



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.04.19.41-TDI

UMA ARQUITETURA DE AGENTE DE REPLANEJAMENTO EM TEMPO REAL PARA PLANO DE VOO EM MISSÕES ESPACIAIS

Edson Alves Ribeiro

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Maurício Gonçalves Vieira Ferreira, aprovada em 18 de dezembro de 2015.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L569TE>](http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L569TE)

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.: (012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.04.19.41-TDI

UMA ARQUITETURA DE AGENTE DE REPLANEJAMENTO EM TEMPO REAL PARA PLANO DE VOO EM MISSÕES ESPACIAIS

Edson Alves Ribeiro

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Maurício Gonçalves Vieira Ferreira, aprovada em 18 de dezembro de 2015.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L569TE>](http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L569TE)

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Ribeiro, Edson Alves.

R354a Uma arquitetura de agente de replanejamento em tempo real para plano de voo em missões espaciais / Edson Alves Ribeiro. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxviii + 194 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.04.19.41-TDI)

Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientador : Dr. Maurício Gonçalves Vieira Ferreira.

1. Inteligência artificial. 2. Agentes inteligentes. 3. Planejamento automático. 4. Replanejamento automático. 5. Técnicas de reparo de plano. I.Título.

CDU 629.7.01:629.78



Esta obra foi licenciada sob uma [Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

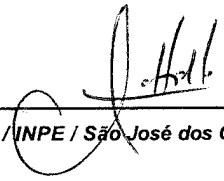
Aluno (a): **Edson Alves Ribeiro**

Título: "UMA ARQUITETURA DE AGENTE DE REPLANEJAMENTO EM TEMPO REAL
PARA PLANO DE VOO EM MISSÕES ESPACIAIS".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em

**Engenharia e Tecnologia
Espaciais/Gerenciamento de Sistemas
Espaciais**

Dra. Maria de Fátima Mattiello-Francisco



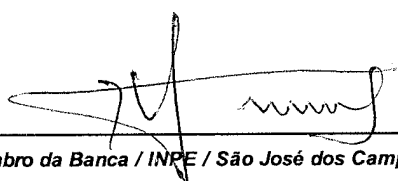
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Mauricio Gonçalves Vieira Ferreira



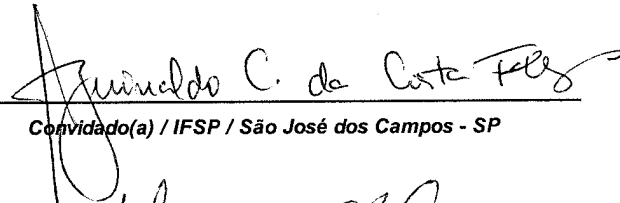
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Ronaldo Arias



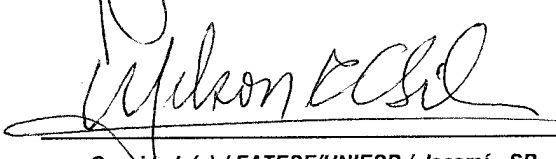
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Aguinaldo Cardozo da Costa Filho



Convidado(a) / IFSP / São José dos Campos - SP

Dr. Wilson Custódio Canesin da Silva



Convidado(a) / FATESF/UNIESP / Jacaré - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 18 de Dezembro de 2015

“Lute com determinação, abrace a vida com paixão, perca com classe e vença com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante.”

Sir Charlie Chaplin

Ao Fred e a Isa que sempre torceram para que o pai tivesse sucesso neste desafio.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus pelo dom da vida que me foi concedido.

Sou imensamente grato ao meu orientador, Dr. Mauricio, pela conquista deste doutorado; sempre me orientou mostrando os caminhos a serem trilhados e me encorajando nos momentos mais difíceis com palavras fortalecedoras.

Sou grato ao INPE pelo apoio irrestrito que me foi concedido para a realização deste trabalho.

Aos meus pais que sempre me apoiaram para que eu alcançasse as metas almejadas, embora hoje não possam compartilhar essa minha nova conquista, a minha gratidão será eterna.

Aos amigos, Luciana Cardoso, Miguel Carreteiro, Maria do Rosário, Adriana e João Trannin, pelo apoio técnico e pelas revisões de texto.

Sou grato também aos colegas do CRC/INPE, Jun Tominaga, Odair, Vanda e Danielle, pelas informações que me prestaram relativas ao Controle de Satélite.

RESUMO

A comunidade brasileira da área espacial, em particular representada pelo INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – tem buscado melhorias no controle da missão para satélites em órbita. No entanto, a redução de custos e a manutenção da qualidade do controle de operações são objetivos difíceis de atingir, devido a algumas características do ambiente de controle de satélites. Além das restrições de custo, as estações terrenas podem controlar múltiplos satélites e, dessa forma, há uma preocupação de aumentar a confiabilidade das operações da missão, ainda realizadas manualmente em alguns casos. Há um grande interesse em criar métodos de planejamento e controle automático, a fim de reduzir os custos associados ao controle do satélite. Este trabalho propõe uma arquitetura composta por módulos que gerenciam a alocação de recursos terrestres para os satélites, dotada de um Sistema Automático de Planejamento e Replanejamento para a geração e reparação de planos de operação de voo de um satélite. Também, emprega-se a tecnologia de agentes de planejamento da Inteligência Artificial na geração automática de plano das operações de voo para a fase de rotina operacional de um satélite. A execução de um plano em tempo real pode se deparar com eventos inesperados que produzem discrepâncias entre o estado observado e o esperado, as técnicas de replanejamento quando são aplicadas podem refazer um plano preestabelecido. Estas técnicas podem usar os métodos combinados chamados “refinamento” e “refinamento reverso” para reparar um plano, isto é, adicionar ações no plano e remover ações com uso de heurísticas de modo que se melhore a tarefa de reparação. O método de reparação do plano deve ser aplicado em situações nas quais há necessidade de tratar contingências. Estas ocorrem, normalmente, durante a passagem de um satélite em atividades de operação, tais como de medidas de *Ranging* e *Range Rate*; controle de câmera de imageamento; envio de telecomando e recebimento de telemetria. O satélite utilizado para estudo de caso é o Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS) lançado em novembro de 2014, pelo Programa de Cooperação Espacial Brasil e China.

Palavras-chave: Inteligência artificial. Agentes inteligentes. Planejamento automático. Replanejamento automático. Técnicas de reparo de plano. Técnicas de refinamento e refinamento reverso.

AN ARCHITECTURE REPLANNING AGENT IN REAL TIME FOR FLIGHT PLAN IN SPACE MISSIONS

ABSTRACT

The Brazilian space community, mainly represented by INPE - National Institute for Space Research, has been seeking for improvements in mission control quality for orbiting satellites and especially new satellites launching. However, to reduce costs and to maintain operations aiming quality are difficult to achieve, due to some characteristics of the satellite control environment, under which ground stations send telecommands and receive telemetry during periods of visibility for satellite operations. In addition to cost constraints, the ground stations can control multiple satellites and hence scheduling conflicts may occur between different satellites which pass by the same ground station. Therefore, there is a growing concern in increasing mission operations reliability, which are still performed manually in some cases. There is also great interest in carrying out planning methods and automatic control in order to reduce the costs of satellite controlling. This thesis proposes an architecture consisting of modules able to manage the allocation of ground resources for satellites. It consists of an automatic Planning and Replanning system, to generate and repair flight operation plans for a satellite operation. To achieve this task, it employs the planning agents technology from the Artificial Intelligence area in operational routine phase of a satellite. The implementation of a plan in real time involves unexpected events that produce discrepancies between the observed and the expected events. This work adopts Artificial Intelligence planning techniques and concepts to generate plans and to remake a pre-established plan to solve the satellite control problem. The planning techniques can use "refinement" and "unrefinement" methods to repair a plan, whether it adds or removes actions to the plan, using heuristics to improve the operation. The plan repair method should be applied in a situation which encounters contingencies during the satellite pass. They usually occur during the passage of a satellite operating activities, such as: Ranging and Range Rate measures; Control Imaging Camera; Telecommands Sending and Telemetry Receiving. The focus of this thesis is the China Brazil Earth Resources Satellite (CBERS), satellite launched in November 2014 by the Brazil and China program space cooperation.

Keywords: Artificial Intelligence. Intelligent agents. Automatic planning. Automatic replanning. Plan repair techniques. Refinement and unrefinement techniques.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - Arquitetura do sistema para planejamento autônomo de operações	9
Figura 2.1 - Relacionamento entre o satélite, segmento solo e usuários	14
Figura 2.2 - Atividades típicas de uma passagem.....	17
Figura 2.3 - Ciclo de operação de controle.....	19
Figura 2.4 - Estrutura funcional do rastreo e controle de satélite.....	20
Figura 2.5 - Preparação e execução de plano de voo no CRC/INPE.....	22
Figura 3.1 - Uma visão simples de agente	28
Figura 3.2- Exemplos de agentes	29
Figura 3.3 - Agente tabela.....	30
Figura 3.4 - Agente reativo.....	31
Figura 3.5 - Agente baseado em objetivos.....	32
Figura 3.6 - Agente de planejamento clássico	33
Figura 4.1 - Grafo de transição de estado	39
Figura 4.2 - Mundo dos blocos representado em STRIP	40
Figura 4.3 - Base de conhecimento em PDDL	43
Figura 4.4 - Problema em PDDL para um caso do mundo dos blocos	43
Figura 4.5 - Arquivo domínio para o caso do mundo dos blocos.....	44
Figura 4.6 - Resultado da execução do plano	44
Figura 4.7 - Busca heurística aplicada ao problema do mundo de blocos.....	47
Figura 4.8 - Escalonamento em linha de produção.....	51
Figura 5.1 - Modelo de reparação de plano	62
Figura 5.2 - Etapas principais um agente de replanejamento	63
Figura 5.3 - Esquema da Técnica Geral de Reparo de Plano	67

Figura 5.4 - A arquitetura agente reativo	69
Figura 5.5 - Algoritmo para refinamento de plano	72
Figura 5.6 - Algoritmo para reparo de plano	73
Figura 5.7 - Heurística de refinamento reverso.	74
Figura 5.8 - Remoção de subplanos por heurística	75
Figura 5.9 - Plano simplificado para uma sonda espacial.....	80
Figura 5.10 - Plano reparado para uma sonda espacial.....	81
Figura 6.1- Cenário de operação de satélite.....	92
Figura 6.2 - Base de conhecimento aplicada ao replanejamento de plano	95
Figura 6.3 - Arquitetura geral do agente de planejamento e replanejamento	97
Figura 6.4 - Arquitetura de planejamento e replanejamento de plano de operações	99
Figura 6.5 - Modelo geral do agente de replanejamento	107
Figura 6.6 - Geração automática de plano	109
Figura 6.7 – Representação de um plano os seus estados.....	110
Figura 6.8 - Módulo de execução e monitoração de plano	112
Figura 6.9 - Módulo de análise e seleção de método de replanejamento	113
Figura 6.10 - Módulo replanejamento e de reparo do plano de voo	114
Figura 6.11 - Processo de reparo do plano.....	116
Figura 6.12 - Modelo do procedimento de recuperação de falhas.....	117
Figura 7.1 - Integração de técnicas de reparo	123
Figura 7.2 - Fluxo de integração das técnicas em replanejamento	125
Figura 7.3 - Caso-1 de reparo por refinamento.....	126
Figura 7.4 - Caso-2 de reparo por refinamento.....	127
Figura 7.5 - Caso-3 de reparo por refinamento.....	127
Figura 8.1 - Arquitetura de desenvolvimento do replanejamento	130

Figura 8.2 - Exemplo do arquivo de aomínio de satélite em PDDL.....	131
Figura 8.3 - Exemplo do arquivo de problema em PDDL.....	132
Figura 8.4 - Representação da ordem cronológica de ações em um plano	134
Figura 8.5 - Plano gerado pelo módulo planejamento	135
Figura 8.6 - Módulo de execução do plano e monitoramento	136
Figura 8.7 - Relação agente IA x ambiente CRC/INPE	139
Figura 8.8 - Modelo geral da estrutura do replanejador	141
Figura 8.9 - Link causal entre telecomandos do CBERS.....	142
Figura 8.10 - Procedimento de recuperação de falha de operação CBERS.....	143
Figura 8.11 - Ciclo operacional diário do CBERS	145
Figura 8.12 - Os Componentes de software do agente reparador	146
Figura 8.13 - Plano original gerado pelo planejador	148
Figura 8.14 - Sequência de TC para ativação de câmera do CBERS	149
Figura 9.1 - Linha do tempo para uma passagem típica	153
Figura A.1 - Inserção de falhas (Taxa Alta)	173
Figura A.2 - Percentual de inserção e remoção de ações (Taxa Alta).....	174
Figura A.3 - Inserção de falhas (Taxa Média)	175
Figura A.4 - Percentual de inserção e remoção de ações (Taxa Média).....	176
Figura A.5 - Inserção de falhas (Taxa Baixa).....	177
Figura A.6 - Percentual de inserção e remoção de ações (Taxa Baixa).....	178
Figura B.1 - Plano reparado - alta taxa de inserção de falhas.....	180
Figura B.2 - Plano reparado - média taxa de inserção de falhas.....	182
Figura C.1- Diagrama de construção do componente.....	185
Figura C.2 - Diagrama de execução do componente	186
Figura C.3 - Diagrama de classes e estrutura de dados	187

Figura D.1 - Representação de um telecomando em XML.	189
Figura D.2 - Representação de telemetria associada em XML.....	189
Figura D.3 - Representação de regra para execução do telecomando em XML.....	190
Figura D.4 - Representação de critérios para reparação de plano	190

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABSTRIPS	<i>Abstraction-Based STRIPS</i>
ALC	<i>Estações Terrenas de Rastreo de Alcântara – MA</i>
AML	<i>ASPEN Aspen Modeling Language</i>
APSS	<i>Activity Planning and Sequencing Subsystem</i>
ASE	<i>Autonomous Science Experiment</i>
ASPEN	<i>Automated Scheduling and Planning Environment</i>
<i>BDI</i>	<i>Belief Desire Intension</i>
CAST	<i>Academia Chinesa de Tecnologia Espacial</i>
CBA	<i>Estações Terrenas de Rastreo de Cuiabá MT</i>
CBERS	<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>
CCS	<i>Centro de Controle de Satélites</i>
CCSDS	<i>Consultative Committee For Spaces Data Systems</i>
CNES	<i>Centre National d'Études Spatiales</i>
CNR	<i>National Research Council of Italy</i>
CNR	<i>Conselho Nacional de Pesquisas Italiano</i>
CRC	<i>Centro de Rastreo e Controle de Satélites</i>
CSP	<i>Constraint Satisfaction Problem</i>
CX-1	<i>Universitário Citizen Explorer One</i>
DCAPS	<i>Data Chaser Automated Planning System</i>
DDR	<i>Digital Data Record</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
DSS	<i>Divisão de Sistemas de Solo</i>
DS-1	<i>Deep Space One</i>
ECSS	<i>European Committee for Space Standardization</i>
EO-1	<i>Earth Observing One</i>
EQUARS	<i>Equatorial Atmosphere Research Satellite</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESOC	<i>European Space Operations Centre</i>

EUROPA	<i>Extensible Universal Remote Operations Planning Architecture</i>
FMEA	<i>Análise de Modos de Falha e Efeitos</i>
FMECA	<i>Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade.</i>
HSP	<i>Heuristic Search Planner</i>
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
INPE	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
IPC	<i>Competição Internacional de Planejamento</i>
ISTC	<i>Institute for Cognitive Science and Technology</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LPG-TD	<i>Local Searching for Planning Graphs – Timed initial literal and Derived predicates</i>
MCT	<i>Ministério da Ciência e Tecnologia</i>
MAPSat	<i>Arquitetura Multi-Agente de Planejamento de controle de Satélites</i>
MECB	<i>Missão Espacial Completa Brasileira</i>
MER	<i>Mars Exploration Rover</i>
MEXAR	<i>Mars-Express Scheduling Architecture</i>
MIRAX	<i>Monitor e Imageador de Raios X</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDDL	<i>New Domain Definition Language</i>
OBDH	<i>On-Board Data Handling</i>
OCL	<i>Object-Centered Language</i>
OWL	<i>Ontology Web Language</i>
PAN	<i>Panchromatic Multi spectral Camera Subsystem</i>
PDDL	<i>Planning Domain Definition Language.</i>
PIT	<i>PAN Transmitter Subsystem</i>
PLANET	<i>Planner for Agile observation satElliTes</i>
PlanIPOV	<i>Sistema de Planejamento Inteligente de Planos de Operação de Voo</i>
PST	<i>Planning and Scheduling Team</i>
PVP	<i>Plano de Previsão de Passagem</i>
RBFB	<i>Remote Terminal Unit</i>
SAR	<i>Synthetic-Aperture Radar</i>
SCD	<i>Satélite de Coleta de Dados</i>

SIPE	<i>System for Interactive Planning and Execution Monitoring</i>
SNLP	<i>Systematic Nonlinear Planning</i>
SRI	<i>Stanford Research Institute</i>
STRIPS	<i>Stanford Research Institute Problem Solver</i>
TC	<i>Telecomando</i>
UCPOP	<i>Universal Conditional Partial Order Planner</i>
UFO-1	<i>UHF Follow-On One</i>
VHPOP	<i>Versatile Heuristic Partial Order Planner</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>
XSCC	<i>Xian Satellite Control Center</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação do trabalho de pesquisa	4
1.2 Objetivos e contribuições do trabalho de pesquisa	8
1.3 Metodologia e organização do trabalho	10
2 AMBIENTE DE CONTROLE E OPERAÇÃO DE SATÉLITES	13
2.1 Operações de missão	15
2.2 Equipes de controle de missões espaciais	18
2.3 Estrutura geral do rastreo e controle de satélite.	20
2.4 Controle e operação de satélite no INPE.....	21
2.4.1 Execução de plano de voo no CRC	22
2.4.2 Controle de falhas operacionais na operação.....	24
3 ESTRUTURAS DE AGENTES INTELIGENTES	27
3.1 Conceitos de agentes	27
3.2 Agente tabela.....	30
3.3 Agente reativo	30
3.4 Agente baseado em objetivos.....	31
3.5 Agente de planejamento	32
4 PLANEJAMENTO E ESCALONAMENTO EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	35
4.1 Nomenclatura em planejamento automatizado	35
4.1.1 Componentes de um plano.....	36
4.1.2 Modelo conceitual para planejamento	37
4.2 Planejadores na linha do tempo.....	39
4.3 Linguagens de representação de problemas de planejamento.....	41

4.4	Ambientes de tarefa ou de planejamento	45
4.5	Planejamento baseado em heurísticas de busca	46
4.6	Métodos de planejamento em ambientes não determinísticos	48
4.6.1	Planejamento sem sensores (Não determinismo limitado)	48
4.6.2	Planejamento condicional (Não determinismo Limitado)	49
4.6.3	Replanejamento ou reparo de plano (Não determinismo Ilimitado).....	49
4.7	Conceitos de escalonamento	49
4.8	Automatização de planos nas operações de missões espaciais	51
4.9	Uso de planejadores e escalonadores em missões espaciais	53
4.9.1	DCAPS - Data Chaser Automated Planning System. Rabideau et al., (1997)	53
4.9.2	ASPEN -Automated Scheduling and Planning Environment. Chien et al. (2002)	54
4.9.3	EUROPA - Extensible Universal Remote Operations Planning Architecture. Frank e Jonsson (2003)	55
4.9.4	MEXAR – Mars-Express Scheduling Architecture - Cesta et al., (2004)	56
4.9.5	APSS - Activity Planning and Sequencing Subsystem (Ko et al., 2004) .	57
4.9.6	ASE - Autonomous Science Experiment (Sherwood et al., 2004)	57
5	REPLANEJAMENTO EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	59
5.1	Agente de replanejamento	61
5.2	A arquitetura de um agente de replanejamento	62
5.3	Técnicas de replanejamento	64
5.3.1	Uma técnica geral de replanejamento	64
5.3.2	Replanejamento com agente reativo	67
5.3.3	Reparo de plano como extensão do planejamento	70
5.3.4	Técnicas de refinamento e refinamento reverso de plano.....	70

5.4	Heurística de refinamento reverso	73
5.5	Análise da estabilidade do plano: replanejamento versus reparo.....	76
5.5.1	Estabilidade do plano.....	77
5.6	Replanejamento de planos de operações em missões espaciais.....	79
5.6.1	ASPEN - <i>Automated Scheduling and Planning Environment</i> (Chien et al., 2002)	82
5.6.2	Planning and Replanning for a Constellation of Agile Earth Observation Satellites – (Grasset et al. – 2011)	85
5.7	Discussão dos fundamentos para replanejamento de planos de voo.....	87
6	UM AGENTE DE REPLANEJAMENTO DE PLANO DE VOO	89
6.1	A Necessidade de replanejamento em controle de missão.....	89
6.2	O Cenário escolhido para a aplicação	90
6.3	Técnicas em inteligência artificial aplicadas ao modelo do agente	93
6.4	Uma arquitetura para o agente de planejamento e replanejamento.....	96
6.5	Visão dinâmica da arquitetura de planejamento e replanejamento	98
6.5.1	O Planejador de ações.....	100
6.5.2	O Executor de ações	103
6.5.3	O Replanejador de plano.....	104
6.6	Um modelo geral do agente de replanejamento de plano de voo	105
6.6.1	Módulo de geração automática de plano	107
6.6.2	Módulo de execução e monitoração de plano.....	110
6.6.3	Módulo de análise e seleção de método de replanejamento	112
6.6.4	Módulo de replanejamento e de reparo do plano.....	114
6.7	Análise crítica e limitações identificadas no modelo proposto	117
7	O MODELO FORMAL DO AGENTE DE REPLANEJAMENTO	121
7.1	Técnicas combinadas em IA para reparo de plano.....	122

7.1.1	Módulo de análise e integração de técnicas de reparo	122
7.2	Conceitos básicos para representação do modelo formal	123
7.3	Análise de casos de reparo	125
8	DETALHAMENTO DA ARQUITETURA DO AGENTE DE REPLANEJAMENTO	129
8.1	Módulo do planeamento em pré-passagem.....	130
8.1.1	Características típicas de um plano de voo	133
8.2	Módulo da execução do plano e monitoramento	135
8.3	Módulo de replanejamento do plano	137
8.3.1	Caracterização do ambiente de tarefa	137
8.3.2	Contextualização do agente de replanejamento	138
8.3.3	Concepção da estrutura do replanejador	140
8.3.4	Escolha do método de reparo	141
8.3.5	Reagendamento de ações	144
8.4	Um protótipo do agente de replanejamento	146
8.4.1	Estrutura do elemento de software.....	146
8.4.2	Formatação do plano original	147
8.4.3	Representação da base de conhecimento de procedimentos de reparo ...	148
9	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	151
9.1	Inserção aleatória de falhas	152
9.2	Estudos de casos.....	153
9.3	Resultados obtidos de planos reparados.....	153
10	CONCLUSÕES FINAIS	155
10.1	Contribuição e limitações.....	156
10.2	Proposta de trabalhos futuros	160

10.3	Conclusões finais	161
10.4	Publicações.....	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		163
APÊNDICE A – ESTUDOS DE CASOS.....		173
A.1	- Estudo de Caso 1 - Taxa de falhas: ALTA	173
A.2	- Estudo de Caso 2 - Taxa de falhas: MÉDIA	175
A.3	- Estudo de Caso 3 - Taxa de falhas: BAIXA	176
APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS.....		179
B.1	- Plano Reparado - Taxa de falhas: ALTA.....	180
B.2	- Plano Reparado - Taxa de falhas: MÉDIA	182
APÊNDICE C – DIAGRAMAS DO COMPONENTE DE SOFTWARE.....		185
C1	- Diagrama de Construção do Componente	185
C2	- Diagrama de Execução do Componente	186
C3	- Diagrama de Classes do componente	187
APÊNDICE D – BASE DE CONHECIMENTO DE REPARO		189
D.1	- Representação de telecomando e regras	189
APÊNDICE E – ALGORITMOS E FUNCIONALIDADES DO MODELO FORMAL		191
E.1	- Algoritmo 1 : Agente de Replanejamento.....	191
E.2	- Algoritmo 2 : $\text{Reparo}(\pi, A\grave{c}\tilde{a}oFalha, Pci)$	193
E.3	- Algoritmo 3 : Estabilidade $(\pi, \pi r)$;.....	193
E.4	- Algoritmo 4 : $\text{Heuristica}(Pci)$	194

1 INTRODUÇÃO

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), criado em 1961 como um órgão de pesquisa brasileiro, é dedicado à pesquisa e à exploração espacial brasileira. O instituto tem instalações em doze cidades do Brasil e sua sede está localizada na cidade de São José dos Campos, estado de São Paulo. A Missão do INPE é promover e executar estudos, pesquisas científicas, desenvolvimento tecnológico e capacitação de recursos humanos, nos campos da Ciência Espacial e da Atmosfera, das Aplicações Espaciais, da Meteorologia e da Engenharia e Tecnologia Espacial, bem como em domínios correlatos, conforme as políticas e diretrizes definidas pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). As atividades desenvolvidas pelo INPE buscam demonstrar que a utilização da ciência e da tecnologia espacial, pode influir na qualidade de vida da população brasileira e no desenvolvimento do País e concentram esforços no desenvolvimento tecnológico da área espacial. Dentre as atuações do INPE, destacam-se as ações de inovação tecnológica espacial, que buscam garantir o resultado socioeconômico da atividade de pesquisa e do desenvolvimento espacial.

