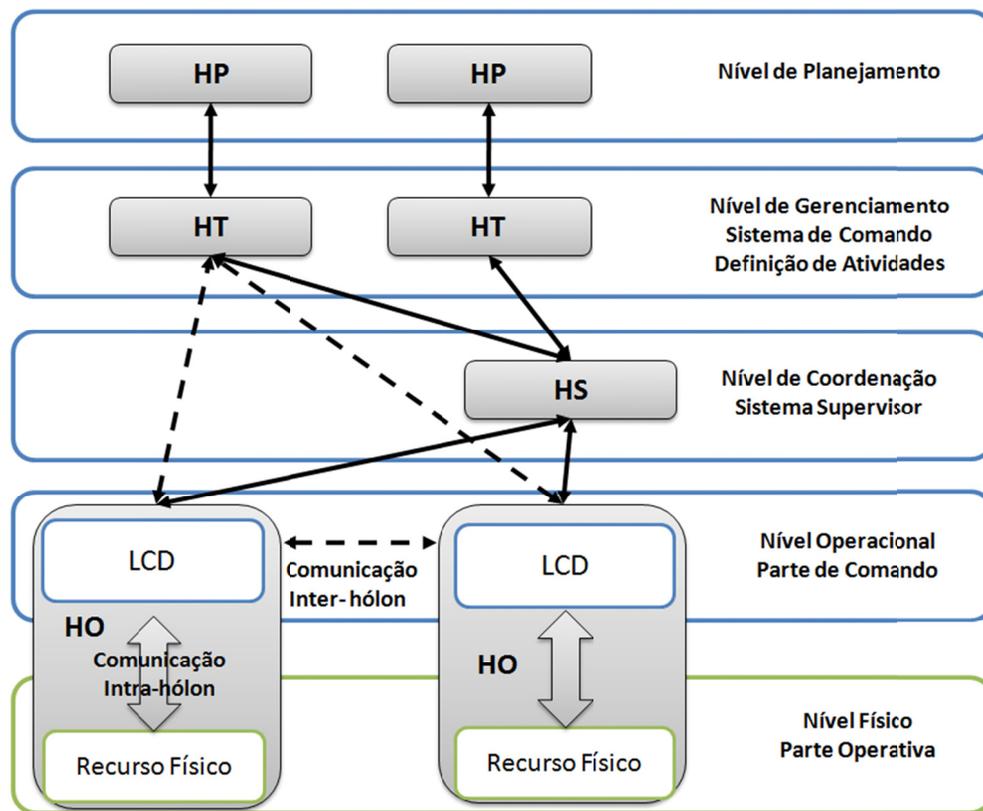


Figura 7. Níveis da Arquitetura ADACOR

### 2.3.2. Níveis Físico e Operacional - Hólon Operacional (HO)

Um hólon operacional ADACOR (ver Figura 8) é composto de:

- **Dispositivo Lógico de Controle (LCD):** É o responsável pelas atividades do hólon e é formado por três componentes principais: Decisão (DecC), Comunicação (ComC) e Interface Física (PIC).

- **Recurso Físico:** Caso exista um recurso físico, esse deverá ser capaz de executar tarefas de manufatura (LEITÃO; COLOMBO; RESTIVO, 2004).

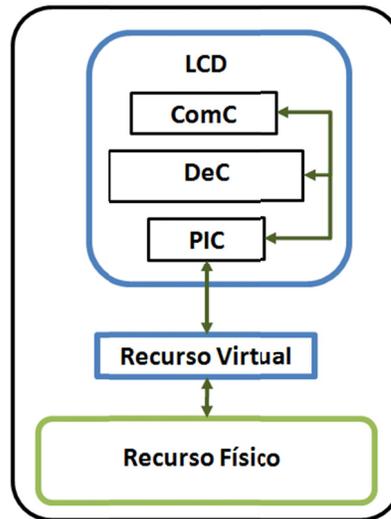


Figura 8. Estrutura de um Hólon Operacional Simples

Dentro dessa estrutura heterárquica cada LCD se comunica diretamente com seu recurso físico por meio da denominada *Comunicação Intra-Hólon*, a qual permite o movimento bidirecional de informação desde os sensores até o LCD e desde o LCD até os atuadores do hólon.

Cada hólon operativo (HO) simples tem uma vista parcial do sistema, e por sua vez esses podem trabalhar cooperativamente entre si ao serem integrados para formar *HO Compostos* através de uma interface de rede, sendo comandados pelo módulo de supervisão e comando. O HS junto com o HT gerenciará as ações de cada hólon de forma a desenvolver um processo completo de classificação, montagem, inspeção e movimentação de produtos, atingindo assim os objetivos globais do sistema.

### 2.3.3. Nível de Coordenação - Hólon de Supervisão (HS)

O Hólon de Supervisão é formado pelo *Módulo – Sistema de Supervisão* responsável pela coordenação, comunicação e funcionamento dos HOs no sentido de cumprir os objetivos globais de produção quando o sistema é integrado em uma arquitetura de controle centralizada (modo normal). Ao mesmo tempo, o HS vai organizar e apresentar para um operador humano informações importantes que de outra forma seria difícil de conhecer, referentes ao estado atual de certas variáveis fornecidas pelos hólons operacionais. Caso o sistema for obrigado para trabalhar

sem o supervisor devido a uma falha, cada um dos LCD terá que tomar conta do seu recurso físico comunicando-se entre si sem ajuda do sistema de supervisão (HS).

O HS atua simultaneamente como um servidor e um cliente, como um servidor fornecendo informações solicitadas pelos hólons operacionais e como um cliente recebendo as informações do seu módulo associado de controle de qualidade e posicionamento, para determinar a rotina que o hólón operacional de movimentação deve executar.

#### **2.3.4. Nível de Gerenciamento - Hólón de Tarefa (HT)**

Este sistema permite uma interatividade entre o processo e um operador humano, de forma que esse último possa comandar a execução de determinadas operações e determinar o tipo de produto que o sistema deve montar. Cada ordem de manufatura gerada automaticamente (pelo hólón de produto) ou introduzida por um operador humano para a manufatura de certo tipo de produto é representada por um hólón de tarefa (HT), o qual será responsável pelo comando e execução dessa ordem; este hólón compreende as seguintes partes: decomposição da ordem, planejamento da alocação de recursos e execução da alocação de recursos.

Nesse sentido, o hólón de tarefa determina primeiro a operação de manufatura a ser realizada interagindo com o hólón de supervisão e o hólón operacional, e depois comanda a execução dessa operação de acordo com as informações recebidas desses hólons (HS e HO). No modo normal de funcionamento o HT interatua diretamente com HS e este por sua vez com os HOs.

#### **2.3.5. Nível de Planejamento – Hólón de Produto (HP)**

O hólón de Produto é o responsável pelos planos de manufatura para produzir um produto determinado, cada produto a ser montado no sistema de manufatura é representado por um hólón de produto. O HP recebe um requerimento para fazer um produto, e levando em consideração a disponibilidade de peças ou matérias-primas encontra ou gera o plano de manufatura do produto, finalmente envia as ordens (de alto nível) desse plano para o hólón de tarefa.

Dentro de um sistema de manufatura podem existir simultaneamente vários HPs, permitindo assim um funcionamento concorrente e um aproveitamento dos recursos de manufatura (LEITÃO; COLOMBO; RESTIVO, 2003).

### **2.3.6. Comunicação Inter-Hólon entre os LCD**

Com o intuito de comunicar os dois hólons entre si é projetada uma conexão em rede entre os LCD, assim em um modo de funcionamento normal e integrado, esses se comunicam através do hólon de supervisão enviando e recebendo informação. Em um modo de funcionamento gerado por uma perturbação (falha) externa que impossibilite a comunicação com o hólon de supervisão (HS), os HOs poderão continuar funcionando nesse estado transiente comandados pelo hólon de Tarefa (HT). Nesse caso, (que deve demorar muito pouco tempo) a comunicação inter-hólon ainda permitirá a transferência de informação entre os hólons operacionais de forma a esses cooperar entre si permitindo que o agendamento de manufatura seja realizado de forma distribuída até o sistema se recuperar da perturbação.

## **2.4. Conclusões do Capítulo**

Devido à mudança de uma perspectiva econômica local para uma economia global, desde a última década do século XX os sistemas de manufatura também têm evoluído nas suas dimensões econômica, técnica e organizacional; devendo responder dinamicamente com flexibilidade e agilidade às mudanças e perturbações do ambiente de atuação mantendo a produtividade e qualidade. Esta confiabilidade, agilidade e flexibilidade do sistema de manufatura não é só condicionada pela confiabilidade, agilidade e flexibilidade dos seus componentes mecânicos individuais, mas depende fundamentalmente da confiabilidade e flexibilidade do sistema de controle associado.

O sistema de controle de manufatura deve responder dinamicamente e rapidamente aos imprevistos, executando uma ação corretiva de forma a completar as ordens de produção dentro do tempo programado minimizando assim o impacto dessas perturbações, por meio de uma reformulação dos planos de manufatura. Esses sistemas de controle de manufatura precisam ser desenvolvidos dentro de arquiteturas descentralizadas como as baseadas em agentes e hólons que

possam garantir um comportamento *inteligente e distribuído* do sistema associado. Os algoritmos utilizados nesses sistemas de controle atendem a critérios tais como: o que produzir, quanto tem que ser produzido, o prazo máximo para finalizar a produção, como e quando utilizar os recursos ou disponibilizá-los, quando programar trabalhos na fábrica e como realizar o sequenciamento dos mesmos.

Os sistemas de controle baseados em agentes estão relacionados com os sistemas holônicos, considerando-se os agentes como uma tecnologia e os sistemas holônicos como uma metodologia de implementação dessa tecnologia. A coordenação necessária para os agentes colaborar e/ou cooperar entre si, requer um fluxo de informação regulado entre os agentes e o seu ambiente. Essa Comunicação entre os agentes a qual é um requerimento constante nesses sistemas pode ser ou direta através de uma linguagem com uma sintaxe e semântica determinadas. Levando em consideração esses hólons, os HMSs possuem capacidades de autoconfiguração e facilidades de ampliação e modificação. No entanto, dentro desses sistemas também tem que ser desenvolvida uma hierarquia que possa garantir a ausência de conflitos na relação entre os hólons, mantendo a coerência e a objetividade geral do sistema.

Dessa forma, os sistemas de controle de manufatura HMS combinam a adaptação aos imprevistos (distúrbios) do controle heterárquico e a previsibilidade e alto desempenho do controle hierárquico.

### 3. ABORDAGENS DO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO E CONCEPÇÃO DA ESTRATÉGIA PROPOSTA

#### 3.1. Posicionamento do problema de Planejamento Dinâmico da Produção

Na atualidade este problema constitui uma das aplicações dos Sistema Inteligentes de Manufatura (IMS), descritos na secção 2.2.5, especificamente dos sistemas Multi Agentes (MAS), outros domínios onde os MAS podem ser utilizados são: Projeto de Engenharia, Planejamento de Processos, Planejamento da produção e alocação de recursos e implementação de sistemas holônicos (Figura 9).

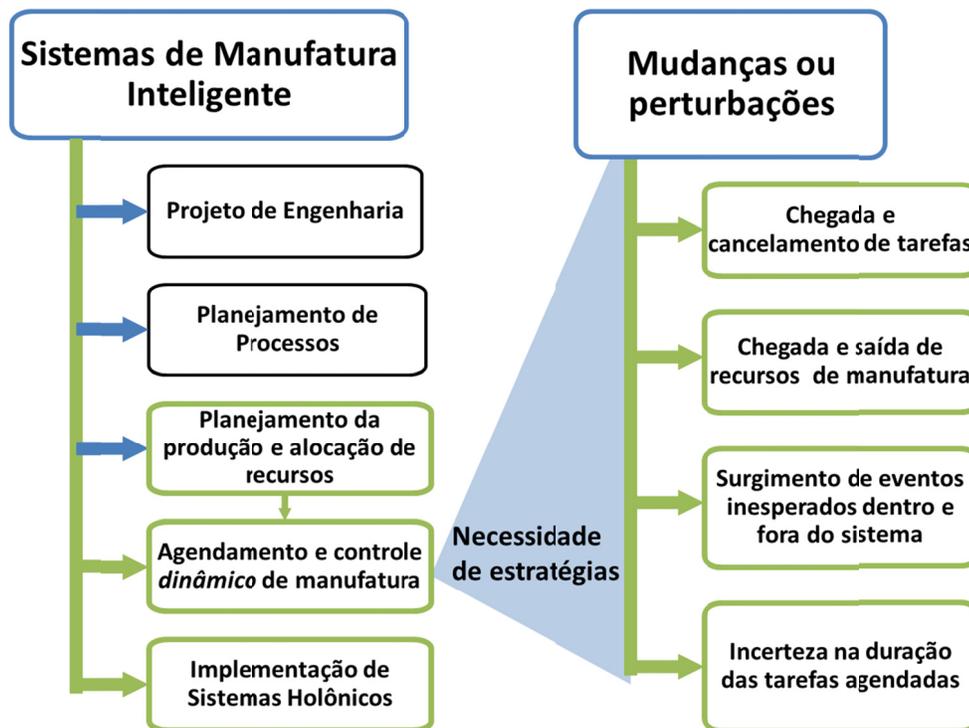


Figura 9. Controle Dinâmico de Manufatura

#### 3.1.1. Planejamento Inicial da produção e alocação de recursos

Nesta etapa, realizada pelo hólón de Produto (HP), no nível de planejamento, as operações a serem realizadas com o intuito de obter o produto final são identificadas e colocadas numa matriz chamada Matriz de Incidência do PFA (Production Flow Analysis). Nessa matriz as linhas representam as máquinas ou recursos de manufatura disponíveis e as colunas representam as peças a serem fabricadas. Dessa forma é possível aplicar um método de agrupamento para

“organizar” as operações dentro da matriz de incidência e assim identificar as possíveis células de manufatura ou HO compostos no chão de fábrica do sistema de produção. O algoritmo de agrupamento ou clustering utilizado para nesta estratégia proposta é o algoritmo ROC (Rank Order Clustering) (KING, 1980).

Nesta etapa é muito importante levar em consideração que mesmo obtendo uma organização das atividades que pode refletir na formação de células de manufatura, não é obtida uma sequência dessas operações ou plano de trabalho que sugira uma forma de fabricar o produto desejado. Na Figura 18 é apresentado o processo para a obtenção das células de manufatura partindo da matriz de incidência original e aplicando o algoritmo ROC para implementar o processo de *Clustering*.

### **3.1.2. Problema de Agendamento de tarefas (JSP)**

Depois da etapa de planejamento e alocação de recursos é preciso então calcular a sequência das operações necessárias dentro de cada uma das células para fabricar o produto, isso é obter o plano de manufatura. Na abordagem tradicional do controle de manufatura esses planos são encaminhados sem modificações para o componente de agendamento de tarefas.

O problema de agendamento de tarefas no chão de fábrica (Job Shop Shedulling Problem – JSP) surge nos sistemas de controle de manufatura e é descrito a seguir: tendo  $n$  trabalhos para serem processadas por  $m$  máquinas, o processamento de um trabalho em uma máquina é chamado de *Operação ou Subprocesso*, cada máquina somente pode processar uma operação por vez (restrição de capacidade) e cada operação tem que ser processada pelo menos por uma máquina no tempo (restrição disjuntiva). Assim, cada trabalho é completado através de uma sequência de operações (possíveis planos de processamento), esta sequência determina as restrições de precedência das operações. Já que os objetivos da programação de tarefas podem complexos e muitas vezes conflitantes, é desejável calcular uma programação de forma a maximizar ou minimizar alguma medida de rendimento  $f$  que usualmente é uma função dos tempos de realização (máximo tempo de conclusão, tempo médio de fluxo, atraso médio, número de operações tardias, etc) (BRENNAN; NORRIE, 2003), dessa forma o JSP pode ser considerado um problema de otimização.

O JSP é na maioria de casos um problema do tipo NP – difícil, o que significa que não existe um algoritmo em tempo polinomial que sempre forneça a solução ótima do problema. Já que não se tem acesso à informação global não é possível garantir uma otimização, contudo adicionar um componente de aprendizado aos agentes dá a oportunidade a esses para alcançar uma otimização global do sistema. Em Monostori (2004) é proposta uma arquitetura de aprendizado neurodinâmico de três níveis.

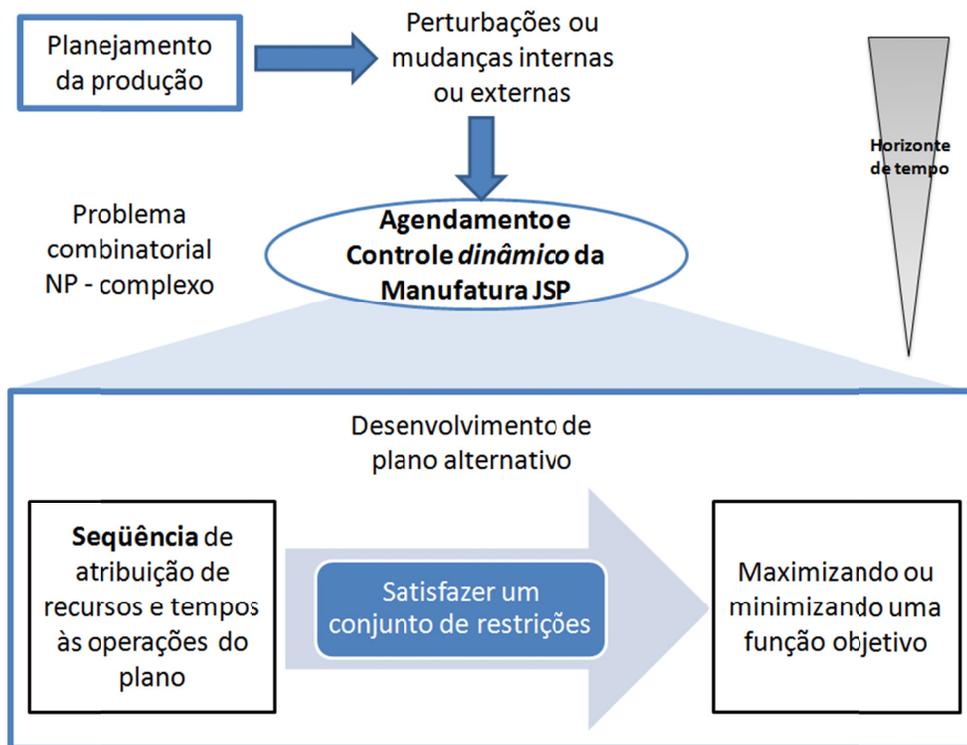


Figura 10. Processo de Agendamento Dinâmico da Manufatura

### 3.1.3. Abordagens Atuais para Solução do Agendamento Dinâmico de Manufatura

Em (JIMENEZ et al., 2013) é apresentado o método analítico OR/HMS para obter uma solução quase ótima para o problema de agendamento de tarefas, onde são discutidas quatro aproximações que podem ser utilizadas para desenvolver planos de manufatura. Embora esses métodos possam obter resultados quando a arquitetura do sistema é altamente centralizada, não permitem lidar muito bem com a ocorrência de perturbações em ambientes altamente dinâmicos. Na atualidade a possibilidade de utilizar arquiteturas de tipo híbridas (centralizadas – descentralizadas) para conseguir sistemas de manufatura dinâmicos que possam reconfigurar rapidamente seus hólons é um tema de constante investigação. O trabalho descrito em (LEITÃO;

BARBOSA, 2014) utiliza técnicas de inteligência de enxame para atingir flexibilidade e escalabilidade em sistemas compostos por um número grande de agentes (hólons).

### **3.1.3.1. Market – Based Resource Allocation**

É um algoritmo de negociação utilizado para gerar uma programação por meio de um processo iterativo com ciclos de anúncio – oferta – prêmio (announce-bid-award). O agente ordem anuncia as operações a serem executadas uma de cada vez, a seguir também anuncia a plano de processo associado à ordem. Levando isso em consideração os agentes recurso elaboram e apresentam ofertas de acordo ao estado das suas variáveis locais, essas ofertas são avaliadas respeito a diferentes critérios (tempo, energia), ainda o peso de cada um desses critérios pode ser modificado obtendo-se diferentes estratégias de coordenação e controle.

A abordagem baseada em agentes tem sido adequada para solucionar o problema de agendamento (BABICEANU; CHEN, 2006), (CARIDI; CAVALIERI, 2004). Nos quais a utilização de agentes permite lidar com a coordenação - cooperação e a resolução de conflitos, podem-se estudar duas técnicas: técnicas baseadas em mercado (Market – Based Techniques) e stigmergia (MONOSTORI; CSÁJI; KÁDÁR, 2004).

### **3.1.4. Abordagens do Planejamento da Produção Utilizando Agentes e Hólons**

Uma das aplicações da tecnologia de agentes nos sistemas de manufatura é sua implementação em problemas relacionados com o agendamento e controle da produção (MONOSTORI; CSÁJI; KÁDÁR, 2004) como solução às necessidades atuais dos sistemas de produção e acrescentando adaptabilidade e capacidade de aprendizagem aos sistemas para esses modificarem seu funcionamento de acordo com os requerimentos. O processo de agendamento e controle da produção consiste na seleção de um entre diferentes planos “alternativos” de manufatura quando aparece uma perturbação ou uma mudança, e na atribuição de recursos e tempos às atividades do plano selecionado. O controle de manufatura pode ser considerado em dois níveis (alto e baixo); no nível alto está relacionado com a coordenação dos recursos de manufatura disponíveis de forma a fabricar os produtos requeridos. No nível baixo é executado dentro de cada recurso de forma a esse executar as atividades programadas.

Nos sistemas de controle baseados em multiagentes existe tanto uma micro-interação quanto uma macro-interação, a micro interação é utilizada para coordenar um número reduzido de agentes de forma a resolver subproblemas, enquanto a macro-interação coordena as soluções parciais para garantir que as decisões individuais de cada agente sejam sinérgicas e não destrutivas.

### **3.1.5. Aplicações do Planejamento da Produção Baseado em Agentes e Sistemas Holônicos**

As primeiras aplicações que introduziram os conceitos de controle baseado em agentes começaram com (DUFFIE; PIPER, 1986) os quais utilizaram uma estrutura heterárquica, utilizando agentes para representar recursos físicos, partes ou operadores humanos, Sadeh (SADEH, 1989) utilizou técnicas micro-oportunistas e busca heurística com restrições para solucionar o problema de agendamento de atividades, Lin (LIN; SOLBERG, 1992) utiliza um modelo de controle baseado em mercado para implementar a alocação de recursos e o agendamento distribuído. O sistema YAMS implementa uma técnica de convenio num sistema de manufatura hierárquico que utiliza agentes, o projeto AARIA utiliza agentes de forma a satisfazer demandas de produção em tempos determinados levando em conta o agendamento dinâmico, reconfiguração e o controle dos sistemas de manufatura, os recursos, processos e operações são “encapsuladas” como agentes autônomos.

Sousa (SOUSA; RAMOS, 1999) propôs um sistema de agendamento dinâmico para um sistema holônico utilizando a influência direta e inversa na negociação para alocar as tarefas, manejando as restrições temporais e solucionando conflitos, Gou et al. (GOU; LUH; KYOYA, 1998) definiram um algoritmo de agendamento baseado nos conceitos de relaxação de Lagrange onde é requerida uma coordenação centralizada dos hólons, Heikkilä et al. (HEIKKILÄ; JÄRVILUOMA; JUNTUNEN, 1997) propuseram uma abordagem holônica para o agendamento e controle de hólons dentro de uma célula de manufatura. Cheung et al. (CHEUNG et al., 2000) descrevem um sistema que implementa uma série de hólons protótipo para o agendamento de tarefas em “tempo real” dentro de um Sistema de Manufatura Flexível (FMS).

A arquitetura holônica de referência para sistemas de manufatura (VAN BRUSSEL et al., 1998) utiliza hólons para representar produtos, recursos, ordens e atividades lógicas, essa

arquitetura está baseada em três tipos de hólons: produto, ordem e recurso. O hólón de recurso contém o recurso e a parte de processamento de informação necessária para o seu controle; o hólón de produto contém o conhecimento do produto e do processo; o hólón de ordem representa as tarefas no sistema de manufatura; finalmente essa arquitetura define staff hólons para assistir os três tipos de hólons básicos.

No projeto MASCADA foram desenvolvidos mecanismos de controle de manufatura que suportam mudanças na produção e distúrbios, protegendo e maximizando o rendimento do sistema de produção (VALCKENAERS et al., 2006), essa aproximação utiliza um tratamento pro-ativo das perturbações usando agentes inteligentes e autônomos. Bruckner et al. (BRUKNER et al., 1998) descreveu uma aplicação baseada na arquitetura PROSA desenvolvida dentro do projeto MASCADA, essa aplicação foi implementada num sistema de pintura de carros em Sildenfingen (Alemanha); o projeto MetaMorph (MATURANA; NORRIE, 1996) utiliza agentes segundo uma abordagem de mediação que suporta as mudanças de forma, estrutura, e atividade de forma a se adaptar às perturbações, os agentes representam dispositivos de manufatura e produtos, e os mediadores coordenam as ações entre os agentes, essa abordagem introduz clustering e aprendizado dinâmico. Chirn e McFarlane (CHIRN; MCFARLANE, 2000) desenvolveram uma arquitetura holônica de controle (arquitetura baseada em componentes holônicos – HCBA) utilizando hólons de recurso e de produto.

O projeto iShopFloor (SHEN et al., 2006) trabalha na aplicação de inteligência artificial distribuída no chão de fábrica utilizando agentes inteligentes para realizar o agendamento de manufatura. O projeto EtoPlan (WULLINK; GIEBELS; KALS, 2002) desenvolve uma arquitetura holônica para o planejamento e controle de manufatura levando em consideração as incertezas ocasionadas por informação incompleta. Heragu et al. (HERAGU et al., 2002) desenvolve uma arquitetura híbrida entre hierárquica e heterárquica definindo para isso três níveis diferentes de agentes: um alto nível para o agendamento de tarefas, um nível baixo com agentes que respondem a agendamentos individuais e um nível intermédio para coordenar as ações dos agentes mais baixos. Babiceanu et al. (BABICEANU; CHEN; STURGES, 2004) apresenta uma arquitetura de controle holônica para um sistema de manipulação de materiais que apresenta confiabilidade e agendamento em tempo real, tolerância a falhas e reconfigurabilidade.

Arquitetura do Sistema / Técnica de Planejamento	Hierárquica - Centralizada	Heterárquica – Distribuída (agentes)	Holárquica – Híbrida (hólons)
Baseados em Mercado, Contract net Protocol (CNP)	•(Fisher, 1994) •YAMS, AARIA (Parunak, 1998)	•(Duffie e Piper, 1986) •IFCF (Lin e Solberg, 1992) •(Barata e Camargos, 2003) •ABBAS (Lastra, 2004) •MAST (Vrba e Marik 2005)	•(Sousa e Ramos, 1999) •HCBA (Chirn e Mc Farlane, 2000) •EtoPlan (Wullink et al., 2002) •(Babiceanu et al. , 2004) •ADACOR-CNP(Leitão e Restivo, 2008)
Campos de Atração repulsão		•(Ueda et al., 2001)	
Relaxação de Lagrange			•(Gou et al., 1998) •Jeong e Leon, 2002)
Inteligência Artificial Distribuída	•(Burke e Prosser, 1994)	•MetaMorph (Maturana e Norrie, 1996)	•PROSA (BRUSSEL et al. 1998) •Heragu et al, 2002 •FABMAS (MONCH ET AL, 2003) •Hadeli et al.,2004
Técnicas micro-oportunistas e Heurísticas	•(Rabelo e Camarinha, 1996)	•CORTEZ (Sadeh e Fox, 1989)	
Algoritmos genéticos		•(Choi et al., 2004)	

Tabela 1. Estratégias Utilizadas no Problema de Agendamento Dinâmico

Tanaya et al.(TANAYA; DETAND; KRUTH, 1997) utilizou conceitos holônicos para desenvolver controladores de máquinas mais abertos e flexíveis que os implementados com a tecnologia de controle numérico, baseados em um planejamento, monitoramento e execução avançados, Lastra et al. (MARTINEZ LASTRA; ARMANDO W. COLOMBO, 2006) propuseram um sistema de montagem baseado em atores (ABAS) cuja arquitetura permite uma reconfigurabilidade fácil. Trabalhos direcionados a aplicação de técnicas de auto-organização em sistemas de controle tem sido desenvolvidos por Hadeli et al. (HADELI et al., 2004) para realizar a coordenação dos agentes utilizando stigmergia para a comunicação entre eles, além disso Ueda et al. (UEDA et al., 2001) utilizou os campos de atração e repulsão para implementar auto-organização em um sistema de produção. Em (HSIEH; CHIANG, 2011) é descrito um método baseado em Contract-net Protocol (CNP) de dois níveis, o qual é utilizado em um sistema

holônico composto de várias holarquias com o intuito de formar contratos entre um conjunto de hólons de produto e um conjunto de hólons de recurso, assim é possível reconfigurar o plano de manufatura e lidar com imprevistos, a representação formal do fluxo de informação e materiais é realizada utilizando Redes de Petri de alto nível. Algumas técnicas de referência utilizadas no agendamento dinâmico são apresentadas na Tabela 1.

### **3.2. Coordenação e Planejamento Dinâmico Baseados em Stigmergia**

Na atualidade existem diversas técnicas de inteligência artificial para solucionar o problema JSP, neste trabalho é utilizada uma técnica baseada na comunicação indireta entre agentes para alcançar um agendamento ágil e dinâmico da manufatura. A técnica utilizada nesta tese utiliza conceitos de inteligência artificial distribuída e bio-inspirada (DAÍ), e é conhecida como *Stigmergia* (Figura 11), esta técnica disponibiliza de forma local o conhecimento global do sistema (DUAN; ZHU; HUANG, 2012). Assim é obtida não só cooperação, mas também coordenação no interior dos hólons que compõem o sistema ADACOR.

A Stigmergia é uma aproximação relativamente nova ao controle multiagente baseada na interação animal – animal (VALCKENAERS; VAN BRUSSEL, 2005), sendo também considerada como uma forma indireta de coordenação utilizada por enxames de insetos (formigas) os quais empregam feromônios para disponibilizar localmente parte da informação global, dessa forma os agentes individuais não têm que lidar com a complexidade nem dinâmica da situação, e portanto o peso computacional na implementação do algoritmo de comunicação é menor que o obtido com outros métodos como Market-Based solutions.

A coordenação dos agentes baseada em Stigmergia visará não somente a atribuição de recursos e tempos às atividades do plano de manufatura, mas também a coordenação dos recursos de uma mesma célula para completar uma determinada atividade (KOROSEC; SILC, 2013), (PARK; TRAN, 2012). O modelo de Stigmergia proposto neste trabalho de forma a satisfazer esses requerimentos é conhecido como *Stigmergia Baseada em Sinais* (KOLLINGBAUM, 2001 apud. HADELI et al., 2004). Nesse tipo de stigmergia os agentes baseiam sua comunicação e coordenação em sinais (extra-tarefa) não permanentes e locais conhecidos como Feromônios, a combinação desses feromônios produz um Campo Dissipativo no ambiente, disparando ações em

outros agentes sem necessidade de comunicação direta (custo computacional). Assim, os agentes não terão que lidar com a dinâmica complexa do sistema e sim podem combinar seu poder computacional e conhecimento local de maneira coordenada para alcançar um comportamento coletivo, ordenado e efetivo. O mecanismo de olvido - atualização da stigmergia garante uma informação atualizada.

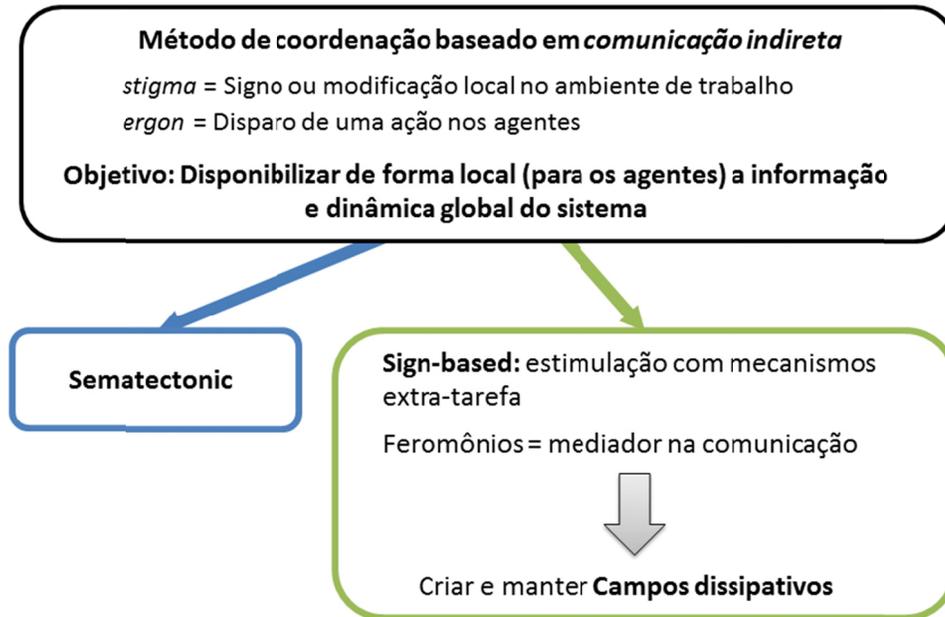


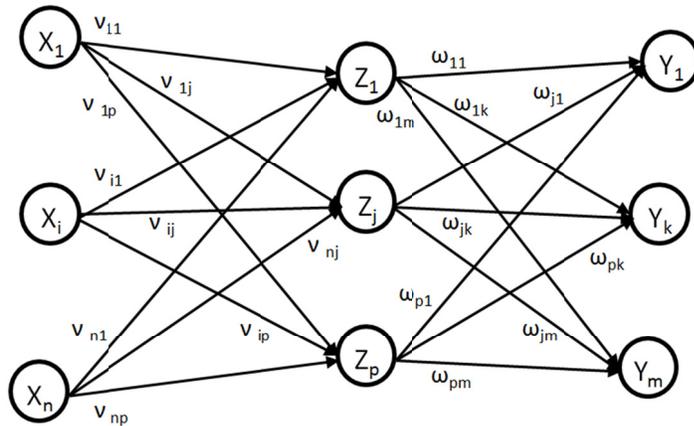
Figura 11. Stigmergia – Método de comunicação indireta entre agentes

Assim como para a implementação física dos sistemas de controle de manufatura baseados em stigmergia, podem ser utilizadas formigas virtuais através de agentes de software móveis; um desenvolvimento baseado em mensagens pode também ser utilizado. Em Valckenaers e Van Brussel (2005) é desenvolvido um sistema holônico baseado numa arquitetura heterárquica que consegue prever o futuro imediato lidando com mudanças e perturbações. Visando estas características, alguns agentes de software foram desenvolvidos levando em consideração o sistema físico de manufatura e outros foram considerados como agentes móveis (formigas) trabalhando em combinação com técnicas tradicionais baseadas em mercados.

### 3.2.1. Adaptação e Aprendizado em Sistemas de Controle Multiagente

A eficiência e qualidade do agendamento em um sistema multiagente depende da implementação de estratégias variáveis, adaptativas e de compromisso. Nesse sentido as questões fundamentais a considerar são: quando, que e para quem atribuir o compromisso

(MONOSTORI; VÁNCZA; KUMARA, 2006). O aprendizado e outras formas de adaptação em sistemas multiagentes podem ser classificados como apresentado a seguir:



**Rede neural MLP (multi camada)**

**Algoritmo Back-Propagation**

- Atualização de pesos  

$$\vec{\omega}(k + 1) = \vec{\omega}(k) + \alpha * (-\nabla(E))$$

- Função do erro utilizada  

$$E_p = \frac{1}{2} * \sum_{i=1}^m (y_{di} - y_i)^2$$

Figura 12. Rede Neural utilizada para adaptação de parâmetros

- **Aprendizado Centralizado:** O aprendizado é desenvolvido por agentes individuais sem precisar de interação com outros agentes.
- **Aprendizado Descentralizado:** Também chamado de aprendizado interativo, este envolve vários agentes que aprendem utilizando uma interação coordenada entre eles.
- **Aprendizado Supervisionado:** Neste tipo de aprendizado os parâmetros dentro dos hólons são adaptados em função de uma tabela (entradas – saídas desejadas). Esse tipo de aprendizagem pode ser desenvolvido utilizando redes neurais artificiais (RNA) multi-camada do tipo MLP (Multilayer Perceptron) as quais podem ser treinadas utilizando um algoritmo de Retropropagação do erro (BackPropagation) de forma a diminuir uma função do erro entre as saídas dos neurônios e os parâmetros desejados da tabela (Figura 12). Também é possível realizar um treinamento ON-LINE depois de cada perturbação, de forma a adquirir conhecimento de forma contínua e automática, complementando e melhorando a tabela entradas-saídas através do tempo, ver Figura 13. O algoritmo de treinamento tem como desvantagem o alto tempo de computação, sendo também possível não alcançar os valores de erro desejados.
- **Aprendizado Não-Supervisionado:** Neste tipo de aprendizado os parâmetros dentro dos hólons são adaptados de acordo a uma função de semelhança que pretende representar uma

distribuição de alta dimensão numa baixa dimensão. As funções para adaptar os parâmetros são funções simples e decrescentes que garantem estabilidade e velocidade do treinamento através do tempo. Contudo nesse tipo de aprendizado é também possível ajustar as variáveis ou coeficientes nas funções de adaptação para garantir um melhor desempenho do sistema de manufatura subjacente. Um exemplo de sistemas com esse tipo de aprendizado são as Redes Neurais Auto Organizativas (Self Organizing Maps - SOM), (WU; CHOW, 2003), (ISHII; YANO, 2001).

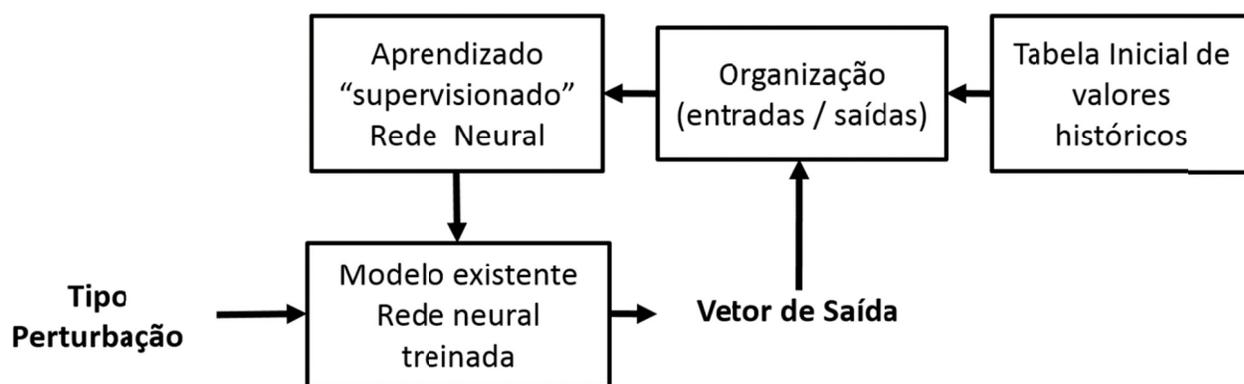


Figura 13. Adaptação de Parâmetros – Algoritmo de Treinamento Supervisionado

Em Monostori (2004) são apresentadas técnicas de aprendizado de máquina como o aprendizado neurodinâmico e “simulated annealing” para gestão de *Mudanças e Perturbações* em sistemas de manufatura diminuindo o custo computacional. Nesse trabalho é utilizado um procedimento centralizado no qual a realimentação é representada pelas mudanças nos parâmetros de utilização local, premiação de ofertas (bid awarding) e/ou reações de rejeição emitidas pelo agente de ordem. Cada agente de recurso incorpora uma base de regras a qual leva em conta para decidir o fator de custo para aplicar em cada anúncio de tarefa. As precondições dessas regras são: a utilização do recurso e a relação entre “bid” (propostas, ofertas) ganhas e perdidas, esses dados são guardados localmente em cada agente.

Resultados de simulações mostram que a abordagem descrita acima reflete em uma utilização mais balanceada dos recursos, além disso, muitas medidas de rendimento tais como o máximo atraso provam que essa abordagem é ainda melhor acrescentando adaptação do fator de custo.

### 3.3. Proposta de Estratégia de Coordenação para Sistemas de Manufatura Colaborativos

Diferentemente das abordagens apresentadas anteriormente baseadas em apenas dois componentes: uma arquitetura do sistema de controle combinada com uma técnica de planejamento de produção não adaptativa, a estratégia proposta neste trabalho é projetada para integrar aos dois componentes anteriores, um terceiro componente adaptativo, propondo parâmetros variáveis (dentro algoritmo de agendamento dinâmico) que podem ser sintonizados com o intuito de melhorar o desempenho e a velocidade de reconfiguração cada vez que aparece uma perturbação no sistema. Dessa maneira, a estratégia proposta está composta de três partes principais (ver Figura 14):

- Uma arquitetura de controle híbrida – holônica para o sistema de manufatura.
- Um algoritmo de planejamento (dinâmico) e coordenação Inteligente entre os agentes do sistema.
- Parâmetros de manufatura adaptativos dentro do algoritmo a fim de possibilitar uma maior convergência e diminuição do tempo no Estado Transiente do sistema.