Com a aprovação da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB) em 1979, o INPE assumiu o desenvolvimento de satélites. A MECB previa o desenvolvimento de pequenos satélites de aplicações e a implantação de toda a infraestrutura necessária para o lançamento e controle destes satélites. Esta missão resultou no lançamento dos dois primeiros satélites brasileiros: o Satélite de Coleta de Dados (SCD), o SCD1 em 1993 e o SCD2 em 1998. Ambos os satélites foram bem sucedidos, tendo ultrapassado em muito a vida útil estimada, conferindo ao Brasil reconhecimento de sua capacitação na área espacial.

Para realização do controle dos satélites brasileiros em órbita, foi construída, nas instalações do INPE, uma estrutura organizacional composta por um Centro de Rastreo e Controle de Satélites (CRC), responsável pelas atividades de rastreo e controle dos satélites em órbita. O CRC é constituído pelo Centro de Controle de Satélites (CCS), localizado em São José dos Campos – SP, e pelas estações terrenas de rastreo de Cuiabá – MT (CBA) e de Alcântara – MA (ALC). Estes três locais estão interligados por uma

rede privada de comunicação de dados, que permite a troca de informações entre estas unidades.

Os Centros de Controle de Missões Espaciais, em geral, são responsáveis por controle operacional em órbita de veículos espaciais, que abrange uma grande variedade de tipos de missão, com propósitos de observação da terra, observação astronômica, e comunicações. Esses veículos espaciais variam de sondas planetárias, com observatórios para missões no espaço profundo, às missões científicas de propósitos gerais para observação da terra. Todos estes diferentes tipos de missões requerem, cada vez mais, a necessidade de planejar as operações nos veículos espaciais a partir do solo.

Um sistema espacial é dividido em dois segmentos: o segmento espacial e o segmento solo. O segmento espacial consiste do veículo espacial em si, como satélite e sondas, contendo equipamentos dedicados à operação das cargas úteis. O segmento solo é composto por toda a infraestrutura, incluindo as estações terrenas, pelo pessoal envolvido nas operações de monitoramento e manutenção do satélite, e pelo serviço de disponibilização aos usuários dos produtos do satélite tais como imagens e dados científicos. Existe uma integração entre elementos constituídos por recursos humanos, instalações de hardware, e sistemas de software específicos de controle e procedimentos operacionais para o controle de satélites, que são essenciais para o cumprimento dos objetivos das missões espaciais.

Os objetivos de missões espaciais podem ser atendidos por satélites que desempenham funções específicas das quais se deriva um determinado conjunto de produtos. Uma missão espacial cujo veículo é um satélite, de modo geral, tem seu segmento espacial dividido em dois elementos: carga útil e plataforma. A carga útil é um conjunto de equipamentos dedicado à obtenção de dados de interesse da missão. Em aplicações de sensoriamento remoto, a carga útil do satélite é composta por câmeras e outros sensores. Segundo Epiphany (2005), os sensores remotos medem a reflexão e a emissão de energia eletromagnética dos alvos na terra e transformam essas propriedades em imagens no formato passível de ser tratado por especialistas em sensoriamento remoto. A plataforma é um conjunto de subsistemas e equipamentos projetados para sustentar a operação da missão em órbita, ou seja, a operação das cargas úteis, o monitoramento,

operação e manutenção do satélite em órbita, e a comunicação da carga útil com as estações terrenas de rastreamento e controle.

O segmento de solo é formado por dois componentes principais: a organização das operações de solo e os sistemas de solo. A organização das operações de solo compreende os recursos humanos que são responsáveis pela preparação dos dados de operação de uma missão e pela execução das tarefas de operação de controle do satélite. Os sistemas de solo consistem em elementos de solo (hardware, software e instalações) que oferecem suporte ao controle e à monitoração do satélite. O segmento espacial atingirá os objetivos da missão por meio de um plano de operação do satélite.

A tecnologia de Planejamento e Escalonamento de tarefas possui potencial considerável na automatização de operações de veículos espaciais. As atividades de planejamento e escalonamento de tarefas de um veículo espacial envolvem a geração de uma sequência de comandos de baixo nível, a partir de um conjunto de metas de ciências e engenharia de alto nível como apresentado em Chien et al. (1998). O planejamento de operação de satélites resulta na construção de um plano de operações que busca a melhor solução para os problemas de restrições de tempo e recursos, com propósito de satisfazer da melhor forma possível as solicitações do usuário da missão.

A Inteligência Artificial (IA) é um ramo de pesquisa da Ciência da Computação que explora as técnicas de planejamento com recursos que permitem gerar planos de forma automatizada, e levam em conta as restrições inerentes ao ambiente de controle. Esses recursos, quando aplicados ao controle de missões espaciais, o ambiente de controle passa a ser tratado como um problema de planejamento, de maneira que é possível tratar isoladamente as instâncias do problema, como problemas específicos de cada passagem de um satélite por uma estação de rastreamento.

O objetivo final do planejamento é a construção de planos para execução. No entanto, quando um plano é executado em um ambiente real, diferenças entre o esperado e o realizado podem ocorrer. Essas diferenças podem se manifestar como divergências entre os estados observados e os esperados do ambiente, e consequentes necessidades de alteração nos objetivos a serem atingidos pelo plano, no caso em estudo, o controle de satélites.

Na execução de um plano pela equipe de operação do INPE durante uma passagem, podem surgir problemas decorrentes da operação do satélite. No caso do satélite de sensoriamento remoto, *China-Brazil Earth Resources Satellite* CBERS, temos como exemplos, informações de telemetria com valores fora dos esperados, ou qualidade ruim de imagem. Para evitar as falhas de funcionamento nos satélites, são disponibilizados métodos e procedimentos ao controle de operação, que constituem a base da operação de rotina em solo. Um exemplo de falha e como corrigi-la é o caso de obtenção de imagens de má qualidade; isso pode ser melhorado aumentando-se o ganho da imagem e ajustando o plano focal por meio de envio de telecomandos específicos.

1.1 Motivação do trabalho de pesquisa

A automação das operações de solo dos veículos espaciais que usam as ferramentas de planejamento e escalonamento automatizado se tornou muito popular nos últimos anos em missões espaciais em grandes centros de controles pelo mundo. A necessidade de adicionar e excluir, rápida e facilmente, atividades e seus respectivos recursos levou à necessidade de representar operações e atividades dos veículos espaciais com modelos reutilizáveis.

As operações totalmente autônomas estão associadas a um alto nível de complexidade e risco que muitos gerentes de operações considerariam incompatível com a realização dos objetivos da missão. Nas últimas décadas a comunidade da área espacial tem buscado métodos e sistemas que possibilitem automatizar as operações de missões espaciais e inovar as técnicas de controle.

Como os grandes centros de controle estão envolvidos com altos custos operacionais necessários para manter equipes de operação, existe a necessidade de reduzir o tamanho dessas equipes. Entretanto, devido às características de controle de satélites, a redução de custos operacionais se torna uma meta difícil de alcançar.

Segundo Monham e Rudolph (2004), nas últimas décadas houve uma tendência para missões menores, mais rápidas, e mais baratas neste setor, o que levou a um aumento significativo na proporção de orçamento gasto em operações de missão, com a aplicação dos tradicionais conceitos de operações manuais e custos associados, enquanto as despesas de concepção de projetos e desenvolvimento caíram drasticamente.

O aumento do nível de automação sempre foi identificado como um dos principais meios para reduzir o custo de operações espaciais. No entanto, o custo de desenvolvimento, teste e integração de funções complexas de automação, em conjunto com a abordagem conservadora natural de projetistas e operadores do segmento solo, criam barreiras para atingir essa meta, em favor do conceito tradicional *man-in-the-loop*, ou seja, modelo que requer interação humana, conforme Ferri et al. (2004).

Automatizar processos operacionais que no dia-a-dia representa custo com esforço manual é uma ideia muito atraente à primeira vista e uma maneira fácil de reduzir o custo de operação, mesmo no mundo complexo de operações dos veículos espaciais. No entanto, para Cameron, et al. (1998) os custos de implementação de automação de operações, testes, depuração e validação são significativos e aumentam rapidamente com a complexidade das funções envolvidas nesses processos operacionais.

Nos recentes anos, foram elaborados no INPE trabalhos acadêmicos com enfoque na automatização do planejamento e controle de satélites. Esses trabalhos apresentam o anseio de se criar planos para aumentar a autonomia da operação e controle, dentre os quais se destacam os seguintes:

- a) “Sistema de Planejamento Inteligente de Planos de Operação de Voo” (PlanIPOV), em Cardoso (2006), que propõe uma arquitetura que faz uso de tecnologia de agente de planejamento da Inteligência Artificial (IA) na geração automática de planos na fase operacional de rotina de satélites artificiais;
- b) Em Kucinskis e Ferreira (2007), o trabalho intitulado “Alocação Dinâmica de Recursos Computacionais Para Experimentos Científicos com Replanejamento Automatizado a Bordo em Satélites”. Este trabalho propõe o uso de técnicas de Planejamento e Escalonamento, da área de Inteligência Artificial, para permitir o replanejamento a bordo de operações;
- c) Em Carniello (2008), a “Arquitetura Multi-Agente de Planejamento de controle de Satélites” (MAPSat), constituída por agentes que gerenciam a alocação de recursos de solo para o rastreamento de múltiplos satélites e planejam as operações de controle destes satélites.

A tendência do aumento de satélites a ser controlados, se deve aos atuais satélites em órbita controlados pelo CRC, à assinatura entre Brasil e China, em maio de 2015, de um protocolo de intenções binacional, para desenvolver e lançar o sexto CBERS, e a outros programas citados em últimos Planos Diretor do INPE que aguardam liberação de aprovação para serem desenvolvidos.

Os satélites operados pelo INPE, classificados como de órbita baixa (SCD1, SCD2 e CBERS) têm duração média de órbita de cerca de 100 minutos, com um tempo médio de passagem em torno de 10 minutos. Portando, o processo de elaboração do plano de voo, e posteriormente sua execução ficam limitados ao tempo de passagem; com isso o plano deve ser elaborado de forma a atender às operações importantes e essenciais no período de execução dos comandos do plano dentro do tempo limitado à passagem.

A operação em ambiente com múltiplos satélites pode se deparar com conflitos de horários das passagens sobre uma mesma estação. Sabendo que uma estação deve estar dedicada a rastrear um único satélite em um dado momento, isso cria a situação de competição pela atenção da estação, sendo necessário atribuir prioridade para um dado satélite em especial.

Devido à preocupação do pessoal do CRC do INPE quanto à possibilidade do sistema atual não conseguir gerenciar satisfatoriamente missões futuras, há uma linha de pesquisa em andamento que propõe a automação de planejamentos de operações mais complexas. Porém, especialistas de planejamentos de operações têm ressalvas quanto à adoção de produtos derivados deste projeto. Conforme Tominaga (2010), um simples erro no planejamento de operações pode levar à execução de procedimentos falhos, causando danos irreversíveis em satélites que podem comprometer os seus funcionamentos e os investimentos nas respectivas missões.

Com intuito de diminuir as tarefas de decisão em solo, como discutido em Kucinskis e Ferreira (2007), esforços que tem sido feitos no sentido de se encontrar soluções automatizadas para a operação de missão, incluindo a busca pelo aprimoramento da autonomia do segmento espacial desenvolvendo sistemas de controle de bordo inteligentes com mais autonomia, e também pela automatização do segmento solo como apresentado em Cardoso (2006) e Carniello (2008). As pesquisas na área de planejamento

automatizado têm grande interesse no desenvolvimento de sistemas planejadores aumentando o nível de automatização na geração de planos de operação.

Os trabalhos da área de Planejamento no INPE, tais como Cardoso (2006) e Carniello (2008) trataram apenas do problema do Planejamento Automático para simples e múltiplos agentes, e o trabalho de Kucinskis e Ferreira (2007) tratou do problema do Replanejamento em bordo. Esta tese estudou o problema do replanejamento concebendo a solução do Agente de Replanejamento com a combinação de técnicas de replanejamento aplicadas em solo e em tempo real.

A construção de um plano para realizar uma tarefa buscando atingir um objetivo faz parte de um dos ramos da Inteligência Artificial (IA) referente ao Planejamento Automático (*Planning*), que estuda o planejamento associado a escalonamento de recursos, com a possibilidade do uso do replanejamento, para refazer um plano original que supostamente falhou na execução de suas ações. Esta técnica possibilita o reparo de planos que estejam em execução para controlar as atividades de um satélite.

Neste contexto, as técnicas de Planejamento e Escalonamento da área de Inteligência Artificial (IA), apresentam-se como uma solução em potencial a ser explorada, e uma das mais promissoras tecnologias aptas a aumentar a autonomia dos satélites. O Planejamento tem como base a simulação da execução de ações sobre determinado ambiente e a avaliação do efeito destas ações sobre o esse ambiente, de forma que possa ser encontrado um conjunto de ações, isto é, um plano que leve de um estado inicial do ambiente a um estado desejado, ou estado-objetivo.

Questões importantes para justificar as necessidades de replanejamento são pelo fato de que, o uso soluções automáticas para planejamento pode levar a falhas na execução. Qualquer agente executando um plano deve monitorar seu ambiente e os efeitos reais de suas ações, Van Der Krogt e Weerd (2005) afirmam que há mais maneiras de um plano dar errado do que ações que o agente pode executar.

Durante a execução do plano podem ocorrer mudanças não esperadas no ambiente a ser controlado devido às ações exógenas de outros agentes ou fracasso na execução de alguma ação do próprio agente como, por exemplo, uma falha em algum subsistema do

satélite. Quando isso ocorre, o agente precisa reconsiderar o restante do plano, reparando o plano ou construindo um completamente novo.

A motivação para esse trabalho foi explorar as técnicas de Planejamento integrado ao Replanejamento Automático, com o propósito de escolher a melhor que se adapte a infraestrutura operacional do INPE, minimizando as falhas de execução de plano com recursos de Replanejamento em tempo real.

1.2 Objetivos e contribuições do trabalho de pesquisa

Durante o controle de operação do satélite são disponibilizados métodos e procedimentos que são estabelecidos para tratar as possíveis ocorrências de falhas do satélite. Esses procedimentos são base da operação de rotina do satélite em solo utilizada pela equipe de controle do CRC. A ocorrência de possíveis falhas se dá porque o controle da operação acontece em um ambiente dinâmico não determinístico. Caso ocorram falhas durante a execução de um plano de operação de voo a ideia principal consiste em identificar a falha potencial comparando as condições atuais com a descrição do estado gerado.

De modo geral as técnicas de Planejamento e Replanejamento automáticos são abordadas de forma isolada, e o Replanejamento pode ser tratado como uma extensão do Planejamento, conforme Van Der Krogt e Weerd (2005). Este trabalho concentrou-se na busca pela solução da integração do Planejamento Automático com as técnicas de Replanejamento formalizando uma arquitetura para essa integração apresentada na Figura 1.1.

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo principal explorar técnicas para a concepção de uma arquitetura abrangente para tratar as atividades em missão espacial. As técnicas exploradas foram: Planejamento Automático, Escalonamento de atividades e tempo, e técnicas de Replanejamento para permitir a alteração do plano de operações em tempo real. Para promover a integração dessas técnicas foi necessária a concepção de um módulo cuja funcionalidade permitisse a conexão de dados entre as fases envolvidas do planejamento. A construção dessa arquitetura teve como foco a aplicação do planejamento automático de planos de voo dos satélites rastreados pelo INPE.

- b) **Base de Conhecimento**, que contém os elementos necessários para confecção do Plano de voo, incluindo Domínio do Plano, Pedidos de Usuários, Regras de Sistemas, Histórico e Predições de Missão, Modelos de Sistemas e Planos de Operação;
- c) **Dinâmica de Voo**, composto pelos Sistemas de Órbita e Atitude;
- d) **Planejamento de Operações**, responsável pela geração de planos, execução de testes e geração de diagnósticos de falhas;
- e) **Execução de Procedimentos**, composto pelos sistemas de controle de solo e de bordo.

O **Módulo de Replanejamento** proposto nesta tese deverá ser integrado ao **Módulo de Execução de Procedimentos** recebendo notificações de ocorrência de falhas durante a execução do plano de controle de voo e deverá avaliar o ponto de ocorrência da falha, escolher as medidas a serem tomadas, estimar a quantidade de ações a serem inseridas, avaliar a parte ainda válida do plano e decidir entre a construção de um novo plano (Replanejamento de novo plano) ou o reparo do plano atual (Reparo de plano).

Como desafio de pesquisa desse trabalho, estão as seguintes três questões:

- a) Como analisar as falhas da execução do plano,
- b) Como escolher entre o reparo do plano atual em execução ou o replanejamento de um novo plano
- c) Como Aplicar a técnica escolhida para refazer o plano.

Para atingir os objetivos desse trabalho foram necessários estudos das técnicas em IA e trabalhos correlatos produzidos pela comunidade de automação de missões espaciais para poder identificar como essas técnicas se aplicariam no contexto da solução do controle realizado pelo INPE.

1.3 Metodologia e organização do trabalho

Na fase inicial deste trabalho foram realizados estudos em Inteligência Artificial nas áreas de Planejamento e Replanejamento Automático de Planos. Estes estudos foram baseados em literaturas clássicas de autores consagrados tais como Russell, Norvig

(2004), e Gahlab (2004), que são citados ao longo desse documento e cujas referências são citadas com mais detalhes na seção de Referências Bibliográficas desse documento. Nesta fase, houve uma concentração de esforços em estudo dos temas Resolução de Problemas por Busca, Agente de Planejamento, e Planejamento.

Com o propósito de focar nas questões do replanejamento foram realizados estudos para conhecer as técnicas de replanejamento, e suas áreas de aplicação de modo geral, como robótica e Controle de Missões Espaciais. Foi essencial estudar e conhecer as aplicações nos grandes centros espaciais, tais como, *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *European Space Agency* ESA, e *European Space Operations Centre* (ESOC), e também ter conhecimento do estado da arte. Em fase complementar fez-se o levantamento e o estudos das técnicas que melhor se adaptassem ao problema.

Como resultado da pesquisa foi possível criar um “mapa de conhecimento”, ou seja, uma estrutura de assuntos relacionados aos documentos científicos que serviram como fonte de pesquisa. Foi possível então conhecer soluções adotadas pela comunidade científica espacial, bem como o estado da arte na tecnologia de Agente de Replanejamento. Em outra fase posterior às pesquisas, houve a dedicação em analisar as técnicas aplicadas ao controle de missão espacial pelos grandes centros mundiais, e escolher as que melhor se adaptavam ao contexto do INPE, e como fase conclusiva foi realizada a implementação de um protótipo com a integração dos recursos selecionados em IA estudados, tais como, Agentes Inteligentes, Planejamento Automático, Escalonamento, e Replanejamento Automático, com intuito de analisar e validar o protótipo aplicado ao ambiente de controle do CBERS.

Este trabalho foi organizado nos tópicos descritos a seguir e seguidos dessa introdução.

No capítulo 2 são apresentados: uma visão geral do ambiente de controle, a operação de satélites, os conceitos de operação de uma missão espacial e o caminho apontado pela comunidade espacial para o uso de automação nas missões espaciais. A definição e conceitos de Agente Inteligentes, os elementos importantes usados em projeto, tais como a natureza do ambiente, a técnica aplicada em agentes e o uso de agente em Planejamento são apresentados no capítulo 3.

No capítulo 4 são apresentados os conceitos e as técnicas de planejamento, o modelo conceitual para planejamento, as linguagens de representação de problemas, alguns planejadores aplicados aos grandes centros internacionais de missões espaciais. No capítulo 5 são apresentadas, noções de estrutura de agente de replanejamento, sua arquitetura, as técnicas de replanejamento, e alguns planejadores aplicados a grandes centros internacionais de missões espaciais. Nos capítulos 6 e 7 estão descritas as técnicas aplicadas em modelos de agentes, uma visão de arquitetura para agentes, uma análise crítica e limitações do modelo proposto, os algoritmos formais que combinam as técnicas de reparo, a estrutura do módulo que realiza a integração das técnicas de reparo de plano, e finalmente uma análise de casos de reparo de plano.

O capítulo 8 apresenta os módulos funcionais caracterizados por cenários nas fases operacionais. Esses módulos representam a fase do planejamento pré-passagem, o controle da execução do plano, e a fase de replanejamento. Também se caracterizou o ambiente de tarefa para escolha do tipo do agente de replanejamento. Essa fase teve como ideia principal a concepção da estrutura do replanejador para escolha do método de reparo. Também é discutido o problema do reagendamento de ações.

No capítulo 9 estão apresentados os recursos necessários e utilizados para a análise dos resultados dos testes, foi necessário criar um ambiente de teste, com processo de geração simulada de falhas, e finalmente análise de casos de testes.

O documento se encerra com as conclusões finais no capítulo 10, mostrando as contribuições e as limitações encontradas ao se aplicar as técnicas discutidas.

2 AMBIENTE DE CONTROLE E OPERAÇÃO DE SATÉLITES

Neste Capítulo será apresentada uma visão geral do ambiente de controle e operação de satélites de um sistema espacial, os conceitos de operação de uma missão espacial e o caminho apontado pela comunidade espacial para o uso de automação nas missões espaciais.

Os satélites são veículos colocados em órbita da Terra e que promovem continuamente a aquisição de dados relacionados às propriedades primárias dos objetos no solo, que são medidas pelos sensores remotos como a capacidade de reflexão e de emissão de energia eletromagnética. Essas propriedades primárias podem ser usadas diretamente, de uma forma “bruta”, por meio de uma imagem. Por estarem a grandes altitudes (tipicamente entre 600 e 1.000 km) têm a capacidade de abranger em seu campo de visada uma grande área da superfície terrestre. Ao mesmo tempo, como têm que orbitar ao redor da Terra, promovem uma cobertura que se repete ao longo do tempo, permitindo o acompanhamento da evolução das propriedades de reflexão ou emissão dos objetos e fenômenos, segundo Epiphany (2005).

Todo satélite deve desempenhar uma função específica, projetado para gerar um conjunto de produtos. As áreas de atuação em uma missão espacial podem ser em telecomunicações, em sensoriamento remoto, em coleta de dados e em experimentos científicos e tecnológicos segundo *European Committee for Space Standardization* (ECSS) (ECSS-E-70 Part 1, 2000) (Wertz e Larson, 1999).

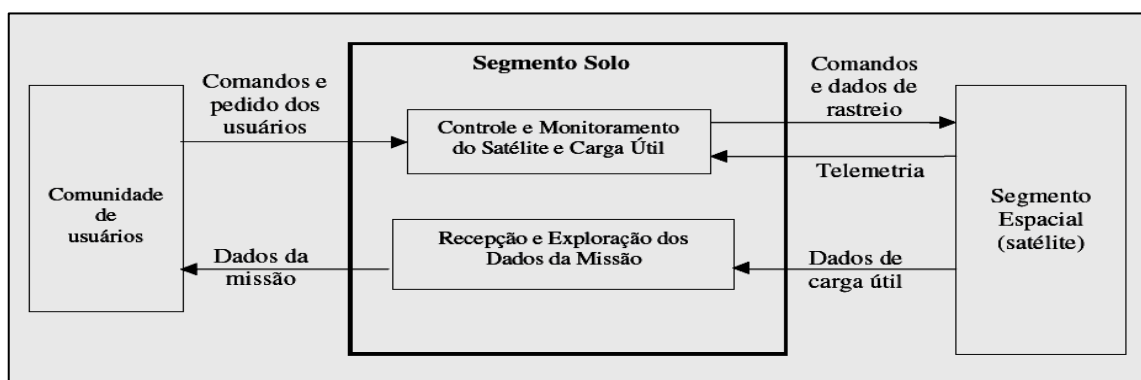
Uma missão espacial que recebe e transmite sinais emitidos por plataformas de coleta de dados distribuídas em um território tem como produto as informações ambientais coletadas por estas plataformas. Missão espacial em sensoriamento remoto tem como produto um grupo de imagens de alvos no solo, obtidas por sensores. Em telecomunicações o produto esperado são transmissões de dados, voz e imagem.

Em missões espaciais são necessários alguns elementos fundamentais integrados para que possa haver o cumprimento dos objetivos da missão. Estes elementos são constituídos por recursos humanos, instalações de hardware, sistemas de software específicos ao controle,

procedimentos operacionais para o controle de satélites. No segmento solo existe conexão entre o satélite e os clientes da missão por meio de fornecimento de dados de carga útil pelo satélite. Os clientes são os usuários que tem interesse nos dados transmitidos pelo satélite, e que utilizam dados para diversas atividades, tais como, meteorologia, sensoriamento remoto e controle ambiental.

A Figura 2.1 ilustra a integração dos componentes que compõem este ambiente, segmento espacial (satélite), o segmento solo, e clientes da missão.

Figura 2.1 - Relacionamento entre o satélite, segmento solo e usuários



Fonte: Adaptada de Wertz e Larson (1999).

A comunicação do solo com o satélite em órbita é realizada por meio do envio de telecomandos e pela recepção de telemetria através do uso de uma antena em uma estação terrena. A comunicação do satélite com a estação só é possível quando há visibilidade entre o satélite e a estação, este período é conhecido como “passagem” do satélite. Durante uma passagem o ambiente é dinâmico, onde são transmitidos conjuntos diferentes de telecomandos para cada satélite, e de modo passivo ocorre a recepção de telemetria, ou seja, o sistema de telemetria fica disponível durante toda passagem para receber automaticamente as telemetrias enviadas pelo satélite.

Um **sistema de telemetrias** tem como propósito transportar, de forma transparente e confiável, informações de medição de uma origem de dados remota para usuários distantes desta origem, segundo o *Consultative Committee For Spaces Data Systems* (CCSDS) (CCSDS, 1987-a).

Um **sistema de telecomandos** deve transportar informações de controle de um ponto de origem (como um operador humano) para um equipamento remotamente localizado (CCSDS, 1987-b). As unidades de telemetria e de telecomandos são chamadas de pacotes ou mensagens.

O pacote de telemetrias contém dados sobre os subsistemas do satélite, tais como:

- a) Temperatura, níveis de tensão elétrica, estado ligado/desligado de seus subsistemas, modos de operação e parâmetros de funcionamento atuais;
- b) Dados de carga útil, como dados brutos de imagens, valores lidos por sensores de experimentos, etc.;
- c) Pacotes de telemetrias também podem informar sobre o sucesso ou falha na execução de comandos, mensagens de erro e alertas.

Existem dois tipos de telemetria: a telemetria de tempo real e a telemetria armazenada, e dois de telecomandos: de tempo real e telecomandos temporizados.

2.1 Operações de missão

Operações de Missão é a coleção de atividades executadas pela equipe de operação durante a fase de voo da missão, juntamente com o projeto das atividades de operações; inclui-se também o desenvolvimento dos elementos das operações da missão, políticas, estimativas de custo, fluxo de dados, plano de treinamento, plano de pessoal. O **Sistema de Operações de Missão** é o sistema integrado de pessoal, procedimentos, hardware e software que deve cooperar para atingir estas tarefas. A NASA, o *Department of Defense* (DoD), indústrias e outras organizações tem diferentes requisitos para operação de missão e cada organização tem desenvolvido sua própria filosofia e estilo para realização da missão. A realização da missão se concentra no período após o lançamento, mas trabalho substancial deve ser feito durante todas as fases do projeto e desenvolvimento da missão para preparar para as operações. O Sistema de Operações de Missão processa as informações e controla os recursos de solo e espacial, assim usuários e operadores podem obter as informações e ter acesso aos serviços necessários. Os elementos da missão são descritos a seguir:

- a) **Planejamento de Missão:** decidir o que fazer e quando;
- b) **Planejamento e desenvolvimento de atividades:** criação de cenários operacionais e desenvolvimentos de comandos operacionais;
- c) **Controle de missão:** gerenciamento de atividades diárias;

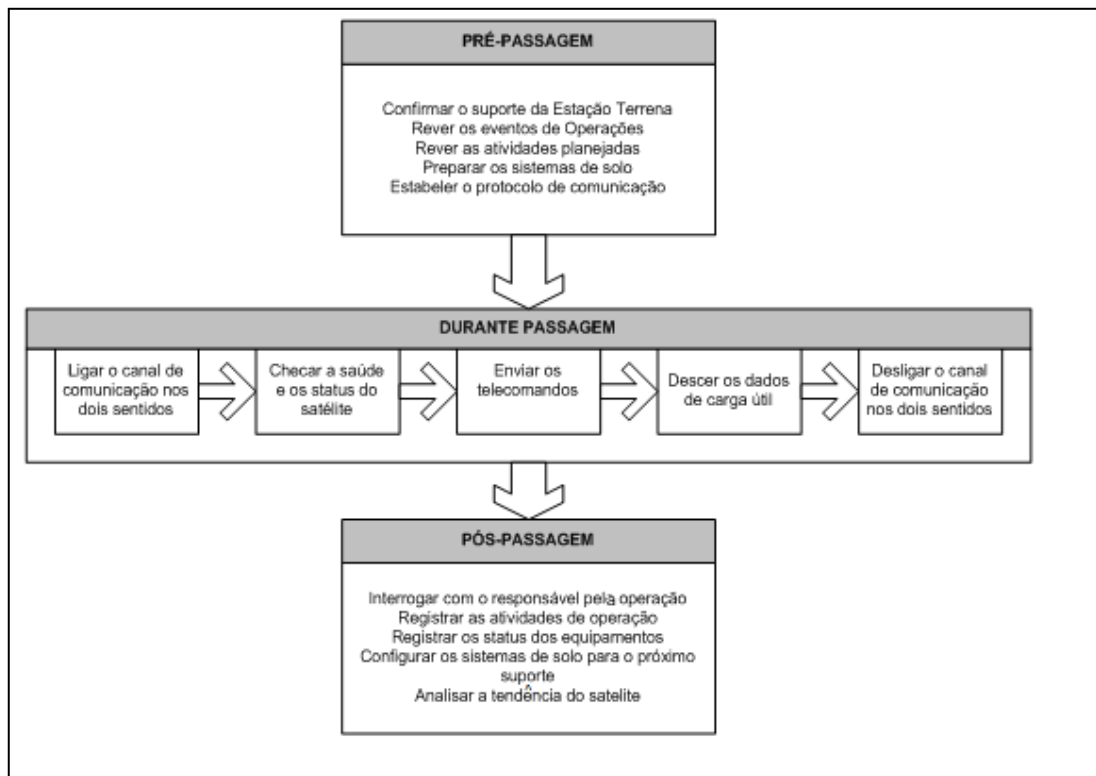
A operação de uma missão espacial de acordo com o padrão *International Organization for Standardization* (ISO) 14950:2004 (ISO, 2004) é uma atividade sob a responsabilidade do segmento solo que tem como objetivo:

- a) Garantir a provisão da missão e dos serviços e produtos científicos;
- b) Executar as tarefas de operações de rotina;
- c) Recuperar as contingências de bordo;
- d) Gerenciar os recursos de bordo de forma a maximizar a vida útil da missão e as provisões de serviços e produtos.

A operação de uma missão pode ser classificada em dois grupos: operações de bordo e operações de solo. As operações de bordo correspondem a todas as atividades relacionadas ao planejamento, execução e avaliação do controle do segmento espacial quando em órbita. Já as operações de solo correspondem a todas as atividades relacionadas ao planejamento, execução dos recursos de solo tais como as estações terrenas e rede de comunicação de dados de solo. Desta forma, normalmente as operações são executadas seguindo dois planos de operação principais: Plano de Operação de Voo e o Plano de Operação de Solo.

A Figura 2.2 apresenta as ações típicas de uma passagem, que podem ser classificadas de acordo com três fases: pré-passagem, passagem e pós-passagem.

Figura 2.2 - Atividades típicas de uma passagem



Fonte: adaptada de Wertz e Larson (1999).

Os sistemas de solo são configurados a cada passagem de um satélite para suportar as necessidades de rastreo, de transmissão de telecomandos e recepção de telemetria. Uma vez que o satélite torna-se visível para a estação terrena, o canal de comunicação é ligado. No final da passagem o canal de comunicação é desligado.

Na fase de pré-passagem deve-se confirmar o suporte da estação terrena, rever as atividades planejadas, executar medidas de calibração de equipamentos da estação terrena a fim de ajustá-los com precisão e estabelecer o protocolo de comunicação com o satélite. Assim, para cada passagem de um satélite configuram-se os sistemas de solo de forma a suportar as necessidades de transmissão de telecomandos e de recepção de telemetrias da próxima fase.

Na fase de passagem do satélite, ou seja, quando há visibilidade com a estação terrena, deve-se primeiramente ligar o canal de comunicação no sentido estação terrena e satélite

e vice-versa. Ao final da passagem, o canal de comunicação deve ser desligado em ambos os sentidos.

Durante a passagem são recebidos os pacotes de telemetrias e são enviados os pacotes de telecomandos. O recebimento das telemetrias de tempo real permite verificar os status dos equipamentos do satélite em órbita, como a bateria e o computador de bordo, assim quando for detectada qualquer anomalia, telecomandos podem ser enviados para tentar corrigi-la ainda durante a passagem. Ao passo que o recebimento das telemetrias armazenadas fornece dados sobre a carga útil, dos estados dos equipamentos, de informações sobre a execução de comandos, alertas e mensagens de erro. Esses dados são gerados durante a órbita e armazenados para envio em passagens futuras.

Os pacotes de telecomandos são enviados da estação terrena para o satélite, e contêm comandos gerados pela equipe de operações, para ser executados pelo satélite. Estes comandos podem ser para ligar ou desligar equipamentos, mudar modos de operação de subsistemas, carregar novos parâmetros de funcionamento. Devido ao tempo limitado de comunicação com o satélite é necessário prover meios de executar comandos a qualquer momento durante sua órbita. Os telecomandos são classificados em dois tipos: os **imediatos** e os **temporizados**.

Os **imediatos** são executados assim que são recebidos pelo satélite, e os **temporizados** em um instante de tempo estabelecido por um campo da mensagem, indicando ao software do satélite quando eles devem ser executados.

2.2 Equipes de controle de missões espaciais

Existem duas equipes para controlar uma missão espacial – a Equipe de Operação e a Equipe de Suporte. A Equipe de Operação é estruturada da seguinte forma (ECSS-E-70 Part 1, 2000):

- a) **Grupo de Controle de Voo** – responsável pelo controle da missão e do satélite;
- b) **Grupo de Dinâmica de Voo** – responsável pela determinação e previsão de órbita e de atitude, cálculo e avaliação de manobras, e previsão de eventos orbitais e de dados de apontamento da antena da estação terrena. Este grupo oferece suporte à equipe de Controle de Voo;

- c) **Grupo de Operações de Solo** – responsável por operar e manter as facilidades de suporte de solo, tais como as estações terrenas, as redes de comunicação de dados e o centro de controle de missão;
- d) **Grupo de Exploração de Missão** – responsável pela interface com os usuários de uma missão, arquivando os produtos e distribuindo os dados de carga útil;
- e) **Equipe de Suporte**, por sua vez, é constituída pelos seguintes grupos:
 - **Grupo de Suporte de Solo** – composto por especialistas dos sistemas de solo que fornecem suporte às equipes de operações de solo;
 - **Grupo de Suporte de Projeto** – composto por especialistas do satélite que fornecem suporte à equipe de controle de voo.

Os grupos aqui citados consistem em recursos humanos responsáveis pela preparação e execução das várias tarefas de operação de uma missão. No ambiente de controle de missões espaciais é ideal que essas equipes sejam subsidiadas por infraestruturas de hardware e de software a fim de contornar a complexidade do ambiente.

As atividades envolvidas na operação de controle de satélites (Figura 2.3) incluem: Dinâmica de Voo, Planejamento de Operações e Execução de Procedimentos Operacionais. Conforme Tominaga (2010) estas atividades são realizadas periodicamente e independente para cada satélite.

Figura 2.3 - Ciclo de operação de controle



Fonte: Adaptada de Tominaga (2010).

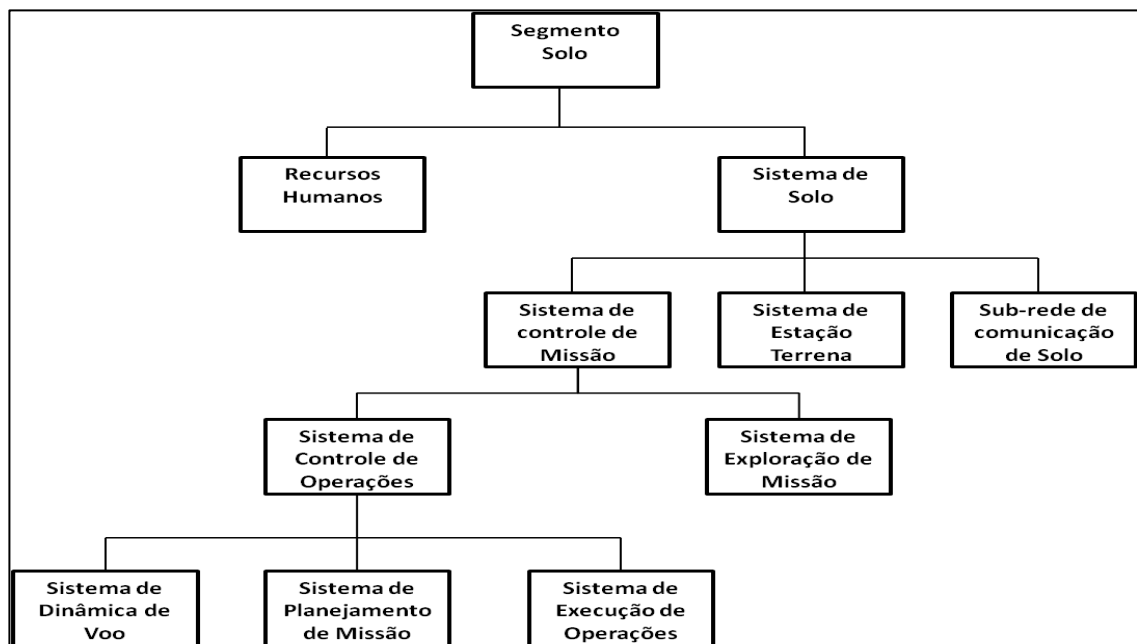
O diagrama da Figura 2.3 apresenta de forma cíclica o procedimento de operação de controle, de maneira que o ciclo é formado para que as informações de uma passagem sirvam de realimentação para uma próxima passagem. A dinâmica de voo é responsável

pela determinação do posicionamento orbital e apontamento de atitude de satélites. O planejamento de operações agenda as tarefas que devem ser desempenhadas para possibilitar a execução de operações de missão para cada satélite. A execução de procedimentos consiste na realização, em tempo real, de tarefas agendadas conforme o planejamento de operações. É através desta execução que equipamentos de carga-útil dos satélites são ligados para a obtenção de dados missão, e medidas de posição e apontamento são obtidas para ser processadas pela dinâmica de voo (TOMINAGA, 2010).

2.3 Estrutura geral do rastreo e controle de satélite.

O contexto do Domínio do Problema desse trabalho é o ambiente de controle de satélite do INPE, que gerencia a operação dos satélites sob a supervisão do Centro de Controle e Rastreo, mais precisamente, os satélites SCDs e CBERS. Com a visão macro do segmento solo pode-se identificar os elementos que compõem esse ambiente, essa visão mais detalhada pode ser apresentada usando conceito de Enfoque Orientado a Agentes (CARNIELLO, 2008 p.170). A Figura 2.4 mostra uma visão geral dos principais elementos desta estrutura.

Figura 2.4 - Estrutura funcional do rastreo e controle de satélite.



Fonte: Adaptada de Carniello (2008).

Segmento de Solo, constituído por: **Recursos Humanos** e um **Sistema de Solo**, constituído por hardware, software e instalações, que oferece suporte às atividades dos especialistas humanos. O **Sistema de Solo** é constituído por três tipos de sistemas:

- a) **Sistema de Controle de Missão:** planeja, monitora e controla a plataforma e a carga útil de um satélite;
- b) **Sistema de Estação Terrena:** presente em cada estação terrena de rastreio, implementa o *link* de comunicação com um satélite durante os períodos em que este passa sobre uma estação. Durante estes períodos de passagem são transmitidos comandos ao satélite (telecomandos) e recebidos dados da plataforma e das cargas úteis (telemetrias);
- c) **Sub-rede de Comunicação Solo:** conecta todos os sistemas de solo permitindo a comunicação entre eles.

O **Sistema de Controle de Missão** é constituído pelos sistemas de:

- a) **Controle de Operações:** realiza as seguintes atividades por meio dos três sistemas que o constitui: **Sistema de Dinâmica de Voo** que gera as informações sobre os satélites em órbita; o **Sistema de Planejamento de Missão** que planeja as operações de voo para estes satélites considerando o uso compartilhado dos mesmos recursos de solo, quando for o caso; e o **Sistema de Execução de Operações** que executa os planos de operações de voo gerados.
- b) **Exploração de Missão:** efetua procedimentos extras para tratar os produtos da missão, quando necessário, e distribui estes produtos aos usuários finais. Este sistema consiste no elo com os usuários finais de uma missão, que são os solicitantes dos serviços que um satélite oferece. Uma solicitação de usuário pode ser, por exemplo, a obtenção de imagens de coordenadas específicas.