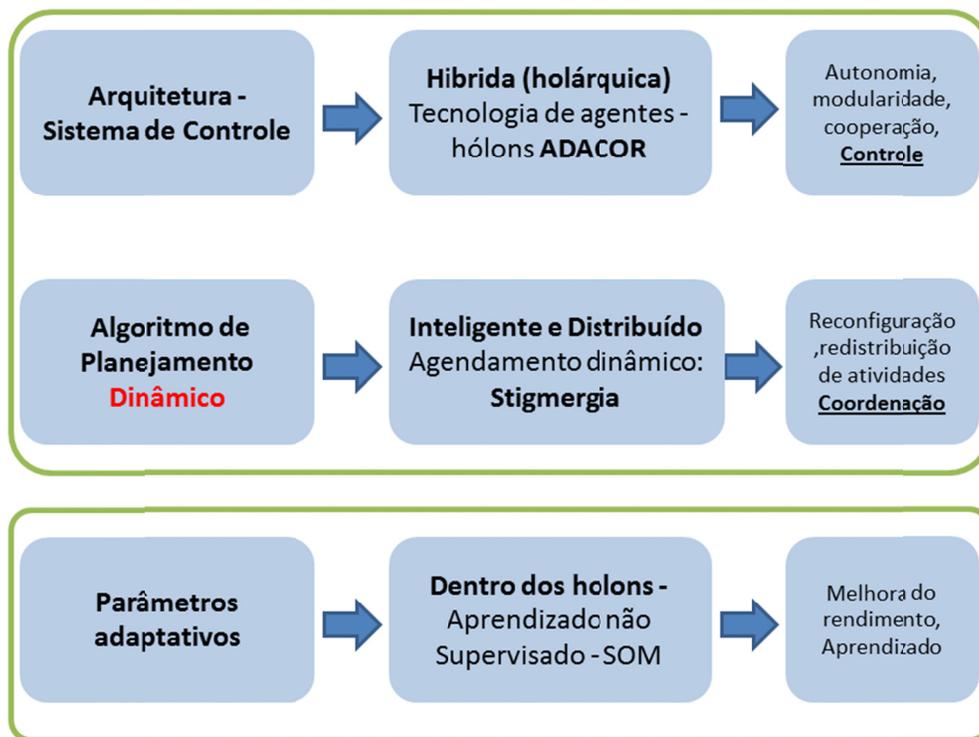


Figura 14. Estratégia de coordenação Proposta

### 3.4. Proposta de Arquitetura de controle baseada em Arquitetura Híbrida ADACOR

A arquitetura proposta para ser utilizada neste trabalho está baseada numa arquitetura híbrida (holárquica) a qual pode apresentar características hierárquicas ou heterárquicas dependendo da situação. Assim a arquitetura projetada estará baseada no modelo holônico ADACOR, dentro do qual vão ser organizados diferentes módulos que exemplificam um sistema de manufatura genérico, nesta arquitetura são levados em consideração os níveis: operacional, supervisão, coordenação e produto. A Figura 15 descreve a arquitetura proposta com seus níveis (operacional, supervisão e coordenação) descritos anteriormente na secção 2.3.1. O projeto do sistema integrado e colaborativo ADACOR visará associar todos os módulos apresentados na Figura 16 de modo que seja possível obter um funcionamento colaborativo entre eles, de modo a exemplificar o processo de manufatura de um produto.

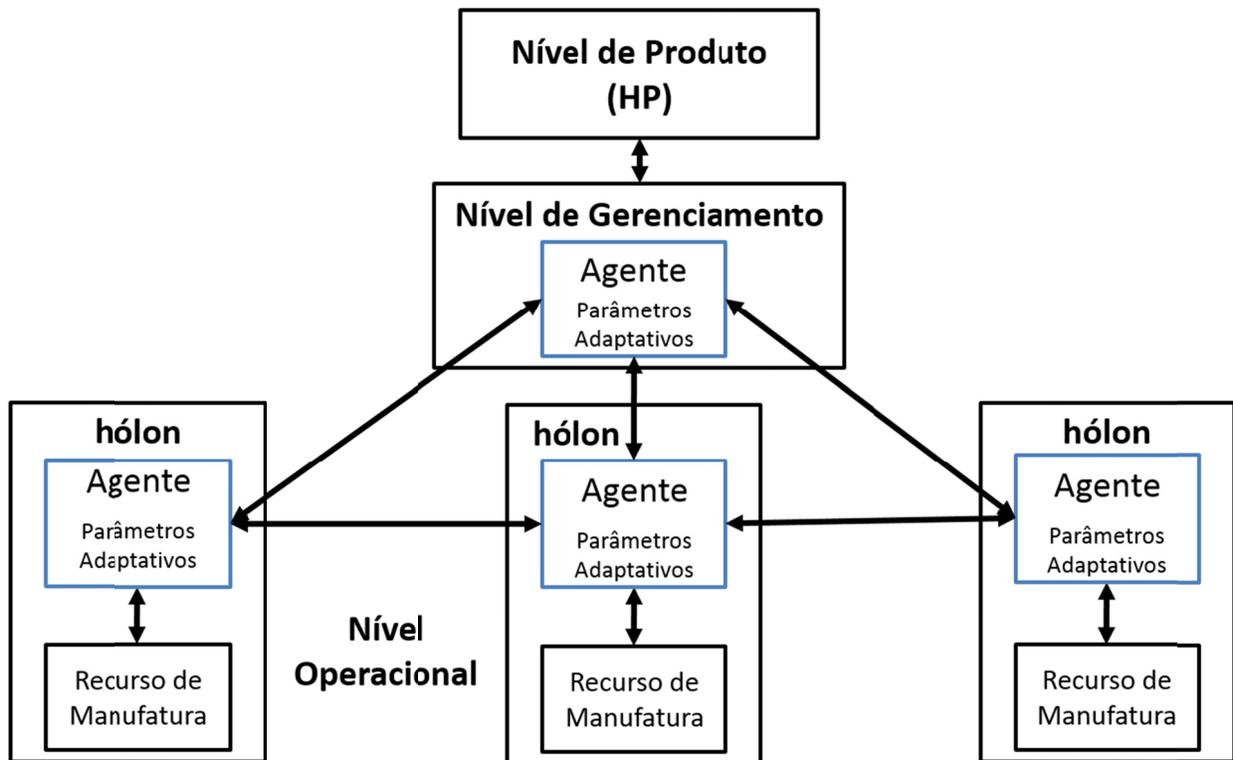


Figura 15. Arquitetura de Coordenação e Controle Proposta

#### 3.4.1. Projeto do nível Operacional

Dentro do nível operacional os módulos ou hólons estarão organizados levando em consideração que sua posição física dentro do sistema permita maximizar a intersecção entre seus espaços de trabalho para permitir que um recurso físico possa executar uma operação

inicialmente atribuída a outro se esse último apresenta uma falha, assim acrescentando a robustez do sistema. Cada módulo está composto por um recurso físico que permite realizar um subprocesso específico por sua vez esses módulos serão agrupados para formar hólons operacionais. A estrutura interna de um agente do nível operacional tendo um recurso de manufatura será implementado utilizando uma programação em lógica de nível baixo a qual informará o início e término de uma atividade definida.

#### **3.4.1.1. Projeto dos componentes lógicos (decisão e interface física) dos hólons operacionais**

O componente de decisão dos hólons operacionais será implementado por meio de lógica de alto nível, cada um dos recursos de manufatura tem associadas possíveis operações que podem ser executadas, sendo essas operações determinadas pelo plano de manufatura que está sendo realizado. As atividades que cada hólón operacional vai realizar estão comandadas pelo hólón de supervisão no nível superior da arquitetura ADACOR. O processo de reconfiguração dinâmica dos planos de manufatura e o processo de recepção das ordens em cada hólón operacional (Componente de Decisão do hólón) podem ser implementados numa linguagem como C++, Java, MATLAB<sup>®</sup>, Python etc, por meio de um computador. Quando o Hólón operacional recebe uma ordem que indica o movimento do(s) seu recurso associado começa funcionar a interface física, essa interface poderá ser programada num CLP utilizando linguagem GRAFCET, Ladder etc.

#### **3.4.2. Projeto do nível de Supervisão**

O nível de supervisão disponibiliza para outros hólons informação sobre o início ou terminação das operações que realizam os recursos físicos que pertencem a um HO. O nível de supervisão poderá ser implementado num computador utilizando uma linguagem de alto nível no qual o operador poderá selecionar uma operação programada previamente e depois de terminar essa operação, outra poderá ser selecionada. No nível automático o sistema supervisor comanda a realização em ordem das operações que em conjunto vão formar uma atividade.

#### **3.4.3. Projeto do nível de Coordenação**

O nível de coordenação é encarregado da elaboração de planos de manufatura, reconfiguração e alocação de atividades. Esse nível é implementado num software de nível alto

que se comunicará com o nível de supervisão para monitorar os planos de manufatura existentes e também de modificar ou reconfigurar esses planos quando aparece uma perturbação no sistema. Os diferentes níveis da arquitetura ADACOR podem ser simulados também num software, dentro de um ambiente tridimensional onde poderá ser visualizado o funcionamento de cada recurso de manufatura.

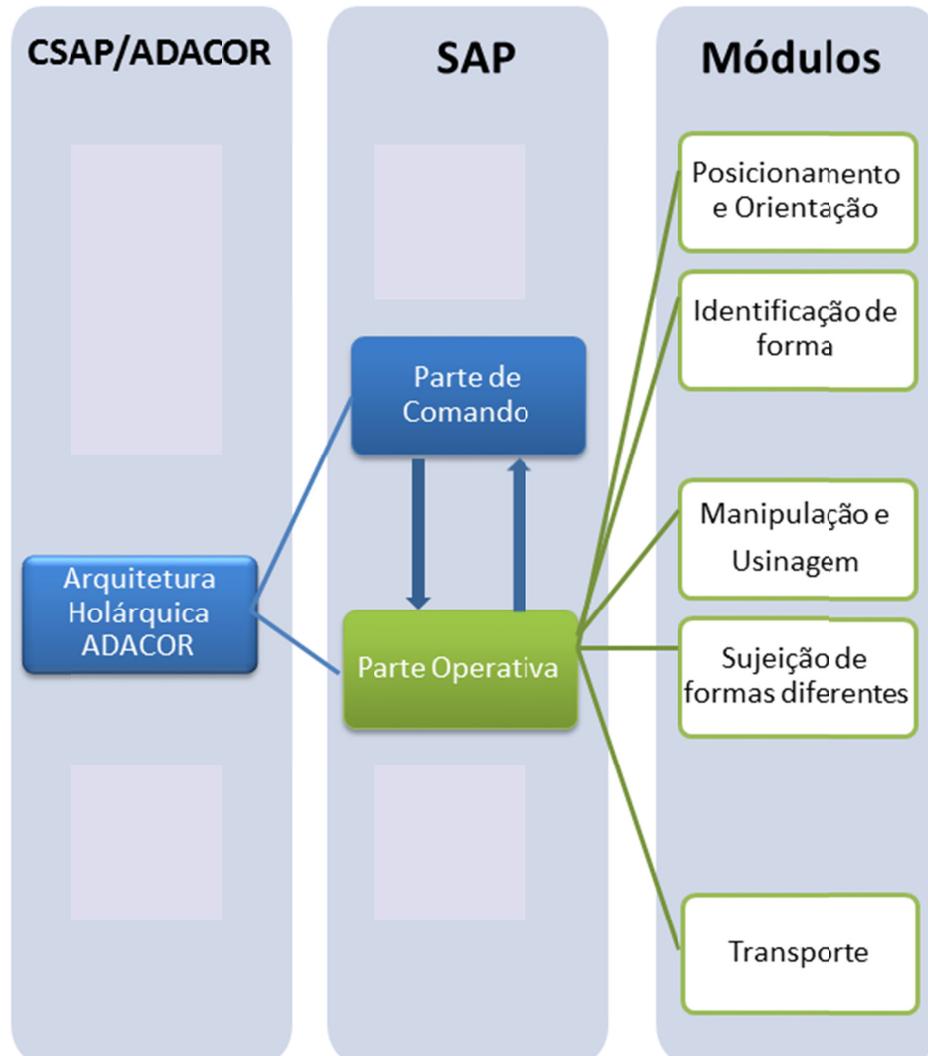


Figura 16. Módulos utilizados dentro de um sistema de manufatura genérico

#### 3.4.4. Seleção dos tipos de Hólons - Agentes utilizados dentro da Arquitetura proposta ADACOR

Como foi descrito anteriormente um agente é uma entidade que não só pode ser utilizada para se referir a módulos físicos senão também entidades abstratas (software). Assim neste

trabalho são chamados de hólons ou agentes as entidades em qualquer nível da arquitetura ADACOR, os módulos somente estão associados com os agentes no nível operacional. Os tipos de agentes que serão utilizados na implementação visam refletir uma arquitetura genérica de um sistema de manufatura, nesse sentido no nível operacional os agentes têm associado um módulo (ou recurso de manufatura) que exemplifica um subprocesso que pode ser realizado pelo sistema. Levando isso em consideração são propostos módulos básicos para: posicionamento e orientação, identificação de forma, manipulação e usinagem, sujeição, transporte (Figura 16).

### **3.4.5. Projeto dos Módulos ou Recursos Físicos dentro de um Sistema Colaborativo ADACOR**

O sistema de manufatura colaborativo estará composto dos módulos apresentados a seguir, cada um com características específicas para exemplificar uma operação dentro de um SAP genérico. A seguir estão as características, funções, e descrição do tipo de recurso físico que pode ser utilizado. Por enquanto somente são apresentadas estas descrições gerais. Já no Capítulo 6, com o intuito de realizar a simulação em software do sistema de manufatura será selecionado o dispositivo físico que exemplificará cada um desses módulos.

#### **3.4.5.1. Módulo de Posicionamento e Orientação**

Este módulo será projetado de forma que o material ou peças que vem da área de estoque possam ser posicionadas e orientadas permitindo que o sistema de usinagem possa realizar uma atividade sobre elas. É projetado que o dispositivo físico associado a este módulo também não seja muito complexo de modo a calcular rapidamente a cinemática direta para calcular a postura (posição e orientação) da peça quando as juntas são comandadas, e cinemática inversa para levar a peça até uma postura desejada para realizar uma operação.

A primeira junta será de tipo prismático para posicionar as peças na intersecção dos volumes de trabalho dos dispositivos que formam o sistema de usinagem, de modo que possa ser aproveitada a redundância do sistema de manufatura, para que uma operação possa ser realizada por mais de um dispositivo quando exista alguma perturbação ou falha. A segunda e terceira junta deste módulo permitirá modificar rapidamente a orientação da peça nos ângulos *Roll e Pitch* com o intuito de realizar um trabalho colaborativo entre esse sistema e o sistema de

usinagem. De modo que possa ser realizada uma atividade em uma das faces da peça por qualquer um dos dispositivos de usinagem, o ângulo de Roll poderá girar 180 graus.

#### **3.4.5.2. Módulo de Identificação de forma**

Este módulo estará baseado na utilização de visão artificial para identificar as peças que são transportadas até o módulo de posicionamento e orientação, verificando que sua posição seja adequada antes de começar o processo de usinagem. Este módulo identificará peças de cores: amarelo, azul, vermelho e verde.

Este módulo informará ao sistema supervisor que tipo de sujeição tem que ser realizada pelo gripper para agarrar a peça corretamente antes de ser levada até o sistema de posicionamento.

#### **3.4.5.3. Módulo de Manipulação e Usinagem**

O módulo de usinagem será projetado de forma que seja possível a realização de operações sobre as peças que estão no módulo de Posicionamento e orientação, o módulo será projetado com um dispositivo de usinagem (manipulador robótico), este módulo poderá trabalhar de forma colaborativa com o módulo de posicionamento e Orientação fazendo com que o sistema de manufatura apresente uma robustez às falhas baseada na redundância de dispositivos que o conformam.

É projetado que os espaços de trabalho dos dispositivos robóticos e o módulo de posicionamento tenham uma intersecção maior do que o tamanho das peças, visando que as atividades atribuídas a um dispositivo possam realmente ser feitas por outro, levando isso em consideração é possível ainda uma maior tolerância a falhas quanto maior seja o espaço de intersecção descrito acima. Por exemplo, se esse espaço fosse maior que o tamanho da peça, uma falha no sistema de posicionamento poderia ser superado, já que um dos dispositivos poderia realizar as atividades de posicionamento e orientação enquanto o outro dispositivo faria as atividades de usinagem.

#### **3.4.5.4. Módulo de Sujeição**

O módulo de sujeição recebe as informações que vem do sistema supervisor indicando o tipo de forma da peça que deve ser agarrada pelo gripper, este módulo é projetado tendo um

gripper antropomórfico de modo a conseguir pegar com sucesso peças de diferentes formas, já que um gripper antropomórfico pode modificar a configuração dos seus dedos variando a forma de sujeição, assim maximizando o contato da peça com o gripper e permitindo que essa possa ser segurada sem cair durante a movimentação até o módulo de posicionamento.

#### **3.4.5.5. Módulo de Transporte**

No projeto deste módulo será utilizado um robô móvel para transportar as peças desde a área de estoque até a área de usinagem e desde a área de usinagem até a área de armazenagem de produtos. O robô móvel poderá se movimentar segundo uma linha marcada no chão a qual indicará o caminho entre as diferentes áreas.

### **3.5. Conclusões do Capítulo**

Na atualidade as abordagens para a solução do problema de controle a agendamento dinâmico de manufatura cada vez mais são implementadas sobre arquiteturas distribuídas ou descentralizadas, as quais permitem o funcionamento e reconfiguração que pode oferecer um sistema de coordenação baseado em agentes e/ou hólons. Dessa forma as estratégias tradicionais para a solução do problema JSP que utilizam oferta e demanda (baseadas em mercado) começam a ser substituídas por estratégias baseadas em inteligência artificial e algoritmos colaborativos as quais garantem uma resposta muito mais rápida para lidar com perturbações ou falhas em recursos de manufatura.

Com a crescente integração de sistemas de manufatura compostos por um grande número de dispositivos, e a diversificação de produtos para satisfazer a demanda do mercado atual, os sistemas automatizados têm que gerar planos de manufatura que envolvem uma grande quantidade de recursos, por sua vez contendo um grande número de operações, o qual torna quase impossível para um operador humano a reconfiguração manual de uma maneira rápida, já que como visto na secção 3.1.2 o JSP é considerado como um problema NP – Difícil ou de complexidade exponencial.

A crescente capacidade e velocidade de cálculo nos computadores atuais fazem com que possam ser implementadas técnicas de Inteligência Artificial colaborativas que requerem de uma

grande comunicação de informação entre os agentes do sistema para tomar decisões obtendo planos de manufaturas semi-ótimos. As técnicas de comunicação entre muitos agentes como a Stigmergia possibilitam essa transmissão somente utilizando sinais ou feromônios que outros agentes podem detectar, sem ter que levar em consideração protocolos complicados.

O projeto e concepção de uma arquitetura de controle híbrida – holônica ADACOR para obter um sistema de manufatura flexível composto por módulos (hólons) genéricos permitirá simular e/ou implementar diferentes operações e atividades, de forma a planejar a fabricação de produtos com distintas características, o qual por sua vez permitirá validar o funcionamento do algoritmo de planejamento dinâmico e coordenação proposto nesta tese, descrito no capítulo 2. Além disso, um sistema de manufatura baseado numa arquitetura ADACOR é adequado para a rápida integração de novos módulos e também para a programação e validação de estratégias de coordenação e planejamento diferentes, que possam aparecer como trabalhos futuros.

Além disso, a adição de um terceiro componente dentro da estratégia proposta, oferecendo a possibilidade de adaptação de parâmetros de manufatura dentro do algoritmo de agendamento dinâmico, faz com que este algoritmo possa ser “sintonizado” ou treinado de forma não supervisionada para diminuir o tempo de reestabelecimento ou reconfiguração enquanto aumenta a convergência.



## 4. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO PARA SISTEMAS COLABORATIVOS

O algoritmo de coordenação e planejamento proposto está baseado na coordenação dos agentes utilizando stigmergia de forma a solucionar o problema de Agendamento Dinâmico de Manufatura (Job Shop Shedulling Problem – JSP) descrito na seção 3.1.2. Este problema será abordado com dois propósitos:

- Desenvolver planos de manufatura (procurando otimização) para serem enviados a cada um dos hólons de operacionais e conseqüentemente aos recursos físicos. As operações básicas (do plano obtido) realizadas por esses recursos serão supervisionadas pelo Hólón de Supervisão.
- Gerar novos planos enquanto o sistema está no seu estado transiente depois de uma perturbação, de forma a enviar esses planos para os hólons operacionais uma vez que o tempo de restabelecimento acabe e o sistema volte a um funcionamento normal, nessa etapa é requerida uma alta velocidade de resposta.

Este algoritmo de controle de manufatura inteligente, cujo fluxograma de funcionamento geral mostrando as etapas principais (os fluxogramas de cada etapa são apresentados de forma detalhada posteriormente) é apresentado na 17, aproveita as características da arquitetura holárquica e distribuída ADACOR sobre a qual está implementado. Essa combinação significa numa capacidade de adaptação do sistema fazendo com que este possa lidar efetivamente com as seguintes perturbações:

- Necessidade para agendamento de novas operações e/ou cancelamento de operações já agendadas.
- Falhas no funcionamento de Recursos de Manufatura se são mantidas as coordenadas  $(X,Y)$  dos pontos de início e final da suas operações associadas (Pontos de Operação – P.O.s)
- Introdução de novos recursos no sistema.

Segundo o diagrama da estratégia proposta, podem ser identificadas as seguintes etapas:

- Planejamento inicial da Produção e Alocação de Recursos (de manufatura).

- Agendamento Dinâmico de Manufatura: Coordenação e Reconfiguração para o Agendamento de Tarefas.
- Adaptação de Parâmetros.
- Execução de Atividades.
- Supervisão de Atividades Planejadas.

As etapas pertencentes ao estado estacionário estão ressaltadas na cor verde na Figura 17, enquanto as etapas pertencentes ao estado transiente estão ressaltadas na cor azul.

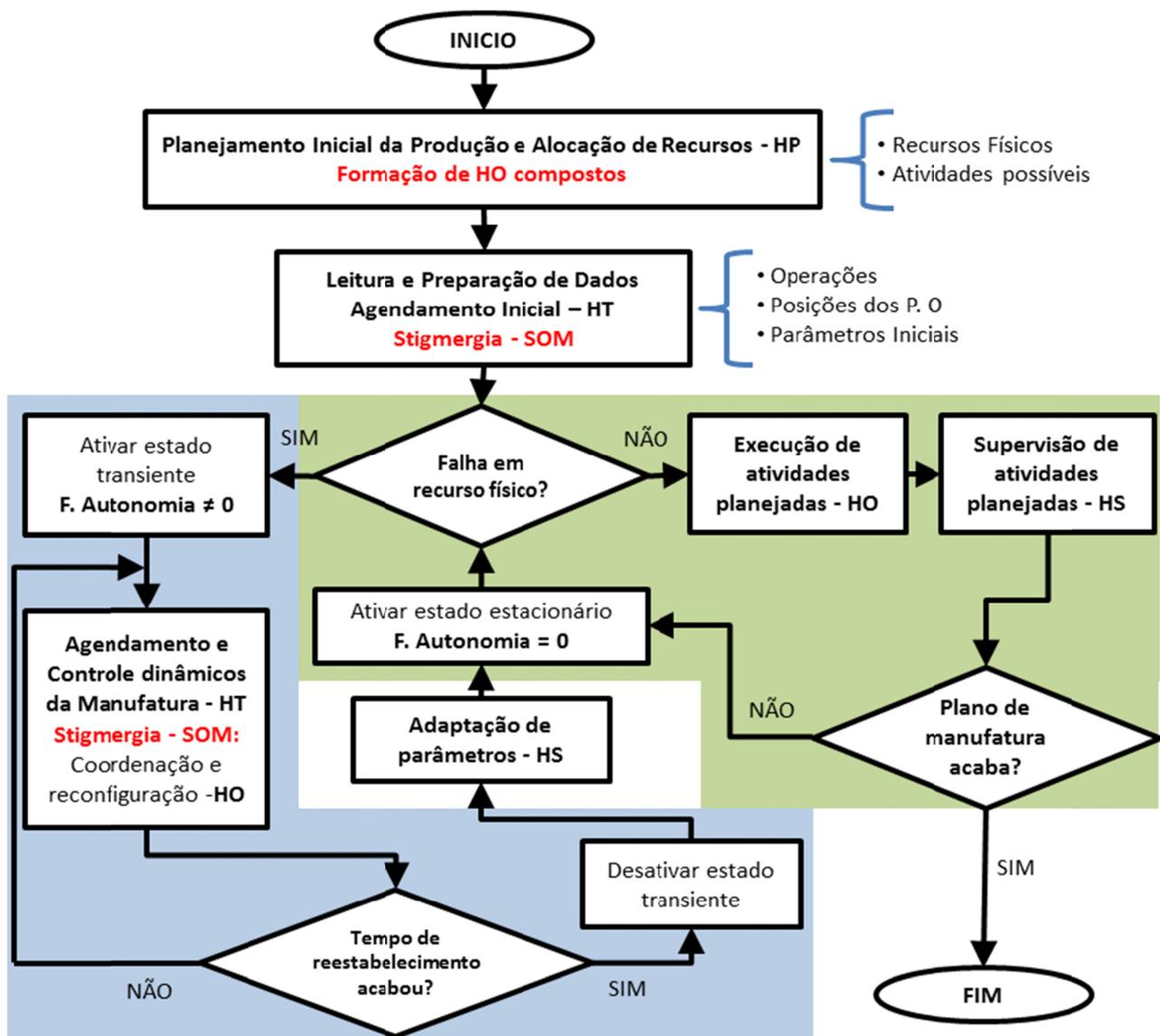


Figura 17. Agendamento Dinâmico proposto – Sistema de Controle de manufatura

A estratégia de reconfiguração dinâmica de manufatura proposta utiliza o conceito de Inteligência artificial distribuída, nesse caso é aproveitado o conceito de *Swarm Intelligence* baseado no modelo biológico (bio-inspirado) que seguem formigas, térmitas e cardumes de peixes ao procurar caminhos ótimos para encontrar alimento. Nesta tese é proposta como solução do JSP a obtenção de uma trajetória sub-ótima em termos de distância entre as operações associadas aos recursos de manufatura que participam na realização de uma tarefa, considerando que assim também poderá ser minimizado o tempo que toma um HO composto para completar um processo completo. Essa trajetória entre as operações indicará a sequência em que essas são executadas para completar o processo. A estratégia proposta neste trabalho combina o conceito de Stigmergia com as Redes Neurais Auto-organizativas (SOM) para obter assim um algoritmo de coordenação que funciona de forma iterativa para obter soluções semi-ótimas do problema JSP. Nesse caso são utilizados agentes móveis tipo formiga para otimizar uma trajetória, a qual pode ser visualizada como uma sucessão de linhas dentro de um espaço tridimensional.

Uma trajetória inicial não otimizada entre os recursos de cada Hólón Operacional composto poderá mostrar cruzamentos de linhas entre os pontos de operação (P.O), mas quando as iterações do algoritmo vão se incrementando é possível visualizar a transformação dessas linhas inicialmente numa sequência aleatória (sem organização), numa sucessão (organizada) de linhas sem lacetes que passa por todos os pontos de operação, assim obtendo uma trajetória ou solução sub-ótima que minimiza a distância entre esses pontos. A estratégia nesta tese está composta das etapas descritas a seguir.

#### **4.1. Etapa de Planejamento Inicial da Produção e Alocação de Recursos – HP**

##### **4.1.1. Leitura e Preparação de dados**

Nesta etapa realizada pelo HP são lidos ou determinados:

- Os recursos de manufatura no sistema.
- As atividades possíveis para obter um produto.
- As operações que os recursos podem executar para formas essas atividades.
- As coordenadas (no plano  $XY$ ) dos pontos iniciais e finais das operações (P.O.) garantindo que os recursos físicos possam se movimentar para alcançar esses pontos de operação associados (esses cálculos atendem a cinemática inversa dos recursos).

As saídas desta etapa são:

- Número de Hólons Operacionais Compostos (células de manufatura).
- Agrupação inicial dos recursos de manufatura para integrar esses HO compostos.
- Sequência das tarefas ou plano de manufatura inicial.

As duas primeiras saídas podem ser determinadas de duas formas: utilizando um algoritmo de agrupamento ROC (secção 3.1.1) ou uma agrupação proposta manualmente pelo usuário, nesta tese é utilizado o algoritmo clássico ROC. Porém já que a arquitetura ADACOR calcula seus HO compostos considerando-os como agrupações de recursos físicos que executam atividades relacionadas (formando tarefas), a matriz de incidência PFA utilizada nesta tese (diferentemente das abordagens tradicionais) propõe relacionar as linhas com os recursos físicos e as colunas com as atividades definidas pelo usuário. Nesse caso partindo da definição de holarquia das arquiteturas holônicas (secção 2.2.6) é possível que um recurso de manufatura possa pertencer a mais de um hólton composto, o agrupamento e formação de hóltons obtido com o ROC implementado é mostrado na Figura 18. Ver ANEXO F – Implementação do Software de Agrupamento de Recursos.

Matriz de Incidência Original PFA (Production Flow Analysis)

REC/ATIVID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
R1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
R2	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
R3	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
R4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R5	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
R6	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1
R7	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1
R8	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
R9	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
R10	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R11	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R12	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
R13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Solução Obtida com o Algoritmo ROC (Rank Order Clustering)

MAQ/PEÇA	1	10	19	8	17	26	4	13	22	5	6	14	15	23	24	27	2	9	11	18	20	12	7	16	3	25	28	21
R1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R4	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R5	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R12	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
R7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
R8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
R9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
R10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
R11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
R13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

Figura 18. Obtenção de Células de Manufatura no Processo de Alocação de Recursos

Logo após, para cada HO composto (vários recursos de manufatura formando uma célula) corresponde um HT que realiza um planejamento interno utilizando também o algoritmo baseado em stigmergia, esse algoritmo produz uma sequência de operações (realizadas pelos recursos físicos) obtendo assim uma tarefa ou processo dentro de cada HO composto. Com este fim é obtida uma solução do problema JSP (secção 3.1.2) utilizando um algoritmo iterativo baseado em stigmergia e Redes neurais SOM para obter uma trajetória que passará por todas as operações indicando a sequência em que são realizadas, obtendo assim finalmente o plano de manufatura inicial.

No final desta etapa os P.O. ficam conectados dentro de HO Compostos, mas não de uma forma ótima, ver Figura 20. Embora um usuário também possa configurar a sequência de operações dentro de cada HO de forma manual, a aplicação do algoritmo iterativo resultará em soluções muito mais rápidas e eficientes quando o número de recursos de manufatura e P.O. seja alto.

#### **4.1.1.1. Pontos de Operação (P.O.)**

No desenvolvimento desta tese é proposto que: para cada operação que pode executar um recurso na qual seja realizada uma movimentação ou trabalho sobre as peças ou produtos, sejam consideradas as suas coordenadas ( $X$ ,  $Y$ ) inicial e final (onde começa e termina a operação), com respeito a um ponto fixo do espaço de manufatura do sistema estudado. Assim neste trabalho essas posições serão chamadas de: *Pontos de Operação (P.O)*. Para que um processo completo possa ser realizado no sistema é necessário que nesses pontos (não aplica para o ponto inicial e final) os espaços de trabalho de pelo menos dois recursos possam-se intersectar de modo que as tarefas realizadas pelo hólón não fiquem detidas, e assim possa continuar o fluxo de peças e ou produtos. Um exemplo de P.O é o ponto em que um dispositivo pode posicionar uma peça para que outro possa interagir com essa e continuar o processo. Cada operação considerada tem dois P.O.s associados, se um recurso pode realizar mais de uma operação esse poderá ter mais de dois P.Os associados.

Dessa maneira no agendamento dinâmico os P.Os de cada recurso ficam distribuídos num espaço tridimensional, o qual será chamado nesta tese: *Espaço de Manufatura*. Estes P.Os são mostrados como cruces pretas na Figura 19. Antes de começar a etapa de agendamento, além das

coordenadas  $X$  e  $Y$ , é considerada uma terceira entrada (uma altura  $Z$ ) para cada P.O, essa entrada se relaciona com o recurso que realiza a operação e é denominada: o *Fator de Rejeição*. Esse parâmetro tem que ser definido nesta etapa de preparação de dados, antes de começar o algoritmo de planejamento dinâmico.

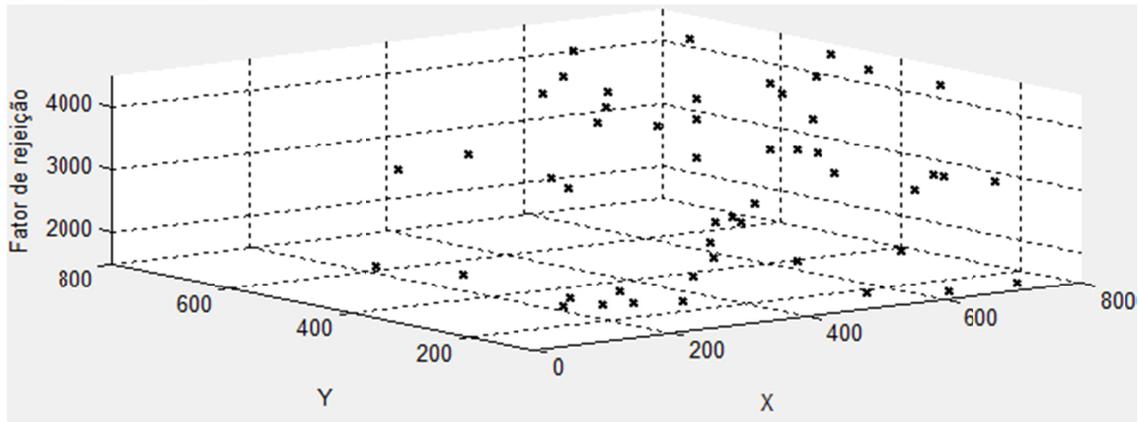


Figura 19. Representação dos P.Os dentro do espaço de manufatura 3D

#### 4.1.2. Fator de Rejeição

O Fator de Rejeição proposto nesta tese corresponderá à coordenada  $Z$  (no espaço de manufatura) dos P.Os, e leva em consideração o resultado do agrupamento realizado manualmente ou por meio do algoritmo ROC para constituir os *Hólons Compostos*, formados por vários recursos de manufatura. Dessa forma para cada um desses hólons compostos é atribuído um número inteiro, que indica a ordem dentro do plano de manufatura da tarefa que realiza este hólón, o Fator de Rejeição é calculado então como a multiplicação desse número inteiro por uma distância (maior que a diferença máxima entre as coordenadas  $X$  e  $Y$  dos recursos de manufatura). Este número também está relacionado com o tempo de início da operação no recurso.

Todos os P.Os dentro de um mesmo hólón operacional composto tem um valor do Fator de Rejeição que permite a esses serem conectados com o algoritmo de agendamento. Os Fatores de Rejeição de P.Os que pertencem a Hólons Compostos consecutivos estão separados por um valor real que garante que no espaço tridimensional de manufatura os hólons fiquem o suficientemente separados, para não apresentar interferência uns com outros no processo de agendamento dinâmico. Esse valor real de separação pode ser considerado como o tempo de movimentação dos

subprodutos de um Hólón composto até outro, já seja utilizando uma esteira ou algum outro dispositivo de transporte de peças. O Fator de Rejeição pertence ao HO no nível operacional.

#### **4.1.3. Fator de Redundância**

Este parâmetro proposto nesta tese é um número inteiro que é assinado a cada recurso de manufatura pelo HP, o fator de redundância indica a quantos HO compostos ou células de manufatura pode pertencer um recurso, realizando operações dentro desses hólons. No caso que um recurso de manufatura efetivamente possa pertencer simultaneamente a vários HO compostos os seus associados P.Os apresentarão uma maior variação na sua terceira coordenada  $Z$  (que representa seu Fator de Rejeição) do que nas coordenadas  $X$  e  $Y$  (terão coordenadas  $Z$  correspondentes a distintos HO). Quanto maior for o fator de redundância de um recurso o sistema poderá responder mais efetivamente às falhas, pois as atividades do recurso que falha poderão ser realizadas por outro. Este parâmetro pertence ao HO no nível de operacional. Os fatores de Rejeição e Redundância são incrementados quando existe mais de um HO composto no sistema.

Quando dentro do mesmo HO composto existam operações que possam ser executadas por vários recursos (P.Os inicial e final que possam ser alcançados ao mesmo tempo por mais de dois recursos de manufatura levando em consideração sua cinemática inversa) aumenta também a redundância do sistema. Nesse caso se existem vários recursos com capacidade de realizar a mesma operação no plano de manufatura, essa operação será agendada no recurso que esteja mais perto dos P.O.s, ou pode ser executada de maneira colaborativa entre os recursos, garantindo assim não ter colisões ou conflitos. Dessa forma dois recursos em posições similares não terão agendada a mesma operação, deixando eles disponíveis para executar outras operações em outros Hólons ou para lidar com perturbações futuras no mesmo Hólón, maximizando assim a eficiência energética do sistema.

Na parte superior da Figura 20 é apresentada uma trajetória entre os P.O.s antes da etapa de planejamento inicial, é possível observar que sem um agrupamento inicial em HO compostos a trajetória obtida (neste exemplo de modo automático) contém lacetes e, portanto, não é ótima em termos de distância nem tempo, neste exemplo a distância total desta trajetória é 71198,019. Na parte inferior da Figura 20 é apresentada uma trajetória entre as operações que já leva em

consideração uma agrupação dos recursos (utilizando o algoritmo ROC baseado em atividades) para formar hólons compostos (neste caso a arquitetura holônica resulta em 3 hólons), dentro de cada HO composto mesmo se a trajetória é aleatória essa tem uma distância total de 18100,61. Nesse ponto inicial já é possível observar a vantagem de utilizar uma arquitetura holônica, a qual oferece uma melhora no planejamento inicial em termos de distância e tempo. Na Figura 21 é apresentado o valor de distância das trajetórias automáticas que podem aparecer na etapa de planejamento inicial para cada um dos três hólons deste exemplo, embora dentro de HOs algumas dessas trajetórias possam refletir em operações impossíveis do sistema de manufatura.

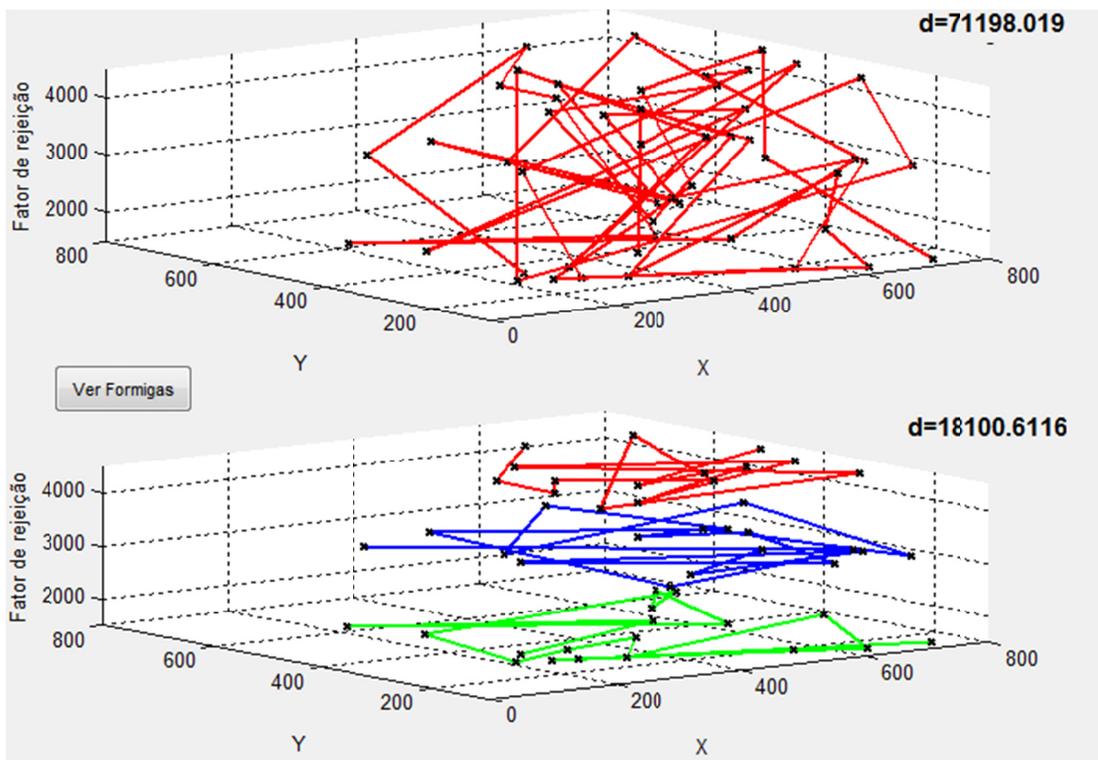


Figura 20. Possível Trajetória Aleatória Inicial sem hólons e logo considerando três Hólons

#### 4.2. Etapa de Agendamento Dinâmico Baseada em Stigmergia - HT

Na estratégia proposta nesta tese esta etapa é realizada pelo HT, os planos iniciais obtidos na etapa anterior têm que mudar ou ser reconfigurados de maneira dinâmica de forma a: otimizar um plano de manufatura manual, aleatório, ou também reconfigurar um plano otimizado existente cada vez que apareça uma perturbação no sistema. Dessa forma as operações inicialmente atribuídas a certos recursos de manufatura podem ser agora reagendadas para outros recursos

aproveitando, a característica de redundância no hardware e na distribuição dos recursos de manufatura (procurando a intersecção dos seus espaços de trabalho) do sistema subjacente. Sempre que o sistema seja reconfigurado e alcance a convergência é verificada a disponibilidade dos recursos para realizar as operações reagendadas, para assim garantir um plano de manufatura realizável.

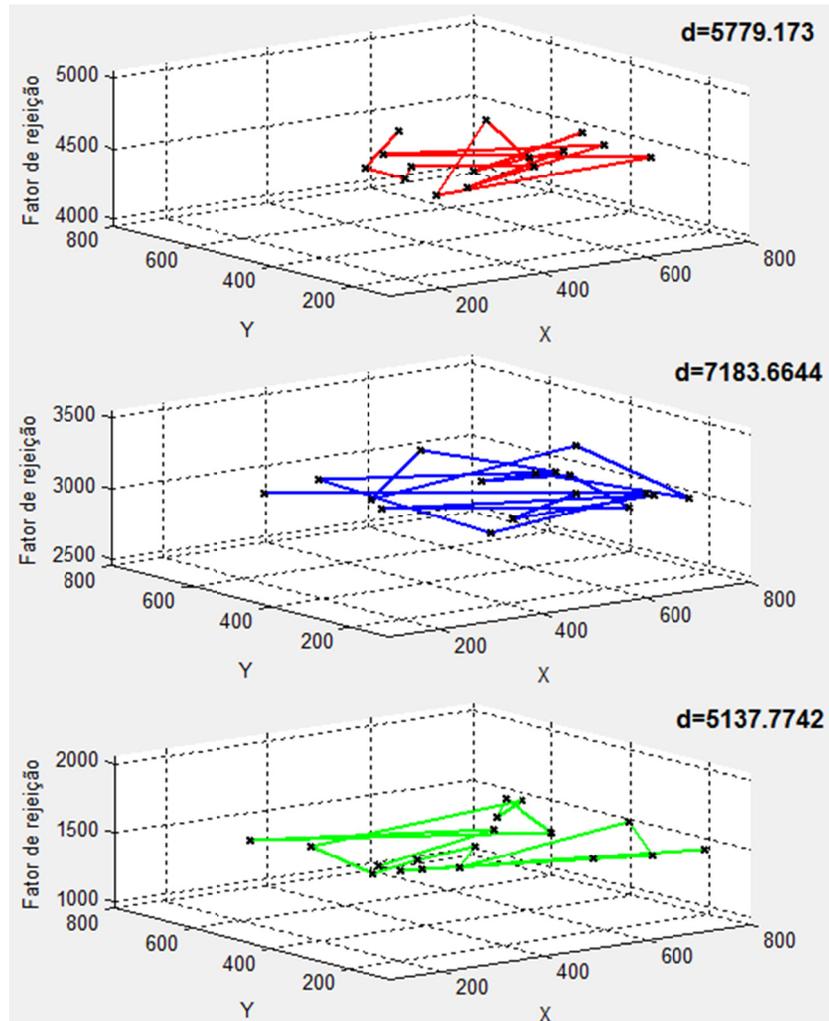


Figura 21. Planejamento Inicial Utilizando uma Arquitetura Holônica com 3 Hólons Compostos

Quando aparece uma perturbação no sistema é ativado um estado conhecido como: *Estado Transiente*. Nesse estado, a estratégia de agendamento dinâmica fará com que possam ser obtidas novas soluções semi-ótimas rapidamente, realocando as operações dos recursos com falha para outros recursos disponíveis, as quais servirão como suporte para a obtenção de novos planos

eficientes, que entrarão a funcionar quando acaba o estado transiente e começa o seguinte *Estado Estacionário* do sistema.