2.4 Controle e operação de satélite no INPE

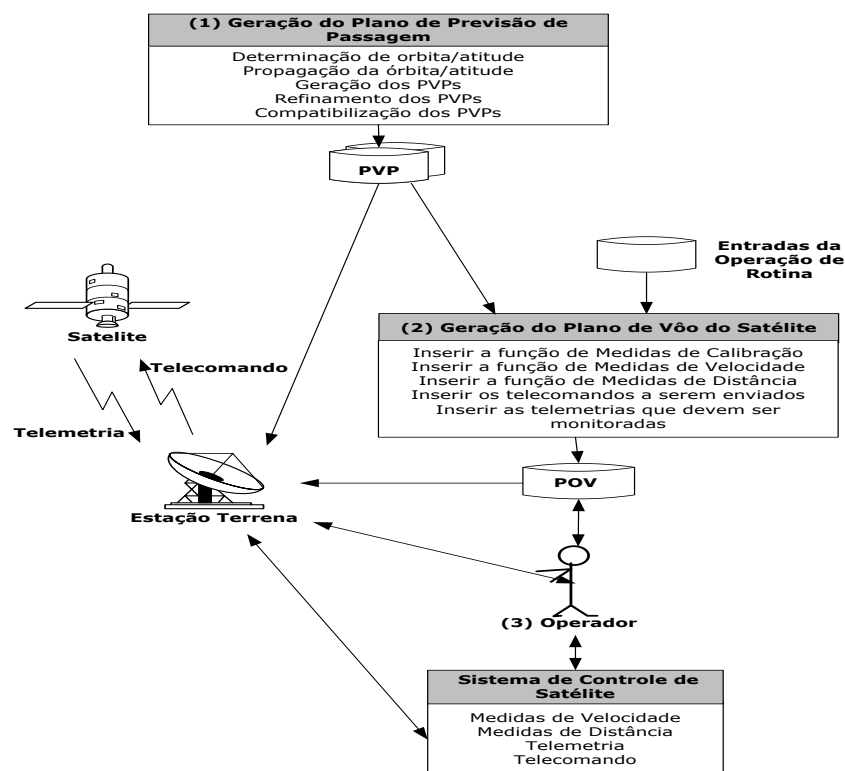
O CRC tem executado operações de controle de satélites desenvolvidos total ou parcialmente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Estas operações de controle são executadas por meio de planos de atividades de controle, a automatização dessas operações é a forma de melhorar a eficiência do controle. No caso particular do

INPE, existe a preocupação de aumentar a confiabilidade das operações de missão, que em alguns casos ainda são realizadas manualmente. Há uma grande demanda para implementar métodos de planejamento e controle automático.

2.4.1 Execução de plano de voo no CRC

Os processos tradicionais de geração de planos em controle de missões espaciais, não fazem considerações com restrições fundamentais ao plano de voo, tais como, restrições de consumos de tempo e recursos. Esses processos realizados por especialistas, apenas procuram a automação de atividades simples e de rotina. O fluxo de atividades para a elaboração e execução de plano de voo utilizado pelo CRC do INPE para controle de satélites é detalhado e apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Preparação e execução de plano de voo no CRC/INPE



Fonte: Adaptada de Cardoso (2006).

A preparação de plano de voo é vista como Planejamento em rotina, que constitui uma categoria de operações de controle de satélites, sendo composta por planejamento de operações contendo atividades rotineiras de controle de satélites, em modo de operação normal ou degradado. No modo de operação normal, tem-se uma situação estável, dentro

do qual o satélite é operado plenamente conforme as especificações de projeto da missão. Neste modo, executam-se operações de controle que são compostas por atividades rotineiras. Exemplos incluem programação e execução de medidas de rastreo, recepção de telemetrias, e telecomandos para ativação e desativação de carga-útil de acordo com visibilidade de estações terrenas de recepção de dados. Atividades especiais são também ocasionalmente executadas, conforme monitoração de parâmetros cujos valores aproximam-se de limites críticos.

No planejamento em rotina, primeiramente são obtidos da dinâmica de voo, arquivos de previsões de contato de satélites, também conhecidos como Plano de Previsão de Passagem (PVP). Estes arquivos contêm uma lista sequencial de passagens, correspondente a cada satélite para cada estação terrena, dentro de um intervalo de tempo futuro estabelecido.

Primeiramente, é gerado um PVP para um período de uma semana para cada par (satélite - estação terrena (ET)), a partir dos dados de órbita e atitude. Cada arquivo PVP gerado contém várias linhas de informações, cada linha contendo, entre outros dados: o instante de tempo (dia/mês/ano, hora, minuto e segundo), os valores dos ângulos de azimute e elevação do satélite neste instante (para o apontamento da antena da ET em direção ao satélite), a distância entre a ET e o satélite, a variação temporal desta distância e o valor do desvio de Doppler¹ na frequência do sinal portador enviado ao satélite. O intervalo de tempo em que cada linha é gerada pode ser definido pelo usuário. O CRC utiliza em suas atividades operacionais um intervalo de trinta segundos entre cada linha de informações.

O modo de operação anormal é uma situação instável, causada por uma ou mais anomalias em bordo. A entrada e permanência neste modo constituem uma situação indesejável que, caso não seja corrigida em tempo, pode pôr em risco a saúde do satélite. Portanto, assim que a execução de procedimentos de monitoração de telemetria identifica a entrada do satélite neste modo, atividades emergenciais devem ser disparadas para levar satélite para um modo de operação seguro.

¹ O nome efeito Doppler é uma referência ao físico austríaco Christian Johann Doppler, que o estudou e descreveu. Ele escreveu um artigo onde afirma que a frequência do som percebida por um observador depende do movimento relativo entre a fonte emissora do som e o observador.

2.4.2 Controle de falhas operacionais na operação

O controle das operações de satélites do INPE ocorre dentro de um ambiente altamente dinâmico onde durante a execução do plano, telecomandos são enviados para atuarem em determinados subsistemas e mensagens de telemetria são recebidas informando o estado seu. Caso ocorra algum comportamento inesperado por parte de algum subsistema do satélite, estão previstos procedimentos para detectar e corrigir falha do satélite, que são base da operação de rotina do satélite em solo.

No caso do controle de operação de CBERS, por exemplo, são disponibilizados métodos previstos e procedimentos para evitar as falhas de satélites, que são base da operação de rotina em solo do satélite CBERS. Os procedimentos adotados para tratamento de falhas estão descritos no documento (Foreseen Faults and Avoidance Procedures Cap. 9) elaborado por XI'AN Satellite Control Center (XSCC) e China Academy of Space Technology (XSCC; CAST, 2009), e contêm os seguintes termos para identificar o cenário da falha:

- a) Código de identificação da falha;
- b) Descrição da falha;
- c) Código do subsistema onde ocorreu a falha;
- d) Grau de severidade da falha, tais como: perda do satélite, perda da carga útil, perda de redundância; outras perdas;
- e) Método de recuperação de falha indica qual o método que deve ser usado para recuperação da falha, por Telecomando ou Automaticamente em bordo;
- f) Indicativos de falha: aqui são apresentados os sintomas da falha, tais como: valor errado de telemetria, sinal anormal ou qualidade ruim de imagem;
- g) Fase da falha, tais como: Inicial, Transferência de órbita ou Ajuste de órbita e Rotina;
- h) Plano de recuperação onde são apresentadas as ações necessárias para superar ou mitigar essa falha

Os tipos de falhas podem ser:

- a) Valor de telemetria fora do esperado
- b) Sinal anormal
- c) Qualidade ruim de imagem

As fases em que pode ocorrer uma Falha são:

- a) Inicial de lançamento;
- b) Transferência de órbita;
- c) Ajuste de órbita;
- d) Rotina.

No próximo capítulo serão apresentados os conceitos de agentes inteligentes, as maneiras como percebem o ambiente e como atuam em respostas às percepções. O uso de agentes inteligentes tem uma grande gama de aplicações. A adoção do conceito de agentes neste trabalho tem como propósito, dispor de recursos inteligentes para a elaboração e reparo de planos.

3 ESTRUTURAS DE AGENTES INTELIGENTES

Existe um grande problema na definição do termo agente, por se tratar de um vocábulo extensamente usado por diversos pesquisadores que trabalham em áreas estreitamente relacionadas, conforme Sycara (1998). Assim, existem várias definições vinculadas a pesquisadores empenhados no estudo e no desenvolvimento de agentes. Algumas definições nas seções seguintes podem ser consideradas as mais utilizadas como referência.

3.1 Conceitos de agentes

Para Russell e Norvig (2004), um agente pode ser visto como algo que observa o ambiente por meio de sensores e age neste ambiente por intermédio de atuadores. Para exemplificar este conceito de agente, pode-se fazer um comparativo entre agentes humanos, agentes robôs e agentes de software.

Um agente humano possui olhos, ouvidos e outros órgãos que funcionam como sensores no ambiente, e possui mãos, pernas, boca e outras partes do corpo que agem como atuadores. Um agente robô, por sua vez, pode possuir câmeras de vídeo e outros sensores para observar o ambiente, e pode ter vários motores como atuadores. Um agente de software recebe sequências de digitações, conteúdo de arquivos e/ou pacotes de rede como entradas sensórias e atua sobre o ambiente exibindo algo na tela, gravando arquivos e/ou enviando pacotes de rede.

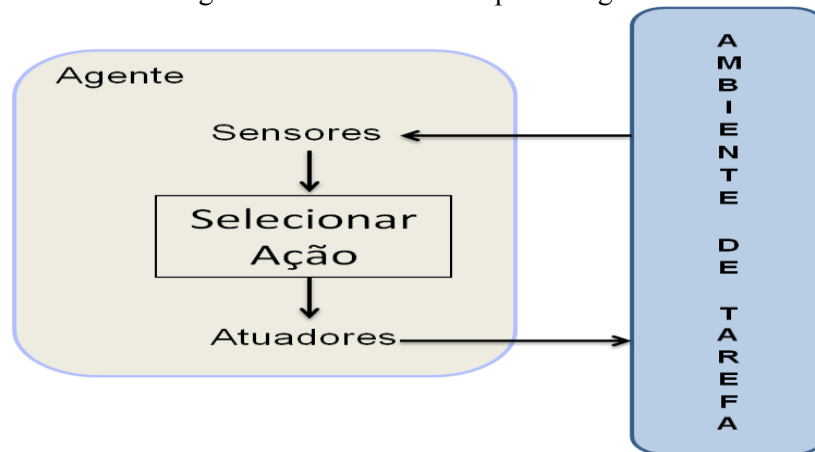
Segundo Maes (1995), agentes são sistemas computacionais que habitam algum ambiente dinâmico e complexo, percebem e agem de forma autônoma nesse ambiente, e fazendo isso, realizam um conjunto de metas ou tarefas para as quais foram projetados.

De acordo com Franklin e Graesser (1996), um agente autônomo é um sistema situado dentro de um ambiente e como parte deste ambiente, sente e age sobre o mesmo, ao longo do tempo, em busca de cumprir sua própria agenda e de maneira que afete o seu próprio sentido no futuro.

No projeto de um agente é importante definir a natureza do ambiente de forma a poder determinar qual a técnica de implementação de agentes a ser aplicada. Para isso, se faz necessário definir o **ambiente de tarefa** do agente a ser desenvolvido e classificá-lo.

Uma representação bem simplificada de agentes que interagem com ambientes por meio de sensores e atuadores, está apresentada na Figura 3.1, e serve de base para conceituar o ambiente de tarefa.

Figura 3.1 - Uma visão simples de agente



Fonte: Adaptada de Russell e Norvig (2004).

Neste modelo simplificado o agente observa as mudanças que ocorrem em um ambiente dinâmico por meio de percepções. Essas são produzidas por eventos e captadas por sensores específicos para cada ambiente de tarefa. Os sensores identificam os eventos externos e internamente buscam uma ação correspondente a ser tomada, como representado na Figura 3.1, ou seja, uma ação específica deve ser selecionada em função de um evento produzido no ambiente de tarefa. Após a seleção da ação a ser disparada, o agente aciona um atuador para realizar a ação de forma a interferir no ambiente de tarefa. Como exemplos de agentes, temos: Seres Humanos, Robô, Software específicos, etc., alguns exemplos de agentes são apresentados na Figura 3.2.

Figura 3.2- Exemplos de agentes

<i>Agente</i>	<i>Percepções</i>	<i>Ações</i>	<i>Objetivos</i>	<i>Ambiente</i>
Diagnóstico médico	Sintomas, paciente, exames respostas.	Perguntar, prescrever exames, testar.	Saúde do paciente, minimizar custos.	Paciente, gabinete
Análise de imagens de satélite	Ponto de Imagem	Identificar uma categoria de imagem.	Classificar temas de imagem corretamente.	Imagens de satélite
Tutorial de Idiomas	Textos digitados	Imprimir exercícios, sugestões, correções.	Melhorar o desempenho do estudante	Estudantes

Fonte: Adaptada de Russell e Norvig (2004).

A primeira etapa do projeto de agente deve consistir sempre em especificar o ambiente de tarefa que é essencialmente formado pelos “problemas” para os quais os agentes são as “soluções”. Segundo Russell e Norvig (2004), o ambiente de tarefa é composto da especificação da medida de desempenho, do ambiente externo, dos atuadores e dos sensores do agente.

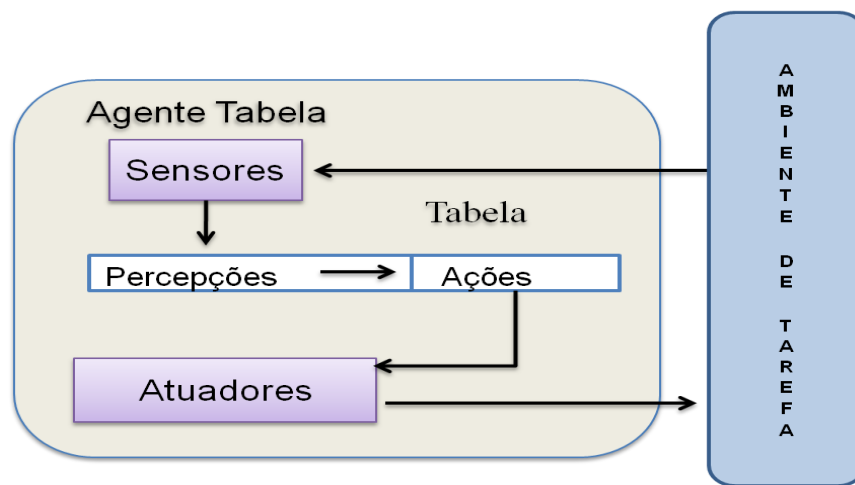
Um agente tem uma arquitetura básica composta de duas outras arquiteturas:

- a) **Arquitetura de Hardware:** é o meio físico onde o agente vai ser implementado (dispositivo computacional, sensores e atuadores);
- b) **Arquitetura de Software:** “arquitetura do agente” são os módulos básicos das funções lógicas, programas e suas inter-relações;
- c) O planejamento é um processo dispendioso em termos de tempo e de computação. A motivação para agentes inteligentes é de personificar capacidades humanas, de forma que possam ser utilizados em vez de seres humanos e poder atingir o objetivo determinado, agindo de forma racional no seu ambiente. A parte principal de um ato racional é a do raciocínio prático. Assim, o planejamento é a parte do raciocínio prático, uma vez que descreve um conjunto de ações para alcançar um objetivo, segundo Bratman (1987).

3.2 Agente tabela

Este agente observa o ambiente, recebe sinais por sensores, interpreta as percepções e as relaciona com ações, passando-as aos atuadores que vão intervir no ambiente como reação. Esse agente possui algumas limitações, pois mesmo para problemas simples, isso implica em construção de tabelas muito grandes, como exemplo, o jogo de xadrez (para cada jogada tem-se 30^{100} possibilidades de ações como respostas); Nem sempre é possível, por desconhecimento ou questão de tempo, construir a tabela; Não há autonomia nem flexibilidade, a Figura 3.3 apresenta o modelo desse agente.

Figura 3.3 - Agente tabela

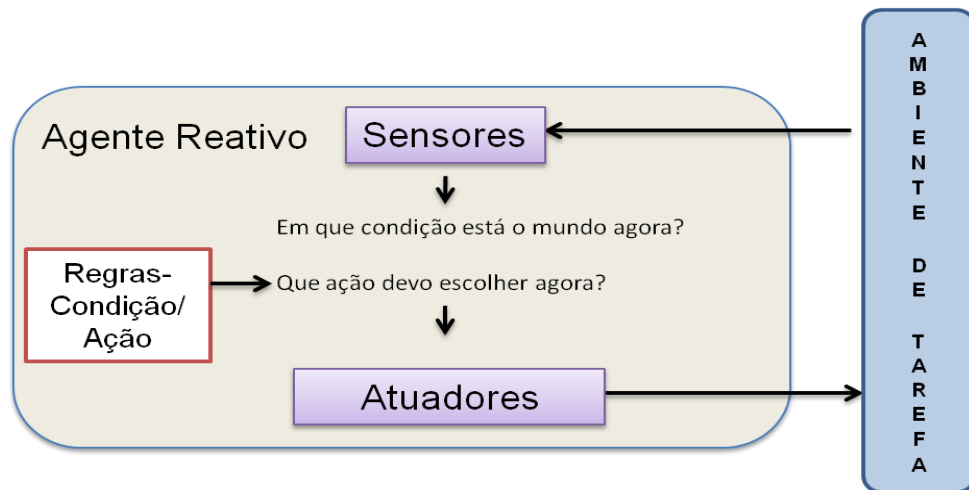


Fonte: Adaptada de Russell e Norvig (2004).

3.3 Agente reativo

O Agente está situado em um ambiente dinâmico, o mundo pode mudar independentemente das ações do agente, ações podem ter efeitos não determinísticos, uma ação pode resultar em um conjunto de efeitos alternativos. Não existe correspondência perfeita entre o ambiente de estado real e representação do agente, a Figura 3.4 apresenta o modelo desse agente.

Figura 3.4 - Agente reativo.



Fonte: Adaptada de Russell e Norvig (2004).

Tem como funcionalidade o uso de regras do tipo *condição-ação* cuja representação é inteligível, modular e eficiente. Um exemplo de regra, poderia ser a seguinte expressão em controle de satélite:

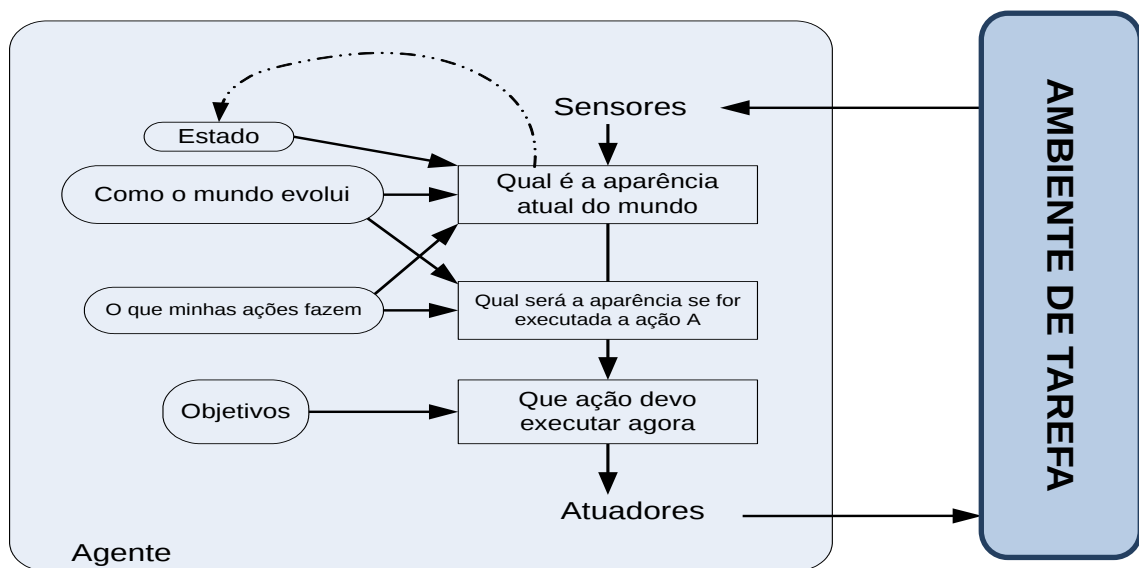
```
Se Telemetria TM003 = 3.5 v,  
então envie telecomando TCJ03.
```

Tem como desvantagem não poder armazenar uma sequência perceptiva e tem pouca autonomia.

3.4 Agente baseado em objetivos.

A Figura 3.5 apresenta a estrutura do agente baseado em objetivos. Este tipo de agente necessita da descrição do estado atual do ambiente e informações sobre objetivos que descrevem situações desejáveis. O programa de agente combina essas informações (estado atual e objetivo) com informações sobre os resultados das ações possíveis, a fim de escolher a sequência de ações que permitam que o objetivo seja alcançado.

Figura 3.5 - Agente baseado em objetivos.



Fonte: Adaptada de Russell e Norvig (2004).

Algumas vezes, a seleção da ação baseada em objetivos é direta, quando a satisfação do objetivo é alcançada de imediato com a execução de uma única ação. Outras vezes ela será mais complicada, quando o agente tiver de considerar longas sequências de ações até encontrar um meio de atingir o objetivo. É nestas situações mais complexas que se encaixa a área de planejamento da IA.

3.5 Agente de planejamento

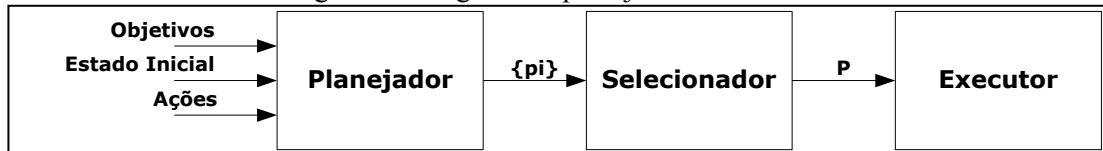
Um agente de software pode ser classificado de acordo com a sua funcionalidade principal. Segundo Russell e Norvig (2004), um agente de software capaz de construir planos de ações para um determinado problema é denominado agente de planejamento ou agente planejador.

Um agente de planejamento é capaz de construir um plano de ações para um determinado problema, baseado em um objetivo. A partir de suas percepções do ambiente, executa estas ações e avalia a satisfação do objetivo, modificando o seu plano, se necessário.

O agente de planejamento, como o próprio nome indica, é dedicado à resolução de problemas de planejamento. Segundo Feber (1999), e como mostrado na Figura 3.6, o agente inicia com a especificação inicial das situações do ambiente (estado inicial), dos objetivos a serem atingidos com o plano e com o universo de ações disponíveis. O

módulo **Planejador** encontra um conjunto de planos $\{p_i\}$ do qual apenas um é selecionado pelo módulo **Selecionador**. Este plano é então encaminhado para o módulo **Executor** que se encarregará de sua execução. Em muitos sistemas, o Planejador gera um único plano e o módulo Selecionador não é necessário.

Figura 3.6 - Agente de planejamento clássico



Fonte: Adaptada de Feber (1999).

Um planejador pode ser visualizado como um programa que procura uma solução ou então, como um programa que demonstra (construtivamente) a existência de uma solução conforme Russell e Norvig (2004). Os planejadores são algoritmos poderosos de resolução de problemas que operam sobre representações explícitas proposicionais (ou de primeira ordem) de estados e ações.

O problema de planejamento é tratado como um problema de inferência lógica, que utiliza lógica de primeira ordem como linguagem de representação. Dessa forma, o agente de planejamento representa o ambiente em que opera e é capaz de deduzir quais ações executar.

4 PLANEJAMENTO E ESCALONAMENTO EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Planejamento automatizado é uma das áreas de pesquisa da Inteligência Artificial que concentra esforços para desenvolver solucionadores genéricos de problemas. Os problemas são vistos como planos que consistem em sequências de ações para alcançar um determinado objetivo. O termo planejamento pode ser definido como uma sequência de ações que ao ser executada alcançará um objetivo, definição essa baseada no contexto de um agente de planejamento.