#### 4.2.1. Tempo de Reestabelecimento

Esta variável determinará a duração do Estado Transiente que começa com uma perturbação e está relacionado com o número de épocas (e portanto, com o número de iterações) o qual é um parâmetro de entrada do algoritmo, ver Figura 31.

#### 4.2.2. Utilização de Agentes Móveis Tipo Formiga

Já que a estratégia proposta nesta tese está fundamentada em *Stigmergia Baseada em Sinais* para o funcionamento do algoritmo de coordenação é levado em consideração um conjunto de agentes virtuais (software) móveis (no espaço de manufatura) simples chamados: *Agentes Formiga*, os quais vão ser coordenados por meio de um algoritmo iterativo, para finalmente obter um plano de manufatura. Para obter uma solução do JSP, é definido que antes de começar o algoritmo estes agentes formiga estejam distribuídos aleatoriamente dentro do mesmo espaço tridimensional (espaço de manufatura) onde estão localizados os P.Os (Figura 22). Nesse algoritmo o número de formigas ( $n_{formiga}$ ) embora é uma variável de entrada definida pelo usuário, deve ser maior ou igual que o número de P.Os totais do sistema estudado.

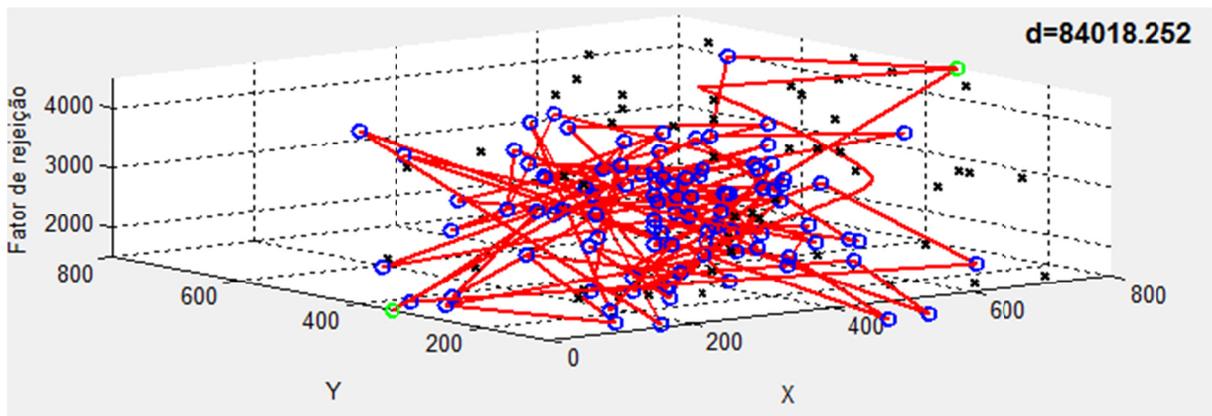


Figura 22. Distribuição aleatória das formigas antes do começo do algoritmo

Com o intuito de implementar e visualizar o funcionamento do algoritmo de agendamento dinâmico, é desenvolvido e implementado um programa utilizando uma linguagem de alto nível (MATLAB<sup>®</sup>), onde os agentes formiga estarão armazenados dentro de uma matriz ( $n_{for} \times 3$ ).

Quando são plotadas linhas retas para unir as posições  $(X, Y, Z)$  das formigas adjacentes na matriz, aparece uma trajetória (composta por linhas retas que não) passa por todos os P.Os nem é ótima em termos de distância (e por tanto também não é ótima em termos de tempo) pois apresenta lacetes e linhas entre P.Os que não estão perto no espaço tridimensional de manufatura e portanto corresponderiam a comportamentos (operações) impossíveis do sistema, ver Figura 23.

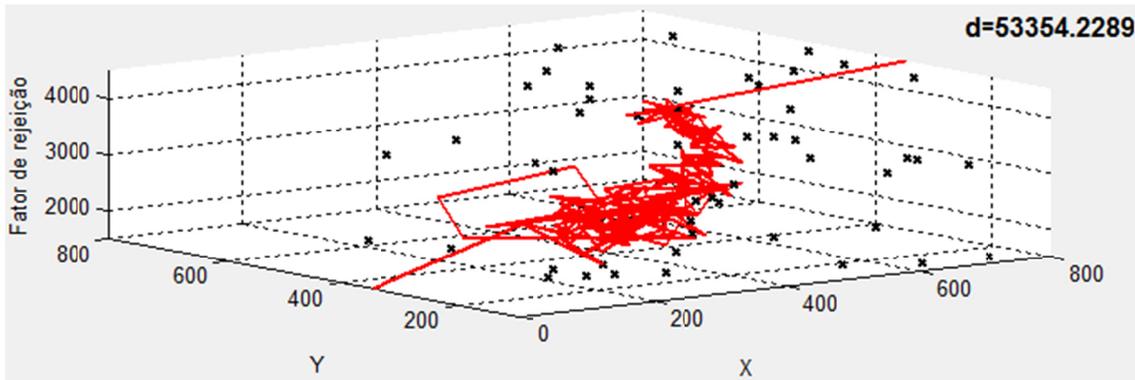


Figura 23. Trajetória na época 1 do algoritmo de Agendamento Dinâmico

No início do algoritmo as duas primeiras coordenadas desses agentes serão números aleatórios dentro dos valores máximos e mínimos das coordenadas ocupadas pelos P.Os do sistema, a terceira coordenada é também um número aleatório entre zero e o fator de rejeição máximo (secção 4.1.2). Assim, embora inicialmente os agentes formiga estejam distribuídos aleatoriamente, com o avanço das iterações irão se posicionar numa trajetória sem lacetes aproximando-se pouco a pouco aos P.Os dos recursos de manufatura, até finalmente passar através de todos esses numa trajetória semi-ótima em termos de distância, ver Figura 24.

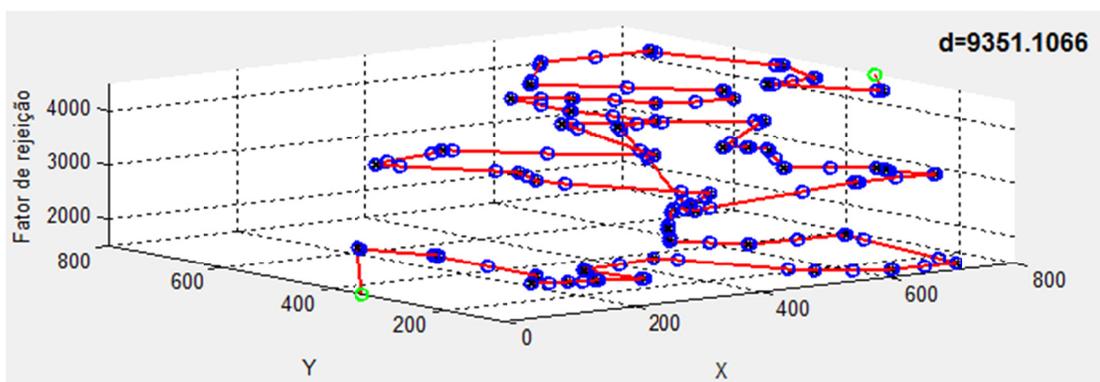


Figura 24. Distribuição das formigas depois de 900 épocas ( $k = 900$ )

Quando o algoritmo finalmente converge cada segmento de reta representa uma operação completa (P.O inicial até P.O final) relacionada a um único recurso de manufatura significando num funcionamento real do sistema. Na Figura 25 pode-se observar um processo de agendamento utilizando 50 P.O e levando em consideração 900 épocas do algoritmo.

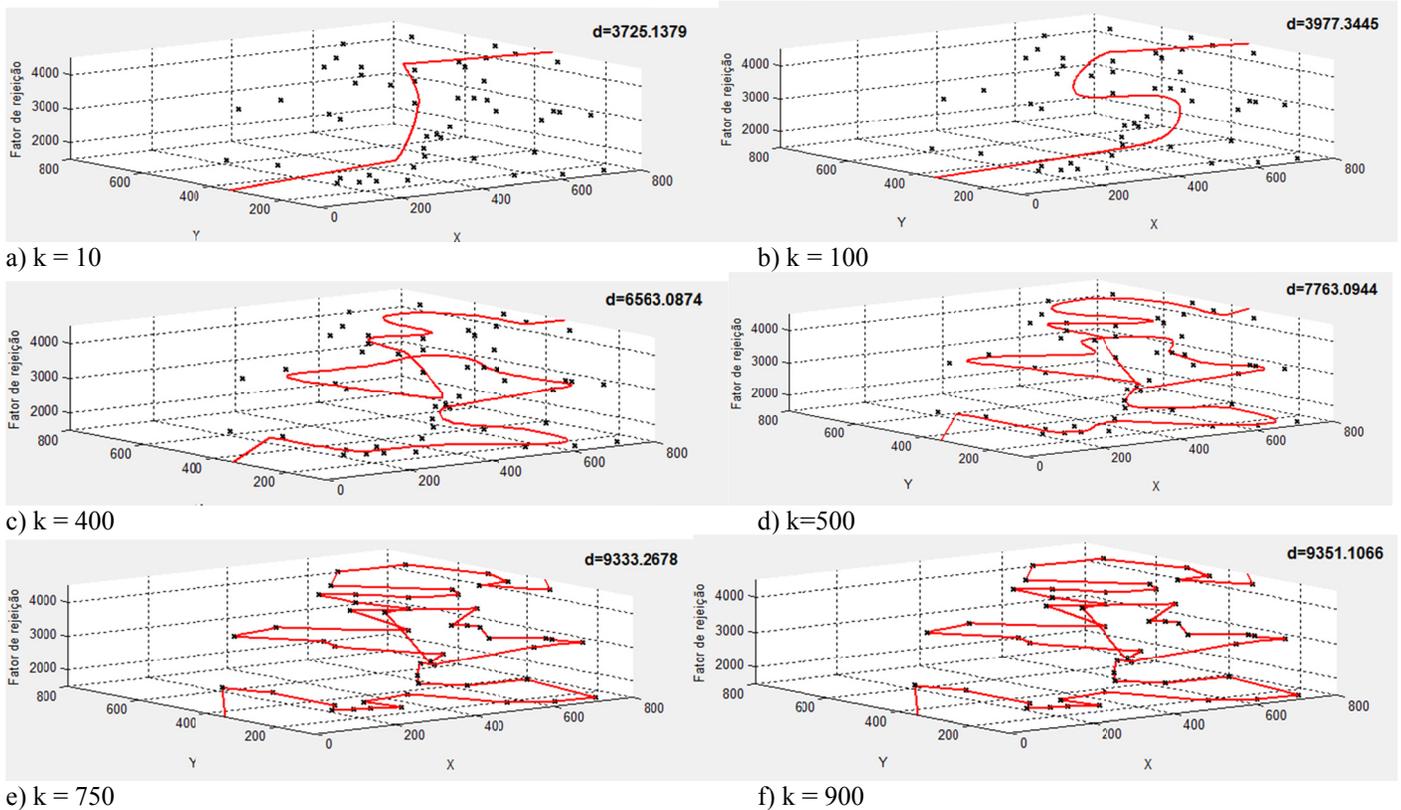


Figura 25. Funcionamento do Algoritmo de Agendamento Dinâmico ao longo das Épocas

Caso apareça uma falha e um segmento de reta da solução final não possa ser alcançado pelos espaços de trabalho de nenhum recurso o sistema o sistema ficará detido e não poderá se recuperar da perturbação. Conseqüentemente é necessário que o sistema projetado apresente redundância, existindo uma intersecção entre os espaços de trabalho dos recursos físicos.

#### 4.2.3. Proposta de Sinais variáveis para comunicação indireta - HO

Para desenvolver a comunicação entre os agentes que formam o sistema de manufatura é implementado um algoritmo baseado na rede neural Mapa Autoorganizativo SOM (Self Organizing Map) na qual os agentes que ficam perto um do outro podem compartilhar informação de maneira indireta, de forma a alcançar uma organização interna, logrando mapear

distribuições de alta dimensão em distribuições muito mais simples, por exemplo, de uma ou duas dimensões.

Nesta tese essa comunicação indireta entre agentes permitirá que os agentes formiga funcionando de forma local possam disponibilizar rapidamente para outras formigas a informação global e dinâmica do espaço tridimensional de manufatura sem ter que levar em consideração protocolos de comunicação direta, os quais virariam complicados e consumiriam muito tempo no caso de aumentar o número de formigas. Esse modelo de comunicação indireta, o qual corresponde com a Stigmergia baseada em Sinais é implementado nesta tese utilizando sinais variáveis chamadas de *feromônios*, os quais vão ser espalhados lateralmente para ambos os lados (direita e esquerda) partindo da formiga que encontra um ponto de operação (formiga ganhadora), ver Figura 26.

#### **4.2.4. Feromônio**

O feromônio então é uma variável dentro dos agentes formiga que determina e comunica a influência ou alcance da excitação de um agente formiga a um número determinado de formigas no conjunto. Quando começa o tempo do reestabelecimento o valor do feromônio (*Feromônio Inicial*) é um máximo número inteiro que indica o número de formigas influenciadas, essa variável pertence ao HT no nível de gerenciamento e pode ser determinado pelo usuário ou pelo tipo de problema que causou a falha.

Logo do início o valor de feromônio (*Feromônio Atual*) vai diminuindo na medida em que decorre o tempo de reestabelecimento, de acordo a uma função exponencial decrescente equação (1), garantindo uma resposta colaborativa e rápida sem fazer instável o sistema. O parâmetro *Feromônio Atual* pertence ao HO no nível operacional.

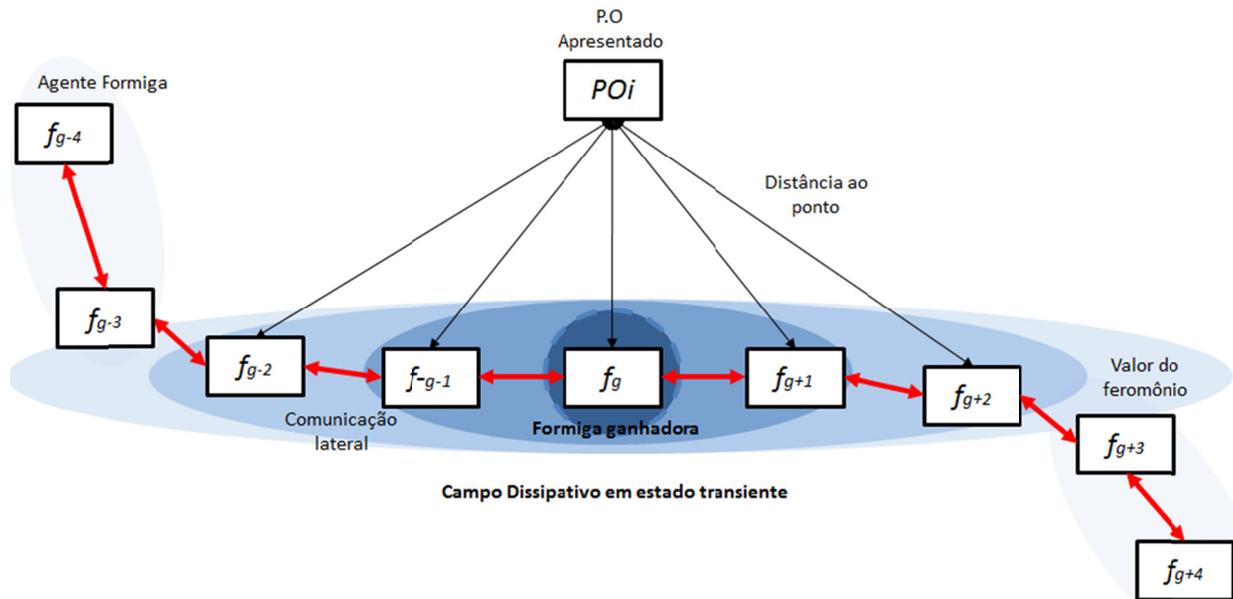


Figura 26. Influência do campo Dissipativo sobre as formigas

Os agentes formiga podem ser excitados pelos feromônios pertencentes aos HOs e, portanto, é obtida uma formiga ganhadora durante cada época do Estado Transiente, mas quando este estado acaba o valor do Feromônio Atual em todos os HOs é levado novamente para zero. Cada vez que é encontrada uma formiga ganhadora o valor do feromônio é responsável da abertura máxima de uma função conhecida como *Campo Dissipativo*. A função descrevendo o valor do feromônio com respeito às épocas é mostrada na Figura 27.

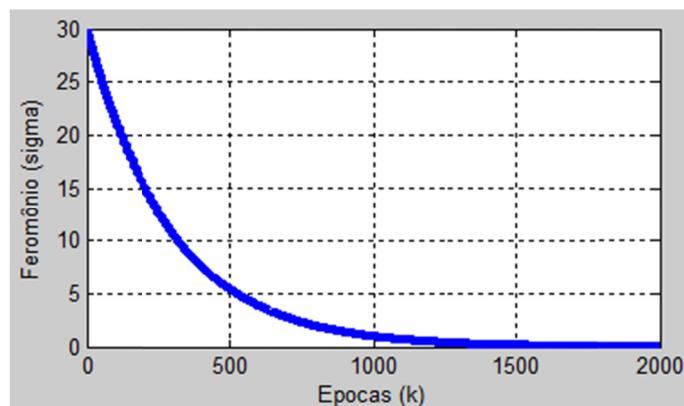


Figura 27. Valor de Feromônio

$$\sigma(k) = \sigma_0 e^{-\left(\frac{k}{\tau_1}\right)} \quad (1)$$

Onde  $\sigma$  é o valor atual do feromônio,  $k$  é a iteração atual,  $\sigma_0$  é o valor inicial do feromônio, e  $\tau_1$  é uma constante calculada como  $\tau_1=1000/\log(\sigma_0)$ . Neste exemplo o valor utilizado do feromônio inicial é  $\sigma_0=30$ ,

#### 4.2.5. Desenvolvimento do Algoritmo de Propagação de Informação (Campo Dissipativo)

Enquanto decorre um *tempo de reestabelecimento* quando uma formiga ganhadora é obtida, essa emite ou espalha um valor de feromônio (valor do feromônio do HO ou recurso encontrado) responsável de criar e determinar o tamanho máximo de um *campo dissipativo* que aparece ao redor dela, o qual distribui indiretamente a informação local da formiga ganhadora para as outras formigas da trajetória as quais detectam esse campo, dessa maneira é utilizada Stigmergia ao invés de protocolos complexos de comunicação direta entre agentes. Este campo é modelado matematicamente por meio de uma função (de vizinhança lateral), que determina um valor máximo do campo (1.0) para as formigas perto da ganhadora, o valor do campo depende da distância lateral ( $d$ ) desde a formiga ganhadora.

A formiga ganhadora COORDENA o movimento dela e o movimento das suas vizinhas dentro do espaço de manufatura compartilhando informação sobre sua posição por meio do campo dissipativo ao seu redor. Entre mais longe da formiga ganhadora, o valor do campo (que faz com que as formigas se movimentem) detectado pelas outras formigas vai diminuir, tendendo a zero enquanto a distância lateral à ganhadora tende a infinito. Logo do estado transiente acabar, os agentes formiga deixam de produzir feromônios, fazendo desaparecer o campo dissipativo e permitindo ao sistema voltar a um novo estado estacionário, no qual nenhuma das formigas vai se movimentar. Se não existisse um campo dissipativo no algoritmo, os agentes formiga somente exibiriam cooperação, mas não coordenação, já que somente seria modificada a posição da formiga ganhadora, mas não a posição das formigas na cercania, assim não existiria comportamento colaborativo nenhum e a trajetória final entre as formigas poderia conter lacetes. Levando essa descrição em consideração, a função de vizinhança utilizada nesta tese reflete uma forma de chapéu mexicano, como mostrado na Figura 28.

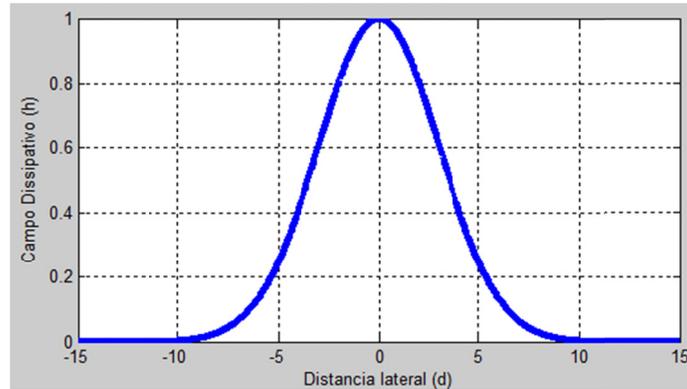


Figura 28. Valor do Campo Dissipativo

A expressão matemática proposta para o Campo Dissipativo é:

$$h(k) = e^{-\left(\frac{d^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (1)$$

Onde  $h$  é o valor do Campo Dissipativo,  $d$  é distância lateral à formiga ganhadora, e  $\sigma$  é o valor atual do feromônio. Neste exemplo o valor utilizado do feromônio é  $\sigma=3$ .

Já que o valor do feromônio (tamanho inicial do campo) decresce na medida que aumenta o tempo de reestabelecimento, a abertura do campo dissipativo ao redor da formiga ganhadora também diminui, fazendo com que o comportamento no algoritmo de stigmergia se transforme com as iterações desde coordenação para cooperação. A coordenação permite que não só a formiga mais próxima “ganhadora”, mas as suas “companheiras mais próximas” possam se movimentar no espaço de manufatura obtendo trajetórias mais suaves e sem lacetes.

Dessa maneira a trajetória entre as formigas inicialmente vai variar muito, as formigas vão cooperar umas com outras para tentar eliminar os lacetes e copiar a distribuição espacial geral dos P.O., depois (na medida em que decorrem as iterações) a trajetória vai ficando cada vez mais estável, com as formigas chegando cada vez mais perto dos P.O. mais próximos a elas. Finalmente depois de um número de iterações (que depende do número de recursos de manufatura) as formigas alcançam todos os P.O. associados aos recursos, e a mudança de posição de uma formiga não modifica mais as posições das outras, obtendo-se mais autonomia (cooperação), neste ponto é obtida uma solução ou novo plano de manufatura.

Na Figura 30 pode se observar o comportamento da trajetória entre as formigas para cada um dos HO compostos (3 neste exemplo) no algoritmo iterativo enquanto ocorrem as épocas. Na medida em que essas aumentam a trajetória unidimensional começa copiar cada vez melhor a distribuição espacial (tridimensional) das operações (neste exemplo  $k=300$  e  $k=400$ ), depois de copiar a distribuição geral as formigas se movimentam de uma maneira mais fina, para chegar cada vez mais perto dos P.O. Finalmente quando essas formigas conseguem alcançar a posição exata dos P.O. ( $k=700$ ) o algoritmo alcança um estado de convergência, que faz com que mesmo aumentando as iterações as formigas fiquem na sua posição na trajetória ( $k=900$ ) e essa não vai mais variar.

#### 4.2.6. Fator de Autonomia

Além do modelo básico de função de vizinhança na equação (1), nesta tese é integrada uma variável (Fator de Autonomia) que permite modelar o comportamento colaborativo das formigas, valores perto de zero significariam um comportamento de coordenação, quanto maior o valor do fator de autonomia as formigas seriam mais independentes e o comportamento seria de cooperação. Este fator aumenta quando aparece uma perturbação no sistema, e é zerado depois de acabar o tempo de restabelecimento (se esta variável tem um valor perto do zero o hólón terá um comportamento altamente colaborativo). A função de vizinhança básica tipo chapéu mexicano se tornará numa função escalonada, a qual diminui com cada incremento inteiro da distância lateral ( $d$ ), ver Figura 29.

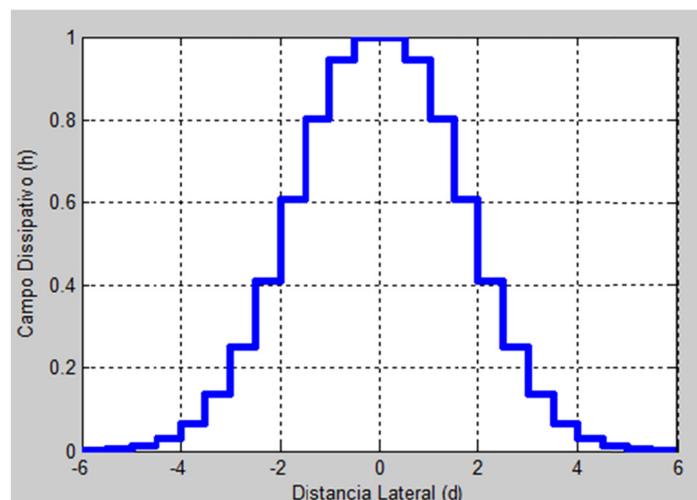
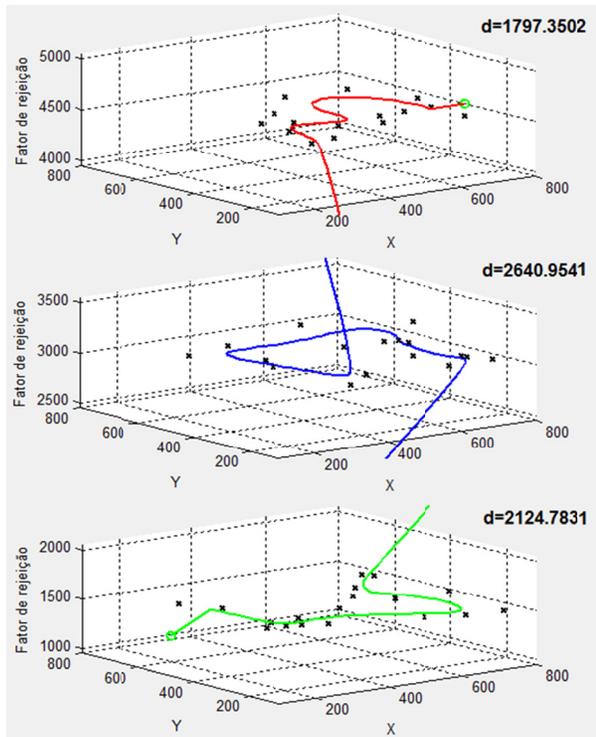
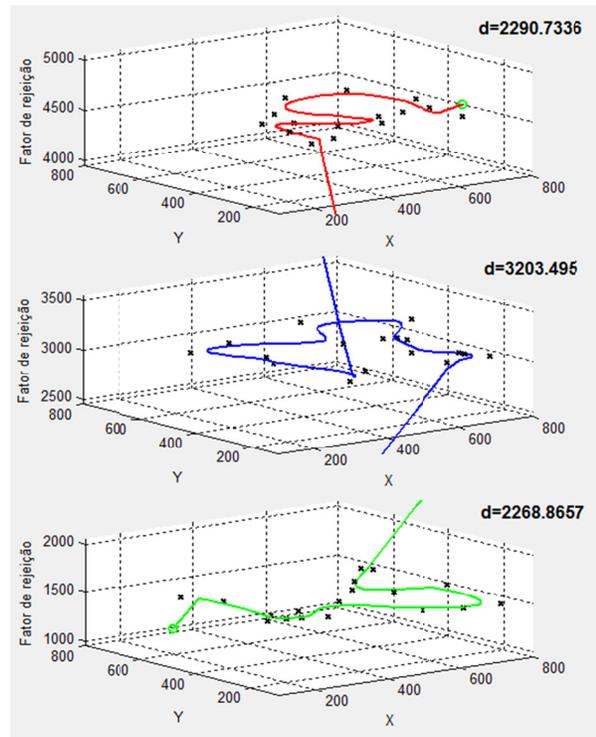


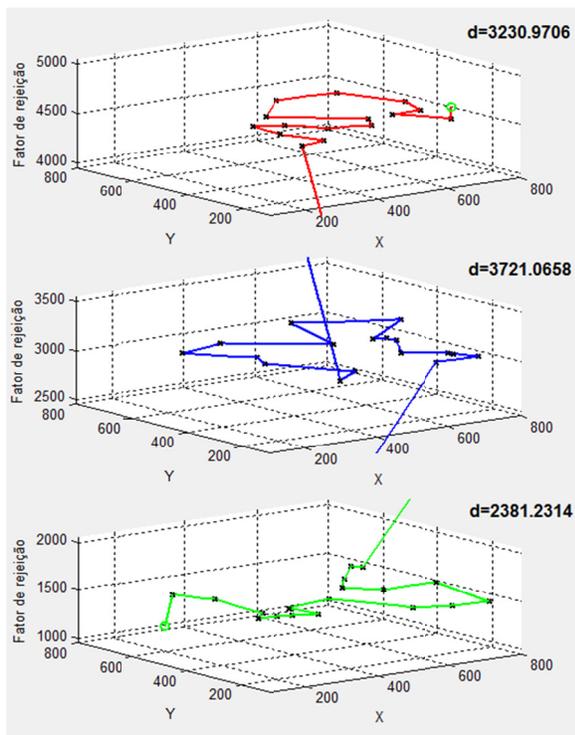
Figura 29. Influência do Fator de Autonomia no Campo Dissipativo



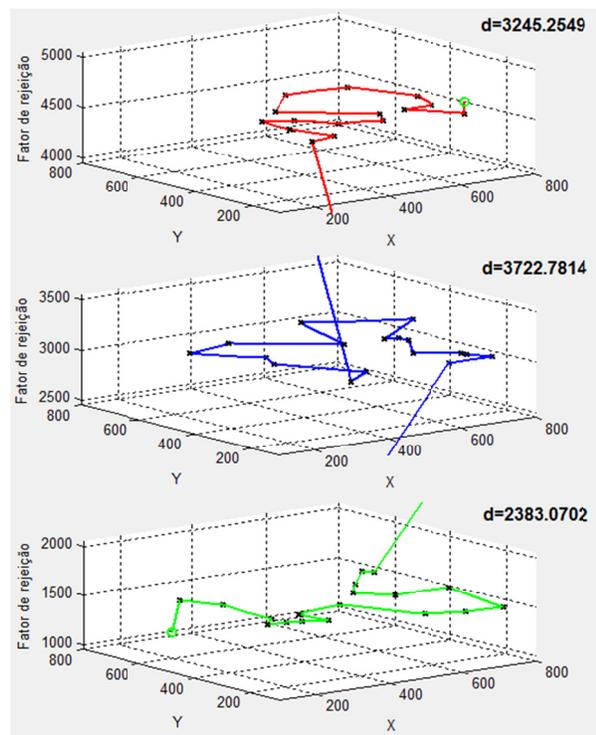
a)  $k = 400$



b)  $k = 500$



c)  $k = 750$



d)  $k = 900$

Figura 30. Trajetória de planejamento nos HO em função das épocas

### 4.3. Desenvolvimento do Algoritmo de Agendamento Dinâmico no HT para Implementação Software

O algoritmo iterativo de agendamento dinâmico proposto nesta tese está baseado na técnica de inteligência colaborativa Stigmergia e na rede neural auto organizativa SOM, as quais utilizam uma aprendizagem não supervisionada. Neste trabalho o algoritmo proposto vai funcionar cada vez que apareça uma perturbação e, portanto, o sistema entre no seu *Estado Estacionário*. Com o intuito de implementar este algoritmo é utilizado o software de alto nível MATLAB® e são levadas em conta as seguintes entradas (Figura 31):

- O usuário pode definir o valor das seguintes variáveis:

**nrec** = Número de P.O.;

**numformiga** = Número de formigas;

**nepoc** = Número de épocas ou tempo de reestabelecimento;

**ferom** = Valor inicial do feromônio;

**fautom** = Fator de Autonomia;

**frejeic** = Fator de rejeição;

**fdisp** = Fator de Disponibilidade inicial;

50	Número de P.O.
200	Número de formigas
1000	Tempo de Reestabelecimento
200	Feromônio
5	Fator de Autonomia
1500	Fator de Rejeição
0.1	Fator de Disponibilidade

Figura 31. Entradas no Software Desenvolvido

As três primeiras variáveis são os parâmetros de comando necessários para o funcionamento do algoritmo, enquanto as quatro últimas variáveis são parâmetros de manufatura que vão ser adaptados enquanto decorrem as épocas.

- Os P.Os estão armazenados numa matriz **xmatriz** de tamanho ( $nrec \times 4$ ), onde as três colunas correspondem às três coordenadas do ponto dentro do espaço tridimensional de manufatura (X,Y, Z) e a quarta ao recurso associado a esse ponto.
- O Conjunto de formigas está armazenado numa matriz **wij** de tamanho ( $nformiga \times 3$ ): onde as três colunas correspondem às coordenadas (X,Y, Z).

O algoritmo de coordenação é um algoritmo de funcionamento iterativo onde:

- **Iteração:** Apresentação de um só P.O ao conjunto de formigas.
- **Época:** Apresentação de todos os P.Os ao conjunto de formigas. Uma época tem tantas iterações quantos P.Os existem no sistema.

No começo do algoritmo os agentes móveis formiga estão aleatoriamente distribuídos no espaço tridimensional de manufatura. Para conseguir que as formigas comecem a se organizar para obter uma trajetória aberta entre a primeira e a última formiga, a qual possa passar por todos os P.Os copiando sua distribuição no espaço (preservação topológica), é proposto um algoritmo de três etapas (Competitivo, Colaborativo, Adaptativo), o qual tem que ser executado de forma repetitiva, durante um número de épocas definidas pelo usuário no início como uma entrada no software: (*niter*), já que o tempo que demora o algoritmo em terminar a execução dessas épocas é o tempo de reestabelecimento. Depois de esse tempo o sistema entra novamente no Estado Estacionário. Além disso, em cada época do algoritmo vão ser executadas as três etapas em ordem descendente como se mostra na Figura 32.

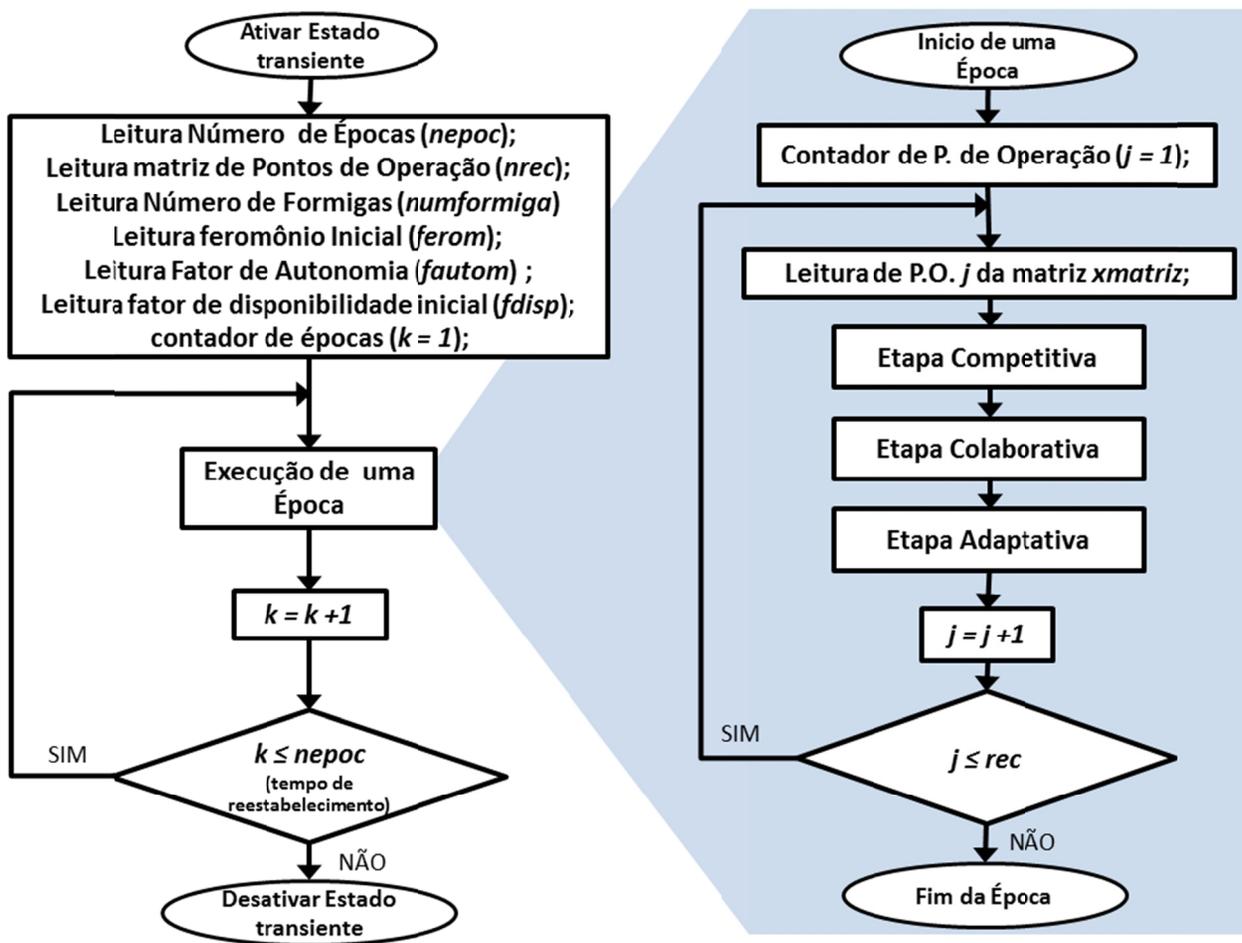


Figura 32. Fluxograma do Estado Transiente e uma Época no Agendamento Dinâmico

### 4.3.1. Implementação Software da Etapa Competitiva

Nesta etapa é lida a posição (X,Y,Z) de um P.O (guardada na matriz *xmatriz*) para logo ser comparada com a posição (X,Y,Z) de todas as formigas (guardadas na matriz *wij*), essa comparação será calculada utilizando a distância euclidiana. A formiga que esteja mais perto do P.O correspondente à iteração (*j*) será identificada como a formiga ganhadora e seu índice dentro da trajetória será levado em consideração na etapa colaborativa.

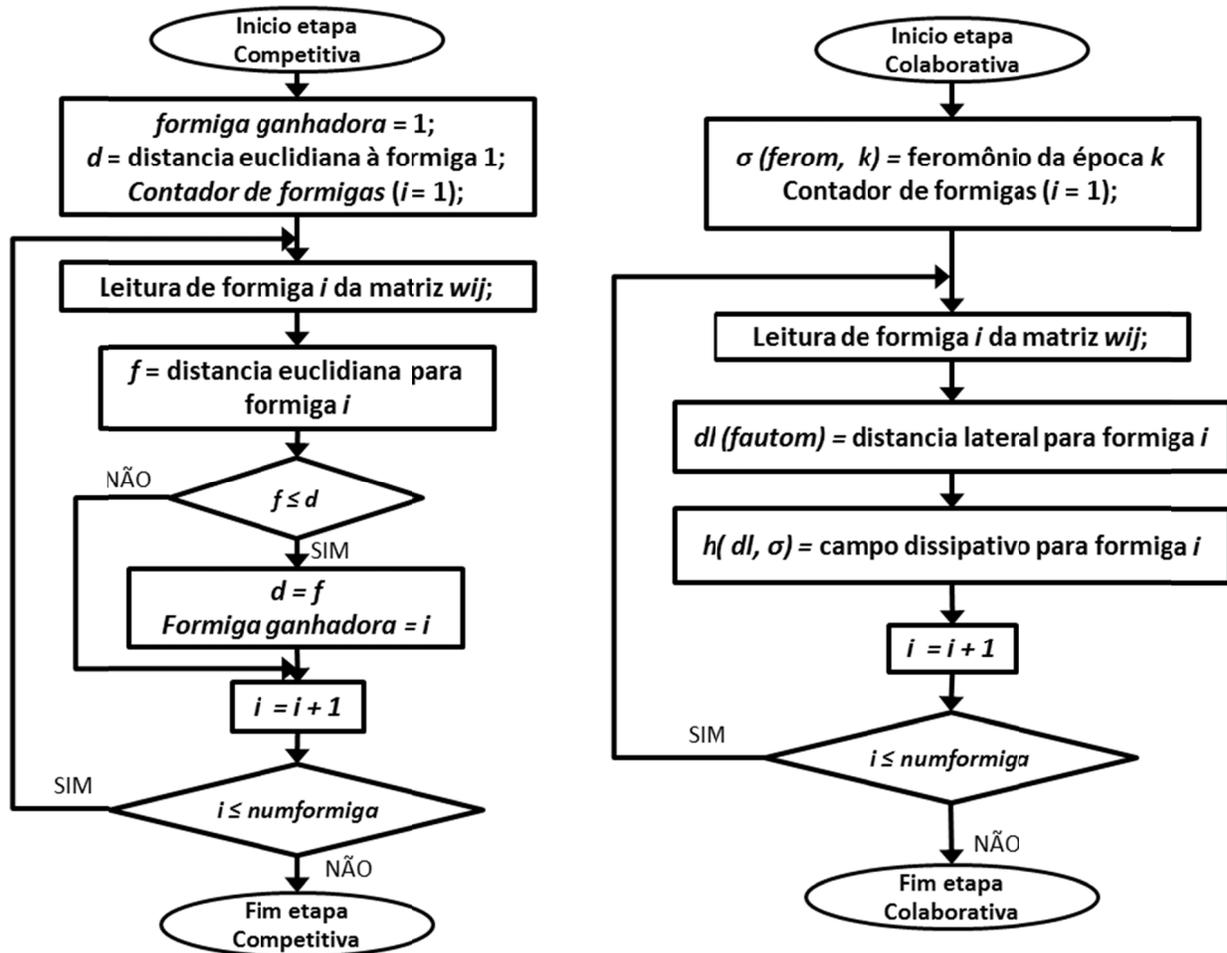


Figura 33. Fluxograma das Etapas Colaborativa e Adaptativa no Algoritmo de Agendamento

### 4.3.2. Implementação Software de Etapa Colaborativa

Nesta etapa é calculado o valor do feromônio ( $\sigma$ ) que emite a formiga ganhadora conforme a equação (1) (o qual depende da época atual (*k*)), e logo com esse valor é calculado o campo dissipativo que detecta cada formiga, o qual transmite ou comunica de forma indireta a informação local da ganhadora para as outras formigas da trajetória, Ver Figura 33. Este campo

( $h$ ) o qual será levado em consideração na Etapa Adaptativa também depende da iteração ( $k$ ), da distância lateral ( $d$ ) e do valor do feromônio ( $\sigma$ ).

### 4.3.3. Implementação Software da Etapa Adaptativa

Nesta etapa todas as formigas da trajetória modificam sua posição no espaço tridimensional de manufatura (armazenada na matriz  $w_{ij}$ ) de forma a ficar mais perto do P.O. pela formiga ganhadora que espalhou o feromônio o fluxograma desenvolvido para a implementação da etapa Adaptativa é mostrado na Figura 35. A atualização da posição 3D das formigas é calculada de acordo a equação (2):

$$w_i(k + 1) = w_i(k) + \mu(k)h(k)(x - w_i(k)) \quad (2)$$

Esta modificação da posição da formiga ( $i$ ) é calculada de maneira proporcional a: o valor do campo dissipativo que detecta cada formiga ( $h$ ), sua distância euclidiana ao P.O. encontrado e um *Fator de Disponibilidade* ( $\mu$ ) para a época atual ( $k$ ).

### 4.3.4. Fator de Disponibilidade

O Fator de Disponibilidade variável ( $\mu$ ) proposto nesta tese é um indicador da disponibilidade do recurso associado ao P.O para executar uma operação, se o valor deste fator está perto de zero indica que o recurso já está ocupado e, portanto, a trajetória não poderá passar por esse (esse não vai atrair formigas), se o valor aumenta significa recurso estará disponível para uma operação e, portanto, este vai atrair mais formigas para a trajetória poder passar pelos P.Os desse recurso. Este fator começa desde um valor inicial  $\mu_0$  quando começa o estado transiente e vai diminuindo na medida que as épocas aumentam (decorre o tempo de reestabelecimento) de acordo a uma função exponencial decrescente, ver equação (3).

$$\mu = \mu_0 e^{-\left(\frac{k}{\tau_2}\right)} \quad (3)$$

Onde  $\mu$  é o valor atual do fator de disponibilidade,  $k$  é a iteração atual,  $\mu_0$  é o valor inicial do fator de disponibilidade dos recursos, e  $\tau_2$  é uma constante.

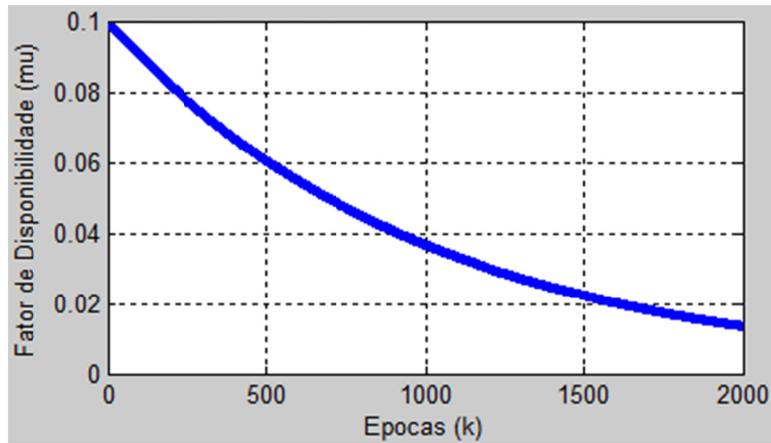


Figura 34. Valor do Fator de Disponibilidade

Na Figura 34 o valor utilizado do fator de disponibilidade inicial é  $\mu_0 = 0,1$ .

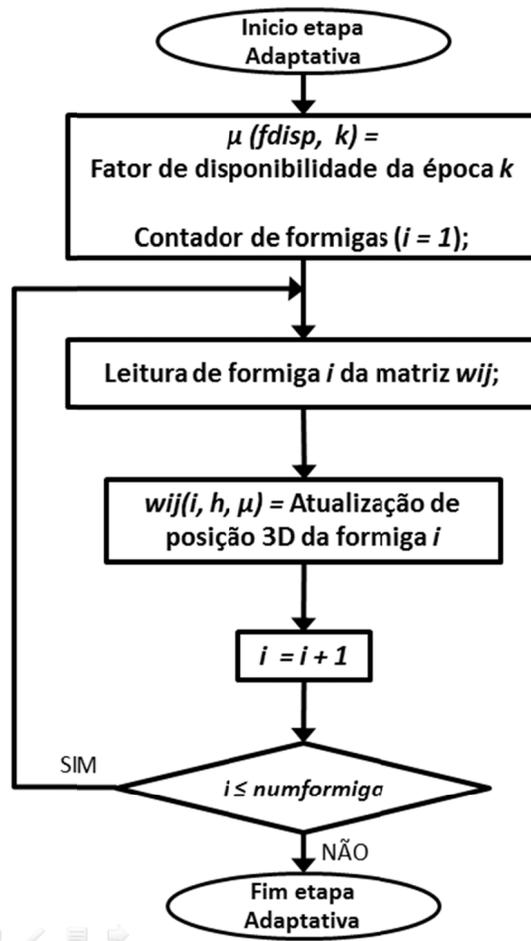


Figura 35. Fluxograma da Etapa Adaptativa no Algoritmo de Agendamento

Na concepção da estratégia para o agendamento dinâmico de manufatura utilizando Stigmergia, desde o ponto de vista dos Hólons da arquitetura ADACOR são desenvolvidos os pseudocódigos que mostram as etapas básicas do algoritmo para: hólón de produto (HP), hólón de tarefa (HT), hólón de Supervisão (HS) e hólón operacional (HO), ver Figura 36.

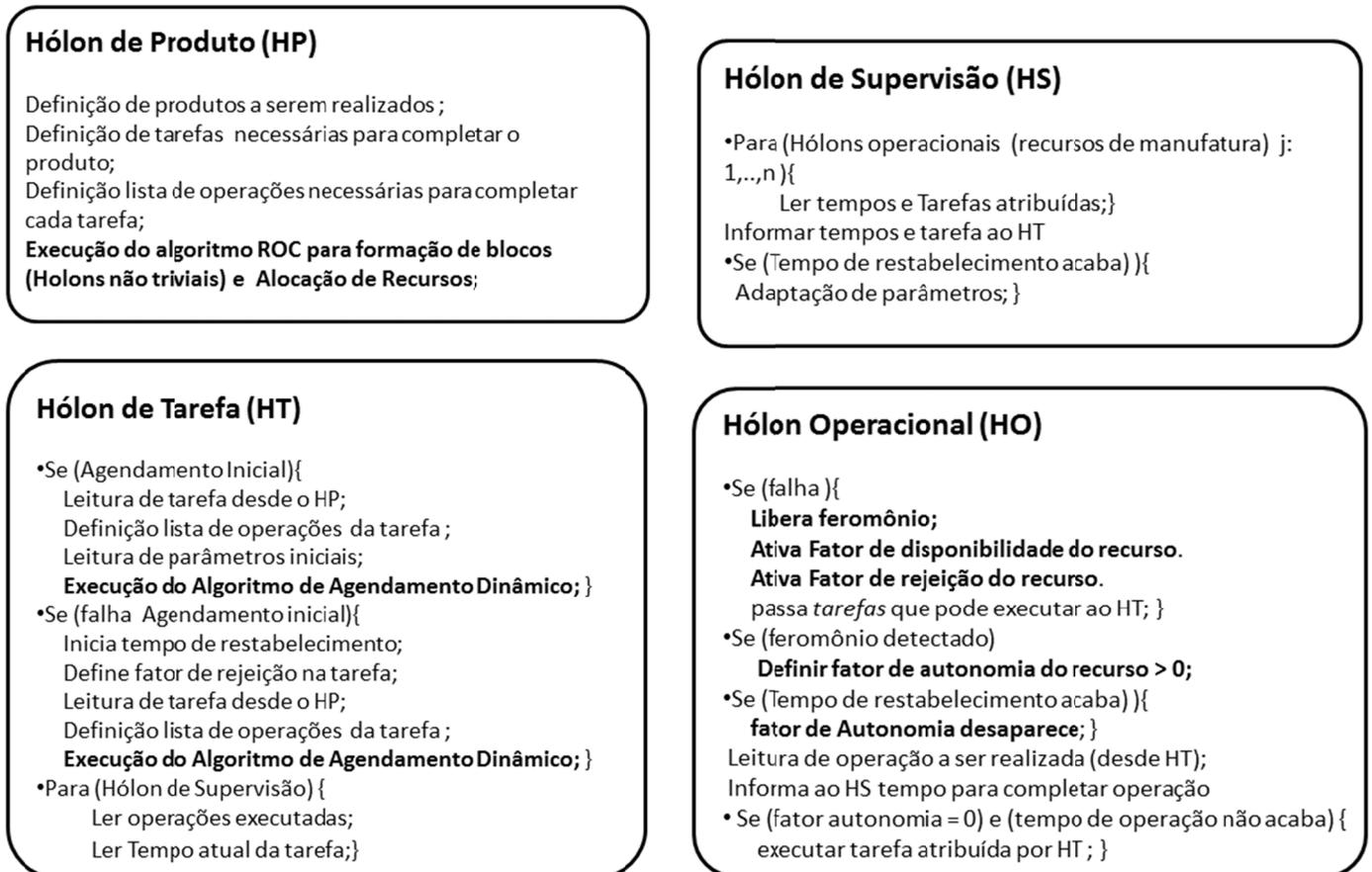


Figura 36. Tarefas básicas dentro dos hólons da arquitetura ADACOR na Estratégia Proposta

#### 4.4. Comportamento dos Parâmetros dentro do HO no Estado Transiente e Estado

##### Estacionário

A estratégia de coordenação propõe que enquanto decorre o tempo de estabelecimento, no Estado Transiente o hólón operacional (HO) continua liberando: o *Feromônio* atual e o *Fator de Disponibilidade* atual os quais vão descender com as iterações de acordo às equações (1) e (3) para permitir a formação e logo a estabilização desde uma trajetória inicialmente muito oscilatória e caótica até uma trajetória estável e sub-ótima que ao passar por todos os P.O.s

indicará a ordem de execução das operações que os recursos realizam para completar uma tarefa ou processo de manufatura; essas duas variáveis propostas e decrescentes com as iterações são as responsáveis do comportamento de Coordenação predominante no início do estado transiente.

Dentro do HO também são ativados outros dois parâmetros: o *Fator de Rejeição* e o *Fator de Autonomia* os quais permanecem constantes ao longo do estado transiente mesmo quando os dois primeiros parâmetros continuam diminuindo, esses últimos dois parâmetros são responsáveis do Comportamento de Cooperação, o qual é o comportamento predominante no final do tempo de reestabelecimento. O algoritmo que modela o comportamento dos parâmetros dentro do HO no estado transiente é implementado dentro do HT como apresentado anteriormente. O comportamento do HO durante os Estados transiente e Estacionário se mostra na Figura 37.

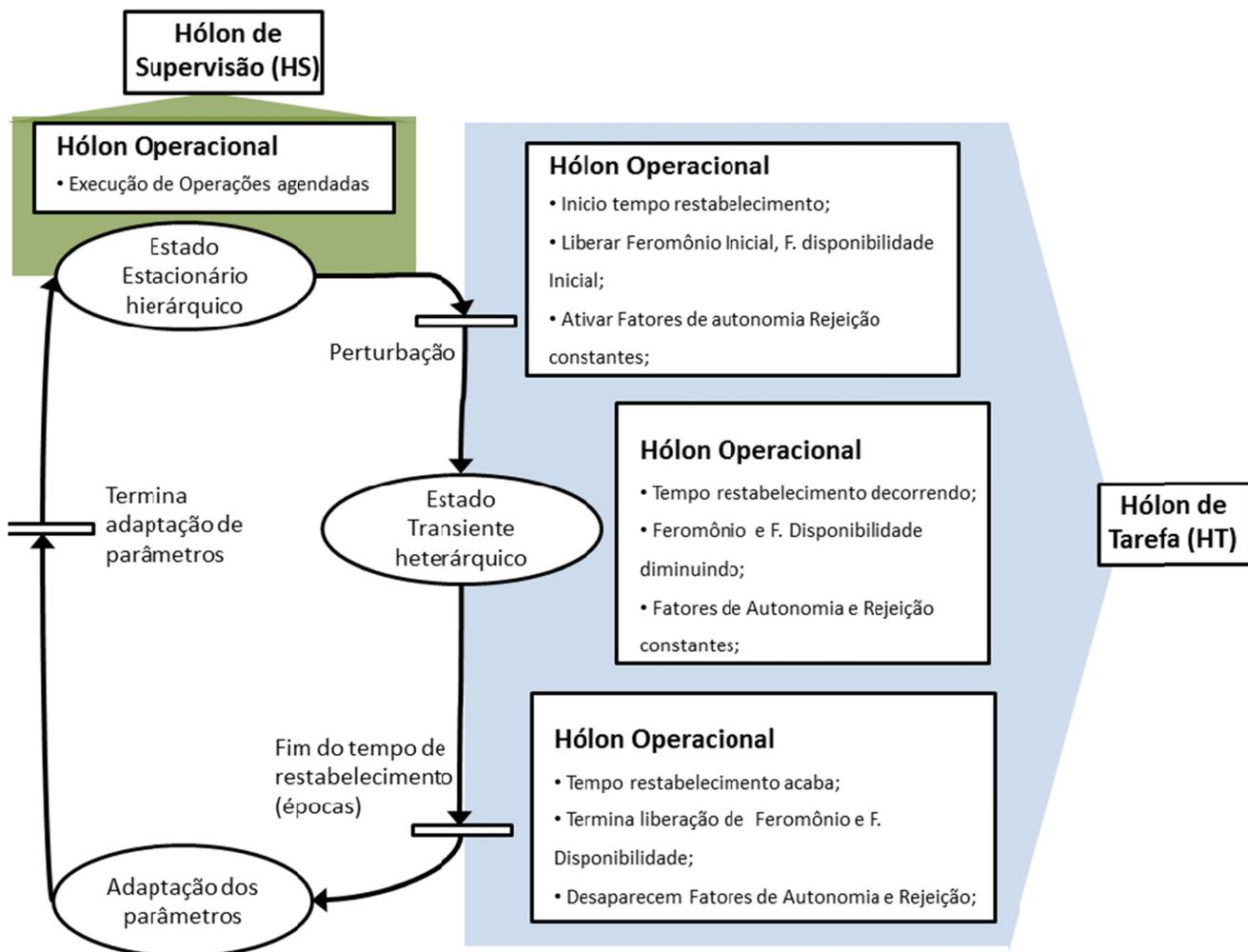


Figura 37. Comportamento dos parâmetros no Hólon Operacional

#### **4.4.1. Supervisão da Execução do Plano de Manufatura - HS**

O Hólón de supervisão somente entra em funcionamento quando termina o tempo de reestabelecimento e começa o Estado Estacionário do sistema, sua função é garantir que cada HO simples (e seu recurso de manufatura associado) execute as operações do Plano de Manufatura agendado pelo HT. Desta maneira a função do HS é enviar aos HOs Compostos as tarefas (e as operações que a compõem) do plano de manufatura segundo a trajetória sub-ótima calculada anteriormente. Além disso o HS informa os tempos de início e término dessas operações e caso que se apresente uma falha informa também a posição do recurso de manufatura (dentro do HO Composto correspondente) que será levada em consideração na seguinte execução do algoritmo de agendamento dinâmico, dessa forma será possível reassinar a operação a outro recurso no seguinte Estado Transiente.

#### **4.5. Parâmetros Adaptativos no Algoritmo de Planejamento Dinâmico e Coordenação**

Esta característica é terceira parte da estratégia de coordenação proposta e visa que os recursos de manufatura inseridos dentro dos Hólons HO e HT (nos níveis Operacional e de Gerenciamento) na arquitetura ADACOR proposta possam não somente ter um comportamento reativo, mas também possam ser adaptados (segundo uma função matemática ou manualmente) para melhorar o seu desempenho e velocidade de resposta no Estado Estacionário do sistema, levando em consideração a duração e a convergência alcançada pela trajetória no final do Estado Transiente anterior. Assim sendo alguns parâmetros responsáveis do processo de agendamento dinâmico poderão evoluir através das épocas do algoritmo adaptativo. Essa adaptação contínua faz com que o sistema melhore seu desempenho ao longo do tempo sem sair de uma faixa que prejudique a sua estabilidade.

A integração do componente adaptativo dentro dos HT e HO a serem coordenados fará com que esses não somente apresentem um comportamento reativo, mas também “aprendam” de maneira não supervisionada inserindo nestes uma característica deliberativa, além disso, diminuindo a complexidade do algoritmo de coordenação. Os parâmetros que serão adaptados continuamente dentro dos HOs compostos no algoritmo são: Fator de Rejeição, Fator de Redundância, Feromônio Atual, Fator de Autonomia e Fator de Disponibilidade Atual. Os Parâmetros que

serão adaptados dentro do HT são Feromônio Inicial, Campo Dissipativo e Fator de Disponibilidade Inicial, todos estes explicados já neste capítulo. Na Tabela 2 se mostra um resumo dos métodos de adaptação para estes parâmetros dentro da estratégia proposta.

Parâmetro	Método de Adaptação	Etapa do Algoritmo	Hólon
Feromônio Inicial	Manual	Agendamento Inicial ou E. Estacionário	HT
Fator de Disponibilidade Inicial	Manual	Agendamento Inicial ou E. Estacionário	HT
Campo Dissipativo	$h(k) = e^{-\left(\frac{d^2}{2\sigma^2}\right)}$	Agendamento Dinâmico – etapa colaborativa	HT
Fator de Rejeição	Manual	Planejamento Inicial ou E. Estacionário	HO Composto
Fator de Redundância	Manual	Planejamento Inicial ou E. Estacionário	HO Composto
Fator de Autonomia*	Manual	Agendamento Dinâmico – etapa colaborativa ou E. Estacionário	HO Composto
Feromônio Atual	$\sigma(k) = \sigma_0 e^{-\left(\frac{k}{\tau_1}\right)}$	Agendamento Dinâmico – etapa colaborativa	HO Composto
Fator de Disponibilidade atual	$\mu = \mu_0 e^{-\left(\frac{k}{\tau_2}\right)}$	Agendamento Dinâmico – etapa adaptativa	HO Composto

Tabela 2. Métodos de adaptação dos parâmetros de manufatura dentro do HO e HT

#### 4.6. Conclusões do Capítulo

Nesta tese é proposta como solução do JSP a obtenção de uma trajetória sub-ótima em termos de distância entre os pontos de operação (P.O.s) associadas aos recursos de manufatura que participam na realização de uma tarefa, considerando que assim também poderá ser minimizado o tempo que toma um HO composto para completar um processo completo. Esta trajetória entre os P.O. operações indicará a sequência em que as operações associadas são

executadas para completar o processo. A estratégia proposta neste trabalho combina o conceito de Stigmergia com as Redes Neurais Auto organizativas (SOM) para obter assim um algoritmo de coordenação que funciona de forma iterativa para uma solução semi-ótimas do problema JSP. Nesse caso são utilizados agentes móveis tipo formiga para otimizar uma trajetória, a qual pode ser visualizada como uma sucessão de linhas (operações) dentro de um espaço tridimensional.

O nível de eficiência da reconfiguração do sistema depende do mecanismo de aprendizagem e do número de parâmetros que irão modificar seus valores através dessa aprendizagem. Além disso, a estabilidade do sistema depende das variáveis anteriormente descritas e do número de hólons projetados para o sistema. A estratégia de coordenação utilizando stigmergia potencializada com a integração do componente adaptativo dentro dos agentes a serem coordenados (NÍVEIS OPERACIONAL E GERENCIAMENTO), permite que esses não somente apresentem um comportamento reativo, mas também “aprendam” inserindo neles uma característica deliberativa.

O custo (tempo, processamento) representado no número de épocas necessárias para alcançar o estado estável depois de uma perturbação, pode diminuir com a adaptação ou sintonização dos parâmetros dentro da arquitetura proposta depois da finalização do estado transiente, quando é utilizada a estratégia de coordenação e planejamento descrita anteriormente.

## **5. PROJETO E VALIDAÇÃO SOFTWARE DA ESTRATÉGIA DE COORDENAÇÃO**

A validação software da estratégia de coordenação proposta atenderá duas fases: uma primeira fase de modelagem 3D e implementação da arquitetura de controle híbrida multi-nível ADACOR, dentro de um ambiente de simulação tridimensional, e uma segunda fase de utilização e aplicação do algoritmo de planejamento e coordenação proposto para obter um plano de manufatura possível, composto por operações básicas. O funcionamento desse plano de manufatura também será implementado no ambiente de simulação exemplificando um processo simples de manufatura.

Com o intuito de projetar e simular sistemas multiagentes é preciso levar em consideração a simulação de cada um dos componentes físicos e não físicos (lógicos) do sistema (agentes ou hólons). Neste trabalho também são consideradas as propriedades intrínsecas dos hólons dentro de um sistema, neste caso os hólons tem que ser autônomos, mas também poderão cooperar com outros hólons quando for necessário para realizar uma tarefa ou atingir um objetivo global do sistema de manufatura. Assim sendo também é projetado um nível de autonomia variável dentro de cada HT, de forma a esse indicar se as operações do recurso físico do hólón estão baseadas na lógica programada dentro do seu próprio LCD (Dispositivo Lógico de Controle) ou na lógica programada no nível de supervisão para garantir operações colaborativas.

### **5.1. Projeto para simulação software de agentes num Sistema Descentralizado**

Neste trabalho é projetado que a estratégia de coordenação desenvolvida possa ser utilizada por agentes não só homogêneos, mas heterogêneos ou com características físicas e de funcionamento diferentes (robôs móveis e robôs manipuladores) já que é necessário que esses exemplifiquem os agentes envolvidos num SAP genérico. Os tipos de agentes cujo funcionamento é simulado neste trabalho atendem a descrição a apresentada na secção 3.4.4. Considerando as características desses hólons, os requisitos de um software para simular e validar o comportamento do sistema utilizando a estratégia desenvolvida são:

- Possibilidade de simulação e visualização de funcionamento em três dimensões.

- Possibilidade de visualização e tabulação de movimentos ON-LINE.
- Integração de bibliotecas para a simulação de variáveis e leis físicas.

Em função disso é selecionado um ambiente de simulação software (Webots™) o qual permite o projeto, modelagem, desenvolvimento e simulação em três dimensões de robôs e sistemas compostos por diferentes tipos de sensores e atuadores. Esse software oferece uma integração e simulação realista (ON-LINE) dentro de um ambiente tridimensional entre os elementos lógicos, mecânicos e eletrônicos que formam um hólón. Além disso, as simulações desenvolvidas dentro do software Webots™ atendem as leis físicas (gravidade, coeficientes de fricção, detecção de colisões, propriedades de diversos materiais etc.).

Por conseguinte, as simulações vão refletir o comportamento dos diferentes agentes de uma maneira realista, permitindo a observação e estudo detalhado de um sistema multiagente colaborativo. No processo de implementação dentro deste software são configuradas variáveis globais para a simulação em três dimensões (Ver Figura 38), entre as quais estão:

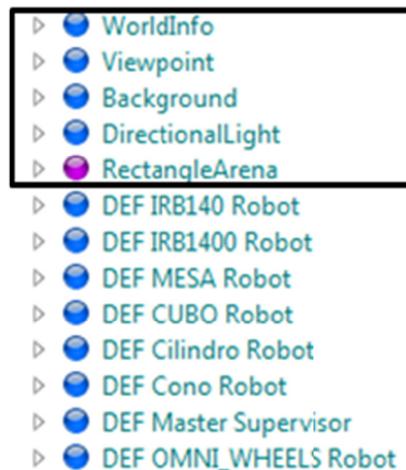


Figura 38. Declaração de variáveis Globais no software de simulação

**WorldInfo:** Informação sobre as variáveis físicas que afetam o ambiente de simulação.

**Viewport:** Informação da posição e orientação do dispositivo de visualização do ambiente.

**Background:** Color do fundo do ambiente.

**DirectionalLight:** Configuração da luz de iluminação do ambiente.

**RectangleArena:** Tamanho e desenho do chão.

### 5.1.1. Projeto de Agentes/Hólons para um Sistema de Manufatura colaborativo

Logo das variáveis globais, os Agentes e Hólons projetados e desenvolvidos para ser simulados são configurados como objetos lógicos dentro do software. Os HO no nível operacional da arquitetura colaborativa estão compostos de: sensores, atuadores e controlador, esses componentes ficaram dentro cada objeto, organizados de uma maneira hierárquica dentro do software Webots<sup>TM</sup>. Além disso, os recursos físicos associados a estes HO simples no sistema serão modelados em 3D quando seja necessário (neste caso o robô móvel e a mesa hidráulica foram modelados completamente) e adicionados no ambiente virtual definindo para cada um deles uma posição e orientação inicial dentro do ambiente tridimensional.

Elementos tais como mesas e peças de diferentes formas a serem processadas no sistema tem que ser modelados em 3D e logo adicionadas como novos objetos, mas sem rotinas de comportamento associadas. Na Figura 39, ressaltados dentro do quadro negro podem-se observar os agentes físicos a serem utilizados dentro da simulação e as peças que podem ser processadas no sistema.

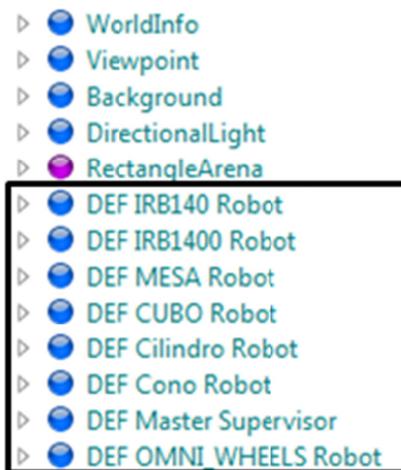


Figura 39. Declaração de Objetos dentro do software de simulação

Neste trabalho a parte lógica (LCD) dos HO simples assim como os hólons nos níveis superiores da arquitetura colaborativa (Supervisão, Tarefa e Produto) também são simulados utilizando como ambiente o software Webots<sup>TM</sup>. Já que esse software é um ambiente de implementação e simulação, mas não uma linguagem de programação de alto nível, Webots<sup>TM</sup> oferece a possibilidade de utilizar linguagens externas para a implementação de funções lógicas,

em razão a isso nesta tese é utilizada uma linguagem de alto nível Python<sup>TM</sup> para programar cada uma das operações básicas e atividades; e a linguagem MATLAB<sup>®</sup> para programar a reconfiguração do sistema quando aparece uma perturbação ou quando o usuário do software modifica o plano de manufatura via teclado.

### **5.1.2. Representação da Estrutura Interna dos Agentes no Software de Simulação**

Já que neste trabalho vai ser desenvolvida uma arquitetura holônica híbrida tipo ADACOR é necessário obter uma representação de cada um dos agentes a ser utilizados para formar o sistema colaborativo, mas também de cada um dos níveis e da comunicação entre eles. Consequentemente, dentro do software de simulação, para cada um dos agentes são configuradas também as variáveis que determinam a forma e tamanho, sensores e atuadores (juntas) que formam o dispositivo, posição e orientação do recurso físico. Para representar cada um dos agentes projetados no sistema dentro do software de simulação é utilizada uma metodologia orientada a agentes (POA), dessa forma cada agente é declarado como um objeto independente, definindo assim para esse, propriedades (variáveis globais e locais) e comportamentos (funções).

A programação do comportamento do agente faz com que esse realmente possa ter um funcionamento autônomo, mas também cooperativo o qual é necessário para poder representar um hólón da arquitetura ADACOR. Este comportamento baseado em lógica de alto nível dentro do LCD de cada hólón é programado dentro de uma função chamada de *controller*. Desse modo neste trabalho são desenvolvidas cinco funções desse tipo, uma para cada um dos Hólóns Operacionais e uma para o Hólón de Supervisão.

#### **5.1.2.1. Controlador - Software**

A função principal para cada hólón (agente) chamada de *controller* está composta por uma implementação em linguagem Python das rotinas ou atividades que pode realizar cada hólón operacional composto, é também aqui onde são programadas as sub-rotinas ou operações que o recurso físico vai executar quando aparece uma perturbação.

No nível de Gerenciamento são declaradas as variáveis que vão determinar o *Fator de Rejeição*, *Feromônio*, *Fator de Autonomia* e *Fator de Disponibilidade*. Como parte da estratégia

proposta neste trabalho, essas variáveis descritas anteriormente são adaptadas com o intuito de melhorar o rendimento do sistema através do tempo. Na Figura 37 é apresentado o comportamento das variáveis dentro do hólón operacional quando aparece uma perturbação.

### **5.1.3. Modelagem Cinemática dos Módulos ou Recursos Físicos**

É projetado que cada recurso físico representado dentro do software possa se movimentar até várias posições e orientações desejadas, caso seja preciso realizar uma operação sobre as peças para obter um produto final. Levando isso em consideração, é importante então para cada recurso físico conhecer a posição e orientação do efetuador final em relação a um sistema de referência quando as juntas realizam um deslocamento linear ou angular (cálculo de cinemática direta), e também conhecer os valores necessários das juntas para que o efetuador final do dispositivo possa atingir uma posição e orientação desejadas (cálculo de cinemática inversa).

De acordo com isso, é desenvolvido o cálculo de cinemática direta e inversa para cada um dos dispositivos físicos utilizados no sistema:

- Robô manipulador - ABB 1400.
- Robô manipulador - ABB 140.
- Mesa Hidráulica.
- Robô móvel – Omnidirecional.

Como é apresentado a seguir.

#### **5.1.3.1. Cinemática Direta Robô ABB 1400**

Com o intuito de simplificar a análise cinemática dos dispositivos físicos utilizados, esses são representados de uma forma esquemática para facilitar a colocação dos sistemas de coordenadas.

Na representação esquemática (Figura 40) são colocados os sistemas de referência segundo a convenção de Denavit – Hartenberg (D-H). É importante ressaltar que na posição do robô apresentada no esquema existe um ângulo  $\theta_2$  inicial de 90 graus. A seguir é apresentada a tabela de parâmetros D-H segundo os sistemas de referência apresentados na Figura 40 e levando em consideração o sentido dos ângulos, ver Tabela 3.

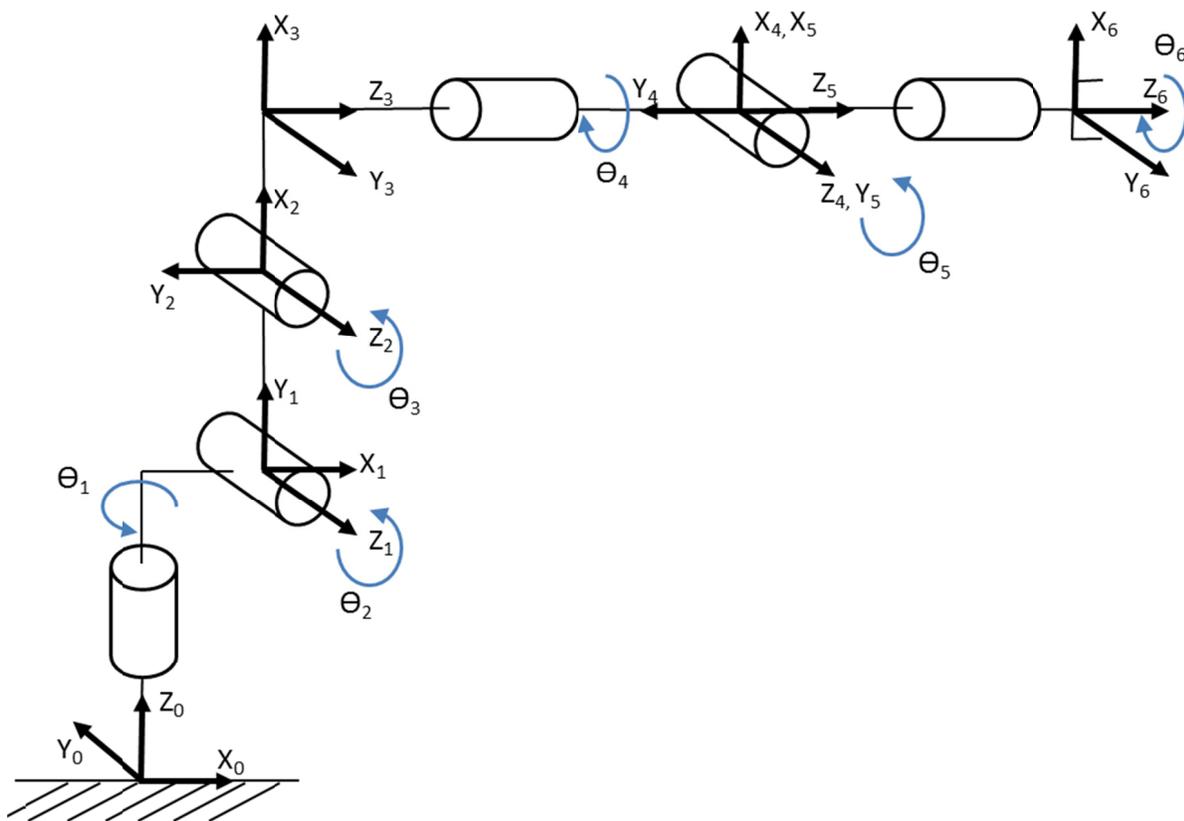


Figura 40. Representação esquemática do Robô ABB 1400

Junta $i$	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	475	150	90
2	$\theta_2$	0	600	0
3	$\theta_3$	0	120	90
4	$\theta_4$	720	0	-90
5	$\theta_5$	0	0	90
6	$\theta_6$	85	0	0

Tabela 3. Parâmetros Denavit – Hartenberg Robô ABB 1400

Para calcular a cinemática direta do robô manipulador é necessário substituir cada um dos parâmetros D-H obtidos para cada junta na matriz geral de transformação homogênea, a qual é calculada para passar de um sistema de coordenadas para o seguinte, como apresentado a seguir.

$$A_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Desta maneira, para o robô ABB 1400 são obtidas seis matrizes as quais são logo pôs-multiplicadas para obter a matriz homogênea total, a qual permite a transformação desde o sistema de coordenadas zero até o sistema do efetuador final (sistema seis).

$$A_{0,6} = A_{0,1} * A_{1,2} * A_{2,3} * A_{3,4} * A_{4,5} * A_{5,6}$$

As seis matrizes de transformação para este robô são apresentadas no ANEXO A – Modelo Cinemático do robô ABB 1400.

### 5.1.3.2. Cinemática Direta Robô ABB 140

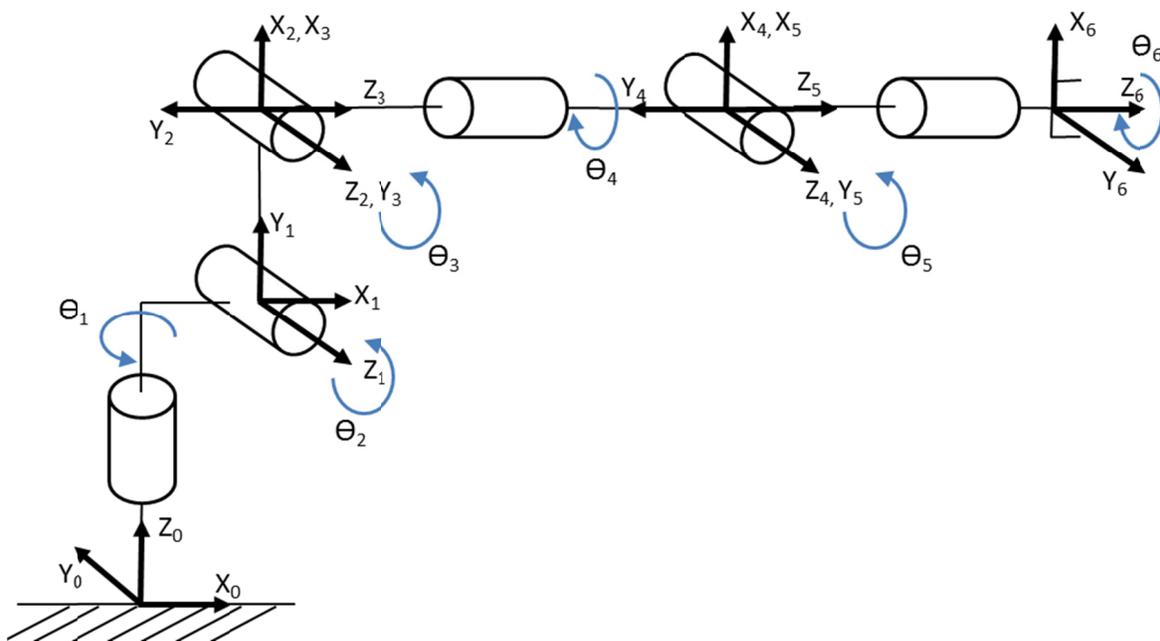


Figura 41. Representação esquemática do Robô ABB 140

Na posição apresentada no esquema (Figura 41) existe um ângulo  $\theta_2$  inicial de 90 graus. Levando em consideração os sistemas de coordenadas e os sentidos dos ângulos são obtidos os parâmetros D-H apresentados a seguir, ver Tabela 4.

Junta $i$	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	352	70	90
2	$\theta_2$	0	360	0
3	$\theta_3$	0	0	90
4	$\theta_4$	380	0	-90
5	$\theta_5$	0	0	90
6	$\theta_6$	65	0	0

Tabela 4. Parâmetros Denavit - Hartenberg Robô ABB 140

Substituindo os parâmetros D-H de cada junta na matriz de transformação homogênea geral, são obtidas seis matrizes que logo são pôs-multiplicadas para obter a matriz de transformação total desde a base do robô até o efetuador final. As matrizes individuais de transformação são apresentadas no ANEXO B – Modelo Cinemático do robô ABB 140.

### 5.1.3.3. Cinemática Direta Mesa Hidráulica

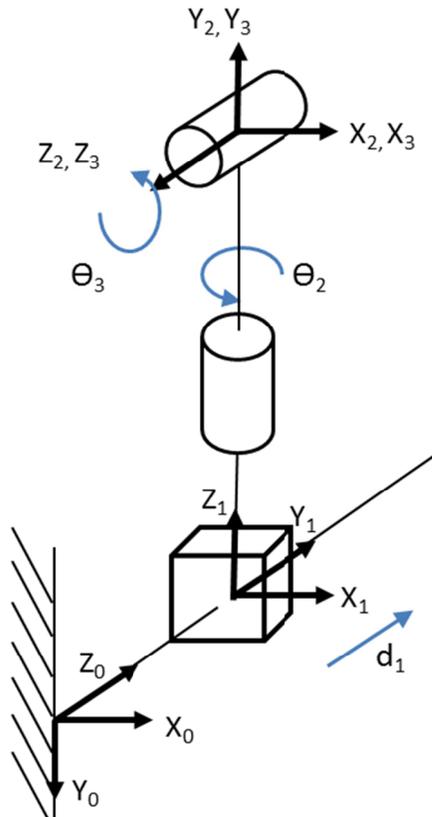


Figura 42. Representação esquemática da Mesa Hidráulica

Na Figura 42 é mostrada a colocação dos sistemas de coordenadas para a mesa hidráulica segundo a convenção D-H, neste caso a origem do sistema  $S_3$  é colocado no mesmo ponto de origem do sistema  $S_2$ , já que a última articulação da mesa é de revolução, e serve só para orientar a peça sem movimentá-la. Levando em consideração os sistemas de coordenadas e os sentidos dos ângulos são obtidos os parâmetros D-H apresentados a seguir, ver Tabela 5.

Junta $i$	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	0	$d_1$	0	90
2	$\theta_2$	$d_2$	0	90
3	$\theta_3$	0	0	0

Tabela 5. Parâmetros Denavit - Hartenberg da mesa hidráulica

Neste caso as matrizes individuais de transformação são apresentadas no ANEXO C – Modelo Cinemático da Mesa Hidráulica.

Quando é programada a cinemática direta dos recursos físicos utilizados esses podem se integrar facilmente no software de simulação, já que é possível conhecer a posição e orientação do efetuator final ou ferramenta de cada robô, assim como a posição e orientação da peça sobre mesa hidráulica quando tem que ser realizada uma tarefa ou operação. Essa interação é realizada relacionando todas as posições com respeito de um só sistema de coordenadas fixo  $S_0$ , que nesta implementação será o sistema fixo do robô ABB 1400.

#### 5.1.3.4. Cinemática Diferencial Robô Móvel Omnidirecional

A cinemática diferencial direta do robô móvel permite relacionar as velocidades angulares das suas três rodas com: as velocidades lineares do chassi nos eixos ( $X$  e  $Y$ ) e a velocidade angular do chassi no eixo perpendicular ao plano do chassi  $Z$ . O cálculo desta cinemática é necessário para o planejamento de trajetórias do robô móvel desde a área de armazenagem de peças até a área de usinagem, dessa forma ao definir uma geometria e velocidade desejada da trajetória do robô é possível calcular a velocidade angular das rodas do robô para enviá-las a cada um dos atuadores e assim obter o movimento desejado do robô, esses dados também são levados em consideração dentro da simulação no ambiente tridimensional Webots<sup>TM</sup>.

A trajetória do robô móvel pode estar composta de segmentos retos ou curvos entre vários pontos no plano de movimento, nesses casos as velocidades das rodas são calculadas aplicando a cinemática diferencial inversa para cada um dos segmentos.

$$[\sin(\alpha + \beta + \gamma) \quad -\cos(\alpha + \beta + \gamma) \quad (-l) \cos(\beta + \gamma)]R(\theta)^{-1} \dot{\xi}_I - r\dot{\phi} \cos \gamma = 0 \quad (4)$$

O modelo cinemático diferencial utiliza a restrição de rolamento apresentada na equação (4) para rodas omnidirecionais (SIEGWART; NOURBAKHSI, 2004) a qual é aplicada para cada roda, a agrupação dessas restrições é agrupada para formar a matriz de restrições  $J_1$  utilizada para calcular o modelo cinemático completo.

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -l \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -l \\ 0 & 1 & -l \end{bmatrix}$$

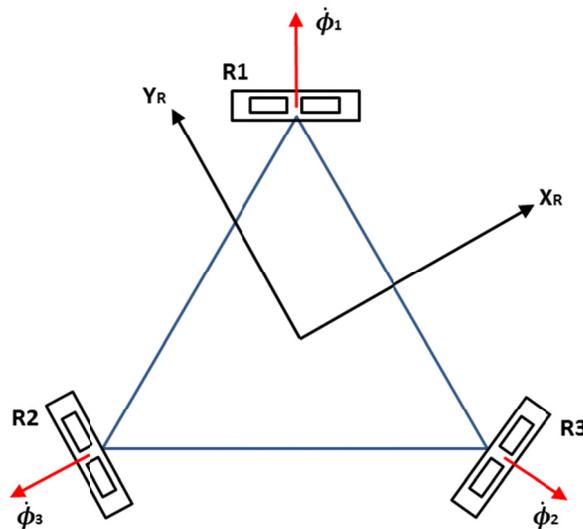


Figura 43. Eixos e estado de movimento considerados no robô móvel

De acordo ao estado de movimento (Figura 43) considerado para o robô móvel (sentido de giro à direita sem deslocamento do chassi) e a colocação do sistema de coordenadas móvel com o

robô ( $X_r$ ,  $Y_r$ ), são determinados os vetores de velocidade angular  $\dot{\phi}$  para cada roda e os parâmetros para o cálculo do modelo Ver (Tabela 6).