O processo de planejamento simula o comportamento de um ambiente ao qual é aplicada uma sequência de ações. As características do ambiente são representadas por um conjunto de estados de forma lógica, e cada ação aplicada ao ambiente pode modificar um ou mais de seus estados. A meta é encontrar a sequência correta de ações que leve o ambiente de seu estado inicial a um estado desejado. Para isso o planejador deve possuir um modelo do ambiente com representações de seus estados, um conjunto de ações aplicáveis ao modelo – cada uma possuindo suas precondições para execução e a descrição de seus efeitos – e os estados, inicial e objetivo.

Problemas de planejamento, que levam em conta o fator tempo, são conhecidos como planejamento temporal e consideram mais fatores além dos elementos do planejamento clássico como: o tempo gasto para a execução do plano, o início e a duração de cada ação e, em problemas mais complexos, também a restrição de recursos. Um único recurso pode ser utilizado por duas ações diferentes e esta restrição deve ser levada em consideração durante a geração do plano pelo planejador. O planejamento temporal é aplicado a problemas do mundo real. Para cada tipo de problema de planejamento existe um conjunto diferente de algoritmos e projetos de agentes.

4.1 Nomenclatura em planejamento automatizado

Alguns termos mais comuns são empregados pela comunidade de pesquisa da área de inteligência artificial com interesse em Planejamento Automatizado. Em Carniello (2008) foi elaborada uma relação dos termos fundamentais:

- a) **Fluente** – Alguma coisa capaz de fluir, tal como um líquido. Para o propósito da IA é alguma coisa que flui ou se altera de estado mediante situações. Na lógica clássica, os fatos são caracterizados por objetos que compõem um mundo. No planejamento automatizado, existe forma de associar as informações com instantes de tempo, ou seja, o que é válido em um momento pode não ser válido no momento seguinte. Isto é representado nos problemas de planejamento pelo termo fluente, ou seja, um fluente é uma proposição cujo valor verdade é dado em função do tempo.
- a) **Estados** - é um conjunto finito de fluentes pertencentes a uma linguagem da Lógica Clássica de 1ª ordem e que são verdadeiros em um instante de tempo.
- b) **Operadores**: também chamados de ações, são esquemas que representam regras de inferência não instanciadas. Um esquema de ação é constituído pelo nome da ação e lista de parâmetros, uma precondição que deve ser válida para que a ação seja executada e o efeito resultante de sua execução.
- c) **Domínio**: o domínio é composto pela enumeração dos predicados e do conjunto de operadores aplicáveis a um determinado ambiente.
- d) **Problema**: o problema é composto pela descrição do estado inicial e do estado objetivo associado a um ambiente, ou seja, descreve-se o estado atual de um mundo e o estado esperado após a aplicação de um plano.
- e) **Plano**: é a lista ordenada de operadores instanciados por um planejador e que permite a transição do estado atual ao estado objetivo de um problema.

4.1.1 Componentes de um plano

Os componentes do plano, conforme notações e definições padrão da literatura são descritos a seguir:

- a) Um **conjunto de ações** que compõem os passos do plano. Estas ações são obtidas do conjunto de todas as ações possíveis para o problema de planejamento, sendo que um plano vazio contém apenas as ações *Iniciar* e *Terminar*. *Iniciar* não tem

precondições e apresenta como efeito todos os literais no estado inicial do problema de planejamento. *Terminar* não tem efeitos e tem como precondições os literais de objetivo do problema de planejamento;

b) Um **conjunto de restrições de ordenação**. Cada restrição de ordenação tem a forma $A < B$, isto significa que a ação A deve ser executada antes de B , mas não imediatamente antes, podendo haver ações intermediárias;

c) Um **conjunto de vínculos causais**. Um vínculo causal entre as ações A e B no plano é escrito como $A \xrightarrow{p} B$. Isto afirma que p é um efeito da ação A e uma precondição de B , e também significa que p deverá permanecer verdadeiro entre as ações A e B . A ação A é chamada de ação que contribui com p , e B a ação que necessita de p . Deste modo, o plano não pode ser estendido adicionando-se uma nova ação C que esteja em conflito com o vínculo causal. A ação C está em conflito com $A \xrightarrow{p} B$, se C tem efeito $\neg p$ e se C pode ocorrer depois de A e antes de B . Vínculos causais também podem ser chamados de intervalos de proteção.

A partir dos termos citados acima, pode-se conceituar o termo planejamento automatizado por meio da definição abaixo.

Planejamento Automatizado: é a enumeração do conjunto de instâncias de operadores aplicáveis ao domínio de um problema de planejamento e que permitem a transição do estado inicial, dito S_0 , para o estado objetivo S_n , que representa o estado desejado do problema de planejamento.

4.1.2 Modelo conceitual para planejamento

Um modelo conceitual para planejamento pode ser descrito formalmente utilizando um modelo de sistema de transição de estados, considerando o aspecto dinâmico de seu comportamento.

Definição: Sistema de transição de estados. Um sistema de transição de estados é uma tupla $\Sigma = (S, A, E, \gamma)$ segundo Ghallab et al. (2004), onde:

$S = \{s_1, s_2, \dots\}$ é um conjunto finito de estados, recursivamente numerável;

$A = \{a_1, a_2, \dots\}$ é um conjunto finito de ações, recursivamente numerável;

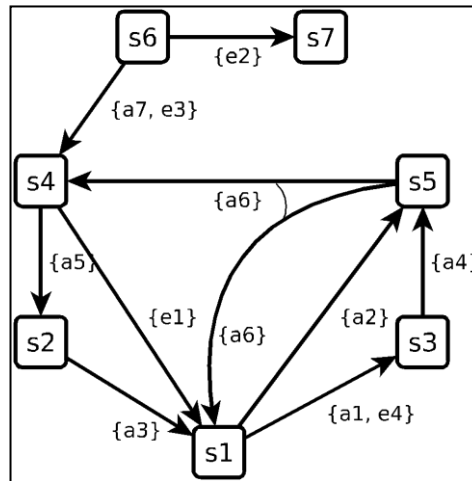
$E = \{e_1, e_2, \dots\}$ é um conjunto finito de eventos, recursivamente numeráveis, que aqui serão chamados de ações exógenas (ou eventos exógenos);

$\gamma : S \times A \times E \rightarrow 2^S$ é uma função de transição de estados;

Um sistema de transição de estados pode ser representado por um grafo dirigido, cujos nós são estados em S . Se $s' \in \gamma(s, u)$, onde u é um par (a, e) , com $a \in A$ e $e \in E$, então o grafo contém um arco de s a s' que é especificado com u . Cada um desses arcos é chamado transição de estado.

Um exemplo de um grafo de transição de estado pode ser observado na Figura 4.1, no qual os diferentes estados são representados por s , os eventos por e e as ações por a .

Figura 4.1 - Grafo de transição de estado



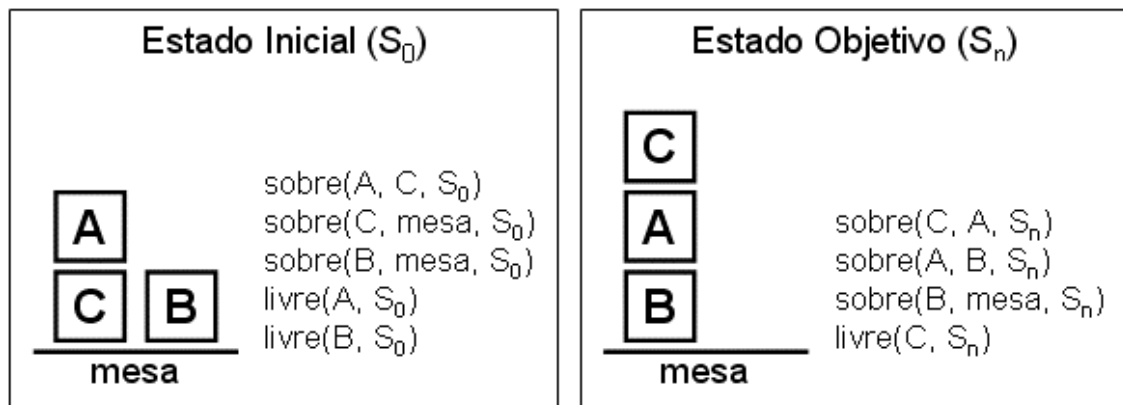
Fonte: Adaptada de Ghallab et al. (2004).

4.2 Planejadores na linha do tempo

No início dos anos setenta, Fikes e Nilson (1971) lançaram o software do primeiro planejador *Stanford Research Institute Problem Solver* (STRIPS), de formulação simples, o STRIPS marca o início do estudo de planejamento automático. Os operadores STRIPS permaneceram quase duas décadas como paradigma vigente, mas, ainda assim, havia problemas difíceis para ser resolvidos por eles. A alta complexidade de seu algoritmo (busca exaustiva no espaço de estados) fez com que muitas melhorias fossem propostas. O STRIPS trouxe um esquema de representação de estados e ações baseado em literais, também chamadas de predicados.

Em STRIPS, uma ação é definida em função dos operadores de precondição (PRE), de adição (ADD) e de eliminação (DEL). Os operadores PRE são um conjunto de literais que, se estiverem presentes no estado atual, permitem a aplicação da ação ao estado. Os operadores ADD são um conjunto de literais que são adicionadas ao próximo estado, após a aplicação da ação ao estado atual. Finalmente, os operadores DEL são um conjunto de literais que devem ser removidas no próximo estado, após a aplicação da ação ao estado atual. Além da representação das ações, STRIPS descreve o problema como conjuntos de predicados, que definem os seus estados inicial e objetivo. A Figura 4.2 traz um exemplo da representação em STRIPS para o problema do mundo dos blocos, que é definido a seguir.

Figura 4.2 - Mundo dos blocos representado em STRIP



Fonte: Adaptada de Kucinskis e Ferreira (2007).

O objetivo do problema é rearranjar os blocos de forma a se obter determinada configuração. Esse é um problema clássico de IA. Para atingir este objetivo, as seguintes regras devem ser respeitadas:

- a) Deve-se mover apenas um bloco por vez;
- b) Podem ser movidos apenas blocos que não estejam sob nenhum outro bloco.

Uma ação pode ser definida em STRIP, da seguinte maneira:

mover (bloco, de, para)

PRE: sobre(bloco, de), livre(bloco), livre(para)

ADD: sobre(bloco, para), livre(de)

DEL: sobre(bloco, de), livre(para)

O algoritmo do STRIPS seleciona um dos literais do objetivo e aplica sequências de ações ao estado inicial até atingir um estado que contenha este literal, ou seja, as condições de lógicas. Então seleciona o próximo literal do objetivo e repete o processo, até encontrar um estado que contenha todos os literais do estado objetivo.

Diversos outros planejadores foram baseados nos conceitos do STRIPS, dentre os quais podem ser destacados os seguintes:

- a) O *Abstraction-Based STRIPS* (ABSTRIPS) de Sacerdoti (1974), que trouxe a primeira abordagem de planejamento hierárquico, adicionando prioridades aos operadores de pré-condição das ações do STRIPS. Estas prioridades eram usadas para gerar um esboço de plano (uma abstração) que resolvia todas as pré-condições de maior nível e, em seguida, as prioridades do nível imediatamente inferior eram resolvidas, e o processo seguia até a obtenção de um plano;
- b) PRODIGY - (Minton et al., 1989), que adicionou a regressão encadeada de estados, podendo assim realizar uma busca em profundidade em ambos os sentidos (do estado inicial ao objetivo e vice-versa);
- c) O *Systematic Nonlinear Planning* (SNLP) (McAllester e Rosenblitt, 1991), que definiu um plano como um conjunto de ações parcialmente ordenadas, através do uso de restrições de ordenação entre as ações e links causais;
- d) O *Universal Conditional Partial Order Planner* (UCPOP) (Penberthy e Weld, 1992), uma extensão do SNLP que trouxe operadores condicionais e implementou satisfação de restrições para provar a consistência dos planos obtidos.

A grande contribuição do STRIPS foi a sua padronização de descrever os estados e ações, que é a base para as principais formas de representação do conhecimento em planejamento.

4.3 Linguagens de representação de problemas de planejamento

Em 1971 foi lançado o primeiro sistema de planejamento de nome STRIPS, (Fikes e Nilsson, 1971) que foi projetado como o componente de planejamento do software para o projeto de robótica Shakey no *Stanford Research Institute* (SRI). A representação de ações usada pelo STRIPS teve muito mais influência que sua abordagem algorítmica. Quase todos os sistemas de planejamento desde então utilizaram uma ou outra variante da linguagem STRIPS. STRIPS é uma linguagem básica de representação de problemas de planejamento clássicos. Ela descreve ações em termos de suas pré-condições e seus efeitos, e descreve o estado inicial e estado objetivo como conjunção de literais positivos.

Com as limitações da STRIPS, foram desenvolvidas muitas variantes dessa linguagem. A linguagem *Action Description Language* (ADL) - (Pednault, 1989), por exemplo, é uma

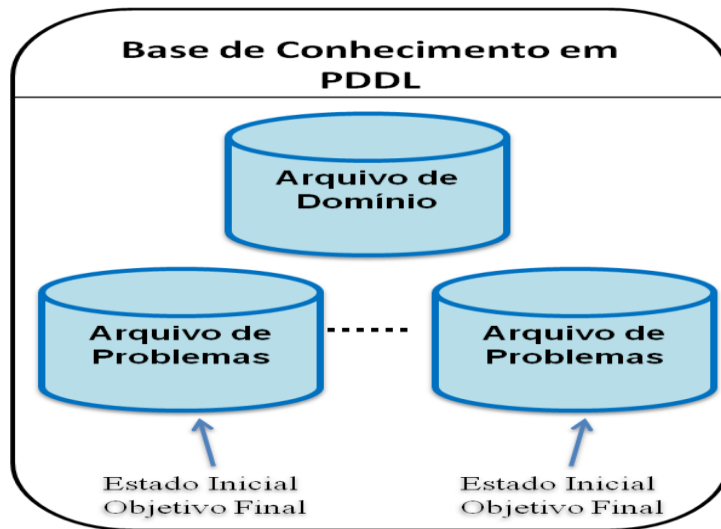
variação importante que relaxou algumas das restrições da linguagem STRIPS permitindo a representação de disjunção nas precondições, de condições nos efeitos, e de quantificadores universais nas precondições e efeitos, tornando possível assim codificar problemas mais realistas.

Entretanto, em 1998, o comitê responsável pela organização da primeira Competição Internacional de Planejamento (IPC) disponibilizou a linguagem *Planning Domain Description Language* PDDL, para descrição de domínios de planejamento a ser utilizada na competição daquele mesmo ano – IPC/98 (McDermott, 2000, McDermott et al., 1998). A PDDL foi introduzida como uma sintaxe padronizada e analisável por computador para representar STRIPS, ADL e outras linguagens e tem sido utilizada como a linguagem-padrão nos IPCs. Desde então, ela passou a ser para a comunidade de planejamento a linguagem-padrão para representação e troca de modelos no domínio de planejamento e tem facilitado o desenvolvimento científico na área de planejamento e é capaz de modelar o problema de planejamento para a operação de satélite que envolva restrições de tempo e de recurso.

A última versão, PDDL 3.0, permite a descrição de objetivos opcionais, ou seja, objetivos que um planejador deve tentar atingir após ter alcançado todos os objetivos mandatórios. Em geral, nem todos os objetivos opcionais podem ser atingidos, mas, mesmo assim, um plano que não leve o sistema a estes estados ainda é considerado um plano válido.

A linguagem PDDL separa a descrição de ações que caracterizam o comportamento do domínio de planejamento que se está modelando, da descrição das condições iniciais do ambiente e dos objetivos que se desejam alcançar no plano, que caracterizam a instância do problema. Desta forma, o problema de planejamento é criado pela junção em arquivos da descrição do domínio com a descrição do problema. Uma mesma descrição de domínio pode fazer par com descrições de problemas diferentes, para produzir diferentes problemas de planejamento, dentro de um mesmo domínio. A Figura 4.3 ilustra a representação da base de conhecimento em PDDL.

Figura 4.3 - Base de conhecimento em PDDL



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.4 apresenta um exemplo do problema de planejamento codificado em PDDL para o caso do Mundo dos Blocos, contendo os blocos A, B, C, D, E, F e G.

Figura 4.4 - Problema em PDDL para um caso do mundo dos blocos

```
(define (problem BLOCOS)
  (:domain MUNDO_DOS_BLOCOS)
  (:objects A B C D E F G - bloco)

  (:INIT
    (sobre-a-mesa A)
    (sobre-a-mesa E)
    (sobre-a-mesa F)
    (sobre-a-mesa G)
    (sobre B E)
    (sobre C F)
    (sobre D G)
    (livre B)
    (livre C)
    (livre D)
    (livre A))

  (:GOAL (AND
    (sobre C D)
    (sobre D B )
    (sobre B E )
    (sobre-a-mesa E)
    (sobre-a-mesa F)
    (sobre-a-mesa G)
    (sobre-a-mesa A)
    (livre A)
    (livre F)
    (livre G)))
```

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.5 apresenta um exemplo de arquivo para o domínio do Mundo dos Blocos:

Figura 4.5 - Arquivo domínio para o caso do mundo dos blocos

```
(define (domain MUNDO_DOS_BLOCOS)
  (:requirements :strip :typing)
  (:predicates (sobre ?x - bloco ?y - bloco)
                (sobre-a-mesa ?x - bloco)
                (livre ?x - bloco))

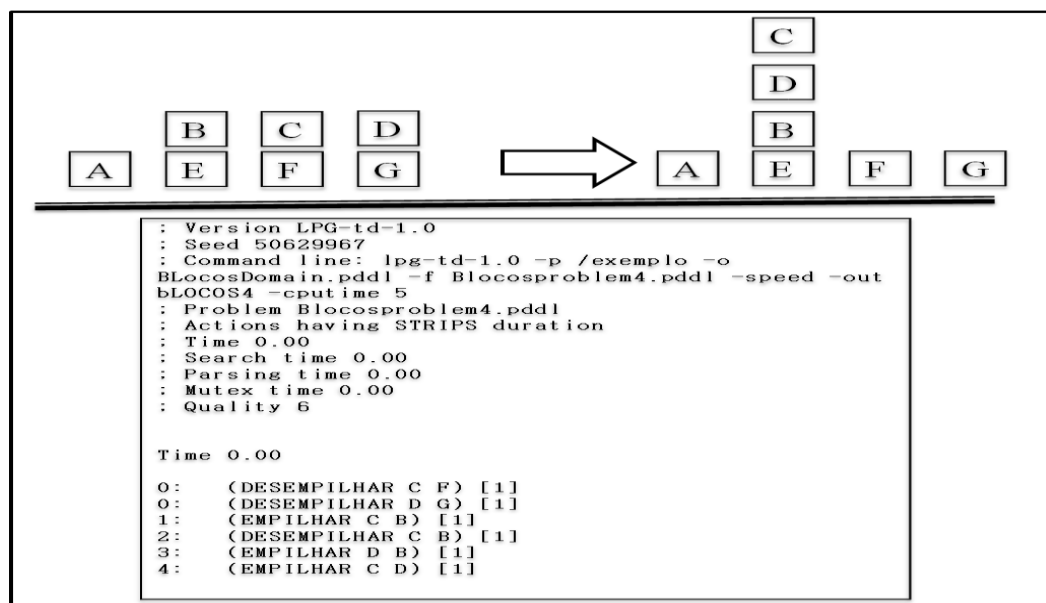
  (:action empilhar
    :parameters (?x - bloco ?y - bloco)
    :precondition (and (livre ?x) (sobre-a-mesa ?x) (livre ?y))
    :effect (and (not (livre ?y))
                 (not (sobre-a-mesa ?x))
                 (sobre ?x ?y)))

  (:action desempilhar
    :parameters (?x - bloco ?y - bloco)
    :precondition (and (sobre ?x ?y) (livre ?x))
    :effect (and (livre ?y)
                 (livre ?x)
                 (sobre-a-mesa ?x)
                 (not (sobre ?x ?y)))))
```

Fonte: Produção do autor.

Como resultado da execução do plano usando o Planejador *Local Searching for Planning Graphs – Timed initial literal and Derived predicates* (LPG-TD) dos autores Gerevini e Serina (2002), tem-se o resultado mostrado na Figura 4.6:

Figura 4.6 - Resultado da execução do plano



Fonte: Produção do autor.

Existem algumas aplicações que permitem a tradução de linguagens de representação de conhecimento de uma linguagem para outra. A descrição do problema de planejamento pode ser representada em instâncias por meio de classes de programação orientada a objeto ou em Ontology Web Language (OWL) (W3C, 2012). Com a tradução para OWL o desenvolvimento de novos softwares para planejamento terá agregado uma tecnologia importante para a implementação de uma semântica que poderá ser distribuída pela Web. Consequentemente, essa abordagem pode ser considerada uma evolução para o processamento de conteúdo semântico da informação no domínio de planejamento de rastreo de satélite. Um trabalho de Ribeiro e Carretero (2014), mostrou essa possibilidade de traduzir um problema de domínio de rastreo de satélite em PDDL para a linguagem OWL, usando a ferramenta *Protégé* dos autores Knublauch, et al. (2004), um software de domínio público que é um editor de ontologias em OWL.

4.4 Ambientes de tarefa ou de planejamento

Um ambiente de tarefa ou de planejamento pode ser classificado de acordo com as características identificadas por Russell e Norvig (2004) que estão relacionadas a seguir:

- a) **Completamente observável versus parcialmente observável** – um ambiente de tarefa é completamente observável se os sensores do agente permitem acesso ao estado completo do ambiente em cada instante. Um ambiente é parcialmente observável devido a ruído e a sensores de baixa precisão ou porque partes do seu estado estão simplesmente ausentes nos dados do sensor;
- b) **Estático versus dinâmico** – o ambiente de tarefa é dinâmico se o ambiente puder se alterar enquanto o agente está deliberando, caso contrário, ele é estático. Em ambiente estático, o agente não precisa continuar a observar o mundo enquanto está decidindo sobre a realização de uma ação e não precisa se preocupar com a passagem do tempo. Já os ambientes dinâmicos estão sempre perguntando ao agente o que ele deseja fazer. Se o próprio ambiente não mudar com a passagem do tempo, mas o nível de desempenho do agente se alterar, o ambiente é classificado como **semi-dinâmico**;
- c) **Episódico versus sequencial** - em um ambiente de tarefa episódico, a escolha da ação em cada episódio só depende do próprio episódio e o agente não precisa pensar para frente. Cada episódio consiste na percepção do agente, e depois na

execução de uma única ação. Em um ambiente sequencial, a decisão atual pode afetar todas as decisões futuras;

- d) **Discreto versus contínuo** – a distinção entre discreto e contínuo pode se aplicar ao estado do ambiente, ao modo como o tempo é tratado e às percepções e ações do agente. Um jogo de xadrez é considerado como um ambiente de tarefas discreto. Já um jogo de futebol é considerado como um ambiente contínuo;
- e) **Determinístico versus estocástico** – um ambiente de tarefa é considerado determinístico se seu próximo estado é completamente determinado pelo estado atual e pela ação executada pelo agente. Caso contrário, ele é estocástico. Se o ambiente é determinístico exceto pelas ações de outros agentes, dizemos que o ambiente é **estratégico**.