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
<b>Roda 1</b>	$\pi/3$	0	0
<b>Roda 2</b>	$-\pi/3$	0	0
<b>Roda 3</b>	$\pi$	0	0

Tabela 6. Parâmetros do Robô Móvel Omnidirecional

O cálculo do modelo cinemático diferencial completo é apresentado no ANEXO D – Modelo Cinemático Diferencial do Robô Móvel Omnidirecional, para o cálculo deste modelo é considerado que: as três rodas têm o mesmo raio ( $r$ ) e a distância desde o centro do robô a qualquer das três rodas é uma constante ( $l$ ).

## 5.2. Proposta e Simulação de Arquitetura para Sistema de Manufatura Colaborativo

### ADACOR

A arquitetura que é simulada dentro do software Webots<sup>TM</sup> é a arquitetura descrita na secção 3.4.4, com seus respectivos módulos, cada um desses módulos será considerado um *HO Simples dentro da simulação e tem um recurso físico associado*, ver Tabela 7.

Módulo	Recurso Físico	Recurso Físico	Descrição
A) Posicionamento e Orientação	R1	Mesa Hidráulica com 3 GL.	1 GL prismático para posicionamento da peça, e 2 GL de rotação para orientação da peça a ser processada.
B) Manipulação e Usinagem	R2a	Manipulador antropomórfico (ABB IRB 1400) com 6 GL.	3 GL para posicionamento fino e três GL para orientação fina da ferramenta. Capacidade para realizar os processos de movimentação, e transporte de peças
	R2b	Manipulador antropomórfico (ABB IRB 140) com 6 GL.	Usinagem ou processamento de peças
C) Sujeição de formas diferentes	R3	Dispositivo de sujeição	Capacidade para agarrar objetos de forma plana, esférica e cilíndrica.

D) Identificação de Forma	R4	Câmera	Identificação de forma e Controle de qualidade
E) Transporte	R5	Robô móvel Omnidirecional	Transporte das peças sem usinar até a mesa hidráulica, e logo das peças usinadas desde a mesa hidráulica até a área de armazenagem.

Tabela 7. Recursos Físicos utilizados na Simulação da Arquitetura Proposta

Além dos recursos físicos, são propostas três áreas dentro do sistema de manufatura:

- **Área de estoque de peças:** Nesta área estarão as peças que vão ser transportadas e usinadas dentro do sistema de manufatura.
- **Área de Usinagem:** Nesta Área estarão localizados os módulos de: Posicionamento e Orientação, Manipulação e Usinagem, Identificação de forma, Sujeição.
- **Área de armazenagem de produtos:** Nesta área serão armazenados os produtos ou peças logo que sobre essas são realizadas as atividades de usinagem. O transporte dos produtos desde a área de usinagem até a área de armazenagem será feito por um robô móvel de acionamento omnidirecional (módulo ou Hólon de transporte).

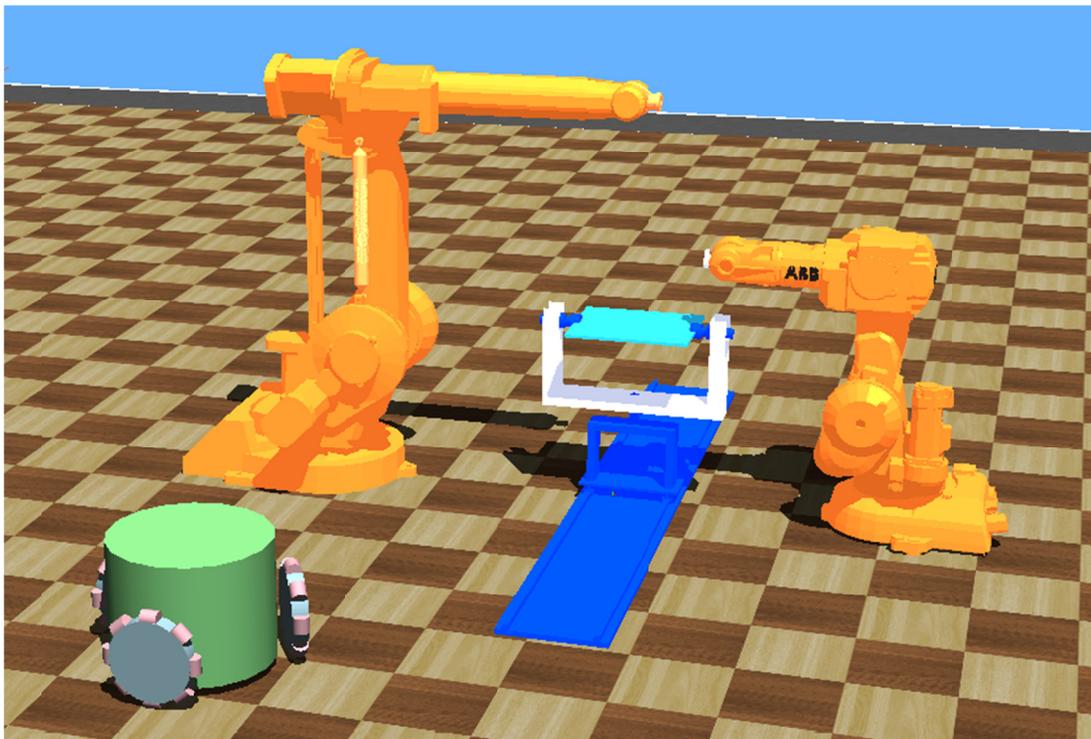


Figura 44. Arquitetura distribuída a ser simulada para validação

### 5.2.1. Projeto de Arquitetura Híbrida de Controle ADACOR a ser Simulada

A arquitetura que é simulada dentro do software visa que possam ser programadas diversas situações que poderiam exemplificar uma perturbação ou mudança no sistema. Desse modo dentro da simulação são utilizadas três figuras de diferente forma (cilindro, cubo, cone), das quais um usuário seleciona via teclado uma dessas (Figura 45), para que o sistema realize uma operação de pintura sobre a peça (a cor para a operação de pintura também pode ser selecionada), ver Figura 44.

Dependendo da forma da peça a operação de pintura poderá ser realizada com um número diferente de rotações da mesa e um número diferente de movimentos do robô ABB 140. O número de recursos físicos que participam no desenvolvimento da operação de manufatura também influi no tempo total para o término da mesma e é um indicativo quantitativo da eficiência do sistema.

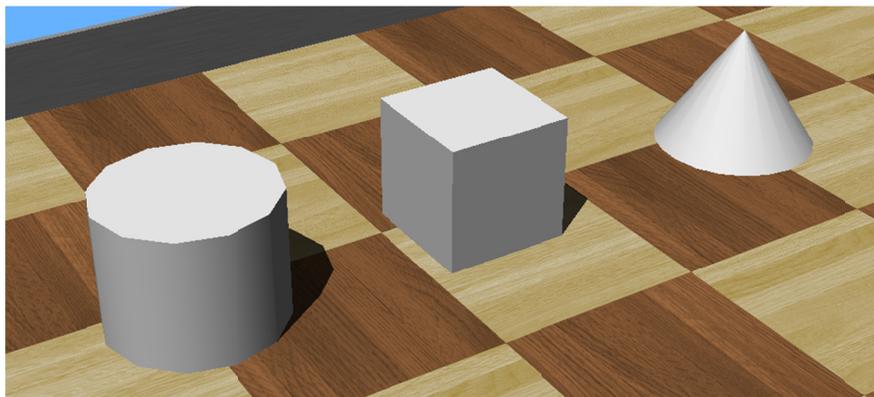


Figura 45. Peças Utilizadas na Simulação

### 5.2.2. Representação Software da Arquitetura Descentralizada / Heterárquica

Cada um dos hólons com recurso físico associado (hólons operacionais - HO) tem associado uma função *controller* a qual indicará o comportamento desse levando em consideração diferentes valores dos parâmetros adaptativos, desta forma cada HO tem sua implementação software para operar de maneira independente (heterárquica) ou coletiva.

Além disso, o nível de supervisão (Hólon de supervisão) também tem uma função *controller* que permite obter um controle global do sistema. Esses níveis se comunicam de maneira indireta com os hólons operacionais HOs.

### 5.2.3. Distribuição de Recursos Físicos dentro de arquitetura holônica

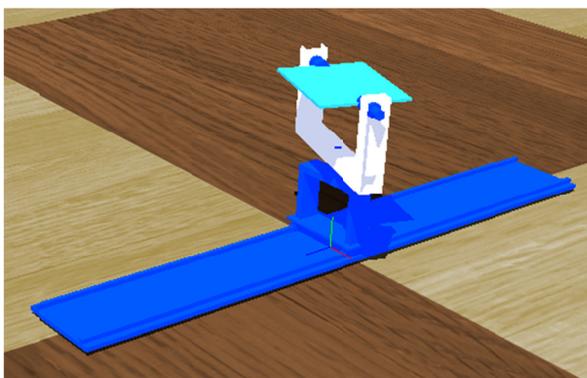
A arquitetura ADACOR projetada para ser simulada dentro do software Webots™ utiliza os módulos descritos anteriormente. Por tanto é projetado que as posições dos recursos físicos fixos (robôs manipuladores e mesa hidráulica) dentro do ambiente virtual permitam que as peças que são usinadas ou modificadas no sistema possam ser alcançadas pelos efetadores finais de todos os dispositivos. Portanto procura-se que na configuração do sistema (distribuição física dos recursos) a intersecção dos espaços de trabalho entre os robôs e a mesa forme um volume o suficientemente grande para ser ocupado por uma peça quando se realiza alguma operação de manufatura sobre ela. Assim garantindo uma *redundância* de operações e, portanto, robustez para lidar com as perturbações ver Figura 46.



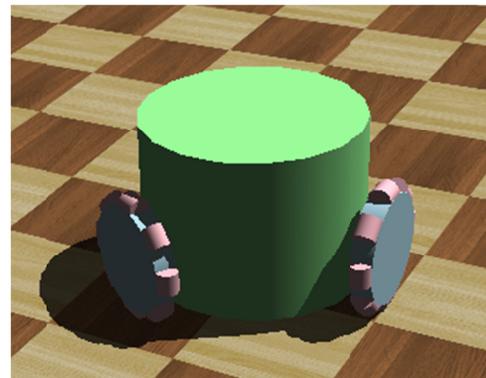
a) Robô ABB 140



b) Robô ABB 1400



c) Mesa Hidráulica



d) Robô móvel omnidirecional

Figura 46. Recursos Físicos dentro do software de simulação

Os agentes que tem um recurso físico associado (hólons) são colocados de tal forma que a mesa hidráulica fica no meio dos dois robôs manipuladores (Figura 47), assim o robô ABB 1400

pode pegar um dos três objetos (cilindro, cubo, cone) da área de estoque de peças A1, e colocar essa peça sobre a mesa hidráulica, a mesa pode orientar e posicionar a peça dentro do espaço de trabalho para logo o robô ABB 140 realizar alguma operação sobre ela. Esta distribuição dos recursos físicos na simulação está baseada numa arquitetura implementada no laboratório LAIR da UNICAMP, configurada segundo essas considerações, neste caso a simulação além dos robôs e a mesa hidráulica, adiciona uma câmera e um robô móvel com suas respectivas operações.

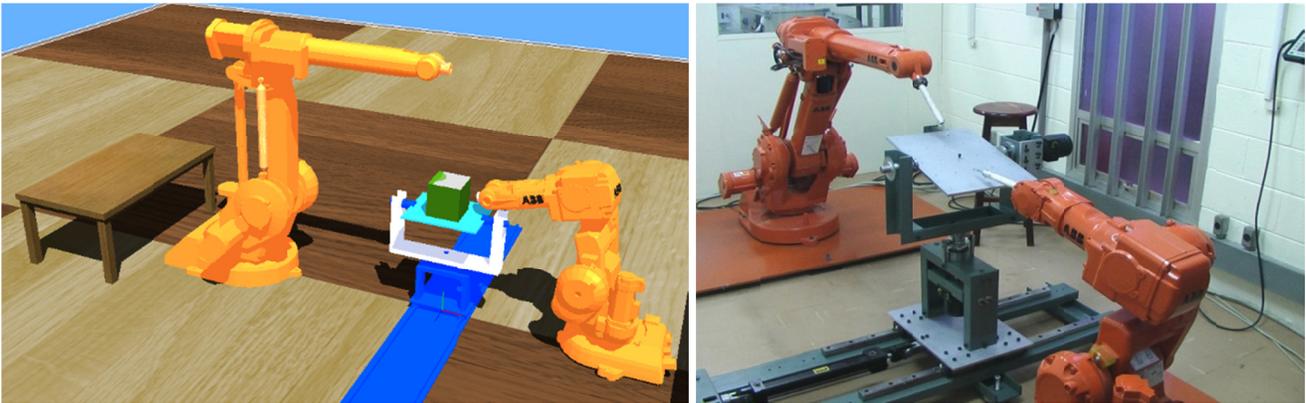


Figura 47. Distribuição dos recursos físicos para realizar uma operação

#### 5.2.4. Simulação de Recursos Físicos Dentro da arquitetura proposta

Para a simulação de cada HO simples são definidas rotinas com as operações básicas de movimento do recurso associado ( Tabela 8), sendo essas programadas dentro da função *controller* correspondente, essas operações básicas constituem os blocos mais básicos para a posterior formação de atividades, tarefas e planos de manufatura. As operações em negrito se referem a movimentos (ou ações de trabalho sobre as peças) de peças ou produtos através do sistema, somente para essas operações serão definidos os P.O. com o intuito de executar o algoritmo de planejamento dinâmico.

As outras operações estão relacionadas com: movimentos de recursos de manufatura (sem peças) desde posições de HOME até posições para interagir com as peças, ou processos de comunicação entre a parte lógica (LCD) do HO Simples e os níveis de Supervisão e Gerenciamento para conseguir um funcionamento colaborativo dos recursos, por exemplo na execução da operação de pintura onde participa a Mesa Hidráulica e o Robô ABB 140.

<b>Recurso Físico</b>	<b>Operações Básicas</b>
Mesa Hidráulica com 3 GL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informa começo da operação de orientação</li> <li>• Leitura do supervisor para realizar um giro da mesa, leitura de ângulo</li> <li>• Movimento de rotação da mesa</li> <li>• Informa ao supervisor que uma rotação acabou e robô pode começar a pintar</li> <li>• Informa ao supervisor fim da operação de orientação</li> <li>• Movimento desde posição final de rotação até HOME</li> </ul>
Manipulador antropomórfico ABB IRB 1400	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informar começo da operação de movimentação</li> <li>• Leitura da forma da peça a sujeitar</li> <li>• Movimento desde HOME até posição do robô móvel para pegar a peça</li> <li>• <b>Sujeitar cone</b></li> <li>• <b>Sujeita cilindro</b></li> <li>• <b>Sujeitar cubo</b></li> <li>• <b>Movimento da peça desde posição do robô móvel até posição HOME</b></li> <li>• <b>Movimento da peça desde posição HOME até posição da mesa hidráulica</b></li> <li>• <b>Movimento da peça desde posição da mesa hidráulica até posição do robô móvel</b></li> <li>• <b>Soltar peça na mesa hidráulica</b></li> <li>• Informar fim da operação de movimentação</li> </ul>
Manipulador antropomórfico ABB IRB 140	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informar começo de operação de pintura</li> <li>• Movimento desde HOME até posição inicial para pintar</li> <li>• Leitura do supervisor forma que vai pintar</li> <li>• <b>Pintar cubo</b></li> <li>• <b>Pintar cone</b></li> <li>• <b>Pintar cilindro</b></li> <li>• Informar ao supervisor que a mesa pode girar</li> <li>• Leitura do supervisor que pode começar a pintar</li> <li>• Movimento desde posição final para pintar ate posição HOME</li> <li>• Informar fim da operação de pintura</li> </ul>
Robô móvel omnidirecional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informar começo da Operação de Transporte</li> <li>• <b>Seguimento de trajetórias e Transporte entre Áreas de Estoque e Usinagem</b></li> <li>• <b>Seguimento de trajetórias e Transporte entre Áreas de Usinagem e Armazenamento</b></li> <li>• Informar fim da operação de Transporte</li> </ul>
Câmera	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informa ao supervisor a forma da peça transportada</li> </ul>

Tabela 8. Definição de Operações Básicas com os Recursos Físicos

### 5.3. Proposta e Simulação de Sistema de Comunicação entre Agentes

A comunicação projetada para o sistema de manufatura a simular também é do tipo indireta, isso significa que não é preciso de um protocolo complexo nem de um sistema de seleção de nós emissores ou receptores. Nesse tipo de comunicação os agentes realizam alguma operação quando detectam uma modificação no ambiente de trabalho ou nas variáveis de manufatura. Com esse fim são implementadas sub-rotinas dentro da função *controller* de cada hólón para programar o comportamento desse, sempre que é realizada uma atividade na peça que está sendo usinada. As sub-rotinas utilizadas dentro da função *controller* visam transmitir a cada um dos recursos físicos a operação que está sendo executada.

#### 5.3.1. Agente Supervisor

Com o intuito de projetar uma forma eficiente de comunicação entre os controladores dos diferentes recursos físicos é proposto um vetor de números inteiros, cujas posições correspondem a cada um dos recursos físicos; cada vez que um recurso está realizando uma operação coloca uma “bandeira” (número inteiro) na sua posição correspondente no vetor, que pode ser lida por outros recursos e indicará a operação que está sendo feita pelo dispositivo, Tabela 9. Esse vetor de comunicação está armazenado na função *controller* dentro de um agente virtual (Agente de Software) que representa o nível de supervisão HS e é chamado nesta tese de *Supervisor*, suas funções são:

- A comunicação para comportamento colaborativo dos hólons.
- A Interface de entrada e saída de dados entre o sistema e um usuário.

Posição do vetor	Recurso Físico
0	Supervisor
1	IRB1400
2	IRB140
3	MESA
4	ROBÔ MÓVEL

Tabela 9. Posições no vetor de comunicação

O agente Supervisor também permite mostrar para o usuário as atividades que estão sendo desenvolvidas em qualquer momento da simulação e os valores do vetor de comunicação atuais.

Quando um usuário começa a simulação do sistema de manufatura no software Webots™ tem a possibilidade de selecionar o processo a realizar com os recursos físicos do sistema, por meio de um caráter do teclado:

- ‘1’: Pintar peça com forma de cubo.
- ‘2’: Pintar peça com forma de cilindro.
- ‘3’: Pintar peça com forma de cone.

Depois da seleção da forma, o usuário também poderá selecionar a cor desejada para pintar a peça:

- ‘1’: Pintar na cor vermelha.
- ‘2’: Pintar na cor azul.
- ‘3’: Pintar na cor amarela
- ‘4’: Pintar na cor verde.

#### **5.4. Planejamento Dinâmico de Atividades Baseado em Stigmergia na Simulação Proposta**

Levando em consideração as operações que podem realizar os recursos físicos as quais envolvem movimentar ou realizar um trabalho sobre as peças ou recursos (ressaltadas em negrito na Tabela 8) são definidos os Pontos de Operação que serão utilizados no algoritmo de planejamento dinâmico. Com esse fim é projetado e desenvolvido um software para simular este algoritmo iterativo, o qual é implementado na linguagem MATLAB®.

##### **5.4.1. Preparação de Dados**

Para cada um dos Pontos de Operação (P.O.) é considerada sua posição  $X$  e  $Y$  dentro do espaço de manufatura tridimensional como é observado na (Tabela 10). Esses pontos serão representados no espaço de manufatura como se mostra na Figura 49. Na definição dos seis pontos de operação neste exemplo é possível observar que os pontos identificados com os números 3 e 4 pertencem ao mesmo recurso (robô móvel) e por isso mantêm as mesmas coordenadas ( $X$  e  $Y$ ), mas apresentam uma variação na sua coordenada  $Z$  relacionada com o Fator

de Rejeição, já que as operações de movimentação às quais estão associados esses pontos são realizadas pelo mesmo recurso, mas são a primeira e a última na execução do processo.

Ponto	X	Y	Z	Descrição
1	200	750	1500	Coordenada de saída do robô móvel na Área de Estoque
2	500	300	3000	Coordenada de trabalho da mesa na Área de Usinagem
3	200	400	4500	Coordenada de Chegada do robô móvel na Área de Usinagem
4	200	400	4500	Coordenada de Saída do robô móvel na Área de Usinagem
5	400	400	3000	Coordenada da posição HOME do robô ABB 1400
6	200	100	4500	Coordenada de Chegada do robô móvel na Área de Armazenamento

Tabela 10. Pontos de Operação Considerados na Simulação

Neste exemplo para o cálculo da coordenada Z é considerada uma agrupação inicial dos recursos em dois Hólons Operacionais compostos, a separação entre esses hólons é definida como a multiplicação de um Fator de Rejeição (neste exemplo 1500 já que esse número é maior do que a diagonal máxima (715,89) no plano XY do espaço de manufatura) por o número do hólón ao qual pertence o recurso (1, 2, ou 3), o número 3 é assignado já que o robô móvel executa sua segunda operação, que também é a última operação do plano de manufatura.

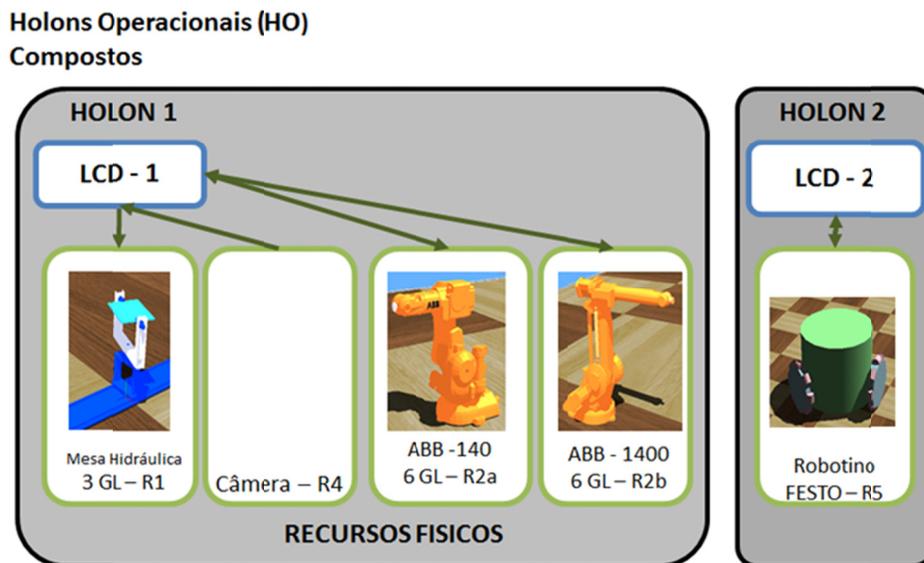


Figura 48. Agrupação de Recursos para Formar HO Compostos

A ordem inicial dos pontos a serem ingressados no software de simulação leva em consideração o primeiro e o último ponto de operação do plano de manufatura (ressaltados em negrito na Tabela 10, e encerrados com círculos azuis na Figura 49) os quais tem que ser identificados pelo usuário (colocando neles o primeiro e o último número) como entradas no algoritmo, esses pontos são mantidos durante todo o processo iterativo para garantir que pertençam efetivamente à primeira e última operação do processo. O número atribuído pelo software aos outros pontos de operação (pontos centrais) pode ser aleatório ou definido manualmente por um usuário. Quando é utilizada uma iniciação aleatória para esses pontos centrais a trajetória que os conecta pode apresentar lacetes e/ou linhas que representam operações não possíveis (Figura 50), mas mesmo assim o funcionamento do software de planejamento dinâmico corrigirá estes erros para obter uma trajetória semi-ótima cujas linhas representam efetivamente operações possíveis do sistema.

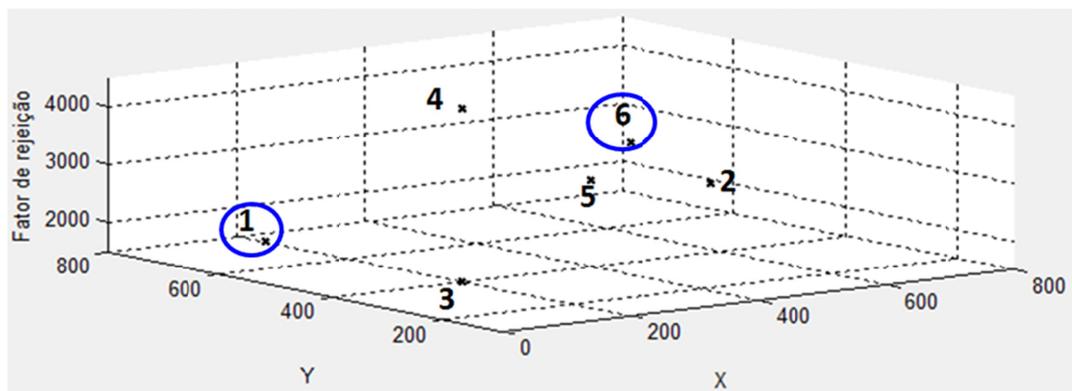


Figura 49. Representação dos Pontos de Operação dentro do Espaço de Manufatura

Embora o problema JSP para sistemas com poucos pontos de operação podem ser facilmente obtido por um usuário, o algoritmo de planejamento pode calcular rapidamente soluções para uma sistemas mais complexos que variam o número de pontos, sendo esse número uma das variáveis de entradas no software implementado nesta tese, na Figura 25 é apresentado o processo de agendamento para um sistema com 50 pontos de operação, com recursos agrupados em três hólons Operacionais Compostos.

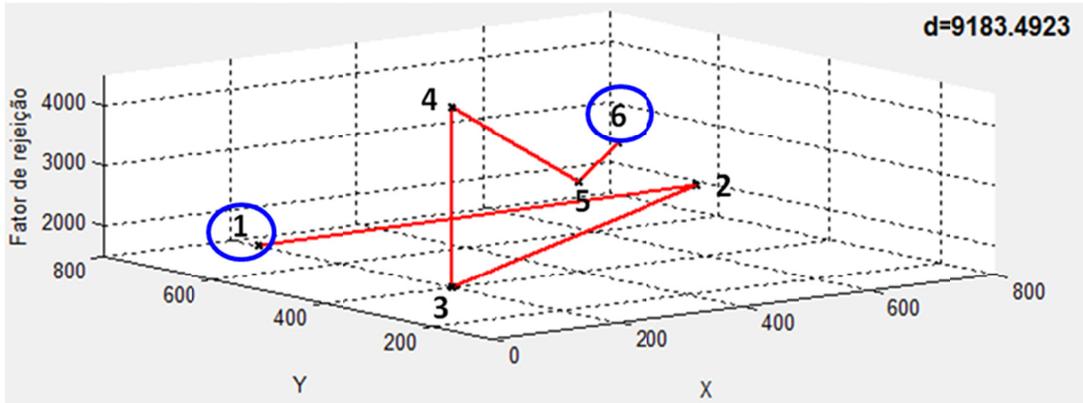


Figura 50. Iniciação Automática / Aleatória da Trajetória (Operações Impossíveis)

#### 5.4.2. Agendamento Dinâmico Baseado em Stigmergia

Já que é possível que o plano de manufatura inicial não seja realizável ou não seja semi-ótimo, nesta etapa é utilizado o algoritmo iterativo de agendamento descrito no capítulo anterior. Com esse fim, nesta tese é implementado um software que permite observar o processo completo de planejamento e coordenação descrito no capítulo anterior com todas suas etapas. Na Figura 51 é apresentada a distribuição das formigas (20 formigas, representadas com círculos azuis) antes do início do agendamento dinâmico, é garantido dentro do algoritmo que a primeira e a última formiga estejam sempre sobre o primeiro e último ponto da trajetória respectivamente (essas formigas estão ressaltadas na cor verde na trajetória).

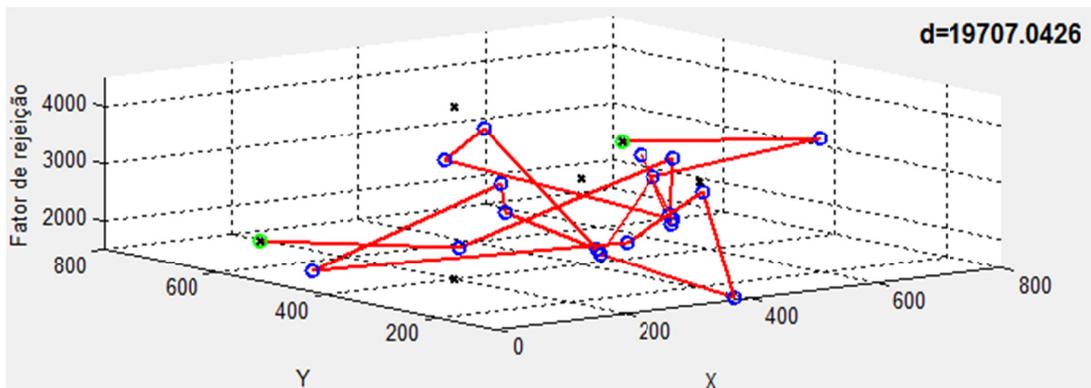


Figura 51. Distribuição Inicial das Formigas no Início do Algoritmo

Os dados dos pontos de operação, suas coordenadas  $(X,Y,Z)$  e os recursos de manufatura associados a esses pontos são ingressados como entradas no software de simulação implementado

no software MATLAB<sup>®</sup> junto com os seguintes dados para a configuração do processo de Stigmergia:

<b>Número de P.O. (nrec)</b>	6
<b>Número de formigas (numformiga)</b>	20
<b>Tempo de Reestabelecimento (nepoc)</b>	São mostrados os resultados com (5, 100, 400, 600, 700, 750) épocas
<b>Valor Inicial do Feromônio (ferom)</b>	20
<b>Fator de Autonomia (fautom)</b>	2
<b>Fator de Rejeição (frejeic)</b>	1500
<b>Fator de Disponibilidade Inicial (fdisp)</b>	0.1

Tabela 11. Parâmetros Ingressados Para o Funcionamento do Algoritmo

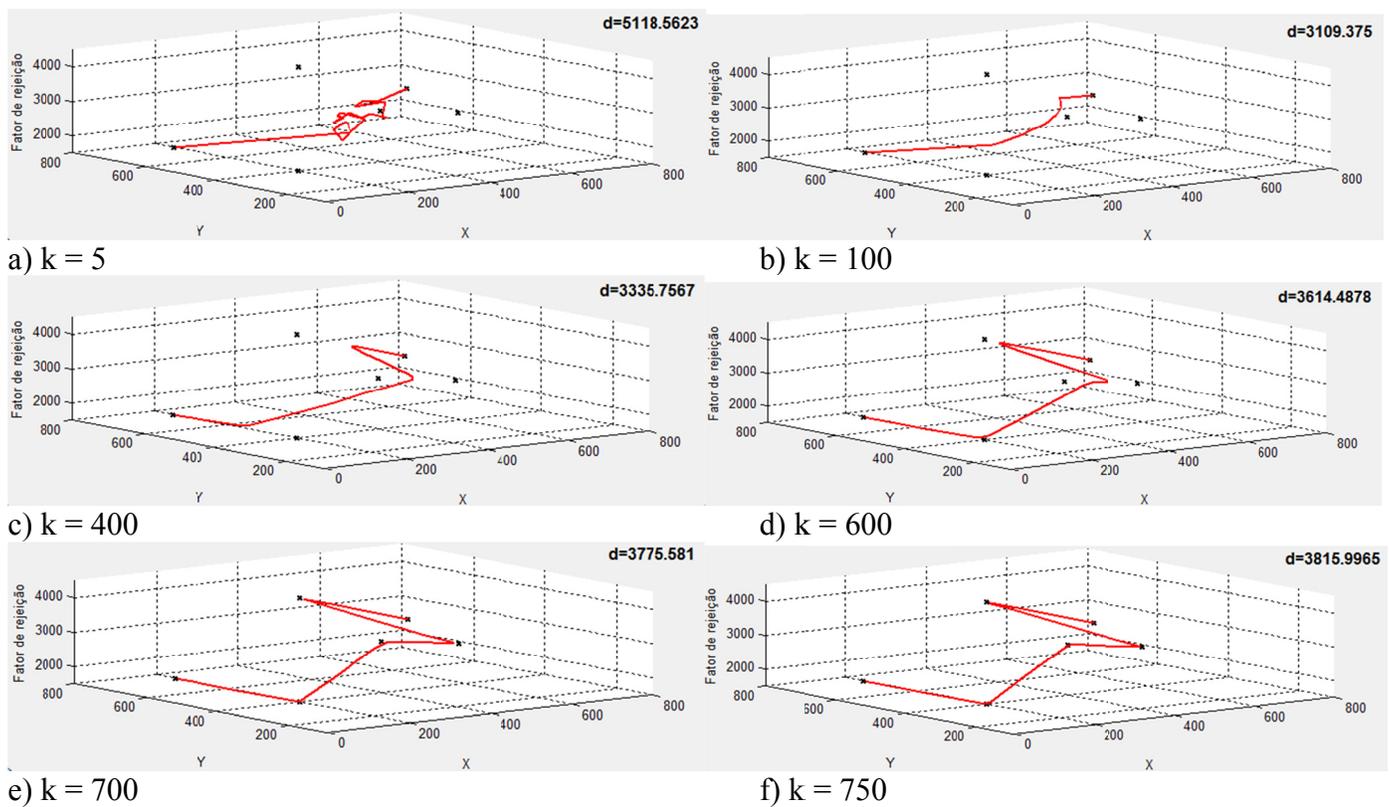


Figura 52. Processo de agendamento dinâmico ao longo das épocas

Desta maneira é possível observar o processo de movimento das formigas durante o planejamento (ao longo das épocas) partindo desde uma trajetória caótica até obter uma trajetória sub-ótima através de todos os pontos de operação ingressados (Figura 52), nesta trajetória cada uma das linhas que a compõem é uma operação realizada por um recurso de manufatura. Depois de a trajetória alcançar a convergência é possível obter o recurso de manufatura que realiza cada operação somente verificando os pontos iniciais e finais de cada linha e comparando-os com os dados de entrada.

Assim o recurso que está associado com os dois pontos é o recurso que executa a operação, no caso de mais de um recurso cumprir essa condição, a operação é atribuída ao recurso cuja somatória de distâncias desde sua posição de Home até os dois pontos seja menor, evitando assim conflitos ou colisões e otimizando a energia do sistema. Na Figura 53 pode-se observar que depois das 750 épocas a trajetória já converge passando através de todos os pontos e a distância ( $d$ ) entre eles deixa de variar, ficando constante num valor de convergência  $d = 3837,6646$ .

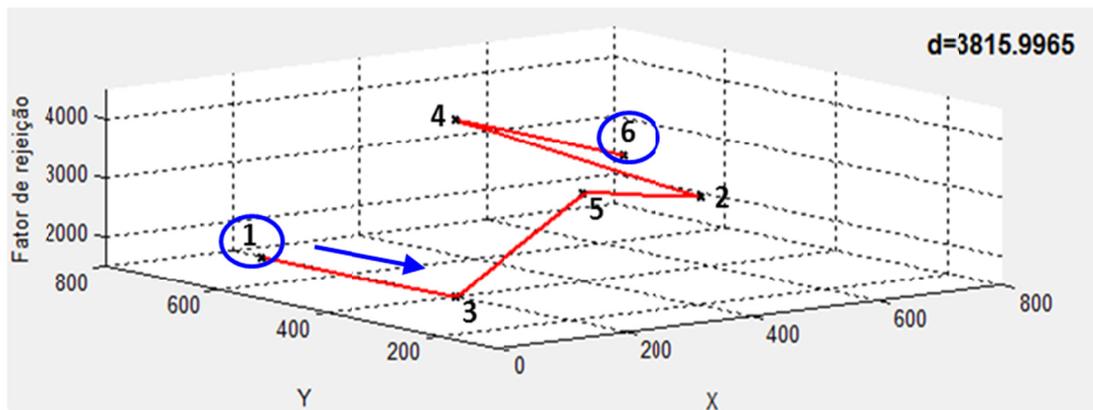


Figura 53. Trajetória obtida no processo de agendamento Dinâmico (750 épocas)

Depois do processo de agendamento dinâmico, a sequência das linhas (na ordem indicada pela seta azul) que compõem a trajetória final ou plano de manufatura conecta os pontos de operação, partindo desde o ponto inicial e chegando até o ponto final definido pelo usuário, mas mudando a ordem dos pontos no meio (que no início correspondiam a operações não possíveis). A sequência final de operações representando o plano de manufatura obtido com o algoritmo segue a trajetória calculada começando no primeiro P.O. (ponto 1) e terminando no P.O. final do

processo (ponto 6) é apresentada na Tabela 12. Esse plano de manufatura final obtido depois do processo de agendamento possui as seguintes características:

- **Semi-ótimo em termos da distância d (minimização).**
- **Passa por todos os Pontos de Operação P.O.**
- **Satisfaz as restrições de ponto Inicial e Ponto final.**
- **Realizável** = Linhas retas representam operações possíveis com os recursos de manufatura.
- **Sem conflitos entre recursos de manufatura.**

Devido a essas características esse plano de manufatura pode ser simulado e visualizado no software Webots<sup>TM</sup> utilizado nesta tese, e também pode ser implementado com base na execução das operações utilizando recursos físicos reais (Capítulo 6) de forma a validar a estratégia proposta.

<b>Sequência de Execução de operações</b>	<b>P. O. Inicial</b>	<b>P.O. Final</b>	<b>Descrição da Operação</b>	<b>Recurso Físico que Executa</b>
1	1	3	Transporte de peças entre Áreas de Estoque e Usinagem	Robô Móvel Omnidirecional
2	3	5	Movimento da peça desde posição do robô móvel até posição HOME do manipulador	Manipulador Robótico ABB 1400
3	5	2	Movimento da peça desde posição HOME do ABB 1400 até posição da mesa hidráulica	Manipulador Robótico ABB 1400
4	2	4	Movimento da peça desde posição da mesa hidráulica até posição do robô móvel	Manipulador Robótico ABB 1400
5	4	6	Transporte de peças entre Áreas de Usinagem e Armazenamento	Robô Móvel Omnidirecional

Tabela 12. Sequência final das Operações na Trajetória Obtida (Plano de Manufatura)

No caso que no sistema existam recursos físicos que realizem operações não de movimentação, mas de trabalho sobre as peças, estando essas detidas num só ponto (P.O. inicial e final da operação sejam os mesmos) essas operações são realizadas nesse ponto antes de continuar com a seguinte linha (operação) da trajetória. Na arquitetura a ser simulada neste capítulo existe um recurso físico (Manipulador Robótico ABB 140) que pode realizar uma

operação de trabalho (pintura) na peça quando essa se encontra na posição da mesa hidráulica (Ponto de Operação número 2), por tanto na simulação apresentada neste capítulo esta operação de pintura deverá ser realizada antes da operação 4.

Na Figura 54 é mostrado o estado do processo de agendamento dinâmico para dois valores de épocas ( $k=600$  e  $k = 750$ ), enquanto a trajetória é ajustada dentro de cada um dos dois Hólons Compostos nas cores (verde, azul) e dentro do hólón 3 adicionado (na cor vermelha) devido ao valor diferente de fator de redundância para os dois pontos que compõem a última operação do processo. A trajetória apresentada é o mesmo plano de manufatura através dos P.O. obtido anteriormente, mas nesse caso se mostra de forma detalhada dentro de cada hólón, o qual se encontra numa altura Z diferente, cada um desses HO compostos corresponde também com um HT dentro da arquitetura ADACOR. Também é mostrada a distância da trajetória no interior de cada hólón, a somatória total dessas distâncias corresponde à distância da trajetória total (mostrada nas épocas correspondentes) na Figura 52.

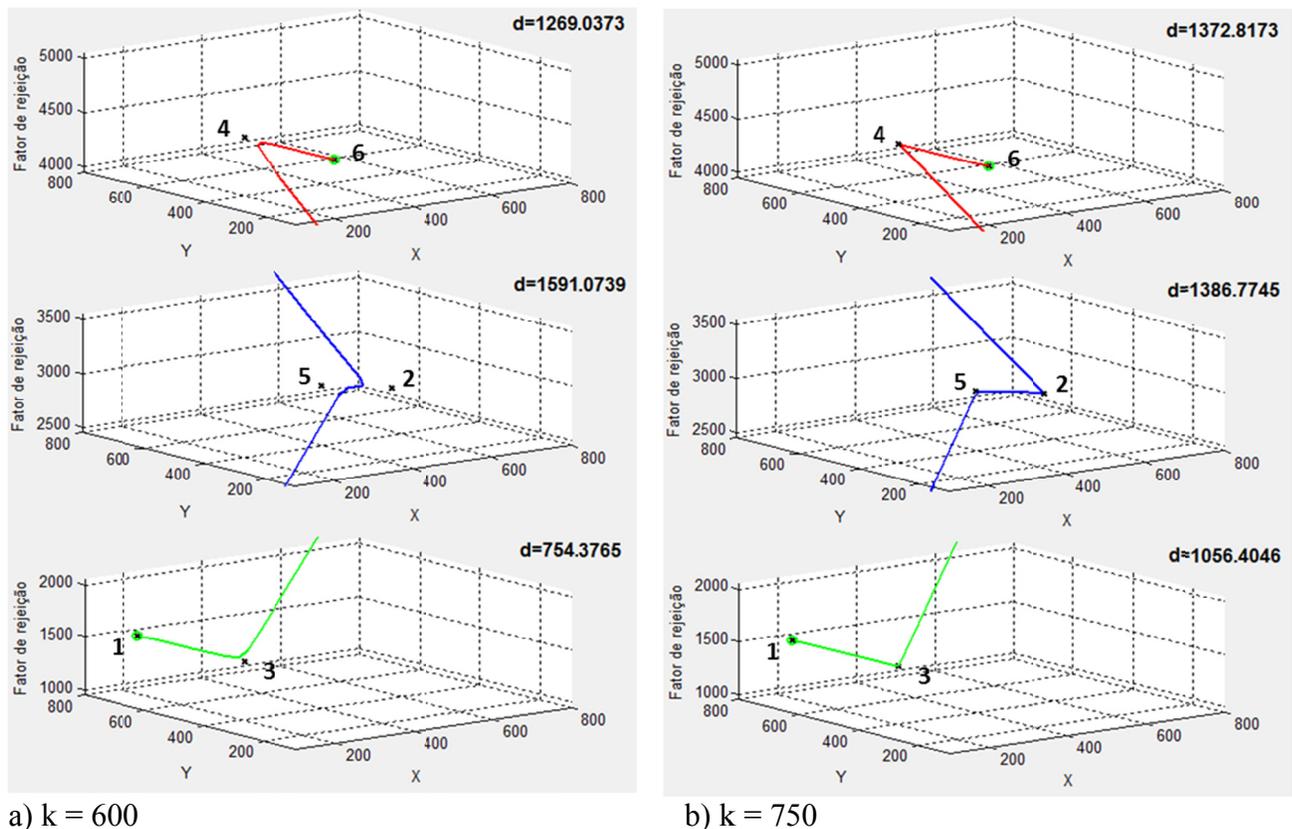


Figura 54. Visualização do Processo de Agendamento no Interior dos Hólons

### 5.4.3. Influência da Modificação dos Parâmetros Adaptativos no Algoritmo de Agendamento Proposto

A seguir é estudado o comportamento do algoritmo de agendamento dinâmico proposto nesta tese (levando em consideração o caso de estudo apresentado neste capítulo), quando são variados os parâmetros adaptativos, propostos como o terceiro componente da estratégia de coordenação: Feromônio Inicial, Fator de Autonomia, Fator de Disponibilidade Inicial e Número de Formigas.