Os ambientes de planejamento podem ser classificados de acordo com as propriedades que apresentam. Assim, um ambiente de planejamento pode ser classificado como clássico e não-clássico conforme Russell e Norvig (2004). Um ambiente de planejamento clássico é um ambiente que apresenta as seguintes propriedades - completamente observável, determinístico, estático (uma mudança ocorre somente quando o agente age) e discreto. Em contrapartida, um ambiente de planejamento não-clássico possui as propriedades - parcialmente observável e/ou estocástico. Para cada um destes tipos de ambientes de planejamento existe um conjunto diferente de algoritmos e projetos de agentes. O planejamento não-clássico é o caso mais difícil de se implementar.

4.5 Planejamento baseado em heurísticas de busca

Heurística é um procedimento para resolver problemas através de um enfoque intuitivo, em geral racional, no qual a estrutura do problema passa a ser interpretada e explorada inteligentemente para obter uma solução razoável. Na IA heurísticas são critérios, métodos ou princípios para decidir, entre vários cursos alternativos de ação, aquele que parece mais efetivo para atingir um objetivo.

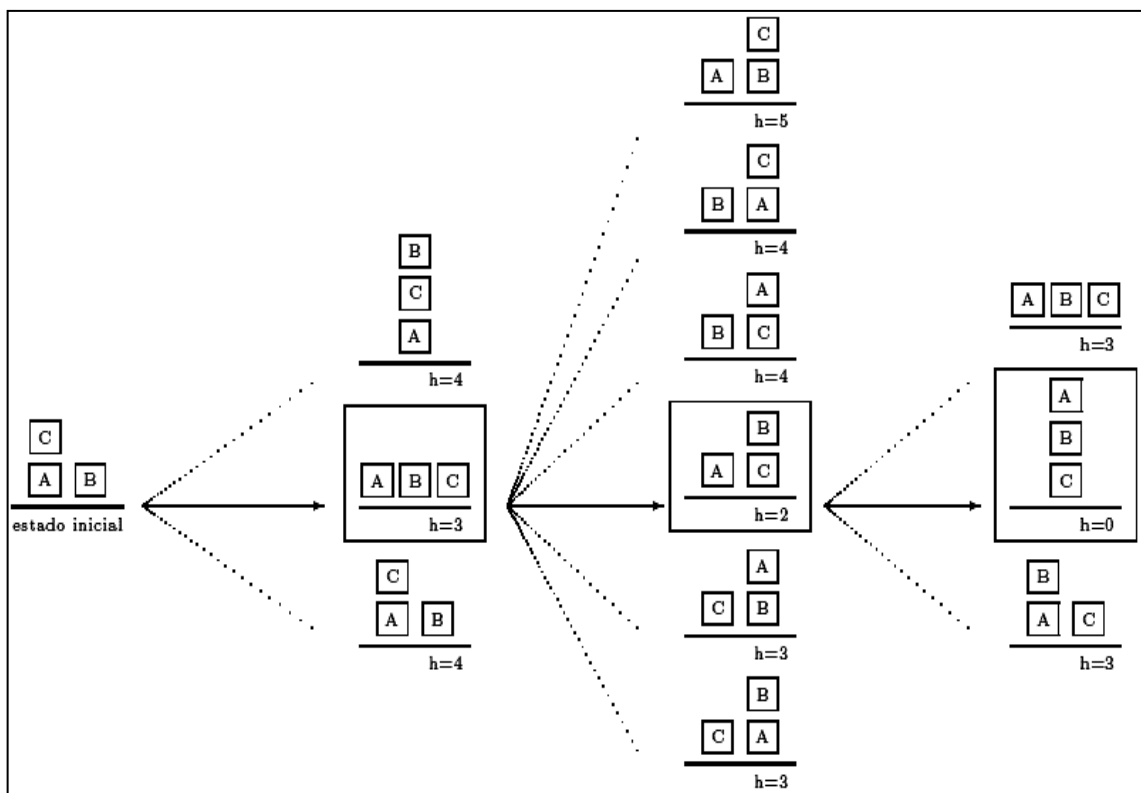
Uma função de avaliação pela melhor escolha é a **função heurística**, denotada por $h(n)$:

$h(n)$ = custo estimado do caminho mais econômico do nó n até um nó objetivo.

As funções heurísticas são a forma mais comum de aplicar conhecimento adicional do problema ao um algoritmo de busca, se n é um nó objetivo $h(n) = 0$. Uma função $h(n)$ será uma função **heurística admissível** se $h(n)$ nunca superestime o custo para alcançar o objetivo, conforme afirmam Russell e Norvig (2004).

Bonet et al. (1998) foram os primeiros a propor o uso de heurísticas de busca na geração de planos. A proposta consiste em realizar uma busca progressiva, a partir do estado inicial ao estado-objetivo, utilizando uma função heurística que estima a distância (custo) em passos do estado atual (intermediário) ao estado-objetivo. A proposta foi implementada no planejador *Heuristic Search Planner* (HSP), que participou da primeira IPC, com bons resultados. A Figura 4.7 mostra um exemplo de planejamento com busca heurística para o problema do mundo dos blocos.

Figura 4.7 - Busca heurística aplicada ao problema do mundo de blocos



Fonte: Adaptada de Silva (2003).

Os estados destacados são aqueles que possuem o menor valor definido por uma função heurística $h(s)$ em cada passo do processo de planejamento, ou seja, aqueles que aparentemente estão mais próximos do objetivo.

A função Heurística (h) estima o custo do caminho mais barato desde o estado atual até o estado final mais próximo. São específicas para cada problema. Por exemplo, encontrar a rota mais curta entre duas cidades: $h(n)$ é a distância em linha reta direta entre o nó n e o nó final. A Estratégia é expandir os nós que se encontram mais próximos do objetivo (uma linha reta conectando os dois pontos no caso de distâncias) e, desta maneira, é provável que a busca encontre uma solução rapidamente.

Neste trabalho o uso de Heurística será utilizado em um processo para refazer um plano, isso, quando for necessária a adição de ações em um plano que deve ser reparado. A aplicação de Heurística deve determinar o comprimento de subplanos em função da duração de cada ação, de forma escolher um subplano que tenha o menor comprimento em termos de duração. Este procedimento será necessário em função da restrição de tempo da duração de uma passagem.

4.6 Métodos de planejamento em ambientes não determinísticos

Em planejamento clássico, o ambiente do problema precisa possuir as seguintes características, ser Observável, Estático e Determinístico. Supõe-se que as descrições das ações são sempre corretas e completas. Nestas circunstâncias, um agente poderia planejar e depois executar o plano de olhos fechados. Mas para ambientes não determinísticos, existem alguns métodos de planejamento mais comuns usados para lidar com o não determinismo.

Em ambientes incertos, um agente deve usar seus sensores para descobrir o que está acontecendo no ambiente enquanto o plano estiver sendo executado, e modificar ou substituir o plano se algo inesperado acontecer. Os agentes precisam lidar com informações incompletas e incorretas.

A seguir serão apresentados brevemente alguns desses métodos.

4.6.1 Planejamento sem sensores (Não determinismo limitado)

Planejamento sem sensores, também chamado planejamento conformante, é um método que constrói planos sequenciais que devem ser executados sem percepção. O algoritmo de planejamento sem sensores deve assegurar que o plano atinja o objetivo em todas as circunstâncias possíveis, independente do estado inicial e dos resultados das

ações. O planejamento sem sensores se baseia na coerção ou a ideia de que o mundo pode ser forçado a entrar em um determinado estado, mesmo quando o agente só tem informações parciais a respeito do estado atual. A coerção nem sempre é possível e, portanto, o planejamento sem sensores, em geral, é inaplicável.

4.6.2 Planejamento condicional (Não determinismo Limitado)

O Planejamento condicional pode ser utilizado nos casos em que todos os prováveis efeitos não determinísticos das ações são previsíveis e existe a possibilidade de se construir planos que incluam ações de percepção. Também conhecida como planejamento de contingência, esta abordagem lida com o não determinismo limitado, construindo um plano condicional com ramificações distintas para as diferentes contingências que podem surgir.

4.6.3 Replanejamento ou reparo de plano (Não determinismo Ilimitado)

Nesta abordagem o agente pode usar qualquer uma das técnicas de planejamento (clássica, conformante, condicional ou probabilística) para construir um plano. Por meio do monitoramento de execução é possível julgar se o plano precisa ou não ser reavaliado. A revisão do plano ocorre quando algo sai errado; então é necessário fazer modificações nele (reparo de plano) ou realizar um novo planejamento a partir do estado atual (replanejamento). Pode-se definir o *replanejamento* como um novo processo de planejamento a partir do estado atual que apresentou uma falha durante a execução de um plano. Este conceito é adotado em todas as citações de *replanejamento* nesse documento. O *System for Interactive Planning and Execution Monitoring* (SIPE) (Wilkins, 1990) foi o primeiro planejador a lidar sistematicamente com o problema de replanejamento.

4.7 Conceitos de escalonamento

Planejamento tradicional trata com o problema de encontrar atividades para satisfazer um determinado objetivo. Escalonamento tradicional resolve o problema de alocação de atividades conhecidas para recursos limitados e com tempo limitado. Em muitos problemas da vida real, ambas as tarefas devem ser realizadas em conjunto, e, portanto, integrar o Planejamento ao Escalonamento é um tema de grande interesse de pesquisa especialmente na comunidade de planejamento. Esta integração geralmente significa a adição de restrições de tempo e de recursos para o problema de planejamento.

Normalmente a solução de problemas de planejamento tradicionais é difícil, e acrescentando tempo e recursos pode tornar o problema ainda mais difícil segundo Barták (2004).

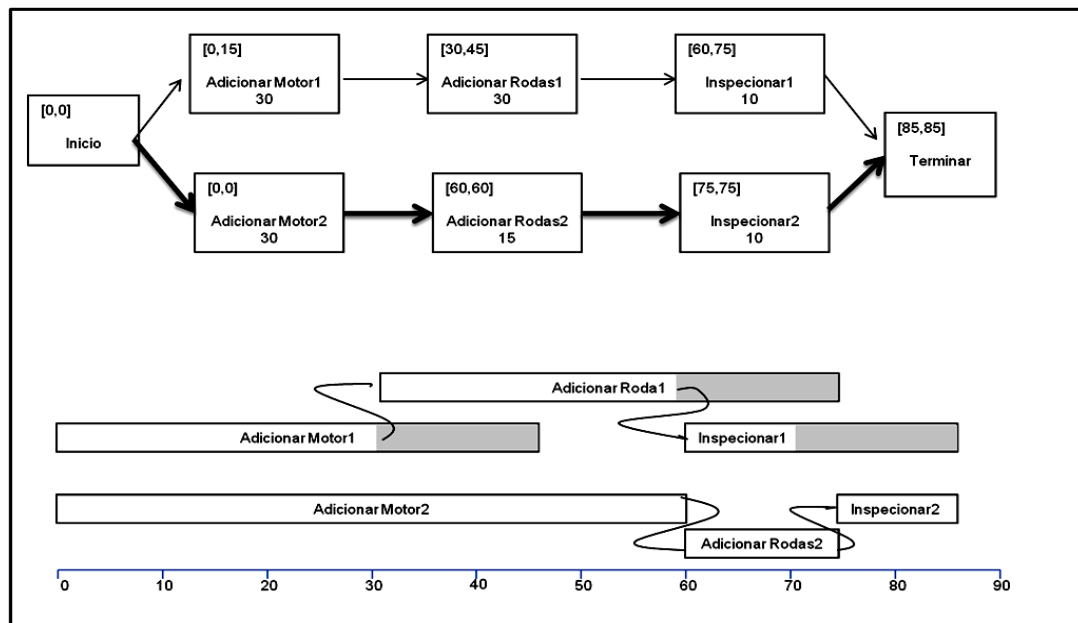
Por isso, alguns pesquisadores propõem manter planejamento e Escalonamento separados, tais como Srivastava e Kambhampati (1999). Em particular, o problema de planejamento é resolvido em primeiro lugar, o que gera um conjunto de atividades, e o problema de escalonamento é resolvido a seguir, alocando tempo e recursos para as atividades.

Segundo (Smith et al. 2000) o problema de escalonamento deve fazer algumas considerações:

- a) Raciocínio sobre tempo e recursos é o que compõe o núcleo do escalonamento;
- b) Problemas de escalonamento são quase sempre problemas de otimização, encontrar um conjunto de atribuições aumentando o intervalo entre a execução de tarefas;
- c) Problemas de escalonamento também envolvem escolhas. Estas escolhas não estão relacionadas apenas à ordenação de tarefas, mas também à seleção de quais recursos a consumir.

Um problema de escalonamento pode ser visto em linha de produção para montagem de dois carros, como foi apresentado em Russell e Norvig (2004). Uma solução para o problema de linha de produção parte inicialmente de um plano de ordem parcial, onde a duração de cada ação é dada na parte inferior de cada retângulo, como o primeiro e o último horários de início possíveis listados como [*PIP*, *UIP*] no canto superior esquerdo. A diferença entre esses dois números *PIP-UIP* é a folga de uma ação; as ações com folga zero estão no caminho crítico, mostrado com setas em negrito cuja duração total é a mais longa. A mesma solução é mostrada como uma linha de tempo. Retângulos em cor cinza representam intervalos de tempo durante os quais uma ação pode ser executada, desde que sejam respeitadas as restrições de ordenação. A parte não ocupada de um retângulo em cinza indica a folga. A Figura 4.8, mostra um exemplo de Escalonamento em linha de produção de uma fábrica.

Figura 4.8 - Escalonamento em linha de produção



Fonte: Adaptada de Russell e Norvig (2004).

4.8 Automação de planos nas operações de missões espaciais

De acordo com Chien et al. (1998), a tecnologia de Planejamento e Escalonamento oferece promessa considerável na automação de operações de planejamento e escalonamento de tarefas para veículos espaciais, o que envolve gerar uma sequência de comandos de baixo nível a partir de um conjunto de metas de alto nível de ciências e engenharia.

A automação de uma missão espacial ajuda a diminuir os riscos e custos da missão ao controlar interações de rotina da missão, além de reduzir o esforço operacional necessário e de eliminar falhas humanas segundo Koller et al. (2010). Há uma grande demanda para implementar métodos de planejamento e controle automático, devido a este conjunto de requisitos, que destacam a complexidade deste ambiente.

Esta necessidade de redução de custo pela comunidade espacial pode ser observada nos anais dos últimos congressos do *Congresso Internacional de Operações Espaciais (SPACEOPS)*, sendo citada, como referência nos seguintes trabalhos:

- a) De acordo Monham e Rudolph (2004), “Mais e mais gerentes de operações estão voltando suas atenções para a possibilidade de automatizar as operações de

missões espaciais dentro do segmento solo, com a expectativa de diminuir custos através da redução das equipes de controles de satélites”;

- b) De acordo Ferri et al. (2004), “O aumento do nível de automação tem sido identificado como um dos principais meios para reduzir os custos de operações” ;
- c) Ercolani et al, (2004) afirmam que “Durante os últimos anos, o objetivo do ESOC tem sido explorar caminhos possíveis para aumentar a automação das atividades de operações de satélites”.

A organização de atividades em uma missão espacial pode ser vista em três níveis de automação, apresentadas a seguir:

- a) Geração de planos de operação por operadores humanos;

Ainda pode-se encontrar na maioria das missões espaciais, onde especialistas são responsáveis pela geração das sequências de comandos, tomando as decisões e fazendo todas as considerações sobre os efeitos diretos e indiretos da execução de comandos em bordo;

- b) Geração automatizada de planos de operação;

Este tipo de automação utiliza planejadores automáticos com base em técnicas de IA para geração de plano, cabendo aos especialistas monitorar o processo de geração de planos, verificando falhas e escolhendo melhores soluções;

- c) Geração autônoma de planos de operação;

Aqui o próprio veículo espacial gera seus planos de operação com a capacidade de alterar o que foi previamente construído, permitindo maior capacidade de reagir aos eventos exógenos, otimizando o consumo de recursos. Entretanto, pode-se observar que poucas missões utilizaram planejamento embarcado, e o fizeram em caráter experimental.

Como já foi exposto, este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal a concepção de uma arquitetura abrangente das atividades de planejamento automático de missão espacial, integrando-se ao escalonamento de atividades, com a inclusão de técnicas de

replanejamento de plano de voo em tempo real, e tem como foco de aplicação o planejamento de planos de voo dos satélites rastreados pelo INPE. Com isso também contribuindo com a linha de pesquisa do INPE com interesse na expansão da automatização de controle das futuras missões espaciais, que estão previstas pelo cronograma macro do INPE e criar novas tecnologias aplicáveis ao CRC.

4.9 Uso de planejadores e escalonadores em missões espaciais

A automação das operações de solo em veículo espacial, usando as ferramentas automatizadas de planejamento e escalonamento se tornou mais popular nos últimos anos nas missões espaciais. A necessidade de adicionar e excluir atividades e seus respectivos recursos, rápida e facilmente, levou ao anseio de representar operações e atividades do veículo espacial com modelos reutilizáveis. Além disso, para cada mudança dos domínios de modelo de veículo espacial, a ferramenta de planejamento de leitura dos domínios pode se adaptar e evoluir para acomodar novas tecnologias necessárias.

Existe uma busca constante para se encontrar soluções automatizadas para a operação de missão. Um dos focos de estudo é a autonomia do segmento espacial com desenvolvimento de sistemas de controle de bordo inteligentes para diminuir as tarefas de solo, e também a automatização do segmento solo. Alguns sistemas de automação importantes e de destaque foram desenvolvidos ao longo das ultimas décadas. Alguns deles são descritos a seguir:

4.9.1 DCAPS - Data Chaser Automated Planning System. Rabideau et al., (1997)

A missão STS-85, lançada em agosto de 1997 no Space Shuttle transportou como cargas úteis um conjunto de instrumentos científicos desenvolvidos pela Universidade do Colorado, chamado de Data Chaser, com a finalidade principal de efetuar observações solares. O Data Chaser possuía um sistema de planejamento automatizado em solo, o Data Chaser Automated Planning System (DCAPS) de Chien et al. (2002), desenvolvido pela Universidade do Colorado em conjunto com o *Jet Propulsion Laboratory* JPL, um dos primeiros sistemas aplicáveis a uma única missão, fez uso de planejamento com IA executado em solo. A partir da segunda metade da década de 1990, procurou-se por *frameworks* genéricos de planejamento em solo, que pudessem ser reaproveitados em diferentes missões. No DCAPS, atividades e recursos são utilizadas para compor o modelo de domínio, cada atividade possui uma duração e um conjunto de

parâmetros, com isso modela os eventos que afetam o estado do sistema e as ações que o Data Chaser pode executar. Além disso, cada atividade pode conter um conjunto de “subatividades”, o que permite realizar planejamento hierárquico.

4.9.2 ASPEN -Automated Scheduling and Planning Environment. Chien et al. (2002)

Os profissionais do JPL do Instituto de Tecnologia da Califórnia Chien et al. (2002) desenvolveram um ambiente de planejamento automatizado denominado *Automated Scheduling and Planning Environment* (ASPEN). O ASPEN é um sistema reconfigurável e orientado a objeto de planejamento e escalonamento, sendo considerado como uma evolução do DCAPS que foi criado pelo JPL para ser um ambiente de desenvolvimento de aplicações de planejamento e escalonamento de propósito geral. ASPEN é um sistema que fornece um conjunto reutilizável de componentes de software que implementam os elementos comumente encontrados em sistemas complexos de planejamento e escalonamento, tais como:

- a) Uma linguagem de modelagem de expressiva restrição para permitir ao usuário definir, naturalmente, o domínio de aplicação;
- b) Um sistema de gerenciamento de restrição para a representação e manutenção da operação de veículo espacial e de restrição de recursos, bem como os requisitos de atividade;
- c) Um conjunto de estratégias de pesquisa para a geração e reparação do plano para satisfazer as duras restrições;
- d) Uma linguagem para representar as preferências do plano e otimizar essas preferências;
- e) A capacidade de fácil replanejamento, em tempo real;
- f) Um sistema para expressar o raciocínio temporal e manutenção de restrições temporais;
- g) Uma interface gráfica para a visualização de planos e Escalonamentos, para uso em sistemas de iniciativa mista, na qual o processo de solução de problemas é interativo.

O conhecimento de um veículo espacial é codificado no sistema ASPEN por meio de sete classes de modelo fundamentais: atividades, parâmetros, dependências entre parâmetros, restrições temporais, reservas, recursos e variáveis de estado. Estes sete componentes são usados para descrever o que um satélite pode e não pode fazer durante suas operações. Para modelar os veículos espaciais foi criada uma linguagem de modelagem customizada denominada Linguagem de Modelagem ASPEN, *Aspen Modeling Language* (AML).

Estes modelos são posteriormente mapeados para estruturas de dados que favorecem o processo de planejamento. O sistema ASPEN representa o problema de planejamento como um Problema de Satisfação de Restrições *Constraint Satisfaction Problem* (CSP). Para resolvê-lo, o sistema trabalha com uma vasta gama de algoritmos, incluindo algoritmos de busca construtiva e de busca local. A resolução de conflitos é realizada de forma iterativa por meio de métodos de reparo. Um conflito é definido como um conjunto de maneiras de se violar uma restrição de um plano, como por exemplo, o uso excessivo de um recurso, uma transição de estados ilegal ou uso excessivo de tempo.

O ASPEN foi utilizado em diversas missões. Rabideau et al. (1999) destacam o satélite de comunicações navais UHF *Follow-On One* (UFO-1), o satélite de sensoriamento remoto *Earth Observing One* (EO-1), e o satélite universitário *Citizen Explorer One* (CX-1).

4.9.3 EUROPA - Extensible Universal Remote Operations Planning Architecture. Frank e Jonsson (2003)

Frank e Jonsson (2003) criaram *Extensible Universal Remote Operations Planning Architecture* (EUROPA) uma biblioteca de classe e um conjunto de ferramentas para os planejadores de construção dentro de um paradigma de Planejamento Temporal baseado em restrição. Planejamento Temporal e Escalonamento baseada em restrição é um paradigma de planejamento baseado em uma noção explícita de tempo e um profundo compromisso com uma formulação baseada em restrições de problemas de planejamento.