#### 5.4.3.1. Variação do parâmetro Feromônio Inicial

Para visualizar a influência do feromônio no funcionamento do algoritmo de agendamento dinâmico, são levados em consideração os dados de entrada apresentados na Tabela 11, e depois o algoritmo é executado com valores diferentes do feromônio. Na Tabela 13 são apresentados os valores da distância ( $d$ ) da trajetória (plano de manufatura) considerando incrementos de 100 no número de épocas (na primeira coluna, desde 100 até 1000). Aliás, nas colunas 2, 3, e 4 são apresentados os resultados obtidos utilizando três valores diferentes do Feromônio (20, 10, 5). A Tabela 18 com os resultados mais detalhados (considerando mais valores de época) é apresentada no ANEXO G – Influência da Variação dos Parâmetros Adaptativos no Algoritmo de Agendamento.

épocas	Feromônio = 20	Feromônio = 10	Feromônio = 5
100	3109,375	3220,7606	3493,1334
200	3140,2708	3321,1338	3581,8263
300	3209,0309	3414,1655	3679,564
400	3335,7567	3532,8397	3761,6827
500	3458,9573	3655,0719	3814,277
600	3614,4878	3777,3393	3833,3264
700	3775,581	3828,038	3837,0861
800	3832,445	3836,9985	3837,6136
900	3837,5055	3837,6417	3837,6641
1000	3837,6646	3837,6664	3837,6668

Tabela 13. Resultados do Agendamento com Diferentes Valores do Feromônio

Desta maneira é possível observar que com o aumento das épocas o algoritmo converge num valor final mínimo de distância ( $d = 3837,66$ ). Na Figura 55 é mostrado o comportamento

da distância da trajetória ( $d$ ) ao respeito do número de épocas no algoritmo, considerando os dados da Tabela 13, a linha na cor azul leva em consideração um valor do Feromônio de 20, a linha na cor vermelha considera um Feromônio de 10, e a linha na cor verde considera um Feromônio de 5.

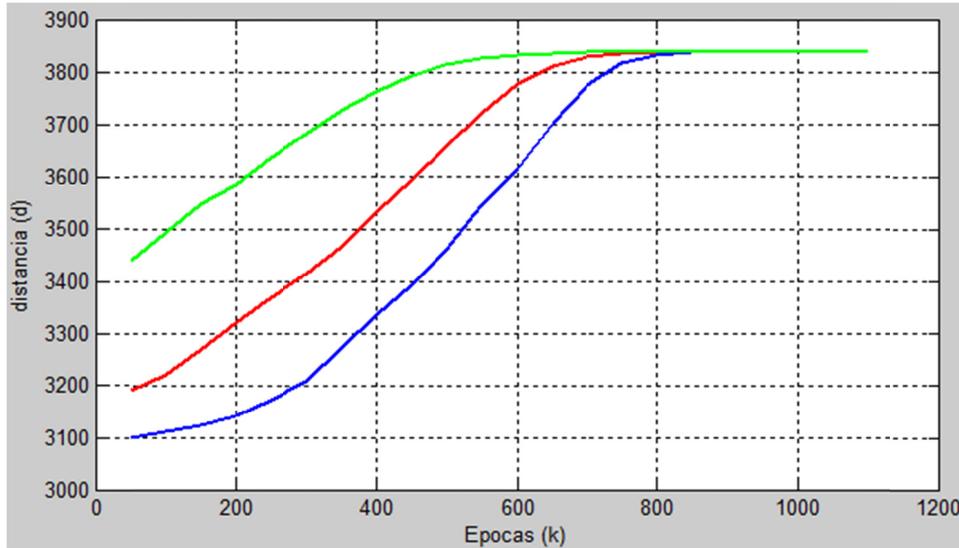


Figura 55. Influência do Feromônio no Algoritmo de Agendamento

Pode-se observar que quanto maior o valor do parâmetro feromônio, o tempo de reestabelecimento ou número de épocas necessárias para alcançar o valor de convergência também aumenta. Se o valor do feromônio diminui o número de épocas para alcançar a convergência também diminui, mas neste caso com valores menores a 5 o algoritmo se torna instável, isso significa que embora converge, alcança soluções impossíveis, formadas por linhas retas entre os P.O que representam operações não realizáveis por nenhum dos recursos físicos do sistema.

#### 5.4.3.2. Variação do parâmetro Fator de Autonomia

Para visualizar a influência do parâmetro Fator de Autonomia no funcionamento do algoritmo de agendamento dinâmico, são levados em consideração os dados de entrada apresentados na Tabela 11, e depois o algoritmo é executado com valores diferentes desse parâmetro. Na Tabela 19 (no ANEXO G – Influência da Variação dos Parâmetros Adaptativos no Algoritmo de Agendamento) são apresentados os valores da distância ( $d$ ) da trajetória (plano de manufatura) considerando incrementos de 50 no número de épocas (na primeira coluna, desde 50

até 1100). Aliás, nas colunas 2, 3, e 4 são apresentados os resultados obtidos utilizando três valores diferentes do Fator de Autonomia (2, 5, 6).

Na Figura 56 é mostrado o comportamento da distância da trajetória ( $d$ ) ao respeito do número de épocas no algoritmo, a linha na cor azul leva em consideração um valor de 2 para o parâmetro Fator de Autonomia, a linha na cor vermelha considera um valor de 5 para esse parâmetro, e a linha na cor verde considera um valor de 6 para esse parâmetro.

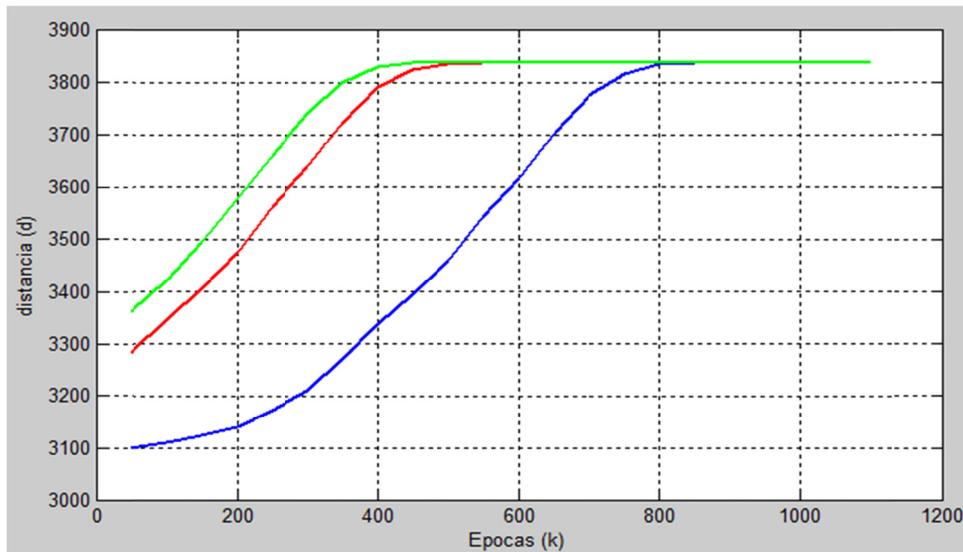


Figura 56. Influência do Fator de Autonomia no Algoritmo de Agendamento

Pode-se observar que do mesmo modo que acontece com o feromônio, quanto maior o valor do Fator de autonomia o número de épocas necessárias para alcançar o valor de convergência aumenta, e vice-versa (a relação entre número de épocas e o Fator de Autonomia é direta). Neste caso, com valores maiores a 6 o algoritmo se torna instável alcançando soluções impossíveis, ou não realizáveis por nenhum dos recursos físicos do sistema.

#### 5.4.3.3. Variação do parâmetro Fator de Disponibilidade Inicial

Para visualizar a influência do parâmetro Fator de Disponibilidade no funcionamento do algoritmo de agendamento dinâmico, são levados em consideração os dados de entrada apresentados na Tabela 11, e depois o algoritmo é executado com valores diferentes desse parâmetro. Na Tabela 20 (no ANEXO G – Influência da Variação dos Parâmetros Adaptativos no

Algoritmo de Agendamento) são apresentados os valores da distância ( $d$ ) da trajetória (plano de manufatura) considerando incrementos de 50 no número de épocas (na primeira coluna, desde 50 até 1100). Aliás, nas colunas 2, 3, e 4 são apresentados os resultados obtidos utilizando três valores diferentes do Fator de Disponibilidade (0.1, 0.8, 1.9) respectivamente.

Na Figura 57 é mostrado o comportamento da distância da trajetória ( $d$ ) ao respeito do número de épocas no algoritmo, a linha na cor azul leva em consideração um valor de 0,1 para o parâmetro Fator de Autonomia, a linha na cor vermelha considera um valor de 0,8 para esse parâmetro, e a linha na cor verde considera um valor de 1,9 para esse parâmetro.

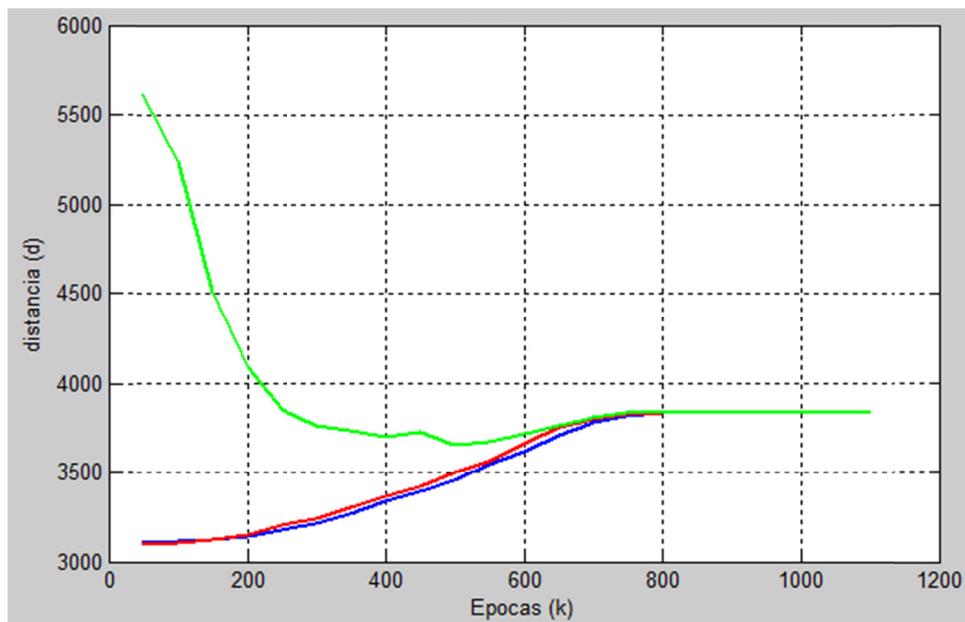


Figura 57. Influência do Fator de Disponibilidade no Algoritmo de Agendamento

Pode-se observar que a variação no Fator de Disponibilidade não influi no número de épocas necessárias para alcançar o valor de convergência, mas influi nas oscilações da trajetória. Assim, quanto maior o valor do parâmetro, mais oscilações apresenta a trajetória calculada antes de alcançar a convergência. Neste caso, com valores de fator de disponibilidade maiores a 1.9 o algoritmo se torna instável alcançando soluções impossíveis, ou não realizáveis por nenhum dos recursos físicos do sistema.

#### 5.4.3.4. Variação do parâmetro Número de Formigas

Para visualizar a influência do parâmetro Número de Formigas no funcionamento do algoritmo de agendamento dinâmico, são levados em consideração os dados de entrada apresentados na Tabela 11, mas neste caso o algoritmo é executado variando o Número de Formigas, e obtendo o resultado da distância ( $d$ ) para valores diferentes do número de épocas. Na Tabela 21 (no ANEXO G – Influência da Variação dos Parâmetros Adaptativos no Algoritmo de Agendamento) são apresentados os valores da distância ( $d$ ) da trajetória (plano de manufatura) considerando incrementos no número de formigas (na primeira coluna, desde 20 até 60). Aliás, nas colunas 2, 3, e 4 são apresentados os resultados obtidos utilizando três valores diferentes do número de épocas (700, 600, 500) respectivamente.

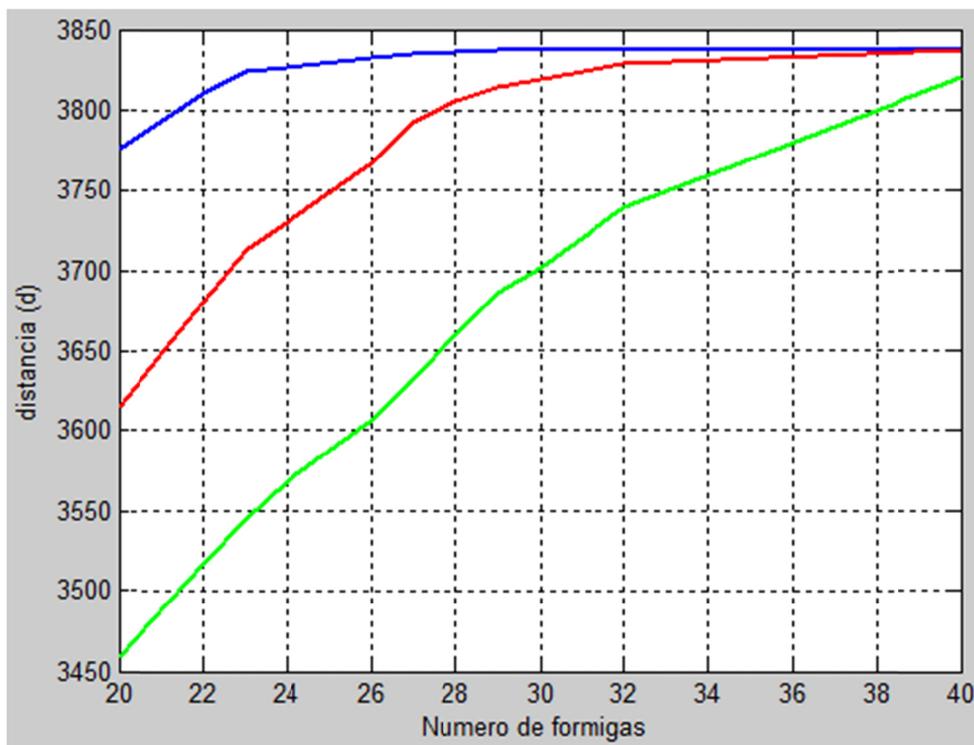


Figura 58. Influência do Número de Formigas no Algoritmo de Agendamento

Na Figura 58 é mostrado o comportamento da distância da trajetória ( $d$ ) ao respeito do número de formigas no algoritmo, a linha na cor azul leva em consideração um valor de 700 para o número de épocas, a linha na cor vermelha considera um valor de 600 para as épocas, e a linha na cor verde considera um valor de 500 para as épocas. Pode-se observar que quanto maior o número de formigas se necessitam menos épocas para alcançar a convergência, e vice-versa (a

relação entre o número de épocas e o número de formigas é inversa). Com um número de formigas menor a 20 o algoritmo não pode garantir que a trajetória passe por todos os P.O. E com um número de formigas maior a 50 a convergência do algoritmo é alcançada depois das 500 épocas.

## 5.5. Conclusões do Capítulo

Na implementação da simulação e visualização 3D foi utilizado um software (Webots<sup>TM</sup>) que permitisse o projeto, modelagem e participação de dispositivos de arquitetura heterogênea compostos de sensores, atuadores e dispositivos de controle, dessa maneira é possível a consideração imediata destes recursos físicos como Hólons Operacionais Simples. Isso permite a simulação de diferentes arquiteturas de controle simplesmente modificando a forma na qual estes hólons interagem entre si dentro do software para realizar tarefas de forma colaborativa. Além disso, dentro da própria implementação estes HO Simples podem ser definidos como unidades ou *Objetos* utilizando uma metodologia de Programação orientada a Objetos ou Agentes (POO – POA).

Tanto a parte lógica dos HO como também o nível de supervisão da arquitetura ADACOR proposta são implementados por médio da linguagem de alto nível Python<sup>TM</sup>, os níveis superiores da arquitetura (Gerenciamento e Produto) são implementados por médio da linguagem de alto nível MATLAB<sup>®</sup>. Para cada um dos HO Simples é implementada uma função *Controller* composta pelas rotinas ou operações básicas que os recursos físicos podem executar e para o nível de supervisão é implementado um agente de software chamado de *Supervisor* o qual permite a transmissão de informação para a coordenação das operações realizadas pelos recursos. Assim é possível simular a parte de comando do sistema de manufatura, possibilitando e programando características para a flexibilidade e reconfiguração rápida.

A comunicação indireta entre os HO, e entre o nível operacional e os níveis superiores é implementada fundamentalmente através do agente de software *Supervisor* que nesta tese representa o funcionamento do hólón HS. Com esse fim, dentro da simulação é desenhado e configurado um vetor de comunicação que vai ser lido e modificado cada vez que uma operação

básica seja realizada para indicar aos outros recursos o início ou fim das suas próprias operações, dessa maneira o sistema pode realizar atividades colaborativas nas quais podem participar vários recursos de manufatura de maneira simultânea sem colidir entre si.

Foi projetada uma arquitetura para um sistema de manufatura baseada no modelo híbrido ADACOR para ser estudada, modelada e simulada em 3D como um possível estudo de caso para validar a estratégia de coordenação e planejamento dinâmico proposta. Utilizando essa estratégia foi possível calcular um plano de manufatura realizável, semi-ótimo e sem conflitos que utiliza todos os recursos físicos para obter um produto finalizado, esse plano pode ser simulado dentro do ambiente para visualizar o funcionamento do sistema. A implementação do plano de manufatura obtido utilizando recursos físicos reais é apresentado no Capítulo 6.

O estudo e análise da influência da variação nos parâmetros adaptativos (terceiro componente da estratégia de coordenação proposta nesta tese) dentro do funcionamento do algoritmo de agendamento dinâmico, é útil para realizar uma adaptação manual ou automática desses parâmetros, depois do sistema ser reconfigurado por causa de uma falha num dos recursos físicos. Assim é possível diminuir o tempo de reestabelecimento (número de épocas) necessário para alcançar uma solução ou plano de manufatura no próximo estado transiente, melhorando continuamente a eficiência do algoritmo de agendamento proposto.

## 6. IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE OPERAÇÕES BÁSICAS DENTRO DO SISTEMA DE MANUFATURA COLABORATIVO

Este capítulo descreve uma segunda parte dentro da validação da estratégia proposta, dessa forma, é levada em consideração uma implementação (hardware – software) das **operações básicas** que pode executar o sistema de manufatura projetado para formar atividades e tarefas. Dessa maneira, são utilizados para isso os recursos de manufatura existentes no Laboratório de Automação e Robótica da UNICAMP, de forma a integrar esses dispositivos num sistema de manufatura colaborativo, configurado segundo a arquitetura heterárquica ADACOR. Os recursos utilizados na configuração (Distribuição Física) da arquitetura são apresentados na Tabela 7 e Figura 59.

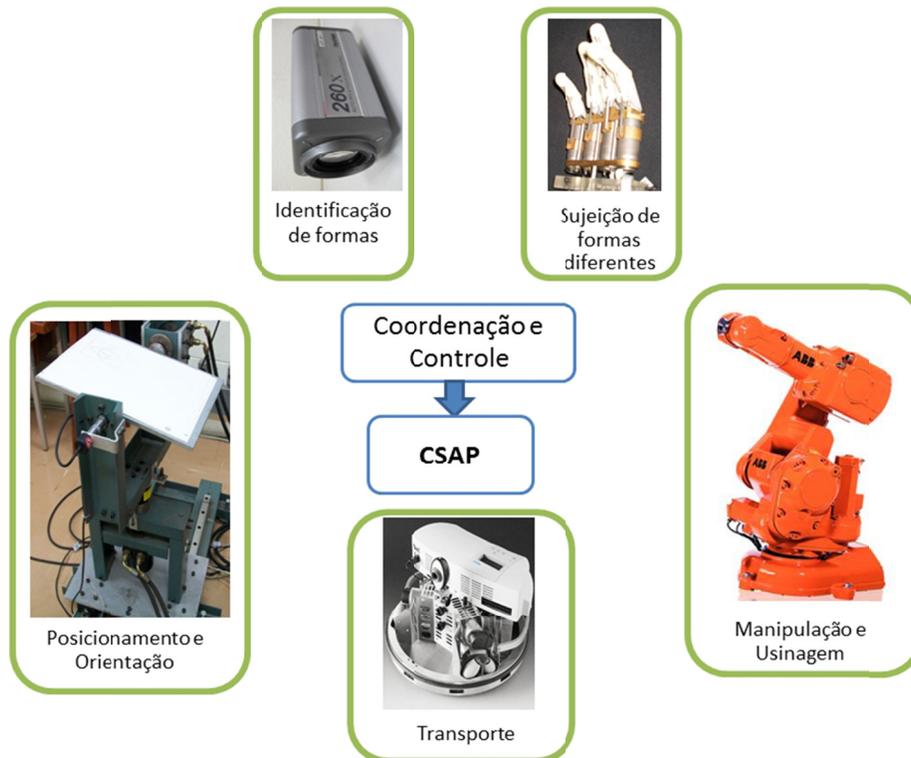


Figura 59. Recursos físicos num sistema de manufatura genérico utilizados na Arquitetura ADACOR projetada

### 6.1. Configuração de Sistema de Manufatura segundo uma arquitetura Holônica ADACOR

É muito importante na configuração heterárquica projetada, que esses recursos de manufatura efetivamente estejam em capacidade de realizar mais de um processo, de forma ao sistema integrado possuir uma REDUNDÂNCIA que possibilite flexibilidade no

desenvolvimento de sequências para realizar uma mesma tarefa, fazendo com que possam ser criados planos alternativos que não utilizem sempre o mesmo recurso.

### 6.1.1. Seleção de Recursos Físicos e HO utilizados e distribuição inicial

Já que o sistema projetado tem que ser robusto a falhas ou danos em algum dos seus componentes sem afetar o desenvolvimento das atividades previamente agendadas, os volumes de trabalho dos componentes devem ter o máximo de espaço coincidente. Cada um destes recursos físicos que atende os requerimentos de um módulo projetados na secção 3.4.5 é identificado como sendo a parte física de um HO simples dentro da arquitetura ADACOR. Na Figura 60 se observa a distribuição dos HO simples no sistema projetado. A seguir são descritos cada um dos recursos físicos utilizados para implementar a validação da proposta de coordenação e testar as operações descritas.

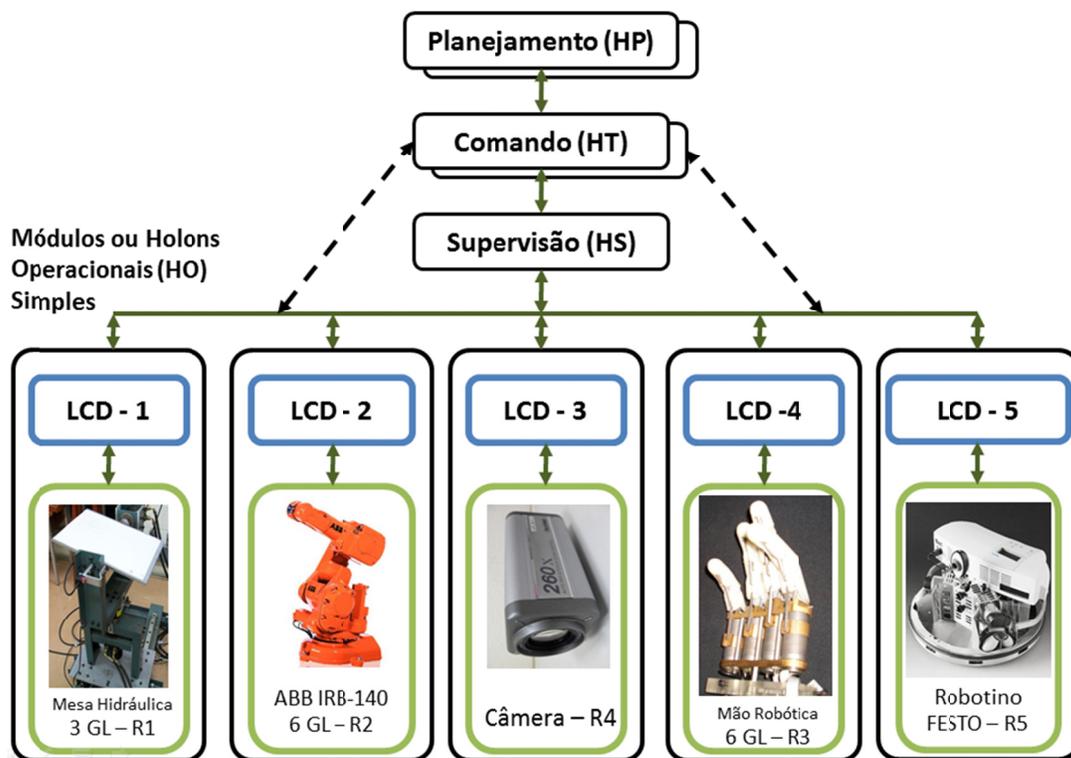


Figura 60. Hólons Operacionais Simples no Sistema Projetado

#### 6.1.1.1. Sistema de Posicionamento e Orientação - Mesa Hidráulica

Este é um dispositivo de três graus de liberdade com acionamento hidráulico: um movimento translacional (acionado por um cilindro) para o posicionamento da mesa ao longo de

um eixo, e dois graus de liberdade (acionados por motores hidráulicos) que permitem mudar a orientação das peças no espaço por meio de duas rotações ao redor de eixos perpendiculares. Os sensores de posicionamento são: um potenciômetro linear (junta linear) para o movimento de translação e dois encoders incrementais para as duas juntas rotativas (Ver Figura 61).

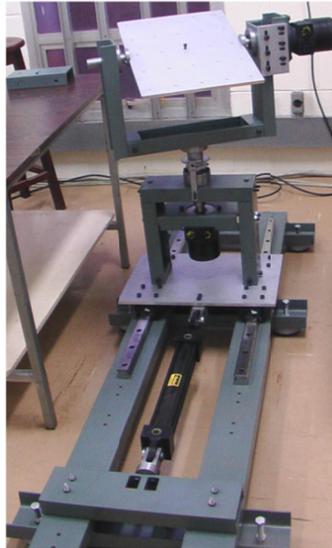


Figura 61. Mesa hidráulica

#### 6.1.1.2. Sistema de Usinagem - Manipulador Robótico

Este dispositivo ABB 140 é um manipulador robótico com seis graus de liberdade de revolução (giro ao redor de um eixo). Os três primeiros permitem a posição da peça no espaço tridimensional, os três últimos graus de liberdade formam uma articulação esférica (cujos eixos se intersectam num único ponto) que permite obter uma orientação desejada no espaço (Ver Figura 62).



Figura 62. Robô manipulador ABB 140

### 6.1.1.3. Sistema de Controle de Qualidade - Módulo de Visão Artificial

Para identificar se tem peças sendo transportadas pelo robô móvel Robotino, é utilizada uma câmera KOCOM 260x, a qual permite também identificar a cor da peça que é pintada e sua posição na mesa hidráulica (Ver Figura 63).



Figura 63. Câmera IP

### 6.1.1.4. Sistema de Sujeição - Módulo de Mão Robótica

O sistema de Sujeição está composto por uma mão robótica antropomórfica de seis graus de liberdade, um grau de liberdade para o movimento de flexão e extensão de cada dedo e um grau de liberdade adicional no dedo polegar para os movimentos de abdução e adução. Esses graus de liberdade permitem o agarre de objetos de forma plana, cilíndrica e esférica, o detalhe da mão robótica utilizada e seu acople no Robô ABB 140 e mostrada na Figura 64.

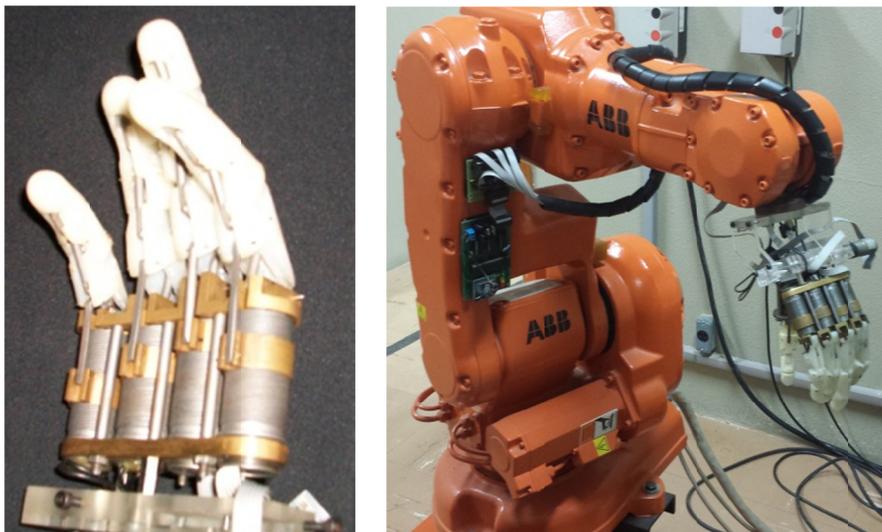


Figura 64. Mão robótica antropomórfica

#### **6.1.1.5. Sistema de Transporte – Robô Móvel**

O sistema de transporte é implementado com a utilização de um robô móvel de referência Robotino FESTO (Figura 65), o qual tem um sistema de movimentação baseado em três rodas omnidirecionais distribuídas no chassi (separação de 120 graus entre elas). Isso faz com que o robô possa controlar de forma independente seu deslocamento nos eixos  $X$  e  $Y$  e o giro ao redor da vertical, sendo um robô holonômico. Este robô pode ser programado utilizando os softwares RobotinoView™ e RobotinoSim™ respectivamente.



Figura 65. Robô Móvel ROBOTINO

A disposição atual dos recursos físicos do laboratório LAIR está baseada na configuração utilizada na simulação do sistema, apresentada na secção 5.2. As atividades de transporte das peças desde a área de estoque até a área de usinagem, e desde a área de usinagem até a área de armazenagem de produtos também pode ser configurada utilizando o programa para o controle do robô móvel Robotino de FESTO. A disposição da mesa hidráulica e os robôs dentro na área de usinagem pode ser observada na Figura 66.

#### **6.1.2. Definição dos Processos, Atividades e Subprocessos no Sistema Projetado**

Para realizar a descrição do funcionamento completo do sistema heterárquico, é projetado que o sistema de manufatura obterá um produto final como consequência do seu funcionamento. Com o intuito de fabricar esse produto, o funcionamento do sistema é dividido em forma descendente levando em consideração as funções dos níveis ADACOR (Figura 67):

### 6.1.2.1. Produtos

São as saídas finais do sistema de manufatura, para cada tipo de produto é gerado um HP (Hólon de Produto) e conseqüentemente plano de manufatura composto por várias tarefas. Nessa validação é levada em consideração a obtenção de um produto terminado.

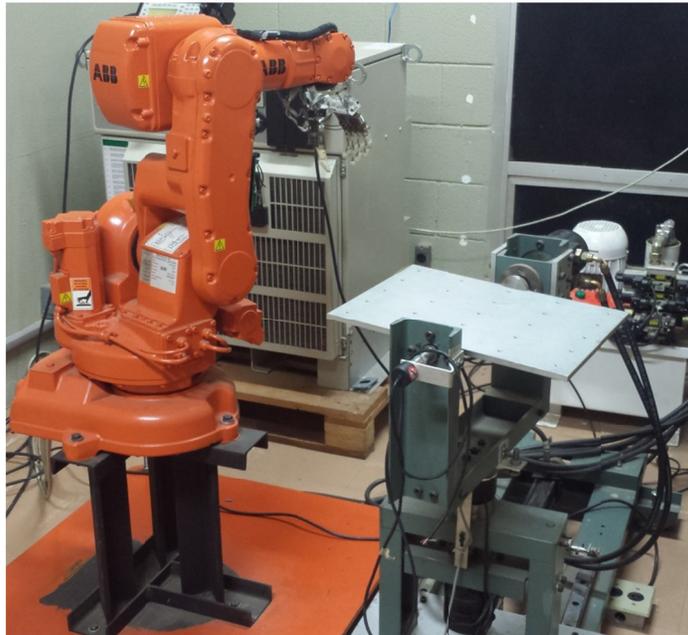


Figura 66. Recursos físicos dentro da área de Usinagem

### 6.1.2.2. Processos, Tarefas ou Ordens de Manufatura

Cada processo é representado por um HT (Hólon de tarefa) e *é obtido pela execução de todas as atividades (não necessariamente ao mesmo tempo) de um HO composto*, embora exista uma sequência determinada pelo plano de manufatura na execução das tarefas para obter um produto, é possível que algumas tarefas possam ser executadas de forma paralela. Um processo é composto por várias atividades. Nesta validação são levados em consideração três processos ou tarefas: Posicionamento, Orientação e Usinagem; Sujeição e Movimentação dentro da Área de Usinagem; Seguimento de Trajetória e Transporte entre Áreas (ver Figura 67) os quais formam um plano de manufatura.

### 6.1.2.3. Atividades ou Ações de Manufatura

São realizadas por *um ou vários recursos físicos pertencentes a um só HO Composto*. Várias atividades formam uma tarefa ou processo, e podem ser executadas de forma paralela. Nesta validação são consideradas as atividades mostradas na Tabela 14.

#### 6.1.2.4. Operações de manufatura ou Subprocessos

Estes são realizados por somente um Recurso de Manufatura, vários destes subprocessos formam uma atividade. Dentro do funcionamento do sistema de manufatura a realização de um subprocesso depende da disponibilidade do recurso, caso o recurso físico não estiver disponível, a redundância do sistema possibilita com que o subprocesso seja realizado por outro recurso físico.

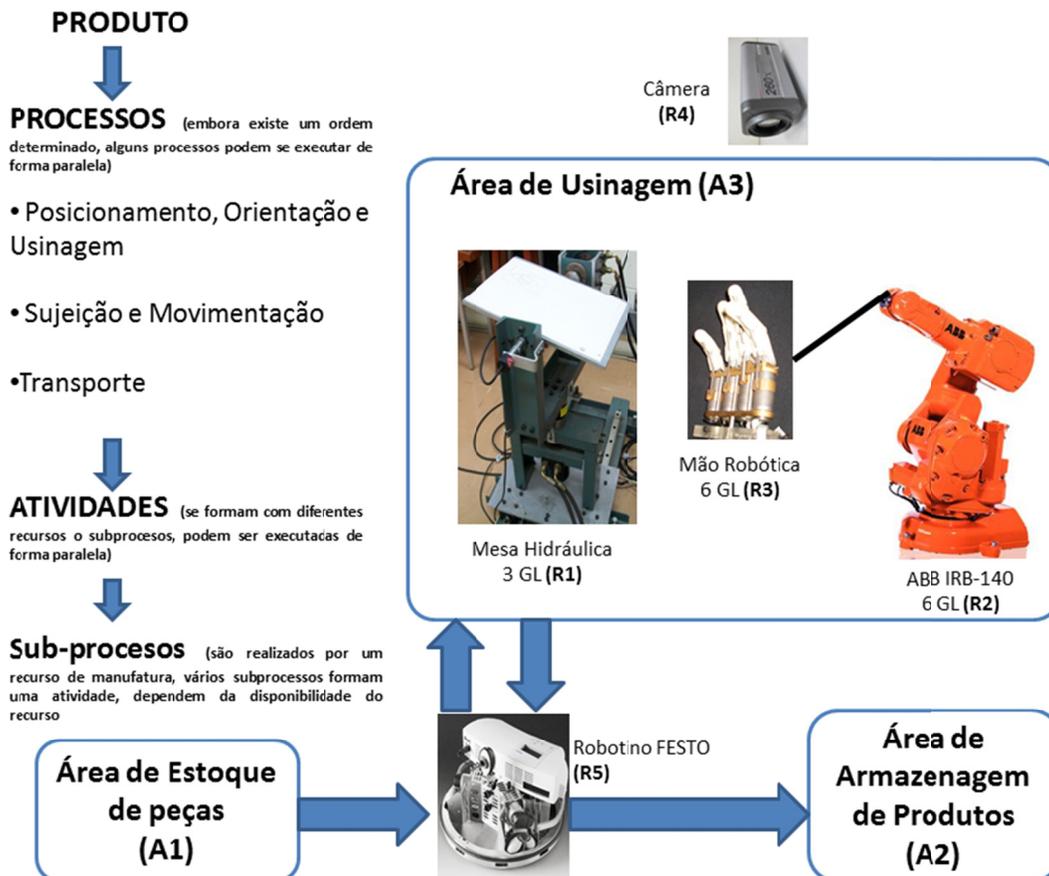


Figura 67. Produto – Processos – Atividades - Operações no sistema projetado

## 6.2. Implementação do Algoritmo de Planejamento e Coordenação

Para a validação do algoritmo de planejamento dinâmico proposto nesta tese são levadas em consideração as sub-etapas que o compõem, definindo claramente os recursos físicos e dados de entrada à primeira etapa de Planejamento Inicial da Produção e Alocação de recursos.

### 6.2.1. Implementação da Etapa de Planejamento Inicial e Alocação de Recursos

Nesta etapa vão se formar os hólons Operacionais Compostos que vão coordenar suas atividades no sistema de manufatura. Com esse fim é formada uma matriz de Incidência PFA

baseada nos recursos de manufatura e as atividades descritas na Tabela 14, os recursos são organizados nas filas e as atividades nas colunas da matriz. Com o intuito de organizar essa matriz em blocos é utilizado um algoritmo de agrupamento ROC, dessa maneira são obtidas duas possíveis matrizes soluções (Figura 68), embora qualquer destas duas soluções produz a mesma agrupação de recursos, a formação dos três HO compostos correspondentes é mostrada na Figura 70.

<b>Atividades</b>	<b>Recursos de Manufatura</b>	<b>Hólón Operacional</b>
A) Identificação de forma	R4	HO1
B) Posicionamento e orientação relativa entre peça e origem da Mesa hidráulica	R1, R2, R3	HO1
C) Usinagem	R1, R2, R4	HO1
D) Sujeição de peças de formas diferentes acima do robô móvel	R2, R3	HO2
E) Movimentação de peças para reposicionamento ou Transporte entre robô móvel e mesa hidráulica e vice-versa (Área de Usinagem A3)	R2, R3	HO2
F) Seguimento de trajetória e Transporte de peças entre A1 (Área de Estoque) e A3	R5	HO3
G) Seguimento de trajetória e Transporte de peças entre A3 e A2 (Área de Armazenagem)	R5	HO3

Tabela 14. Atividades propostas e recursos de manufatura utilizados no sistema

No exemplo de sistema de manufatura desenvolvido neste capítulo, os recursos físicos apresentados anteriormente serão a parte Operativa dos três Hólons Operacionais (HOs) Compostos projetados, e integram diferentes tecnologias visando à obtenção de um sistema de manufatura flexível capaz de realizar os processos de: Posicionamento, Orientação e Usinagem; Sujeição e Movimentação dentro da Área de Usinagem; Seguimento de Trajetória e Transporte entre Áreas.

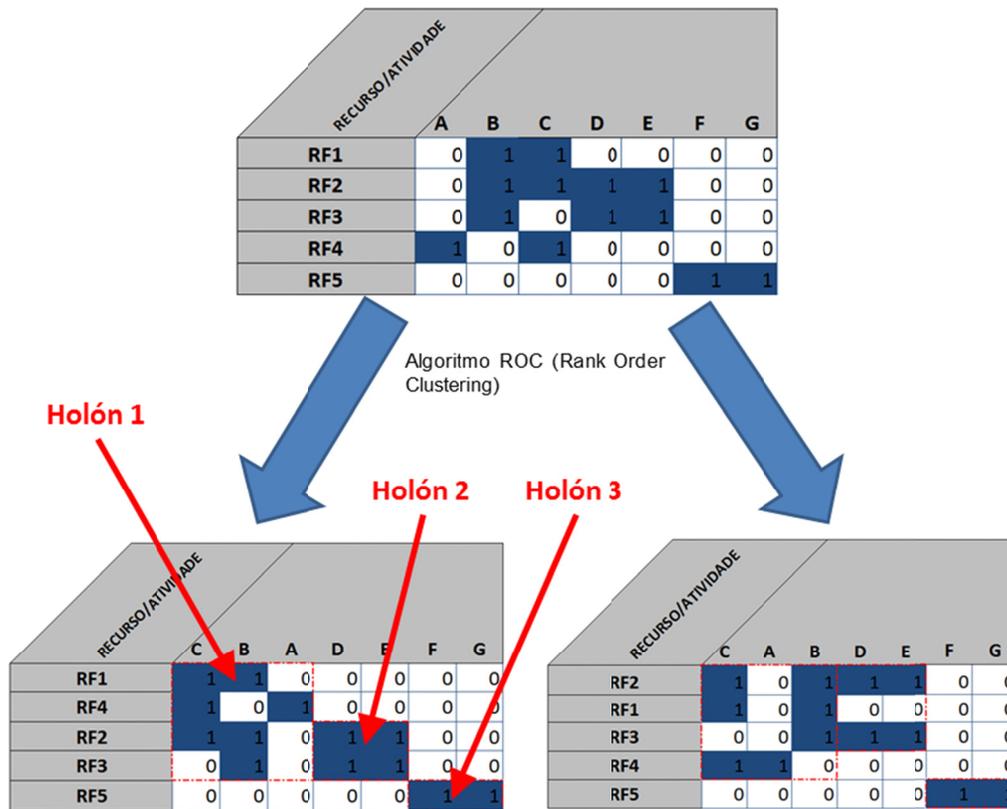


Figura 68. Hólons Compostos Projetados com o algoritmo ROC

Como se observa na solução do algoritmo de agrupamento é possível que um recurso de manufatura possa pertencer simultaneamente a mais de um HO composto. No entanto, em casos como este as atividades nas quais participa o recurso não são realizadas ao mesmo tempo.

Os recursos utilizados e a configuração resultante do sistema de manufatura são apresentados na Figura 69. O nível operacional da arquitetura está formado por três hólons cada um composto por um componente lógico LCD e vários recursos físicos. Na organização no nível operacional é levado em consideração que cada hólón possua sensores e atuadores com o intuito de ser auto-suficiente, caso se presente uma perturbação e esse tivesse que executar ações de forma autônoma (sem depender de sensores ou atuadores de outro hólón). Na Figura 70 se observa a agrupação dos recursos físicos para formar os hólons compostos, as setas saindo dos LCD levam ordens para os atuadores e as setas entrando simbolizam os sinais recolhidas dos sensores.

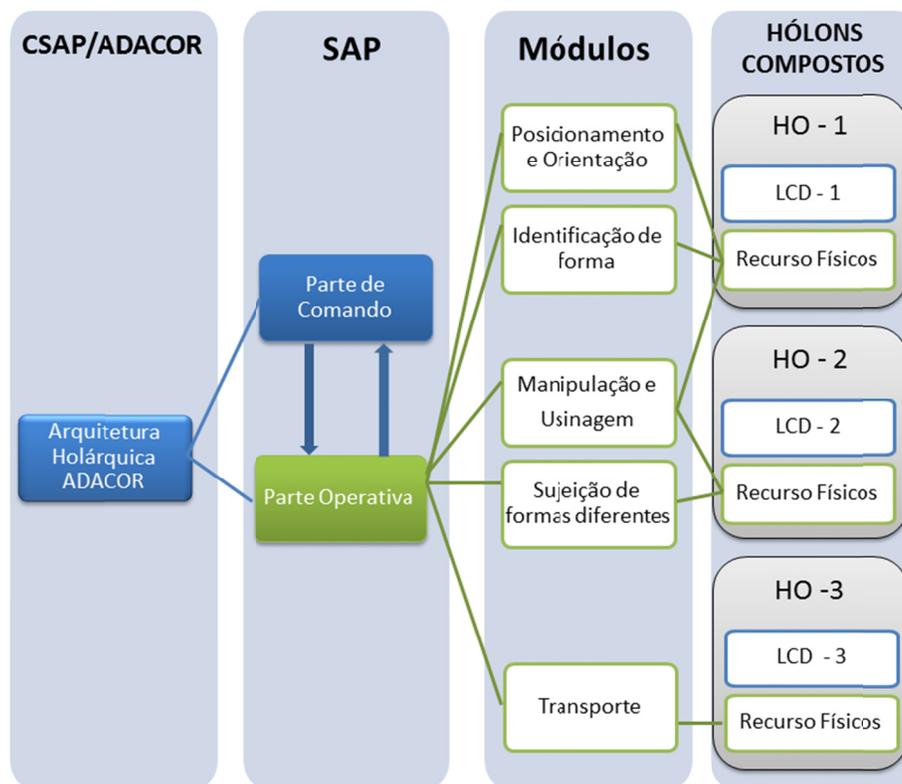


Figura 69. Configuração da Arquitetura ADACOR projetada

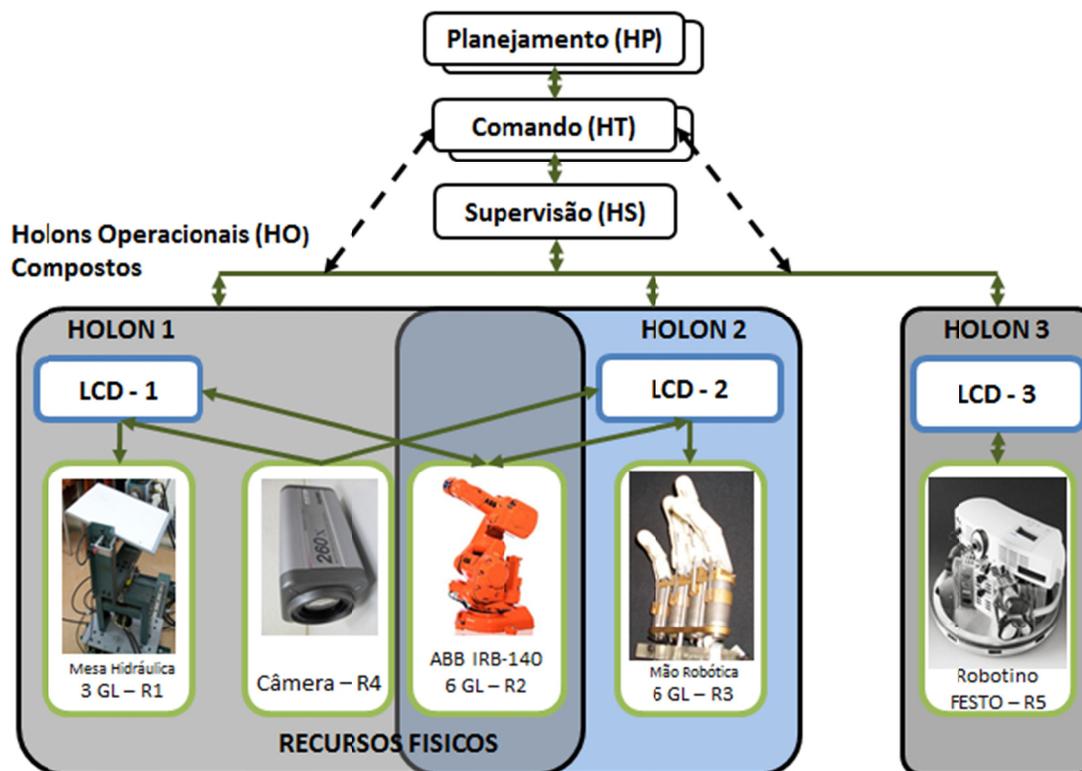


Figura 70. Hólons Operacionais Compostos no Sistema Projetado

### 6.2.2. Descrição das Tarefas dentro dos Hólons Operacionais Compostos

A agrupação de atividades realizadas somente por recursos físicos (trabalhando coordenadamente) dentro de um mesmo hólón composto forma uma Tarefa ou Processo, tanto atividades quanto tarefas pertencem somente a um HO composto. Assim os HO compostos obtidos com o algoritmo de agrupamento podem compartilhar recursos físicos, mas não atividades. Levando essa agrupação de recursos em consideração, junto com a definição de Tarefa ou Processo apresentada na secção 6.1.2, é possível então agrupar as Atividades realizadas por cada um dos três hólons para definir assim as três Tarefas (Tabela 15).

Essa agrupação é a entrada inicial para a etapa de agendamento dinâmico de operações (secção 4.2) o qual é realizado por um hólón de tarefa HT, para determinar a sequência de operações cujo funcionamento será monitorado por sua vez pelo hólón de supervisão HS. Neste capítulo é apresentado um exemplo de um plano de manufatura simples que está baseado nas tarefas executadas pelos os três hólons compostos descritos acima para obter um produto. Desta maneira, o plano de manufatura é formado com a execução das atividades descritas na Tabela 14.

<b>Tarefa</b>	<b>Hólón Operacional Composto</b>	<b>Atividades</b>
Orientação, Posicionamento e Usinagem	HO1	A, B, C
Sujeição e Movimentação dentro da Área de Usinagem (A3)	HO2	D, E
Seguimento de Trajetória e Transporte entre Áreas	HO3	F, G

Tabela 15. Tarefas Resultantes no Sistema Holônico

### 6.2.3. Descrição das Atividades dentro dos Hólons Operacionais Compostos

Cada uma das atividades dentro de um Hólón é obtida como a agrupação de Operações Básicas realizadas com os recursos de manufatura, neste exemplo são levadas em consideração as operações básicas descritas na Tabela 8. É importante considerar que neste sistema de manufatura colaborativo (CSAP) implementação somente participa um robô manipulador (não participa o manipulador robótico ABB 1400), portanto nesse caso as operações que este manipulador executava na simulação apresentada no capítulo 5 vão ser agora realizadas pelo manipulador

robótico ABB 140, assim nessa implementação não vão ser realizadas operações de pintura sobre a peça.

No sistema implementado neste capítulo existe outro recurso que não foi simulado no Capítulo 5: a mão robótica antropomórfica, devido a isso também são definidas operações de sujeição de formas diferentes para esse dispositivo, antes essas operações tinham sido integradas e definidas como sendo executadas por um dos robôs manipuladores. A seguir são apresentadas as atividades definidas na Tabela 14, descrevendo detalhadamente as operações que formam cada uma destas atividades e a sequência de execução destas operações.

#### **6.2.3.1. Atividade F – Hólon 3**

##### **Seguimento de trajetória e Transporte de peças entre A1 (Área de Estoque) e A3**

A atividade de seguimento de trajetórias é realizada com o ROBOTINO - FESTO (R5) seguindo um trilho preto marcado no chão entre as áreas A1 e A3. Essa atividade está composta das seguintes operações básicas ou Subprocessos:

- Informa ao Supervisor do começo de movimento de Seguimento de trajetória;
- Seguimento de trajetórias e transporte de peças entre A1 e A3.
- Informa ao Supervisor o fim do movimento de Seguimento de trajetória.

#### **6.2.3.2. Atividade A – Hólon 1**

##### **Identificação de Forma**

Esta atividade é realizada pela câmera KOCOM 260x (R4) e está composta das seguintes operações básicas

- Leitura do supervisor ou usuário para começar a detecção de forma.
- Detecção da forma da peça, essa peça pode ser de três formas diferentes (cubo, esfera ou cilindro).
- Envio da variável ao supervisor indicando a forma da peça.

#### **6.2.3.3. Atividade D – Hólon 2**

##### **Sujeição de peças de formas diferentes acima o robô móvel**

Esta atividade realizada pelos recursos R2 e R3 e está composta das seguintes operações básicas:

- Leitura do supervisor para começar a sujeição;
- Leitura da forma da peça;
- Movimento do robô manipulador ABB 140 desde posição de HOME até posição intermedia;
- Movimento do manipulador desde posição de intermedia até posição do Robotino;
- Sujeição da peça utilizando a mão robótica;
- Informar ao supervisor fim da sujeição acima do Robotino.

#### **6.2.3.4. Atividade E – Hólon 2**

##### **Movimentação de peças para reposicionamento ou Transporte entre robô móvel e mesa hidráulica e vice-versa (Área de Usinagem A3)**

Esta atividade realizada pelos recursos R2 e R3. A atividade de Reposicionamento permite a utilização do manipulador para mudar a orientação da peça caso a mesa hidráulica apresente uma falha em seu acionamento rotacional. A atividade (E) está composta das seguintes operações básicas:

- Leitura de variável que indica se vai ser realizado um Reposicionamento ou um Transporte.
- Se vai ser realizado um Reposicionamento:
  1. Leitura da forma da peça.
  2. Leitura das variáveis que indicam o reposicionamento (posição e orientação desejadas da peça com respeito à placa da mesa hidráulica).
  3. O manipulador vai desde posição HOME até a posição e orientação atual da peça com respeito à placa da mesa hidráulica.
  4. A mão sujeita a peça.
  5. O manipulador movimenta e gira a peça desde posição atual da peça até posição e orientação desejada da peça com respeito à placa da mesa hidráulica.
  6. A mão solta a peça.
  7. O manipulador vai desde posição desejada da peça com respeito à placa da mesa hidráulica até posição de HOME.
  8. Informar ao supervisor fim do reposicionamento da peça.
- Se vai ser realizado um Transporte:
  1. Leitura da variável que indica o transporte entre Robotino e a mesa hidráulica (A3) ou transporte entre a mesa hidráulica e Robotino.

2. Se vai ser realizado Transporte desde Robotino até a mesa hidráulica, então:
  - a) O manipulador vai desde posição HOME até a posição do Robotino.
  - b) Leitura da forma da peça.
  - c) A mão sujeita a peça.
  - d) O manipulador vai desde posição do Robotino até posição de HOME.
  - e) O manipulador vai desde posição de HOME até posição inicial da mesa hidráulica, (neste caso a peça fica ainda segurada pela mão robótica).
  - f) Informar ao supervisor fim do transporte até a mesa hidráulica.
3. Se vai ser realizado Transporte entre a mesa hidráulica e o Robotino, então.
  - a) O manipulador vai desde posição HOME até a posição e orientação atual da peça com respeito à origem da mesa hidráulica.
  - b) Leitura da forma da peça.
  - c) A mão sujeita a peça.
  - d) O manipulador vai desde posição atual na mesa hidráulica até posição do Robotino.
  - e) A mão solta a peça.
  - f) O manipulador vai desde posição do Robotino até posição de HOME.
  - g) Informar ao supervisor fim do transporte até o Robotino.

#### **6.2.3.5. Atividade B – Hólon 1**

##### **Posicionamento e Orientação relativa entre peça e origem da Mesa hidráulica**

Esta atividade realizada pelos recursos R1, R2 e R3, e está composta das seguintes operações básicas:

- Leitura das variáveis que indicam o posicionamento (posição e orientação desejadas da peça respeito à origem da mesa hidráulica).
- A placa da mesa hidráulica vai até a sua posição inicial: posição central do primeiro grau de liberdade, e rotação zero dos dois ângulos de orientação.
- A mão solta a peça.
- A mesa hidráulica se desloca e gira seus dois ângulos desde sua posição inicial até posição desejada da peça.
- O manipulador vai desde posição inicial da mesa hidráulica até posição de HOME.
- Informar ao supervisor fim do posicionamento da peça.

#### **6.2.3.6. Atividade C – Hólon 1**

##### **Usinagem**

Esta atividade realizada pelos recursos R1, R2 e R4, e está composta das seguintes operações básicas:

- Informa ao supervisor início do processo de usinagem.
- Leitura da posição e orientação do manipulador para usinagem e para mesa.
- O manipulador seleciona ferramenta para usinagem.
- A mesa vai desde a posição Inicial até posição de usinagem.
- O manipulador vai desde posição HOME até posição de usinagem.
- O Manipulador executa operação de usinagem sobre a peça.
- O Manipulador vai desde posição de usinagem até posição de HOME.
- Câmera realiza operação de controle de qualidade.
- A mesa vai desde a posição de usinagem até sua posição Inicial.
- Informa ao supervisor fim do processo de usinagem.

#### **6.2.3.7. Atividade G – Hólon 3**

##### **Seguimento de trajetórias e transporte de peças entre A3 e A2.**

A atividade de seguimento de trajetórias é realizada com o ROBOTINO - FESTO (R5) seguindo um trilho preto marcado no chão entre as áreas A3 e A2. Esta atividade está composta das seguintes operações básicas ou Subprocessos:

- Informa ao Supervisor do começo de Seguimento de trajetória.
- Seguimento de trajetórias e transporte de peças entre A3 e A2.
- Informa ao Supervisor o fim de Seguimento de trajetória.

#### **6.2.4. Especificação e Implementação das Operações básicas a serem realizadas com os Recursos Físicos**

Levando em consideração a definição das atividades apresentada anteriormente (Ver Tabela 14), são definidas as seguintes operações ou subprocessos para serem implementadas pelos recursos físicos existentes no Laboratório de Automatização Integrada e Robótica da UNICAMP. Estas operações básicas são simuladas também no software e são programadas e implementadas

para completar o processo de validação. A seguir são apresentadas as operações consideradas anteriormente, descrevendo detalhadamente os passos que compõem cada uma destas operações.

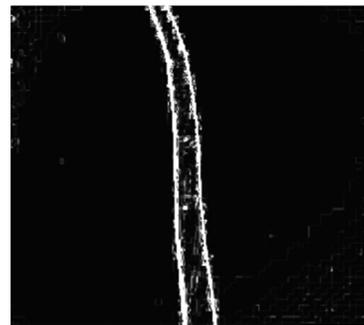
#### 6.2.4.1. Especificação da Operação de Seguimento de Trajetória com o Robô Móvel Robotino

Nesta operação é utilizada a câmera integrada no Robotino para detectar um trilho preto no chão para fazer com que esse robô móvel possa seguir uma trajetória indicada por essa linha entre a Área de estoque de peças A1 e a Área de Usinagem A3. Este programa é implementado no software RobotinoView™ disponibilizado pela empresa FESTO, nesse software a programação é realizada utilizando blocos de funções especializadas, de maneira similar à programação realizada com o software LabView™. O procedimento para a implementação da operação de seguimento de trajetória atende os seguintes passos:

- Aquisição de Imagem (640 x 480) pela câmera do Robotino.
- Detecção do trilho no chão utilizando um bloco de processamento de imagens (Line Detector) no qual é definido um nível de umbral (153) na imagem (utilizando o sistema RGB) para detectar uma linha (Figura 71), a saída desse bloco informa a posição em  $X$  (*pixels*) da linha medida desde a esquerda da imagem.



a) Imagem Original



b) Imagem Processada

Figura 71. Processo de Identificação da linha preta

- Se a linha é detectada a esquerda do centro da imagem o Robotino tem que rotar à esquerda, se a linha está a direita do centro da imagem o Robotino tem que rotar à direita, neste caso é definida uma velocidade de rotação e uma velocidade de translação (150 mm/s) na coordenada  $X$  (para frente) do Robotino, utilizando para isso blocos constantes (Const).

- A seguir é utilizado um bloco especializado no movimento do Robotino que calcula a sua cinemática diferencial inversa (Omnidrive) para obter a velocidade angular de cada uma das rodas.
- Finalmente a velocidade calculada para cada motor é enviada a cada um desses (utilizando o bloco Motor) para obter o movimento do robô. A implementação da operação com o Robotino utilizando RobotinoView™ é mostrada na Figura 72.

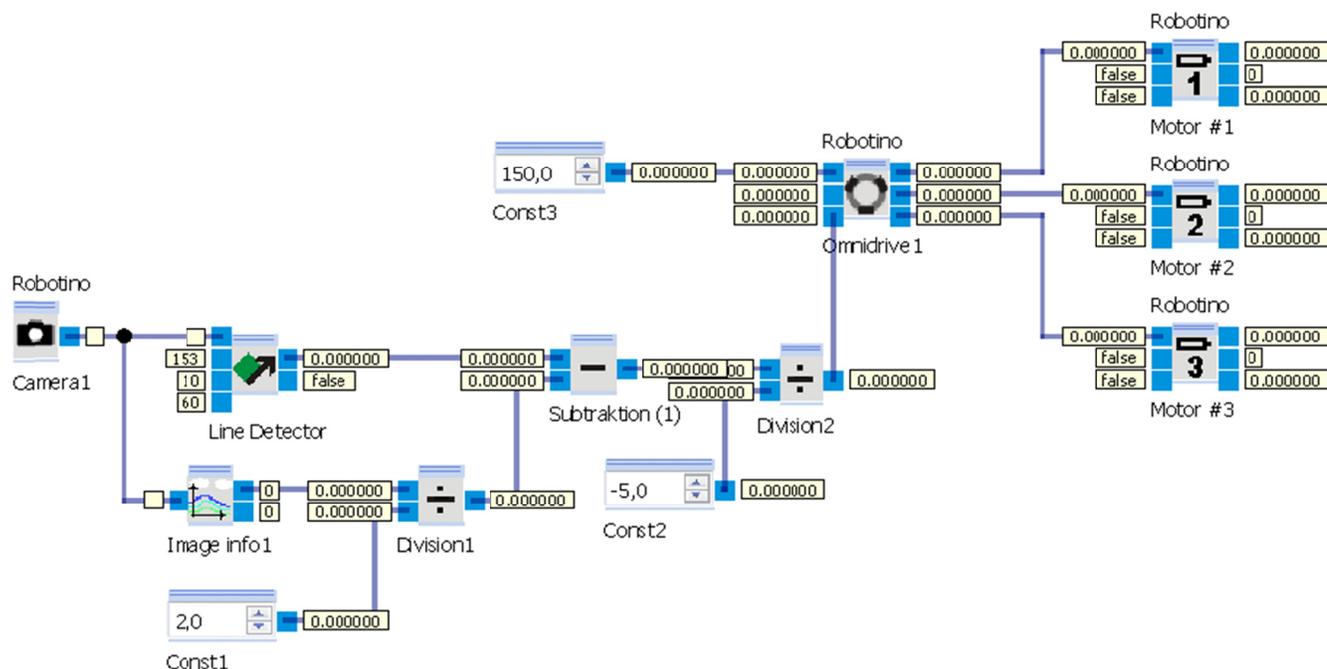


Figura 72. Implementação do Algoritmo de Transporte com o Robotino - FESTO

#### 6.2.4.2. Especificação das Operações com o robô ABB 140

O manipulador robótico pode executar movimentos desde uma posição inicial até uma posição final desejada, quando para cada uma dessas posições tem sido já calculadas as coordenadas das suas seis juntas rotacionais por meio da cinemática inversa. No programa de movimentação desenvolvido no software fornecido pela empresa ABB é definido que o robô possa realizar o planejamento de trajetórias de forma que o movimento composto do efetuador final possa descrever uma linha reta no espaço tridimensional. As posições que são levadas em consideração nesta operação do robô são apresentadas na Tabela 16, para a obtenção das posições variáveis poderão ser levados em consideração os sinais dos sensores e os cálculos de cinemática direta da mesa hidráulica e do manipulador robótico.

<b>Posições Constantes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posição de HOME</li> <li>• Posição Intermédia</li> <li>• Posição de (aproximação ao) Robotino</li> <li>• Posição Inicial (aproximação) da mesa hidráulica</li> </ul>
<b>Posições Variáveis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posição atual da peça com respeito à origem da mesa hidráulica</li> <li>• Posição atual da peça com respeito à placa da mesa hidráulica</li> </ul>

Tabela 16. Posições Consideradas para o Robô Manipulador ABB 140

Para levar o manipulador até qualquer destas posições é preciso sempre realizar a tarefa de calibração inicial, a qual tem por objetivo levar ao robô até a posição inicial de fábrica, e logo para esta posição definir em zero todos dos sensores de rotação (encoders) do robô.

#### 6.2.4.3. Especificação das Operações com a mesa Hidráulica

Para o acionamento da mesa hidráulica também são consideradas duas posições (ver Tabela 17).

<b>Posição Constante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posição Inicial de HOME (posição central do primeiro grau de liberdade, e rotação zero dos dois ângulos de orientação)</li> </ul>
<b>Posição Variável</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posição atual da peça com respeito à origem da mesa hidráulica</li> <li>• Posição atual da peça com respeito à placa da mesa hidráulica</li> </ul>

Tabela 17. Posições consideradas para a mesa Hidráulica

Com o intuito de levar a mesa até essas posições é utilizado um Instrumento Virtual existente no laboratório LAIR (Figura 73) desenvolvido no software LabView<sup>TM</sup>, para realizar a Supervisão das operações.

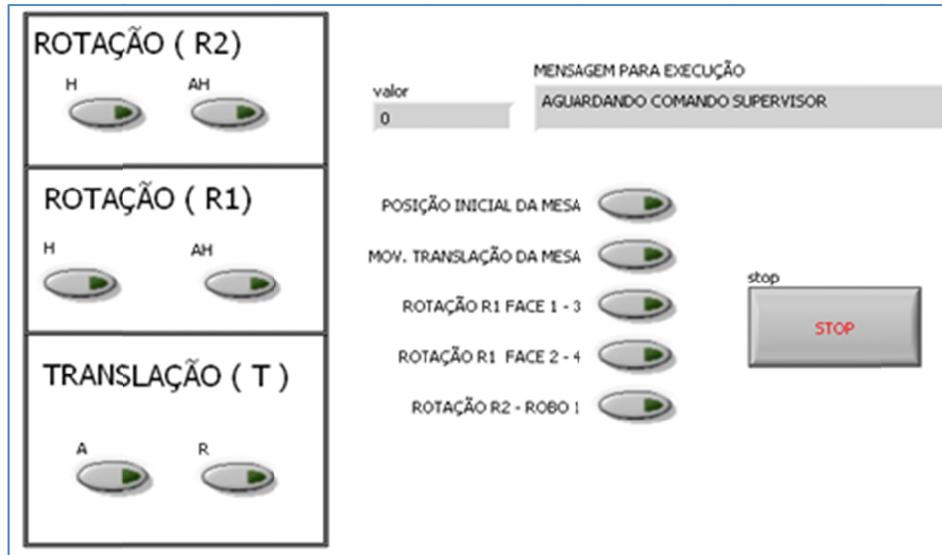


Figura 73. Instrumento Virtual para o Comando da Mesa Hidráulica

Utilizando esse instrumento é possível o comando para posições variáveis (valores analógicos) dos três graus de liberdade da mesa, e também para levar este dispositivo até a posição inicial constante HOME.

#### 6.2.4.4. Especificação das Operações com a Câmera

A câmera executa duas operações básicas: uma operação de identificação de forma da peça (dentro da atividade A) a ser sujeitada pela mão antropomórfica, e uma operação de controle de qualidade (dentro da atividade C) ou identificação de cor depois de que as peças são usinadas pelo manipulador. O algoritmo para a realização dessas duas atividades é desenvolvido no software MATLAB<sup>®</sup> levando em consideração os seguintes passos:

- Aquisição da imagem (640x480).
- Filtrado de meia circular (raio =10 pixels).
- Segmentação da cor desejada, ver Figura 74.

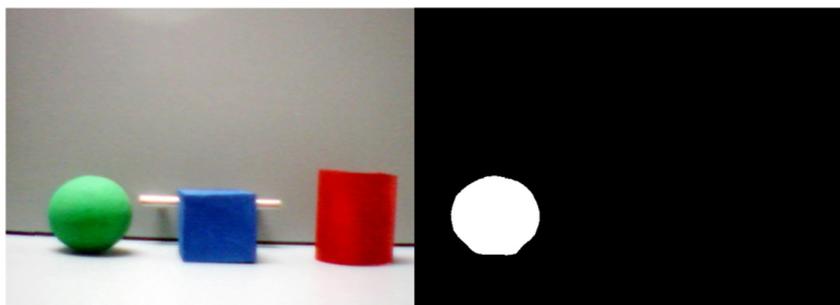


Figura 74. Exemplo de segmentação da cor verde na imagem adquirida

- Cálculo de Propriedades da região segmentada.

Para a obtenção da forma e da posição da peça, logo do processo de segmentação da imagem, são calculadas algumas propriedades da região resultante (região em branco na Figura 74): excentricidade, diâmetro equivalente, comprimento do eixo maior e centroide, utilizando para isso implementações existentes em MATLAB® (Eccentricity, EquivDiameter, MajorAxisLength, Centroid). Além das propriedades anteriores é programada outra mais (que não existe como rotina em MATLAB®), de forma a ter uma medida da circularidade da região, essa propriedade é calculada como se mostra a seguir:

$$C = (4 * \pi * Area) / \text{perímetro}^2 \quad (6)$$

Se o valor obtido para C é maior que 0.86, pode se concluir que a figura é uma esfera. O fluxograma da Figura 75 mostra como pode ser obtida a forma da figura atendendo o valor das propriedades da região (Circularidade e MajorAxisLength).

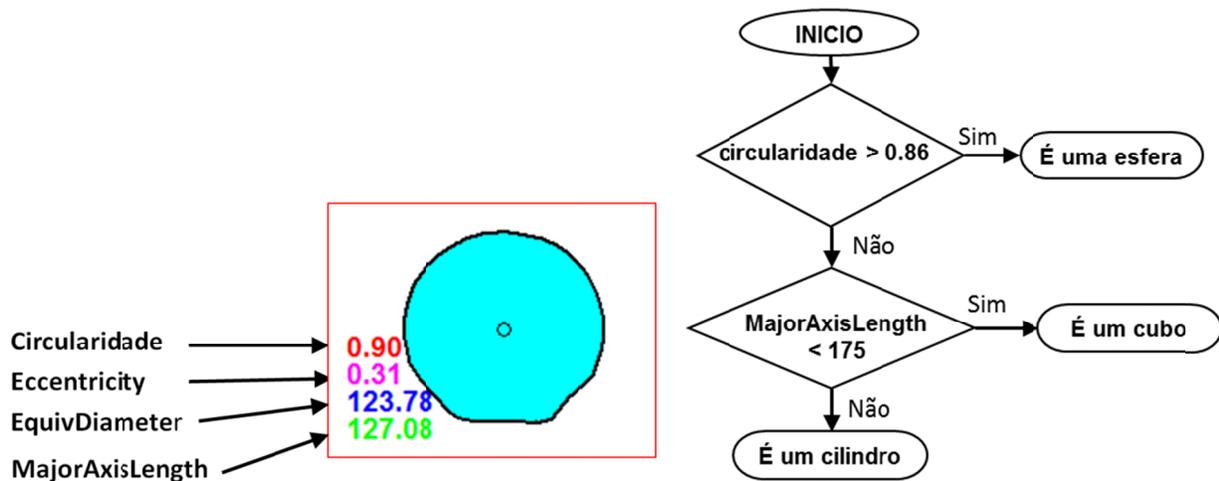


Figura 75. Cálculo da Forma da Figura Considerando as Propriedades da Região

#### 6.2.4.5. Especificação das Operações com a Mão Antropomórfica

A operação de sujeição de peças é executada por uma mão robótica antropomórfica que está em capacidade de realizar as operações que são apresentadas na parte direita do instrumento virtual, desenvolvido no software LabView™ e mostrado na Figura 77. A forma da peça que a mão tem que sujeitar é lida desde o HS ou pode ser selecionada pelo usuário atendendo ao número da operação desejada. Para a integração neste sistema de manufatura são utilizadas as

três operações para segurar objetos de diferente forma (cilíndrica, cubica, esférica) e também as três operações para liberar essas peças, ver Figura 76.

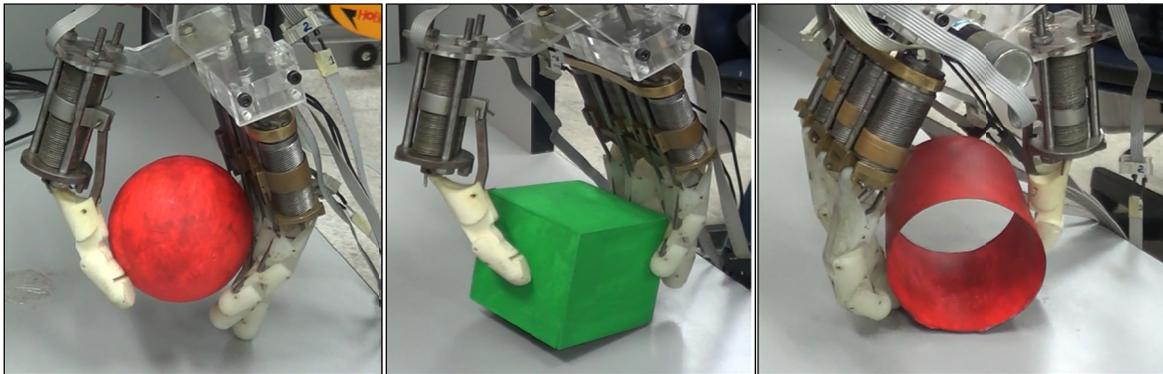


Figura 76. Sujeicao de formas Diferentes (Esferica, Cubica, Cilindrica)

O algoritmo de funcionamento da mão robótica é desenvolvido utilizando a programação em blocos mostrada na Figura 78, e levando em consideração os seguintes passos:

- Leitura do início da operação de sujeição.
- Leitura da operação de sujeição a realizar.
- Leitura da porta de comunicação.
- Espera até passar tempo de realização da sujeição (1.5s).
- Indicar Finalização da operação de sujeição.

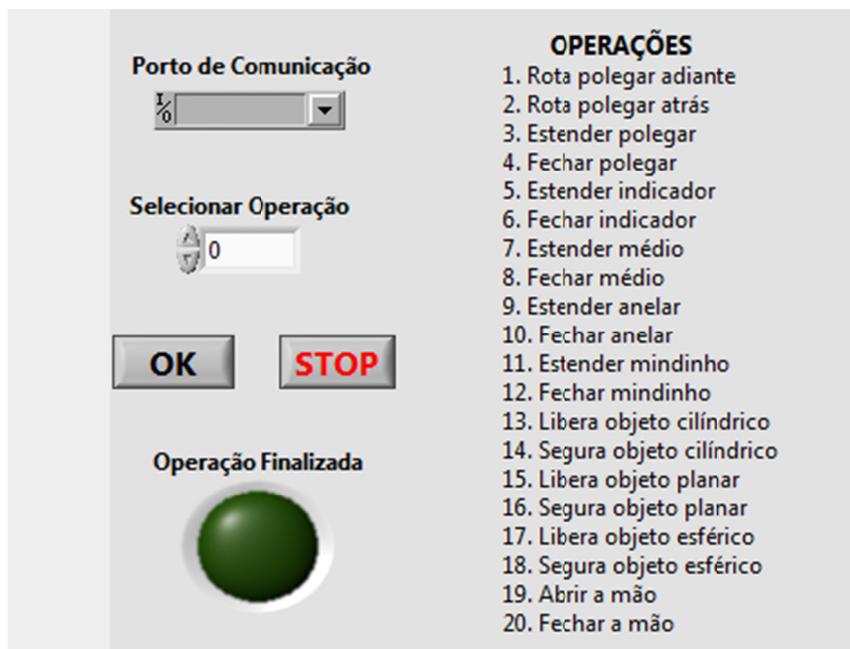


Figura 77. Instrumento virtual desenvolvido para o comando da Mão Robótica

Para garantir que a mão robótica possa executar as operações de sujeição de peças de formas diferentes, foi necessário realizar um projeto e implementação das partes mecânica e eletrônica desse dispositivo. Na parte mecânica foi desenvolvido: o projeto completo para construir o acoplamento da mão com o robô ABB 140, e o melhoramento do suporte para permitir o movimento dedo polegar. O projeto da parte eletrônica foi desenvolvido visando a construção da placa para a comunicação (mão – computador) e o controle dos motores para acionamento dos dedos da mão, ver ANEXO E – Projeto Mecânico, Acionamento e Controle da Mão Antropomórfica.

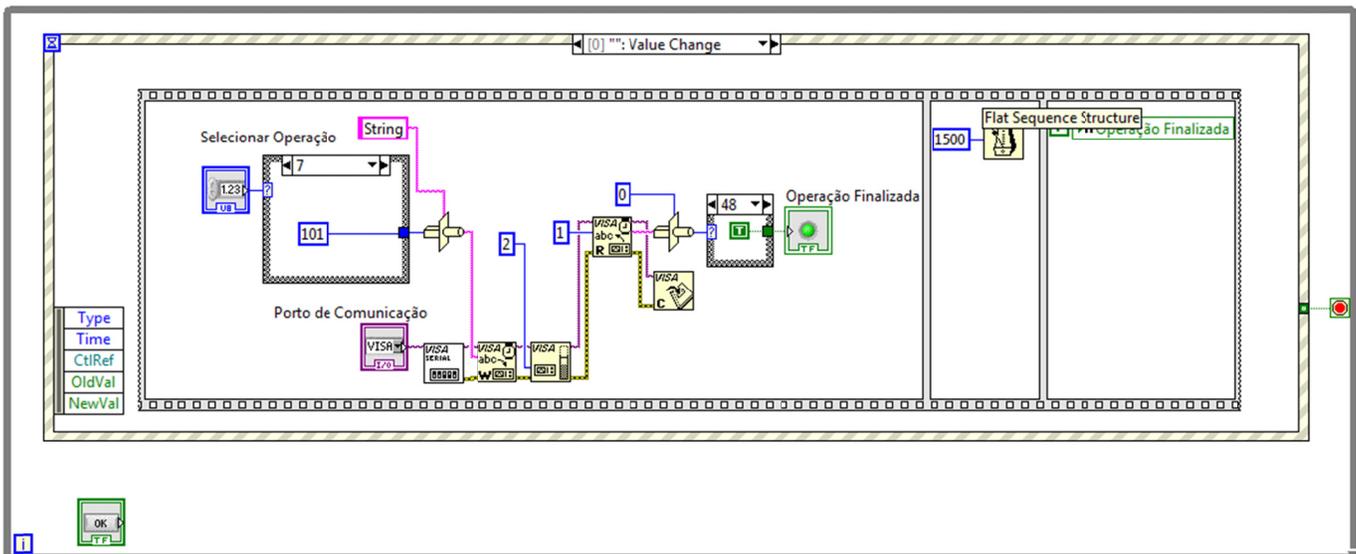


Figura 78. Diagrama de blocos do instrumento para comando da Mão Robótica

Um exemplo de uma sequência de operações básicas selecionadas para formar um plano de manufatura possível, de forma a ser executado pelos dispositivos físicos no Laboratório LAIR é apresentada na Tabela 12 já que a o sistema implementado neste capítulo e a distribuição dos seus recursos físicos está baseada na arquitetura simulada no capítulo anterior. No entanto nesta implementação as operações de movimento das peças são executadas pelo robô ABB 140 e não pelo robô ABB 1400.

### 6.3. Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi projetado e implementado um sistema de manufatura colaborativa aplicando a metodologia e a arquitetura híbrida - holônica desenvolvidas nesta tese, como

primeira parte da estratégia de coordenação. Desta forma são definidos os: Recursos Físicos, Hólons Operacionais Simples e Hólons Operacionais Compostos com base no algoritmo de agrupamento, a seguir também foram definidas detalhadamente as: Tarefas, Atividades, e Operações, e a sequência de operações (plano de manufatura) que é executada pelos Hólons e consequentemente pelos recursos físicos do sistema para obter um produto final.

Segundo a arquitetura Holônica ADACOR utilizada, o sistema proposto é flexível e facilmente escalável de forma a substituir ou adicionar novos hólons e novas tarefas, para ampliar a quantidade ou características dos produtos obtidos. Os recursos físicos podem pertencer simultaneamente a mais de um HO Composto de forma a otimizar a utilização de recursos e minimizando a energia. Isso também resulta em uma maior *Redundância* que faz o sistema mais robusto a perturbações no ambiente de manufatura. A Redundância do sistema também se apresenta dentro de um mesmo HO Composto já que é possível que um recurso físico possa executar as mesmas operações dentro de um mesmo HO.

Na formação dos Hólons Operacionais Compostos é possível observar a realização de operações que significam modificações físicas diretas (trabalho) sobre a peça, mas também existem operações de comunicação entre esses HO e os níveis de Supervisão e Gerenciamento (HS e HT) que são necessárias para a operação coordenada dos recursos evitando colisões entre eles e também reduzindo a perda de tempo (tempos mortos) no processo de manufatura.



## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

### 7.1. Conclusões Gerais

Levando em consideração a literatura existente, é possível observar que os sistemas de controle baseados em agentes e os sistemas holônicos estão fortemente relacionados, considerando-se os agentes como uma tecnologia e os sistemas holônicos como uma metodologia de implementação dessa tecnologia. Dentro desse contexto a coordenação necessária para os agentes colaborar e/ou cooperar entre si, requer um fluxo de informação regulado entre os agentes e o seu ambiente. No entanto, dentro desses sistemas também tem que ser desenvolvida uma hierarquia que possa garantir a ausência de conflitos na relação entre os hólons, mantendo a coerência e a objetividade geral do sistema. Dessa forma, os sistemas de controle de manufatura holônicos (HMS) combinam a adaptação aos imprevistos (distúrbios) do controle heterárquico e a previsibilidade e alto desempenho do controle hierárquico.

Assim, na atualidade as abordagens para a solução do problema de controle e agendamento dinâmico de manufatura cada vez mais são implementadas sobre arquiteturas distribuídas, que permitam o funcionamento e a reconfiguração que pode oferecer um sistema de coordenação baseado em agentes e/ou hólons. Sob essa ótica, e considerando a crescente integração de sistemas de manufatura compostos por um grande número de dispositivos e a diversificação de produtos para satisfazer a demanda do mercado atual, as estratégias tradicionais para a solução do problema JSP que utilizam oferta e demanda (baseadas em mercado) começam a ser substituídas por estratégias baseadas em inteligência artificial e algoritmos colaborativos as quais garantem uma resposta muito mais rápida para lidar com perturbações ou falhas em recursos de manufatura.

O projeto e concepção de uma arquitetura de controle híbrida – holônica ADACOR para obter um sistema de manufatura flexível composto por módulos (hólons) genéricos permite simular e/ou implementar diferentes operações, atividades, tarefas e planos de manufatura de forma a planejar a fabricação de produtos com distintas características, permitindo validar o funcionamento do algoritmo de planejamento dinâmico e coordenação proposto nesta tese. Além disso, um sistema de manufatura baseado numa arquitetura ADACOR permitirá a rápida

integração de novos módulos e também a programação e validação de estratégias de coordenação e planejamento diferentes, que possam surgir como trabalhos futuros.

Nesta tese foi proposta como solução do JSP a obtenção de uma trajetória sub-ótima em termos de distância entre as operações (pontos de operação) associadas aos recursos de manufatura que participam na realização de uma tarefa, considerando que assim também poderá ser minimizado o tempo que toma um HO composto para completar um processo completo. Essa trajetória entre as operações indicará a sequência em que essas são executadas para completar o processo. A estratégia proposta neste trabalho combina o conceito de Stigmergia com as Redes Neurais Auto organizativas (SOM) para obter assim um algoritmo de coordenação que funciona de forma iterativa para uma solução semi-ótimas do problema JSP. Nesse caso são utilizados agentes móveis tipo formiga para otimizar uma trajetória, a qual pode ser visualizada como uma sucessão de linhas dentro de um espaço tridimensional.

A estratégia de coordenação utilizando stigmergia e redes neurais SOM potencializada com a integração de parâmetros adaptativos de manufatura dentro do algoritmo de agendamento dinâmico (dentro do HT e HOs) faz com que os hólons não somente apresentem um comportamento reativo, mas também possam ser sintonizados de forma manual ou treinados de forma não supervisionada, inserindo neles uma característica de aprendizagem, consequentemente diminuindo a complexidade do algoritmo de planejamento e coordenação com respeito a outras técnicas e arquiteturas de controle tradicionais.

Foi projetada uma arquitetura para um sistema de manufatura baseada no modelo híbrido ADACOR para ser estudada, modelada, simulada em 3D e finalmente implementada com recursos físicos reais como um possível estudo de caso para validar a estratégia coordenação e planejamento dinâmico proposta. Utilizando essa estratégia foi possível calcular um plano de manufatura possível, semi-ótimo e sem conflitos que utiliza todos os recursos físicos para obter um produto finalizado.

O nível de eficiência da reconfiguração e convergência do sistema depende do número de recursos de manufatura utilizados, do número de hólons operacionais compostos projetados para

o sistema e dos valores dos parâmetros adaptativos e o mecanismo de aprendizagem. A utilização de um número de formigas maior que o número de Pontos de Operação P.O. dentro do algoritmo permite que a trajetória possa passar através de todos os recursos, mas ao superar determinada quantidade o sistema pode incrementar o seu tempo de reestabelecimento.

## **7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

### **7.2.1. Projeto e Implementação de Sistemas Baseados em Agentes Homogêneos**

A estratégia desenvolvida pode ser utilizada para o comando de sistemas compostos de agentes homogêneos, assim sendo será possível coordenar sistemas de múltiplos robôs móveis simples e econômicos ou também robôs humanoides para completar operações de exploração, recolhida e transporte de elementos. Sistemas desse tipo também poderiam ser implementados em tarefas de busca e resgate de feridos quando ocorre um desastre.