Principal linguagem de modelagem de entrada do EUROPA é *New Domain Definition Language* (NDDL), uma linguagem de descrição de domínio para problemas de planejamento e escalonamento baseada em restrições. NDDL pode descrever uma série de conceitos baseados em variáveis e restrições. A representação NDDL inclui descrições

de estado e de atividade, como é comum em planejadores utilizando linguagens de modelagem tradicionais, como o PDDL.

Este paradigma tem sido aplicado com êxito numa ampla gama de problemas práticos de planejamento e tem um legado de sucesso em aplicações da NASA incluindo:

- a) Escalonamento de observação para o telescópio *Hubble* de Muscettola et al. (1998);
- b) Controle autônomo de *Deep Space One DS-1* de Muscettola et al. (1997);
- c) Planejamento de atividades em terra para Mars Exploration Rover MER de Ai-Chang et al. (2004);
- d) Controle autônomo de EO-1 (*Earth Orbiter 1*) de Tran et al. (2004).

O EUROPA teve como objetivo criar um sistema de planejamento, que pudesse ser facilmente integrável a outros sistemas e encapsulasse toda a lógica de planejamento e escalonamento, sem deixar de ser extensível para cada missão a que fosse aplicado e vem sendo usado em algumas aplicações de planejamento com sucesso, e foi estendido em uma segunda versão EUROPA II de Pedersen et al. (2005).

4.9.4 MEXAR – Mars-Express Scheduling Architecture - Cesta et al., (2004)

O Instituto de Tecnologia e Ciência Cognitiva do Conselho Nacional de Pesquisas Italiano o *Institute for Cognitive Science and Technology/National Research Council of Italy* (ISTC/CNR) em parceria com o ESOC da ESA desenvolveu uma arquitetura denominada *Mars-Express Scheduling Architecture* (MEXAR). Esta arquitetura é utilizada na missão da sonda orbital *Mars-Express* desde fevereiro de 2005.

Durante os primeiros seis meses de atividade da sonda orbital *Mars Express*, seus operadores identificaram um problema na perda de dados científicos, relacionado ao envio dos dados armazenados de carga útil: em determinados períodos era gerado um grande volume de dados de carga útil, que as janelas de visibilidade com a Terra não podiam transmitir. Para resolvê-lo foi contatado o grupo *Planning and Scheduling Team* (PST) do Conselho Nacional de Pesquisas Italiano (CNR), órgão que mantém relacionamento constante com a ESA.

O Grupo PST propôs o desenvolvimento de uma ferramenta utilizando técnicas de planejamento de IA, descrita em Cesta et al. (2004), para a geração automatizada de planos aptos a tratar o problema identificado. Uma primeira versão desta ferramenta, chamada *Mars EXpress Architecture*, foi testada no ambiente operacional da missão e passou a ser utilizada rotineiramente a partir de fevereiro de 2005 em uma nova versão denominada MEXAR2.

De acordo com Cesta et al. (2006), o uso do MEXAR2 trouxe um aumento de cerca de 50% na quantidade de dados científicos obtidos da Mars Express. A abordagem de desenvolvimento do MEXAR e MEXAR2 foi focada especificamente para a solução do problema da Mars Express, fazendo com que este planejador não seja facilmente aplicável a outras missões.

4.9.5 APSS - Activity Planning and Sequencing Subsystem (Ko et al., 2004)

Este subsistema faz parte do sistema de sequência e planejamento da missão *Mars Exploration Rover* (MER) , foi desenvolvido baseado na tecnologia de planejamento da IA e é responsável pelo planejamento da estratégia da missão, da observação científica, das atividades de engenharia e pelo envio de sequências de comando para a espaçonave.

4.9.6 ASE - Autonomous Science Experiment (Sherwood et al., 2004)

Este experimento iniciou o seu teste operacional a bordo da missão EO1 (*Earth Orbiter* 1). O software do ASE usa execução a bordo baseada em objetivos, tarefas robustas e planejamento contínuo. Também utiliza máquina de aprendizado e reconhecimento de padrões a bordo para aumentar radicalmente o retorno de dados científicos pela capacidade de selecionar descidas de dados de forma inteligente e reprogramação dos objetivos de forma autônoma. Desta forma, as funções de análise e planejamento da missão em solo são simplificadas reduzindo assim custos operacionais.

5 REPLANEJAMENTO EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Desde que os ambientes do domínio se comportem de acordo como as descrições de suas ações, executar um plano nos casos de informação completa ou ideal, sempre resultará em realização do objetivo. À medida que cada etapa é executada, o estado do ambiente será como o previsto, contanto que nada dê errado. Se ocorrer algo inesperado, significa que o estado do ambiente depois da realização de uma ação, não será o previsto. Mais especificamente, o segmento do plano restante falhará se qualquer uma de suas precondições não for cumprida. No uso dos componentes do plano, conforme descritos na seção 4.1.1, as condições exigidas são apenas as proposições protegidas por todas as relações causais que começam em uma etapa atual, ou antes, e que terminam nela ou depois.

Um agente de **monitoramento de execução** verifica suas percepções para ver se tudo está funcionando de acordo com o plano. Segundo Russell e Norvig 2004, outra ideia é verificar as precondições de cada ação, assim que ela é executada, ao invés de verificar as precondições de todo o plano restante. Isto é chamado de **monitoramento de ações**, é uma forma mais simples de monitoramento. Este método se aplica bem a sistemas realistas, onde uma falha de ação individual pode ser reconhecida e o agente verifica o ambiente para saber se a próxima ação funcionará. Outra forma mais complexa, ainda que mais efetiva, é chamada de **monitoramento de plano**, em que o agente verifica todo o plano restante. Por exemplo, se um agente robô emite um comando para o subsistema do motor para mover dois metros à frente, o subsistema pode relatar uma falha se o robô esbarra em um obstáculo não esperado.

Por outro lado, o monitoramento de ação é menos eficaz do que o controle da execução, por não olhar para frente e ver, que um estado atual inesperado fará com que uma ação falhe em algum momento no futuro. Estas formas de monitoramento exigem que as percepções forneçam informações suficientes para dizer se um plano, ou uma ação estão prestes a falhar. Em um ambiente inacessível, onde as condições relevantes não são perceptíveis, estratégias mais complicadas são necessárias para lidar com os desvios não detectados, mas potencialmente mais graves que o esperado.

Um agente de replanejamento sabe o que fazer quando acontece algo inesperado, ele chama um planejador para apresentar um novo plano que irá atingir o objetivo. Isso pode evitar gastar tempo demais, na tentativa de reparar o plano antigo, com a finalidade de encontrar um caminho partindo do estado inesperado atual e atingindo algum estado da sequência normal.

O monitoramento da execução e o replanejamento formam uma estratégia geral que pode ser aplicada a ambientes completamente e parcialmente observáveis. O agente de replanejamento, diferente do agente de planejamento, mantém o controle do segmento de plano restante não executado denominado *plano* e do plano original completo, chamado *plano-inteiro*. Ele utiliza o **monitoramento de ação**, ou seja, antes de executar a próxima ação do plano, o agente examina suas percepções para verificar se alguma precondição do plano, inesperadamente não foi satisfeita. Se isso tiver ocorrido, o agente tentará recuar um pouco, replanejando uma sequência de ações que deverá levá-lo de volta a algum ponto no plano original.

As causas da falha de um plano podem ser divididas em dois tipos, dependendo se é possível ou não prever as possíveis contingências:

- a) **Indeterminação limitada:** Neste caso, as ações podem ter efeitos inesperados, mas os possíveis efeitos podem ser enumerados e descritos como parte da descrição do axioma da ação. Por exemplo, o resultado de abrir uma lata de tinta pode ser descrito como sendo a disjunção dos seguintes casos: tinta disponível, uma lata de tinta vazia, ou uma lata vazando a tinta.
- b) **Indeterminação ilimitada:** Neste caso, o conjunto de possíveis resultados inesperados é extremamente grande para ser completamente enumerado, classificado e tabelado.

Sistemas controlados por planejadores, em problemas do mundo real, levam à necessidade de capacitar os planejadores a lidar com situações de falhas segundo Nareyek (2003). Um plano pode falhar quando mudanças em um mundo dinâmico fazem com que o estado do sistema não seja o esperado em um dado ponto da execução da tarefa, de maneira que uma ação não possa ser executada. O replanejamento aborda

técnicas para resolver este problema, garantindo que o agente deixe a situação de plano inválido e alcance seu conjunto de objetivos originais.

Em teoria, modificar um plano existente não é mais eficaz do que um replanejamento completo, a partir do estado atual, no pior caso. Porém, na prática, o reparo do plano pode ser mais eficaz, uma vez que uma grande parte do plano geralmente ainda é válida. Além disso, em muitos domínios pode ser mais caro mudar todo o plano por causa de compromissos com outros agentes baseados no plano original.

Alguns autores, como Nebel e Koeler (1995), afirmam que alterar um plano já existente é às vezes mais difícil do que o planejamento a partir do zero mas outros autores, tais como Chien et al. (2000) e Muscettola (1993) consideram a reparação do plano como uma solução melhor, como por exemplo, nas missões espaciais da NASA .

5.1 Agente de replanejamento

Um agente de replanejamento observa o ambiente para ver se tudo está funcionando de acordo com o plano. Este tipo de planejamento se faz em ambientes realistas, onde sempre poderá surgir alguma circunstância inesperada para a qual as descrições de ações do agente serão incorretas. De acordo com Russell e Norvig 2004, existem dois tipos de monitoramento de execução: uma forma simples, embora fraca, chamada monitoramento de ação, por meio da qual o agente verifica o ambiente para saber se a próxima ação funcionará, e uma forma mais complexa, mais efetiva e chamada monitoramento de plano, em que o agente verifica todo o plano restante.

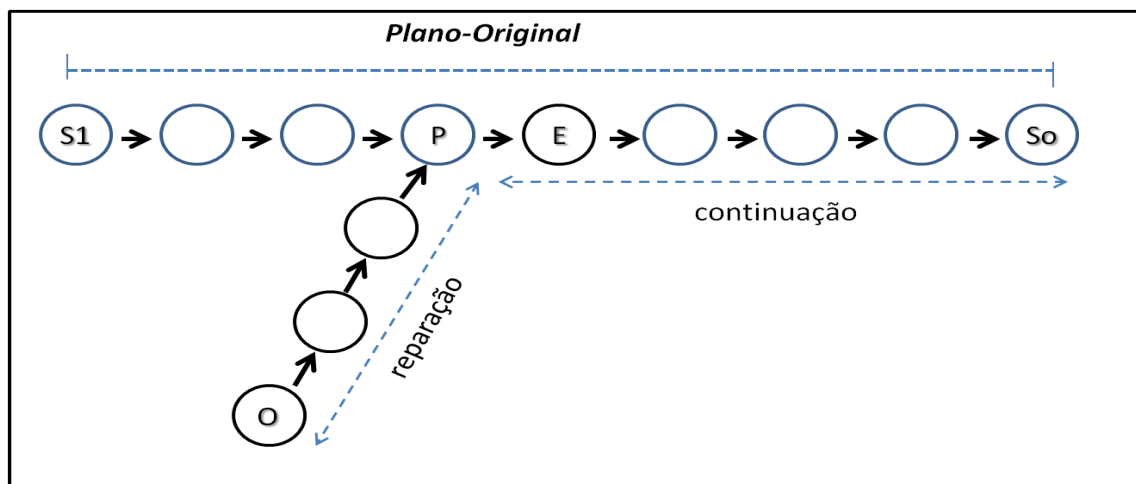
Um agente de replanejamento sabe o que fazer quando acontece algo inesperado: chama novamente um planejador para apresentar um novo plano que irá atingir o objetivo a partir de um novo estado inicial. Para evitar gastar tempo, em geral, o planejador tenta reparar o plano previamente gerado a fim de encontrar um caminho do estado inesperado atual de volta para a sequência normal do plano.

Um agente que realiza o monitoramento de ação e o replanejamento utiliza um algoritmo de planejamento completo em espaço de estados. Se as precondições da próxima ação não forem satisfeitas, o agente entrará em laço repetitivo em pontos do plano original, tentando encontrar um ponto p para planejar um caminho, chamado de *reparação*.

Obtendo sucesso o agente acrescentará a *reparação* e o final do plano depois de *p*, criando um novo plano.

A Figura 5.1 apresenta uma ilustração do processo de reparação. Antes da execução, o planejador apresenta um plano, chamado de *plano-original*, para ir de S_1 até S_o . O agente executa o plano até o ponto marcado com *E*. Antes de executar o plano restante, ele verifica as precondições e descobre que está no estado *O*, e não no estado *E*. Em seguida, ele chama o algoritmo de planejamento para apresentar a reparação, um plano para ir de *O* até algum ponto *P* no plano-original. O novo plano gerado é a concatenação de *reparação* e *continuação*.

Figura 5.1 - Modelo de reparação de plano

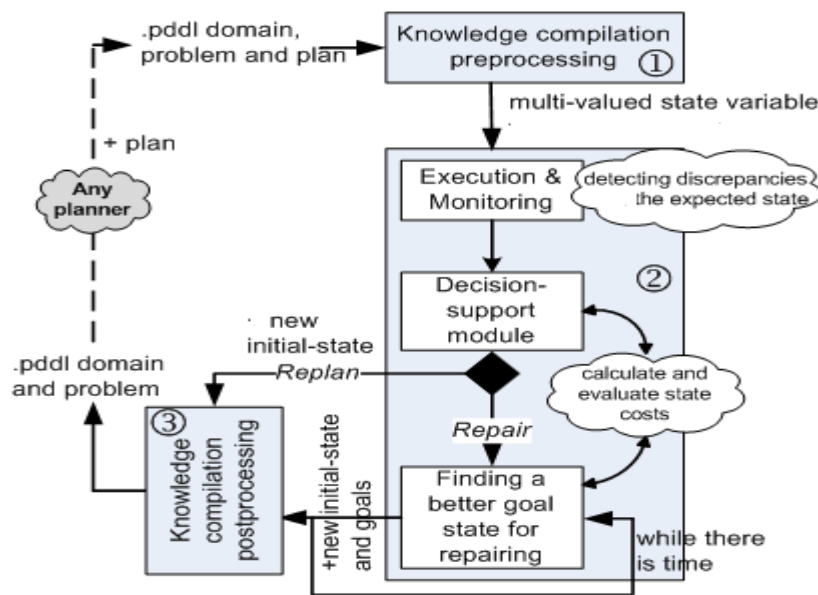


Fonte: Produção do autor.

5.2 A arquitetura de um agente de replanejamento

Em muitas situações durante a execução de um plano, surge a necessidade de corrigir as falhas, e normalmente há duas opções possíveis: replanejar a partir do zero ou reparação, ou seja, adaptar o plano original para o novo contexto. Um método eficaz para apoiar a tomada de decisão entre a reparação ou replanejamento foi apresentado no trabalho de Garrido et al. (2010), onde se calcula o custo de uma ponte entre o estado observado e qualquer outro estado meta alcançável no plano original. Este método de adaptação é dotado de um comportamento que a qualquer momento pode melhorar a qualidade do plano tanto em termos de estabilidade como de métrica. Na Figura 5.2 é apresentada essa estrutura e sua descrição em detalhes.

Figura 5.2 - Etapas principais um agente de replanejamento



Fonte: Adaptada de Garrido et al. (2010).

- a) Estágio 1 - Como os domínios de planejamento são normalmente codificados em um formato padrão PDDL ou em outras linguagens, sem uma clara definição de variáveis, usa-se uma fase de pré-processamento para traduzir essa codificação em um formalismo de variáveis de estado multivaloradas. A entrada é um problema e domínio em PDDL clássica, enquanto que a saída é uma coleção de arquivos que representam um problema multivalorado conforme especificado no planejamento. Neste estágio os autores utilizaram a ferramenta LAMA (Richter e Westphal, 2008) para traduzir e pré-processar as informações do domínio e do problema em PDDL, o módulo de tradução transforma a entrada PDDL em uma tarefa de planejamento em representação de domínio finito.
- b) Estágio 2 - Uma vez que o plano é executado e for encontrada uma discrepância pelo módulo de monitoramento, a fase de reparo do plano começa efetivamente. Intuitivamente espera-se reutilizar uma quantidade importante do plano original, minimizando, assim, o processo de adaptação. Neste módulo, começa-se, então, com a tradução do restante do plano original não executado em uma sequência linear de estados. O módulo de apoio à decisão calcula dois novos planos para resolver estas discrepâncias. Com base do plano original, estima e avalia o custo

de um plano para cada uma dessas duas situações, podendo-se optar por um mecanismo de fixação orientada a replanejamento ou por reparação.

- c) Estágio 3 - Após a segunda fase ter decidido entre replanejamento ou reparação, a terceira fase compila todas as informações necessárias para gerar um novo problema de planejamento a ser resolvido por um determinado planejador.

5.3 Técnicas de replanejamento

Nesta seção serão apresentadas técnicas gerais de replanejamento que envolvem vários conceitos em IA, tais como:

- a) Método independente de domínio para a adaptação de plano;
- b) Replanejamento dentro da janela contendo porções com limites temporais do plano que precisam ser revistos;
- c) Busca sistemática de planejamento por grafos;
- d) Busca local para grafos de ação, que são subgrafos particulares de um grafo maior de planejamento.

5.3.1 Uma técnica geral de replanejamento

Uma visão de técnica geral de replanejamento pode ser obtida, na publicação de Arangú et al. (2008), onde estão apresentados os conceitos e terminologia que estão envolvidos no processo de replanejamento e um algoritmo geral de replanejamento. A técnica é descrita seguindo notações e definições padrão da literatura. Esta seção resume as definições básicas utilizadas.

- a) Definição 1: *Problema de Planejamento*. É definido como uma tupla (I, A, G) , onde I é o estado inicial, A é um conjunto de ações durativas e G representa a metas superiores do problema. O tempo é modelado por meio de $R +$ e as relações de ordem " $<$ " e " $>$ " por ordem cronológica. Normalmente, o domínio das ações inclui todas as ações em A .

- b) Definição 2: Ação Durativa. Seja $a \in A$ uma ação durativa cujo início é tempo t_i e término é t_j . Os componentes que definem a são um conjunto de condições (*conditions*), a duração da ação (*duration*) e um conjunto de efeitos (*effects*) tal como definido na linguagem planejamento PDDL2.2 em Edelkamp e Hoffmann, (2004).
- c) Definição 3: *Link Causal*. Sejam ai e aj duas ações durativas $\in A$. A ligação causal CL , denota que ai gera a condição p para aj ; ai é dito ser uma ação produtora para aj e aj é dito ser uma ação consumidora de ai , representado como:
- $$(ai \xrightarrow{p} aj)$$
- d) Definição 4: Plano. Um plano $\pi = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ é uma lista de n ações durativas, parcial ou totalmente ordenado. Um plano é um plano válido π que é executável no estado inicial I e atinge o estado meta G .

Uma técnica de reparo de plano foi proposta por Garrido et al. (2010), onde as entradas do sistema são: um domínio de ações A , um problema P e do plano atual π . Esta técnica funciona da seguinte forma:

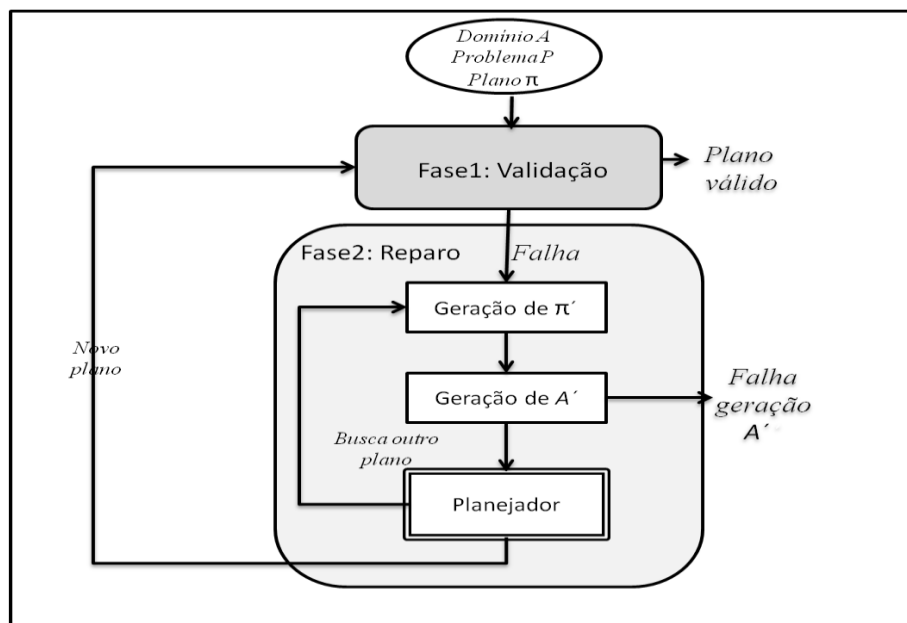
- a) Fase 1: Validação - é um processo iterativo que, em cada ponto de tempo t_k , ele verifica se o atual estado St_k satisfaz as ações podendo começar, continuar ou terminar a sua execução. O processo de validação termina em duas situações; ou porque todas as ações do plano foram satisfatoriamente verificadas, ou porque uma falha no plano foi detectada. Neste último caso, o algoritmo prossegue com a segunda fase.
- b) Fase 2: Reparo – A Figura 5.3 apresenta o processo de reparação que calcula o escopo da ação falha a_e no plano π e seleciona um conjunto de ações de A para corrigir a falha. O conjunto de ações selecionadas será referido como *Cand*, uma vez que representam o conjunto de ações candidatas a fazer parte do plano final. O núcleo do algoritmo de reparação é um processo iterativo. O esquema da

técnica geral para o reparo do plano calcula o conjunto de A' , para resolver π' , ou seja, a parte do π que foi removido em função da ação falha ae .

Em seguida, o conjunto *Cand*, é aumentado com o conjunto de ações em π , envolvido com a ação falha ae , através de um *link* causal mais as ações fora do domínio A , que podem ser potenciais produtoras para ae e potenciais consumidoras de ae , ou seja, as potenciais ações antecessoras e sucessoras de ae . Em geral, *Cand* é composto de ações de π que são afetadas pela falha, mais as ações fora do domínio A , que podem ser potenciais soluções. A ideia é manter as ações afetadas em π como candidatas e deixar o planejador tomar a decisão de reusá-las ou não para computar o plano final.