Assim a perda de um dos robôs móveis não significaria a suspensão na operação de busca já que a tarefa poderia ser coberta facilmente pelos robôs restantes no lugar de desastre. O fato dos robôs móveis ser coordenados com a estratégia desenvolvida aqui permitirá que quando o lugar de desastre esteja num estado estável depois do evento os robôs possam funcionar segundo uma estrutura de comando hierárquica, mas quando houver um novo desastre ou perturbação, ou ainda quando os robôs móveis estejam muito longe uns dos outros, esses poderiam funcionar de maneira totalmente autônoma ou heterárquica sem detenção na tarefa de busca ou resgate.

### **7.2.2. Metodologia de Aplicação do Algoritmo para Adaptação dos Parâmetros**

Quando o tempo de restabelecimento termina (depois do estado estacionário) poderá ser implementado um algoritmo de treinamento supervisionado ON-LINE para adaptar automaticamente os parâmetros nos hólons de Tarefa HT e Operacional HO. Com intuito de desenvolver essa adaptação pode ser projetada uma rede neural multicamada MLP que poderá ser treinada sempre que o sistema supere uma perturbação, de forma a compor uma tabela de valores que possa crescer refletindo a experiência do sistema. A primeira vez que a tabela é treinada os dados que são utilizados como exemplos de treinamento são definidos pelo usuário do sistema levando em consideração seu conhecimento do sistema de manufatura.



## Referências

- AIHARA, C. K. **Projeto e Implantação de Plataforma Didática Aplicada ao Ensino e Pesquisa em Automação**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2000.
- AIHARA, C. K. **Uma Abordagem Interativa para o Problema de Capacitação e Pesquisa em Automação**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005.
- ARAUJO, E. DOS S. **Modelagem e Descrição da Parte de Comando de um Sistema Automatizado de Produção Utilizando o GRAFCET - Aplicação a uma Plataforma Industrial em Automação**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1997.
- BABICEANU, R. F.; CHEN, F. F. Development and Applications of Holonic Manufacturing Systems: A Survey. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 17, n. 1, p. 111–131, 1 fev. 2006.
- BABICEANU, R. F.; CHEN, F. F.; STURGES, R. H. Framework for the control of automated material-handling systems using the holonic manufacturing approach. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 17, 2004.
- BAFFI, A. C. **Projeto e Implementação de uma Plataforma Didática de Manipulação Utilizando Conceitos de Automação e Integração**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2001.
- BAKER, A. D. A survey of factory control algorithms that can be implemented in a multi-agent heterarchy: Dispatching, scheduling, and pull. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 17, n. 4, p. 297–320, 1998.
- BRENNAN, R. W.; NORRIE, D. H. Metrics for evaluating distributed manufacturing control systems. **Computers in Industry**, v. 51, n. 2, p. 225–235, jun. 2003.
- BRUKNER, S. et al. Designing agents for the manufacturing control. **Proceeding of Artificial Intelligence and Manufacturing Research Planning Workshop - State of the art & State of the Practice**, p. 40–46, 1998.
- CARIDI, M.; CAVALIERI, S. Multi-agent systems in production planning and control: an overview. **Production Planning & Control**, v. 15, n. 2, p. 106–118, 1 mar. 2004.
- CHEUNG, H. M. E. et al. HSCF: a holonic shop floor control framework for flexible manufacturing systems. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 13, n. 2, 2000.

CHIRN, J.-L.; MCFARLANE, D. C. **A Holonic Component-Based Approach to Reconfigurable Manufacturing Control Architecture**. Proceedings of the 11th International Workshop on Database and Expert Systems Applications. **Anais**.IEEE Computer Society, 2000

COLOMBO, A. et al. A Collaborative Automation Approach to Distributed Production Systems. **Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN'04)**, p. 1–6, 2004.

COURTOIS, J. et al. **Towards a Novel Manufacturing Control Principle** Proceedings of Second International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems. **Anais**...Leuven, Belgium: IMS-Europe, 1999

DILTS, D. M.; BOYD, N. P.; WHORMS, H. H. The evolution of control architectures for automated manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 10, n. 1, p. 79–93, 1991.

DUAN, J.; ZHU, Y.; HUANG, S. **Stigmergy agent and swarm-intelligence-based multi-agent system** 2012 10th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). **Anais**... In: 2012 10TH WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION (WCICA). jul. 2012

DUFFIE, N.; PIPER, R. Non-hierarchical control of manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, p. 137–139, 1986.

ESMAEILI, A.; MOZAYANI, N.; JAHED MOTLAGH, M. R. **Multi-level holonification of multi-agent networks** 2014 Iranian Conference on Intelligent Systems (ICIS). **Anais**... In: 2014 IRANIAN CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS (ICIS). fev. 2014

GOU, L.; LUH, P.; KYOYA, Y. Holonic manufacturing sheduling: architecture, cooperation mechanism, and implementation. **Computers in Industry**, p. 213–231, 1998.

HADELI et al. Multi-agent coordination and control using stigmergy. **Computers in Industry**, v. 53, n. 1, p. 75–96, jan. 2004.

HEIKKILÄ, T.; JÄRVILUOMA, M.; JUNTUNEN, T. Holonic Control for Manufacturing Systems: Functional Design of a Manufacturing Robot Cell. **Integrated Computer-Aided Engineering**, v. 4, n. 3, p. 202–218, 1 jan. 1997.

HERAGU, S. S. et al. Intelligent Agent Based Framework for Manufacturing Systems Control. **Trans. Sys. Man Cyber. Part A**, v. 32, n. 5, p. 560–573, set. 2002.

HSIEH, F.-S.; CHIANG, C. Y. Collaborative composition of processes in holonic manufacturing systems. **Computers in Industry**, v. 62, n. 1, p. 51–64, jan. 2011.

ISHII, K.; YANO, K. **Path planning system for a mobile robot using self-organizing map** 2001 International Conferences on Info-tech and Info-net, 2001. Proceedings. ICII 2001 - Beijing. **Anais**... In: 2001 INTERNATIONAL CONFERENCES ON INFO-TECH AND INFO-NET, 2001. PROCEEDINGS. ICII 2001 - BEIJING. 2001

JIMENEZ, J.-F. et al. **State of the Art and Future Trends of Optimality and Adaptability Articulated Mechanisms for Manufacturing Control Systems**. In: 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS (SMC). out. 2013

KOROSEC, P.; SILC, J. **The Continuous Differential Ant-Stigmergy Algorithm applied on real-parameter single objective optimization problems**. In: 2013 IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC). jun. 2013

LEITÃO, P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 22, n. 7, p. 979–991, 2009.

LEITÃO, P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. 2009b.

LEITAO, P.; BARBOSA, J. **Adaptive scheduling based on self-organized holonic swarm of schedulers**. In: 2014 IEEE 23RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISIE). jun. 2014

LEITÃO, P.; COLOMBO, A.; RESTIVO, F. **Lecture Notes on Computer Science: An Approach to the Formal Specification of Holonic Control Systems**. [s.l.] Springer, 2004.

LEITÃO, P.; COLOMBO, A.; RESTIVO, F. A Formal Specification Approach for Holonic Control Systems. The ADACOR Case. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, p. 37–57, 2006.

LEITÃO, P.; COLOMBO, A. W.; RESTIVO, F. An Approach to the Formal Specification of Holonic Control Systems. In: MAŘÍK, V.; MCFARLANE, D.; VALCKENAERS, P. (Eds.). . **Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing**. Lecture Notes in Computer Science. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 59–70.

LEITÃO, P.; COLOMBO, A. W.; RESTIVO, F. J. ADACOR: a collaborative production automation and control architecture. **IEEE Intelligent Systems**, v. 20, n. 1, p. 58 – 66, fev. 2005.

LEITÃO, P.; RESTIVO, F. ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. **Computers in Industry**, v. 57, n. 2, p. 121–130, fev. 2006.

LEITÃO, P.; RESTIVO, F. J. Implementation of a Holonic Control System in a Flexible Manufacturing System. **Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on**, v. 38, n. 5, p. 699–709, set. 2008.

LIN, G.; SOLBERG, J. Integrated shop floor control using autonomous agents. **IIE Transactions**, p. 57–71, 1992.

MARTINEZ LASTRA, J. L.; ARMANDO W. COLOMBO. Engineering framework for agent-based manufacturing control. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 19, n. 6, p. 625–640, set. 2006.

MARTINS, M. P. **Estruturação da parte de Comando de um Sistema Automatizado de Produção com Ênfase na Implementação de um sistema de Supervisão.** [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1998.

MATURANA, F. P.; NORRIE, D. H. Multi-agent Mediator architecture for distributed manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 7, n. 4, p. 257–270, 1 ago. 1996.

MONOSTORI, L.; CSÁJI, B. C.; KÁDÁR, B. Adaptation and Learning in Distributed Production Control. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 1, p. 349–352, 2004.

MONOSTORI, L.; VÁNCZA, J.; KUMARA, S. R. T. Agent-Based Systems for Manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 55, n. 2, p. 697–720, 2006.

MOSHEIOV, G.; ORON, D. A note on the SPT heuristic for solving scheduling problems with generalized due dates. **Computers & Operations Research**, v. 31, n. 5, p. 645–655, abr. 2004.

OKINO, N. **Bionic Manufacturing Systems** Proceedings of the CIRP Seminar on Flexible Manufacturing Systems Past- Present-Future. **Anais...**Bled, Slovenia: Peklenik, J. p. 73-95, 1993

PANESCU, D.; VARVARA, G. **On the Sensorial Integration for a Holonic Manufacturing System** Computer Modeling and Simulation, 2009. EMS '09. Third UKSim European Symposium on. **Anais...**nov. 2009

PARK, H.-S.; TRAN, N.-H. An autonomous manufacturing system based on swarm of cognitive agents. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 31, n. 3, p. 337–348, jul. 2012.

PASCAL, C.; PANESCU, D. **A Petri net model for constraint satisfaction application in holonic systems**2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. **Anais...** In: 2014 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, QUALITY AND TESTING, ROBOTICS. maio 2014

ROSARIO, J. M. **Princípios de Mecatrônica.** [s.l.] Pearson Education do Brasil, 2005. v. São Paulo

SADEH, H. CORTES: an exploration into microopportunistic job-shop scheduling, In Workshop on Manufacturing Production Scheduling, IJCAI89 - Detroit, 1989.

SHEN, W. et al. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. **Advanced Engineering Informatics**, v. 20, n. 4, p. 415–431, out. 2006.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R. **Introduction to Autonomous Mobile Robots.** Edição: New. ed. Cambridge, Mass: Mit Pr, 2004.

SOUSA, P.; RAMOS, C. A distributed architecture and negotiation protocol for scheduling in manufacturing systems. **Computers in Industry**, v. 38, n. 2, p. 103–113, mar. 1999.

TANAYA, P.; DETAND, J.; KRUTH, J. A holonic machine controller: a study and implementation of holonic behaviour to current NC controller. 1997.

UEDA, K. et al. Line-less Production System Using Self-Organization: A Case Study for BMS. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, n. 1, p. 319–322, 2001.

VALCKENAERS, P. et al. A benchmarking service for the manufacturing control research community. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 17, n. 6, p. 667–679, dez. 2006.

VALCKENAERS, P.; VAN BRUSSEL, H. Holonic Manufacturing Execution Systems. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 54, n. 1, p. 427–432, 2005.

VAN BRUSSEL, H. et al. Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. **Computers In Industry, special issue on intelligent manufacturing systems**, v. Elsevier Science Publishers B. V., p. 255–276, 1998.

VARVARA, G. **Intelligent open architecture solutions for holonic manufacturing execution systems: Domain #x00AB; key technologies for manufacturing #x00BB; perspective**. 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. maio 2014

WARNECKE, H.-J. **The Fractal Company: A Revolution in Corporate Culture**. [s.l.] Springer-Verlag, 1997.

WEISS, G. (ED.). **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. [s.l.] MIT Press, 1999.

WULLINK, G.; GIEBELS, M. M. T.; KALS, H. J. J. A system architecture for holonic manufacturing planning and control (EtoPlan). **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 18, n. 3-4, p. 313–318, jun. 2002.

WU, S.; CHOW, T. W. S. **Support vector visualization and clustering using self-organizing map and vector one-class classification** Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2003. **Anais...** In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 2003. jul. 2003



## Produção Bibliográfica

CASTILLO, R. A.; ROSARIO, J. M.; FERASOLI, H.; CORBUCCI, M.A. **Apresentação de métodos para implementação de plataformas colaborativas de sistemas automatizados de produção.** GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas. Ano 7. N.2. Abr-Jun 2012. pp.81-96. ISSN: 1984-2430.

CASTILLO, R. A.; ROSARIO, J. M.; AVILES, O. F. **Supervision and control architecture proposal for automation and robotics training on platform.** International Review of Mechanical Engineering (IREME). V. 6. N. 5. Julho 2012. pp. 1025-1034. Print ISSN:1970 – 8734. Cd-Rom ISSN:1970 – 8742.

CASTILLO, R. A.; ROSARIO, J. M.; VARGAS, G. A. **Estrategia de coordinación y comunicación para sistemas robóticos colaborativos.** Scientia et Technica. Vol 18. No 1 (2013). Abril 2013. pp. 101-107. ISSN: 0122-1701.

AMAYA, D.; CASTILLO, R. A.; ROSARIO, J. M.; **Modeling and simulation of hybrid architecture manufacturing systems.** International Review of Mechanical Engineering (IREME). v.5, n.4. Maio 2011. pp. 594-604. Print ISSN:1970 – 8734. Cd-Rom ISSN: 1970 – 8742.

AMAYA, D.; CASTILLO, R. A.; AVILES, O. F.; RAMOS, O. **Production system modeling and simulation using DEVS formalism.** Revista EIA Escuela de Ingeniera de Antioquia. Año XI, Vol. 11, Ed. N.22. Julho – Dezembro, 2014. pp. 13-21. (Colombia). ISSN: 1794-1237. DOI: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.22.13-21>.

CASTILLO, R. A.; RUBIANO, O. G.; HURTADO, C. A. **Simulation of motion control for a modular robot of five degrees of freedom.** Applied mechanics and materials. Vols. 713-715. Janeiro 2015. pp 773-776. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.713-715.773](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.713-715.773). ISSN:1660-9336.

VARGAS, G. A.; CASTILLO, R. A. **Desarrollo de algoritmo para detección y comando de robots humanoides en tareas de recolección.** Revista Tecnura, Universidad Distrital. V. 19. N. 45. Julho - Setembro 2015. pp. 127-140. Bogotá (Colombia). e-ISSN: 2248-7638 p-ISSN: 0123-921X. DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a010>.



## ANEXO A – Modelo Cinemático do robô ABB 1400

### Cinemática Direta

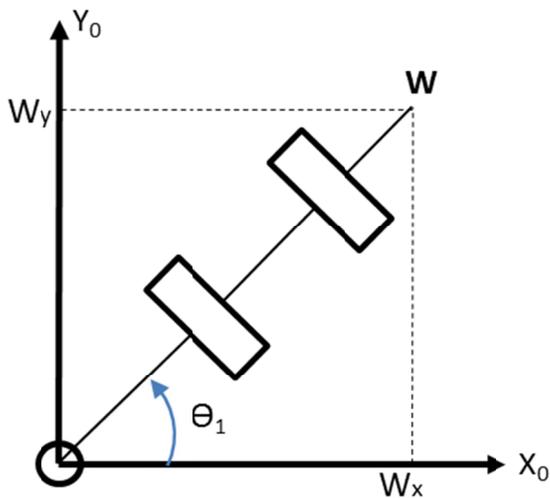
$$\begin{aligned}
 A_0^1 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\cos \alpha_1 \sin \theta_1 & \sin \alpha_1 \sin \theta_1 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \alpha_1 \cos \theta_1 & -\sin \alpha_1 \cos \theta_1 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_1=\pi/2, a_1=150, d_1=475, \theta_1=\theta_1 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 150 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 150 \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 475 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_1^2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\cos \alpha_2 \sin \theta_2 & \sin \alpha_2 \sin \theta_2 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \alpha_2 \cos \theta_2 & -\sin \alpha_2 \cos \theta_2 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_2=0, a_2=600, d_2=0, \theta_2=\theta_2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 600 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 600 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_2^3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\cos \alpha_3 \sin \theta_3 & \sin \alpha_3 \sin \theta_3 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \alpha_3 \cos \theta_3 & -\sin \alpha_3 \cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_3=\pi/2, a_3=120, d_3=0, \theta_3=\theta_3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 120 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 120 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_3^4 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\cos \alpha_4 \sin \theta_4 & \sin \alpha_4 \sin \theta_4 & a_4 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \alpha_4 \cos \theta_4 & -\sin \alpha_4 \cos \theta_4 & a_4 \sin \theta_4 \\ 0 & \sin \alpha_4 & \cos \alpha_4 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_4=-\pi/2, a_4=0, d_4=720, \theta_4=\theta_4 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 720 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_4^5 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\cos \alpha_5 \sin \theta_5 & \sin \alpha_5 \sin \theta_5 & a_5 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \alpha_5 \cos \theta_5 & -\sin \alpha_5 \cos \theta_5 & a_5 \sin \theta_5 \\ 0 & \sin \alpha_5 & \cos \alpha_5 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_5=\pi/2, a_5=0, d_5=0, \theta_5=\theta_5 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_5^6 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\cos \alpha_6 \sin \theta_6 & \sin \alpha_6 \sin \theta_6 & a_6 \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \alpha_6 \cos \theta_6 & -\sin \alpha_6 \cos \theta_6 & a_6 \sin \theta_6 \\ 0 & \sin \alpha_6 & \cos \alpha_6 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_6=0, a_6=0, d_6=85, \theta_6=\theta_6 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 85 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$A_0^6 = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5 \cdot A_5^6$$

## Cinemática Inversa

Para o cálculo da cinemática inversa são utilizadas duas vistas auxiliares do modelo esquemático do robô mostrado na Figura 40, portanto as variáveis e colocação dos eixos nas vistas atendem este esquema.

**Vista Superior**



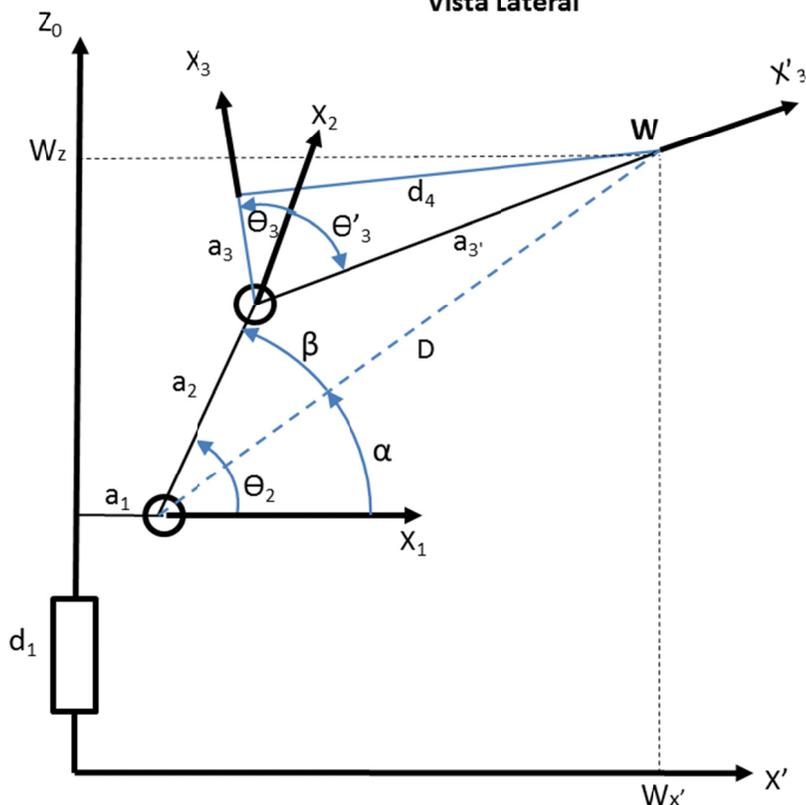
Conhecendo a posição do ponto W

$$W = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix}$$

É possível calcular:

- $\theta_1 = \text{atan2}(W_x, W_y)$

**Vista Lateral**



$$D^2 = (W_{x'} - a_1)^2 + (W_z - d_1)^2$$

$$a_{3'}^2 = a_3^2 + d_4^2$$

Utilizando o teorema dos cossenos se tem

$$D^2 = a_2^2 + a_{3'}^2 + 2a_2a_{3'} \cos \theta'_3$$

$$\sin \theta'_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta'_3}$$

- $\theta'_3 = \text{atan2}(\sin \theta'_3, \cos \theta'_3)$

$$\alpha = \text{atan2}((W_z - d_1), (W_{x'} - a_1))$$

$$a_{3'}^2 = a_2^2 + D^2 - 2a_2D \cos \beta$$

- $\theta_2 = \alpha \pm \beta$

Para o cálculo dos ângulos das últimas três juntas (correspondentes à junta esférica composta no ponto W) é utilizado um desacoplo cinemático, com este fim é obtida a matriz de transformação dos últimos três graus de liberdade, considerando que é uma matriz obtida através da pos-multiplicação das rotações elementares ZYZ. Consequentemente para a obtenção dos três últimos ângulos são aplicadas as expressões de cinemática inversa para os ângulos de Euler ZYZ.

$$A_3^6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Si  $r_{13} \neq 0$  e  $r_{23} \neq 0$  podem ser calculadas soluções para dois intervalos do ângulo  $\theta_5$ , como é descrito a seguir:

- Si  $\theta_5$  pertence ao intervalo entre  $(0, \pi)$ , então

$$\theta_4 = \text{atan2}(r_{23}, r_{13})$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33})$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(r_{32}, -r_{31})$$

- Si  $\theta_5$  pertence ao intervalo entre  $(-\pi, 0)$ , então

$$\theta_4 = \text{atan2}(-r_{23}, -r_{13})$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(-\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33})$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(-r_{32}, -r_{31})$$



## ANEXO B – Modelo Cinemático do robô ABB 140

### Cinemática Direta

$$\begin{aligned}
 A_0^1 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\cos \alpha_1 \sin \theta_1 & \sin \alpha_1 \sin \theta_1 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \alpha_1 \cos \theta_1 & -\sin \alpha_1 \cos \theta_1 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_1=\pi/2, a_1=70, d_1=352, \theta_1=\theta_1 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 70 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 70 \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 352 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_1^2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\cos \alpha_2 \sin \theta_2 & \sin \alpha_2 \sin \theta_2 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \alpha_2 \cos \theta_2 & -\sin \alpha_2 \cos \theta_2 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_2=0, a_2=360, d_2=0, \theta_2=\theta_2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 360 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 360 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_2^3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\cos \alpha_3 \sin \theta_3 & \sin \alpha_3 \sin \theta_3 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \alpha_3 \cos \theta_3 & -\sin \alpha_3 \cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_3=\pi/2, a_3=0, d_3=0, \theta_3=\theta_3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_3^4 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\cos \alpha_4 \sin \theta_4 & \sin \alpha_4 \sin \theta_4 & a_4 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \alpha_4 \cos \theta_4 & -\sin \alpha_4 \cos \theta_4 & a_4 \sin \theta_4 \\ 0 & \sin \alpha_4 & \cos \alpha_4 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_4=-\pi/2, a_4=0, d_4=380, \theta_4=\theta_4 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 380 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_4^5 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\cos \alpha_5 \sin \theta_5 & \sin \alpha_5 \sin \theta_5 & a_5 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \alpha_5 \cos \theta_5 & -\sin \alpha_5 \cos \theta_5 & a_5 \sin \theta_5 \\ 0 & \sin \alpha_5 & \cos \alpha_5 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_5=\pi/2, a_5=0, d_5=0, \theta_5=\theta_5 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_5^6 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\cos \alpha_6 \sin \theta_6 & \sin \alpha_6 \sin \theta_6 & a_6 \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \alpha_6 \cos \theta_6 & -\sin \alpha_6 \cos \theta_6 & a_6 \sin \theta_6 \\ 0 & \sin \alpha_6 & \cos \alpha_6 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_6=0, a_6=0, d_6=65, \theta_6=\theta_6 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$A_5^6 = A_0^1 * A_1^2 * A_2^3 * A_3^4 * A_4^5 * A_5^6$$



## ANEXO C – Modelo Cinemático da Mesa Hidráulica

### Cinemática Direta

$$\begin{aligned}
 A_0^1 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Big|_{\alpha_i=\pi/2, a_i=0, d_i=d_1, \theta_i=0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_1^2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Big|_{\alpha_i=\pi/2, a_i=0, d_i=D_2, \theta_i=\theta_2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & D_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_2^3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Big|_{\alpha_i=0, a_i=0, d_i=0, \theta_i=\theta_3} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

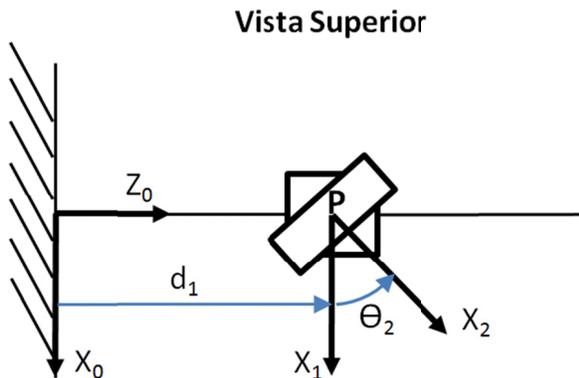
$$A_0^3 = A_0^1 * A_1^2 * A_2^3$$

$$A_0^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & D_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_0^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 & 0 \\ -\sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & 0 & -D_2 \\ \cos \theta_3 \sin \theta_2 & -\sin \theta_2 \sin \theta_3 & -\cos \theta_2 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## Cinemática Inversa

Para o cálculo da cinemática inversa da mesa hidráulica são utilizadas duas vistas auxiliares do modelo esquemático apresentado na Figura 42, portanto as variáveis e a colocação dos eixos nas vistas atendem este esquema.

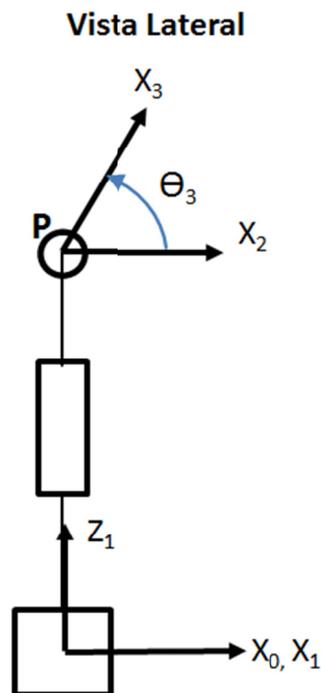


Conhecendo a posição do ponto P

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}$$

Levando em consideração esta vista é possível observar que:

- $d_1 = Z_0$



Se são conhecidos os ângulos de Pitch ( $\alpha$ ) e Roll ( $\beta$ ) da placa da mesa com respeito ao sistema de coordenadas da base, é possível observar que:

- $\theta_2 = \alpha$
- $\theta_3 = \beta$

## ANEXO D – Modelo Cinemático Diferencial do Robô Móvel Omnidirecional

Cálculo da matriz de restrições de rolamento:

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2} & -l \\ 0 & 1 & -l \\ -\frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2} & -l \end{bmatrix}$$

$$J_1^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2} & -l \\ 0 & 1 & -l \\ -\frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2} & -l \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}\sqrt{3} & 0 & -\frac{1}{3}\sqrt{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3l} & -\frac{1}{3l} & -\frac{1}{3l} \end{bmatrix}$$

- **Modelo Cinemático Diferencial Direto**

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = R(\theta)J_1^{-1} \begin{bmatrix} r_1\dot{\phi}_1 \\ r_2\dot{\phi}_2 \\ r_3\dot{\phi}_3 \end{bmatrix}$$

Assim se tem:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = rR(\theta) \begin{bmatrix} \frac{1}{3}\sqrt{3} & 0 & -\frac{1}{3}\sqrt{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3l} & -\frac{1}{3l} & -\frac{1}{3l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{bmatrix}$$

- **Modelo Cinemático Diferencial Inverso:**

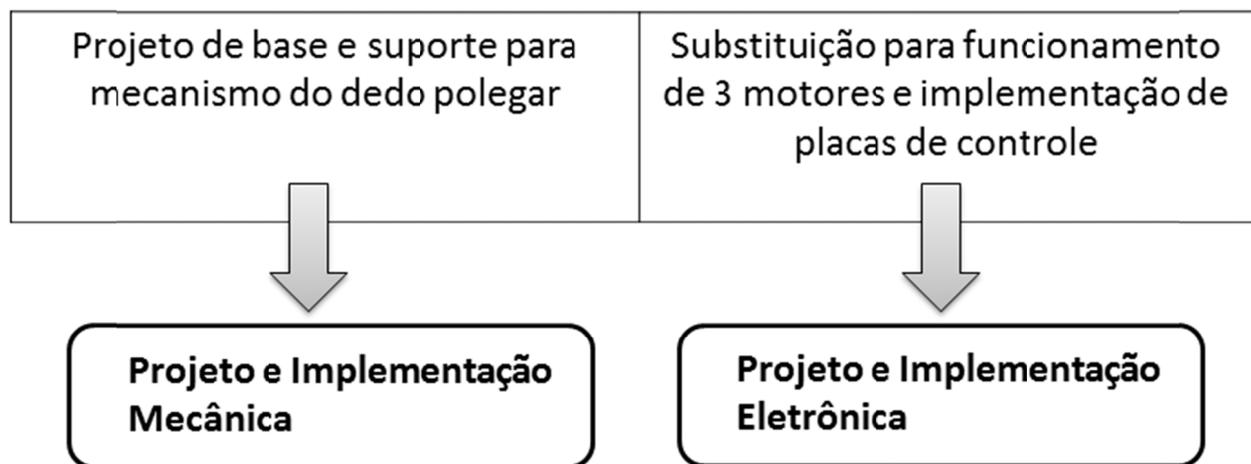
$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2} & -l \\ 0 & 1 & -l \\ -\frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2} & -l \end{bmatrix} R^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

Onde  $R(\theta)$  é uma matriz elemental de rotação com respeito ao eixo perpendicular ao plano de movimento  $Z$ , e  $\theta$  é o ângulo de rotação entre o Eixo  $X_R$  e o eixo do sistema fixo  $X_I$ .

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



## ANEXO E – Projeto Mecânico, Acionamento e Controle da Mão Antropomórfica



### Projeto e Implementação Mecânica da mão Antropomórfica

A seguir são apresentadas as atividades principais para o projeto e construção da base (acople da mão com o robô ABB 140) e suporte para o mecanismo de movimento do dedo polegar (ver Figura 79).

- Estudo de requerimentos do suporte.
- Seleção de material das peças do suporte e elementos de ensemble.
- Conceição da geometria das peças para o suporte.
- Projeto e ensemble CAD de peças para suporte da mão considerando ensemble do mecanismo do polegar (SolidWorks®).
- Análise por elementos finitos do suporte (SolidWorks Simulation).
- Construção das peças e ensemble do suporte.

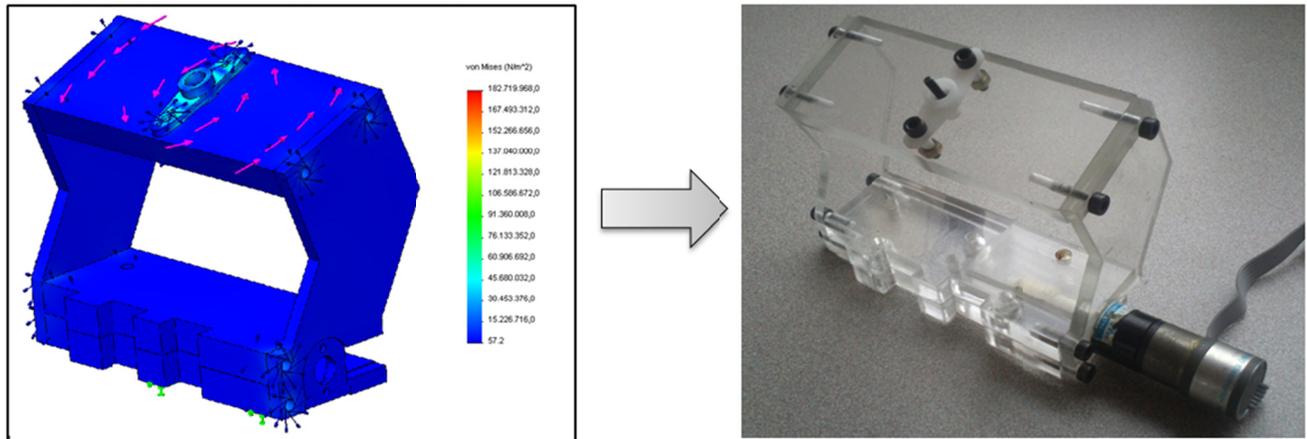
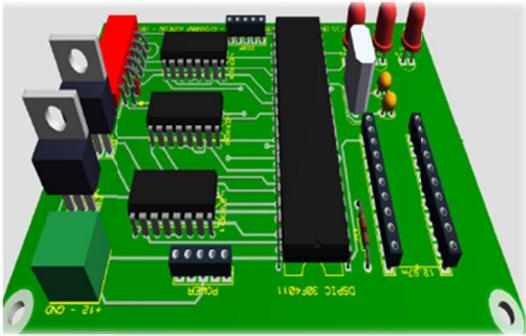


Figura 79. Projeto e Implementação Final da Base e Suporte da Mão Robótica

### Projeto e Implementação Eletrônica

A seguir são apresentadas as atividades principais para a escolha e substituição dos três motores para o acionamento dos dedos: indicador, meio e anelar respectivamente, e também as atividades para o projeto e implementação da placa de comunicação (sem fio) controle e potência para o comando dos cinco motores da mão robótica (ver Figura 80).

- Estudo de requerimentos do sistema:
  - a) Atuadores (Motores DC Faulhaber® com caixa de redução 141:1).
  - b) Alimentação de 12V DC para os motores.
  - c) Alimentação de 5V DC para a placa de controle.
  - d) Alimentação de 3.3V DC para os módulos de comunicação serial.
  - e) 6 soldas digitais para o controle de giro dos motores e PWM.
  - f) 2 canais para transmissão e recepção de dados serial.
- Escolha de dispositivos para implementação do circuito
  - g) dsPIC 30f4011.
  - h) 3 Drivers de potência L293D
- Simulação do circuito (Proteus).
- Implementação da placa de controle e substituição de 3 motores.



Comunicação Inalambrica  
Serial (IEEE 802.15.4)  
2.4 GHz  
XBEE Explorer



Placa de Controle

Figura 80. Projeto e Implementação da Placa de Controle dos Motores para a Mão Robótica



## ANEXO F – Implementação do Software de Agrupamento de Recursos

```
#include "stdafx.h"
#include "iostream"
#include <conio.h>
#include <math.h>

using namespace System;
using namespace std;

void mostrarmatriz(int** matriz, int filas, int columns);

int main(array<System::String ^> ^args)
{

    int f,c,cc,ff;
    f=21; // 20 máquinas
    c=33; // 32 peças
    ff=f-1;cc=c-1;

    //criação da matriz DINAMICA DE TRABALHO!!!

    int** matriz=new int*[f];
    for(int i=0;i<f;i++)
        matriz[i]=new int[c];

    for(int i=0;i<f;i++)
        for(int j=0;j<c;j++)
            matriz[i][j]=matrizdeentrada[i][j];

    mostrarmatriz(matriz,f,c);

    char res='s';
    do{
        double* potfilas=new double[ff];
        double* potcolumnas=new double[cc];
        double acum;

        //codigo para obter o valor binario das filas!!!
        for(int i=1;i<f;i++){
            acum=0;
            for(int j=1;j<c;j++){
                acum+=matriz[i][j]*pow(2.0,(c-j-1));
                potfilas[i-1]=acum;
            }
        }

        //codigo para obter o valor binario de las columnas!!!
        for(int j=1;j<c;j++){
```

```

        acum=0;
        for(int i=1;i<f;i++){
            acum+=matriz[i][j]*pow(2.0,(f-i-1));
            potcolumnas[j-1]=acum;
        }

double* filasdes=new double[ff];
double* columndes=new double[cc];

//Aca é ordenada a matriz na forma descendente por colunas
for(int j=0;j<cc;j++){
    for(int j2=0;j2<cc-1;j2++){
        if(potcolumnas[j2+1]>potcolumnas[j2]){
            double tmp;
            int* aux=new int[ff];
            for(int i=0;i<21;i++){
                aux[i]=matriz[i][j2+1];
            }
            for(int i=0;i<21;i++){
                matriz[i][j2+1]=matriz[i][j2+2];
            }
            for(int i=0;i<21;i++){
                matriz[i][j2+2]=aux[i];
            }

            tmp=potcolumnas[j2];
            potcolumnas[j2]=potcolumnas[j2+1];
            potcolumnas[j2+1]=tmp;
        }
    }
}

//Aca é organizada a matriz na forma descendente por filas
for(int i=0;i<ff;i++){
    for(int i2=0;i2<ff-1;i2++){
        if(potfilas[i2+1]>potfilas[i2]){
            double tmp;
            int* aux=new int[c];
            aux=matriz[i2+1];
            matriz[i2+1]=matriz[i2+2];
            matriz[i2+2]=aux;
            tmp=potfilas[i2];
            potfilas[i2]=potfilas[i2+1];
            potfilas[i2+1]=tmp;
        }
    }
}

mostrarmatriz(matriz,f,c);

    getch();
    cout<<" 's' para continuar, qualquer outra tecla para sair "<<endl;
    cin>>res;
    }while(res=='s');

Console.WriteLine(L"FEITO!!!!");

```

```
    getch();
    return 0;
}

void mostrarmatriz(int** matriz, int filas, int columnas){
    for(int i=0;i<filas;i++){
        for(int j=0;j<columnas;j++){
            if(j==1) cout<<"\t";
            cout<<matriz[i][j]<<" ";
        }
        cout<<endl;
    }
}
```



## ANEXO G – Influência da Variação dos Parâmetros Adaptativos no Algoritmo de Agendamento

Épocas	Feromônio = 20	Feromônio=10	Feromônio=5
50	3099,7167	3188,8842	3438,7084
100	3109,375	3220,7606	3493,1334
150	3122,3459	3269,3475	3545,6106
200	3140,2708	3321,1338	3581,8263
250	3171,2808	3368,2954	3634,6729
300	3209,0309	3414,1655	3679,564
350	3269,9746	3465,8786	3724,7879
400	3335,7567	3532,8397	3761,6827
450	3392,065	3592,2415	3791,8689
500	3458,9573	3655,0719	3814,277
550	3542,4963	3718,2828	3827,1138
600	3614,4878	3777,3393	3833,3264
650	3702,7576	3809,3463	3836,0169
700	3775,581	3828,038	3837,0861
750	3815,9965	3834,9426	3837,4804
800	3832,445	3836,9985	3837,6136
850	3836,6669	3837,5258	3837,6537
900	3837,5055	3837,6417	3837,6641
950	3837,6443	3837,663	3837,6663
1000	3837,6646	3837,6664	3837,6668
1050	3837,6676	3837,6669	3837,6669
1100	3837,668	3837,6669	3837,6669

Tabela 18. Influência do Feromônio na Distância ( $d$ ) da Trajetória no Agendamento Dinâmico

Épocas	F. Autom = 2	F. Autom = 5	F. Autom = 6
50	3099,7167	3281,9251	3361,5797
100	3109,375	3344,6699	3420,5362
150	3122,3459	3405,2465	3494,2908
200	3140,2708	3473,6116	3577,4302
250	3171,2808	3559,6375	3657,7308
300	3209,0309	3635,6639	3738,8218
350	3269,9746	3720,0429	3799,1072
400	3335,7567	3791,5041	3827,5784
450	3392,065	3823,0849	3835,7946

500	3458,9573	3834,7315	3837,3991
550	3542,4963	3837,2094	3837,639
600	3614,4878	3837,613	3837,6648
650	3702,7576	3837,6622	3837,6668
700	3775,581	3837,6666	3837,6669
750	3815,9965	3837,6669	3837,667
800	3832,445	3837,667	3837,667
850	3836,6669	3837,667	3837,667
900	3837,5055	3837,667	3837,667
950	3837,6443	3837,667	3837,667
1000	3837,6646	3837,667	3837,667
1050	3837,6676	3837,667	3837,667
1100	3837,668	3837,667	3837,667

Tabela 19. Influência do Fator de Autonomia na Distância ( $d$ ) no agendamento Dinâmico

Épocas	F. Disp = 0.1	F. Disp = 0.8	F. Disp = 1.9
50	3099,7167	3094,3184	5618,1518
100	3109,375	3108,0759	5234,994
150	3122,3459	3125,7789	4512,5972
200	3140,2708	3149,6139	4088,5912
250	3171,2808	3198,8445	3849,5612
300	3209,0309	3235,0833	3763,1699
350	3269,9746	3299,4046	3735,5924
400	3335,7567	3364,5697	3700,119
450	3392,065	3420,354	3725,5495
a500	3458,9573	3496,5791	3654,556
550	3542,4963	3563,5175	3667,1716
600	3614,4878	3661,3449	3720,6384
650	3702,7576	3750,9875	3763,1573
700	3775,581	3799,9931	3806,468
750	3815,9965	3828,6271	3829,9564
800	3832,445	3836,1223	3836,1313
850	3836,6669	3837,4737	3837,4581
900	3837,5055	3837,6521	3837,6509
950	3837,6443	3837,6664	3837,6664
1000	3837,6646	3837,6669	3837,6669
1050	3837,6676	3837,6669	3837,6669
1100	3837,668	3837,6669	3837,6669

Tabela 20. Influência do Fator de Disponibilidade na Distância ( $d$ ) no Agendamento Dinâmico

<b>N. Formigas</b>	<b>Distância (épocas = 700)</b>	<b>Distância (épocas = 600)</b>	<b>Distância (épocas = 500)</b>
20	3775,581	3614,4878	3458,9573
22	3810,1891	3679,64	3516,9402
23	3823,7592	3712,4681	3545,0093
24	3826,5763	3729,4702	3568,4062
26	3832,0218	3767,3506	3606,8172
27	3834,4059	3792,9616	3632,1933
28	3836,4774	3805,5371	3659,5144
29	3836,7589	3814,2856	3686,7253
30	3837,0244	3818,7575	3702,1158
32	3837,3849	3828,6752	3739,715
40	3837,6633	3837,2405	3820,6424
50	3837,669	3837,6669	3836,6788
60	3837,667	3837,667	3837,6668

Tabela 21. Influência do Número de Formigas na Distância (d) no Agendamento Dinâmico (Número de Épocas = 700)