A seguir, calcula-se o conjunto A' , como $(\pi - Cand \cup Cand)$, onde $(\pi - Cand)$ é o conjunto de ações de π que deve estar obrigatoriamente no plano final, ou seja, o conjunto de ações que permanecem sem alteração em relação ao plano original. O conjunto $(A - A')$ conterá as ações desnecessárias, ou seja, ações que não serão consideradas para resolver o novo problema. Estas ações serão retiradas do domínio. Em seguida, ativa-se o Planejador com problema P e o novo domínio A' , Se o planejador é capaz de encontrar um plano, este plano é passado para o processo de validação para verificar se suas ações são executáveis, e assim o processo se repete em busca de um outro plano. A Figura 5.3 apresenta essa arquitetura.

Figura 5.3 - Esquema da Técnica Geral de Reparo de Plano



Fonte : Adaptada de Arangú et al. (2008)

5.3.2 Replanejamento com agente reativo

Um algoritmo de replanejamento proposto por Boella e Damiano (2002) foi desenvolvido para uma arquitetura de agente reativo que incorpora noções de Teoria da Decisão para determinar o compromisso do agente. A Teoria da Decisão considera alguns elementos fundamentais tais como 1) Um conjunto não vazio de possíveis estados do ambiente , a partir dos quais decisões devem ser tomadas; 2) Um conjunto não vazio de todas as possíveis decisões que podem ser tomadas. Do ponto de vista da teoria de decisão estatística, essas hipóteses podem ser simplesmente do tipo “o dado x pertence à classe C ”. A ideia é simples e clara com vários exemplos práticos, tais como:

- a) Uma imagem médica – “ela indica ou não a existência de uma determinada doença?”;
- b) Um sinal de radar recebido – “pode-se concluir pela presença ou não de um avião nas proximidades?”;

- c) Um valor de telemetria – “pode ele indicar ou não uma falha em algum subsistema de bordo de um satélite?”.

A arquitetura de agente é baseada no paradigma de planejamento proposto por Haddawy e Hanks. (1998), que combina planejamento por refinamento e teoria da decisão com uma noção de ação abstrata. Dada uma meta e um estado do mundo, o planejador é invocado em um plano parcial (ou seja, um plano no qual algumas ações são abstratas) e iterativamente refina-o, retornando um ou mais planos que maximizam a Utilidade Esperada² de acordo com as preferências do agente.

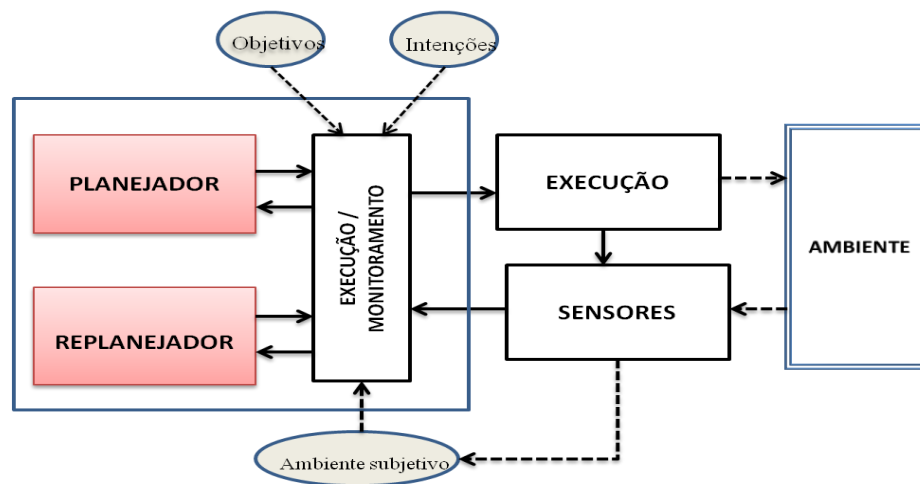
Um agente de replanejamento sempre está situado em um ambiente dinâmico, ou seja, o mundo pode mudar de forma independente a partir de ações do agente, e ações podem ter efeitos não determinísticos, isto é, uma ação pode resultar num conjunto de efeitos alternativos. Além disso, não há correspondência perfeita entre o ambiente de estado real e representação do agente dele.

Conforme afirmam Georgeff e Rao (1991), o agente é do tipo *Belief Desire Intension* (BDI) ou seja, o seu estado interno é definido por suas crenças sobre o mundo atual, seus objetivos e as intenções (planos) que formaram a fim de alcançar um subconjunto destes objetivos³. Crenças são as informações que o agente tem sobre o mundo, os Desejos são o estado de coisas que o agente gostaria de conseguir, e as Intenções são desejos que o agente se comprometeu a alcançar. Agentes BDI são visualizados como sistemas intencionais, ou seja, possuem estados mentais de informação e manipulam o conhecimento. A Figura 5.4 apresenta essa arquitetura e seus componentes.

² Utilidade esperada de um evento é a utilidade de seus possíveis resultados, ponderados por suas respectivas probabilidades, isto é, o valor esperado da utilidade de seus resultados. O conceito de utilidade é definido formalmente na teoria da decisão e na teoria microeconômica.

³ Agente BDI O modelo de software (crença-desejo-intenção) é um modelo de software desenvolvido para especialista em programação. Superficialmente caracterizado pela implementação de crenças, desejos e intenções de um agente, ele realmente usa esses conceitos para resolver um problema particular para agente de programação.

Figura 5.4 - A arquitetura agente reativo



Fonte : Adaptada de Boella e Damiano (2002)

Nesta arquitetura as setas tracejadas representam fluxo de dados, e as setas contínuas representam fluxo de controle. As intenções não são estáticas, e podem ser modificadas como resultado de redeliberação: se o agente detecta uma disparidade importante entre o estado inicialmente esperado e o estado atual observado, provocado por um plano, o agente revisa suas intenções através da realização de redeliberação. Como resultado, o agente está propenso a se comprometer com diferentes planos ao longo do tempo cada um, constituído de uma sequência diferente das ações.

O comportamento do agente é controlado por um *loop* de detecção em execução. Quando este ciclo é inserido em primeiro lugar, o módulo de deliberação é invocado sobre o objetivo inicial; a meta é comparada com os esquemas de plano contidos na biblioteca, e quando um esquema de plano é encontrado, ele é passado para o planejador para o refinamento. Este plano se torna a intenção atual do agente, e o agente inicia sua execução.

Após a execução de cada ação no plano, o módulo de detecção monitora os efeitos da execução da ação, e atualiza a representação do agente do ambiente. Em seguida, o módulo de meta-deliberação avalia a representação atualizada por meio de uma função execução/monitoramento: se o mundo atende às expectativas do agente, não há necessidade de nova deliberação, e a execução é retomada; caso contrário, se as intenções

do agente não estão mais adequadas para o novo ambiente, ao módulo de deliberação é atribuída a tarefa de modificá-las.

Se uma nova deliberação não é necessária, o módulo de meta-deliberação simplesmente atualiza o registro de execução e libera o controle para o módulo de execução, que executa a próxima ação. Ao contrário, se nova deliberação é necessária, ao módulo de deliberação é dado o controle que chama seu componente replanejamento sobre o plano atual com a tarefa de encontrar um plano melhor.

5.3.3 Reparo de plano como extensão do planejamento

Em alguns casos, reparar um plano é muitas vezes mais eficiente do que o planejamento a partir do zero, mas as técnicas de planejamento existentes são mais avançadas do que as técnicas de reparo de planos existentes. No entanto, são possíveis métodos simples para estender as técnicas de planejamento de modo que eles são capazes de reparar planos. Isto é possível, porque o plano de reparação consiste em duas operações diferentes: (i) remoção de ações, e (ii) a adição de ações. Van Der Krogt e Weerdt (2005) propuseram um método para realizar o replanejamento como uma extensão do planejamento, e afirmam que para reparar um plano, a adição de ações é semelhante ao planejamento, e a heurística de planejamento também pode ser usada para a remoção de ações, pelo processo chamado de *Refinamento Reverso*.

A construção de um plano pode ser visto como um refinamento iterativo do conjunto de todos os planos possíveis, e será mais bem detalhado nas seções seguintes. Este ponto de vista é chamado de planejamento por refinamento segundo Kambhampati (1997). A ideia principal do modelo de reparação de plano é que ele consiste em duas fases (que pode ocorrer em qualquer permutação, dependendo do método particular): a primeira fase envolve a remoção das ações em relação ao plano parcial atual, que inibe o plano de alcançar seus objetivos. A segunda fase é uma fase de planejamento regular, em que o plano parcial é estendido (refinado) para cumprir os objetivos.

5.3.4 Técnicas de refinamento e refinamento reverso de plano

A ideia por trás de planejamento por refinamento é começar com o conjunto de todas as sequências possíveis de ações e reduzir este conjunto, adicionando restrições até que todos os planos que correspondem às restrições são as soluções para o problema de

planejamento. As restrições podem impor ordem entre as ações ou impor que uma condição deva ser verdadeira em algum estado do plano. As restrições no planejamento por refinamento podem ser dos seguintes tipos:

a) Restrições de Ordem:

- Por precedência, onde um passo precede outro passo do plano, mesmo com outros passos entre eles;
- Por contiguidade, onde um passo deve preceder imediatamente outro, não existindo nenhum outro passo entre eles;

b) Restrição de vínculo causal – impõe que uma condição deve permanecer verdadeira sobre um intervalo;

c) Restrição de verdade pontual – a verdade de uma condição em um ponto particular do tempo deve ser preservada.

Durante o refinamento, não se armazena o conjunto de planos candidatos, mas apenas as restrições que são armazenadas em um plano, chamado plano parcial P . Dado um plano parcial P , o conjunto de candidatos que ele representa é denotado por candidatos (P). A estratégia de refinamento R é uma função que mapeia um plano parcial P a um conjunto de planos parciais $P = \{P1, \dots, Pn\}$, de tal modo que, para cada um dos novos planos parciais Pi , o conjunto candidato Pi é um subconjunto de candidatos (P). Se um Pi é uma solução do problema, então finaliza-se o processo, caso contrário, aplica a estratégia de refinamento R para obter uma coleção de planos parciais $\langle P, H' \rangle = R(P)$, em que cada plano parcial Pi possui uma restrição adicional em relação a P . Isto é feito selecionando-se um plano candidato de Pi' e verificando novamente se ele é uma solução, caso não seja, aplica-se novamente R .

O Algoritmo usa um histórico H para manter o controle dos refinamentos e a fim de evitar trabalho repetitivo e laços infinitos. O Algoritmo para refinamento de plano é apresentado na Figura 5.5 abaixo.

Figura 5.5 - Algoritmo para refinamento de plano

```
Algoritmo. REFINAMENTO ( $P, \pi, H$ )  
  
Entrada: Um plano parcial  $P$ , um problema  $\pi$ , e Histórico  $H$   
  
Saida: Uma solução para  $\pi$  ou falha  
  
Início  
  
1. Se candidato ( $P$ ) é vazio então  
    1.1. retorna falha;  
  
2. Se encontra solução ( $P, \pi$ ) então  
    2.1 retorna solução ( $P, \pi$ ) ;  
  
3. Selecionar estratégia de refinamento  $R$   
    3.1 Gerar novo conjunto de planos  $\langle P, H' \rangle$   
    =  $R(P)$ .  
  
4. Nao-deterministicamente selecionar um  
    componente  $P'_i \in P'$   
  
    Chamar REFINAMENTO ( $P'_i, \pi, H'$ )  
  
Término
```

Fonte: Produção do autor.

Para o reparo do plano, não se pode usar o mesmo modelo diretamente, porque uma estratégia de refinamento só pode adicionar restrições. Se esta restrição é relaxada, Van Der Krogt e Weerdt (2005) afirmam que o planejamento por refinamento pode ser visto como uma visão unificada do planejamento e da reparação de plano. Isto esconde o fato de que o reparo do plano constitui realmente duas atividades distintas: remoção de ações a partir do plano que estão obstruindo a alteração bem sucedida do plano, e a expansão do plano incluindo ações para resolver o problema de planejamento.

A ideia principal desse modelo de reparação plano é que o reparo de plano consiste em duas fases, que podem ocorrer em qualquer ordem, dependendo do método particular: a primeira fase envolve a remoção das ações em relação ao plano parcial atual, que inibe o plano de alcançar seus objetivos. A segunda fase é uma fase de planejamento regular, em que o plano parcial é estendido (refinado) para cumprir os objetivos.

Uma extensão do modelo de refinamento de plano que permite estratégia de refinamento reverso a ser empregada, é encontrada no algoritmo proposto em Van Der Krogt e Weerdt (2005) e apresentado na Figura 5.6 , para incluir uma estratégia de refinamento reverso para reparo de plano.

Figura 5.6 - Algoritmo para reparo de plano

```

Algoritmo . REPARO ( $P, \pi, H$ )
Entrada: Um plano parcial  $P$ , um problema  $\pi$  e um  $H$  Histórico
Saida: Uma solução para  $\pi$  ou falha

Início
1. Se candidato ( $P$ ) é vazio então
    retorna falha;
2. Se encontra solução ( $P, \pi$ ) então
    retorna uma solução solução ( $P, \pi$ ) ;
3. Se escolher Refinamento Reverso então
    Seleciona estratégia Refinamento Reverso  $D$  e gera
    novo conjunto de planos  $\langle P, H' \rangle = D(P, H)$ .
4. Senão
    Seleciona estratégia Refinamento  $R$  e gera novo
    conjunto de planos  $\langle P, H' \rangle = R(P, H)$ .
5. Nao-deterministicamente selecionar um componente  $P_i \in P$ 
    Chamar REPARO ( $P_i, \pi, H'$ )
Término

```

Fonte: Produção do autor.

5.4 Heurística de refinamento reverso

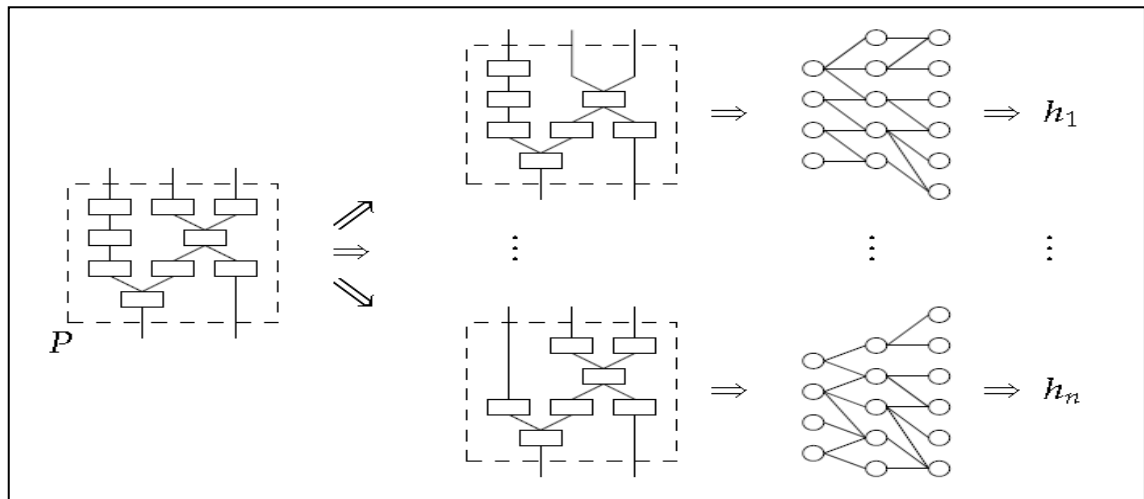
O problema do uso de métrica de reparação de plano foi abordado em Gerevini et al. (2003), onde os elementos da vizinhança na região de reparo são considerados de acordo com uma função de avaliação de ação E . Esta função é usada para estimar o custo da adição $E(a)^i$, ou da remoção $E(a)^r$, de um nó qualquer de uma ação a no plano parcial a ser gerado ou adaptado. Em geral, E consiste na somatória de termos ponderados, avaliando os aspectos da qualidade do plano atual que são afetados pela adição ou

remoção de a , os termos são: $Custo_execução(a)$, $Custo_Busca(a)$, $Custo_Temporal(a)$.

A fim de gerenciar adequadamente os problemas de planejamento dinâmico a função E foi estendida para incluir um termo de avaliação $D(\pi, \pi_0)$ adicional que tem o propósito de penalizar a inserção e remoção de ações que aumentem a distância do plano parcial π atual, sob a adaptação do plano de entrada π_0 .

Um método que pode reutilizar uma heurística de planejamento existente para se incorporar em reparação de plano em planejadores foi proposto por Der Krogt e Weerdt (2005). Esse método utiliza uma heurística arbitrária de planejamento que é usada na estratégia de refinamento reverso e espera-se que ela possa avaliar os planos parciais para a seu encaixe, ou seja, atribuir um valor a um determinado plano parcial que indica o quão perto ele está de uma solução. A Figura 5.7 apresenta um modelo de refinamento reverso de plano com uso de Heurística.

Figura 5.7 - Heurística de refinamento reverso.



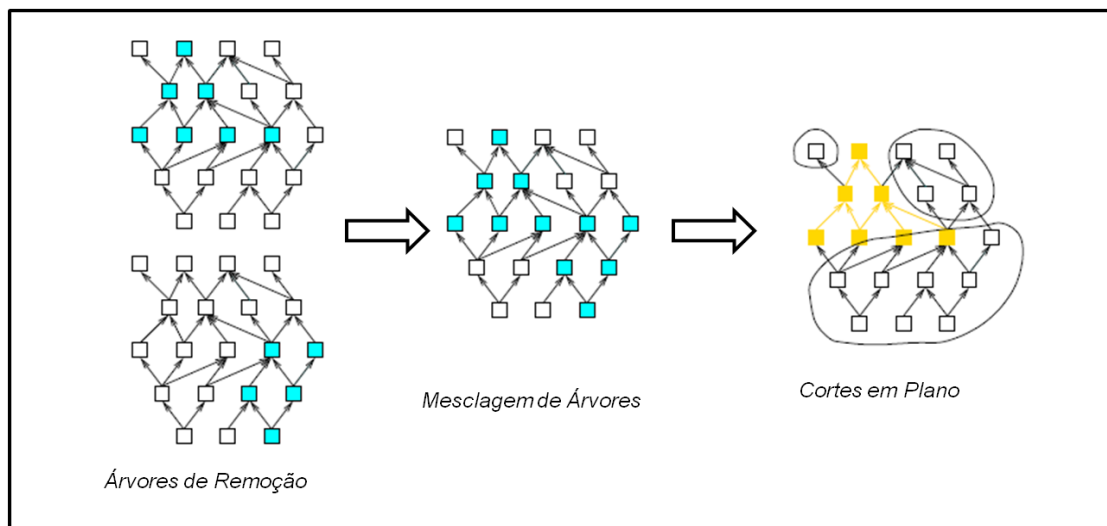
Fonte: Adaptada de Van der Krogt e Weerdt (2005)

Neste modelo é computada uma série de planos resultantes da remoção de ações de um plano P . Para cada um dos planos resultantes, é usada a heurística de planejamento escolhida (por exemplo, heurística de planejamento em grafo) para estimar a quantidade de trabalho necessário para transformar um plano em um plano válido, ou seja, para cada

um destes planos, um valor heurístico é calculado. O plano que tem o melhor (menor) valor heurístico é selecionado e a heurística de planejamento (refinamento) é usada para completar este plano. Note-se que uma vez que o plano inicial P já foi refinado, só se aplica a estratégia de refinamento escolhida, para finalizar o processo.

A estratégia completa de refinamento reverso funciona da seguinte forma: começa-se calculando as profundidades das árvores de remoção. As Árvores de remoção que se sobrepõem são mescladas, e para cada árvore retirada mesclada o plano resultante é calculado. Esse procedimento é ilustrado na Figura 5.8.

Figura 5.8 - Remoção de subplanos por heurística



Fonte: Adaptada de Van Der Krogt e Weerd (2005).

Para os planos resultantes, consulta-se a heurística de planejamento para obter uma estimativa do custo de estender o plano para um plano válido. Assim, a heurística de planejamento é usada para selecionar o candidato mais promissor (se tal candidato existir). Este candidato é então passado para a estratégia de refinamento, a fim de ser concluído. Se isso não for possível, os outros candidatos são julgados, até que todos os candidatos deste nível sejam removidos.

Uma heurística para escolher o melhor plano quando o seu **custo (cabeça) + custo (cauda)** for o melhor, foi proposta em Garrido et al. (2010). A cabeça e a cauda são as duas extremidades opostas de um plano considerando o ponto central, como o ponto onde ocorreu a falha. O custo é calculado de acordo com o problema de métrica. Como

geralmente é feito em heurística, avalia-se o custo do plano em termos de custo real (para a cauda) e uma estimativa (para a cabeça). A *função Custo* é calculada aplicando o *algoritmo de Dijkstra*⁴ e no nosso caso, representa o custo entre um estado inicial e um objetivo. O algoritmo de Dijkstra identifica, a partir de um vértice do grafo, qual é o custo mínimo entre esse vértice e todos os outros do grafo.

5.5 Análise da estabilidade do plano: replanejamento versus reparo

O conceito "Estabilidade do Plano" é utilizado para se referir a uma medida da diferença que um processo induz entre um plano original (origem) e um plano novo (alvo). Em geral, considera-se casos em que o novo plano destina-se a resolver um problema diferente, embora, relacionado com aquele a ser resolvido pelo plano original. Isto significa que haverá inevitavelmente uma diferença entre os planos. Existe interesse em alcançar a estabilidade do plano, ou seja, uma diferença mínima entre dois planos, a fim de preservar o conteúdo da informação que um plano contém. Para esta finalidade, um plano deve ser considerado mais estável se ele está próximo de outro, não só em termos dos passos que ele contém, mas também em termos de ordem desses passos.

Uma situação em que os problemas de planejamento podem mudar durante a execução ocorre no plano da observação por satélite segundo Frank et al. (2004), onde novos pedidos de observação podem surgir durante a execução de um plano. Em tais situações, o plano original pode ou não ser executado, mas deve ser adaptado para responder à nova situação. O reparo do plano significa o trabalho de adaptar um plano existente a um novo contexto, não perturbando o plano original tanto quanto possível.

Embora uma mudança inesperada no contexto possa surgir a qualquer momento durante a execução de um plano, parte do plano que já tenha sido executada não pode ser retrocedida. Pode-se, então, sempre se considerar o problema, como se o estado atual fosse o estado inicial e o resto do plano não executado fosse como todo do plano original. Mais formalmente:

⁴ O algoritmo de Dijkstra, concebido pelo cientista da computação holandês Edsger Dijkstra em 1956 e publicado em 1959, soluciona o problema do caminho mais curto num grafo dirigido ou não dirigido com arestas de peso não negativo.

Definição: Um problema de planejamento dinâmico é uma tupla (I, G, π_0, I', G') onde π_0 é um plano que atinge o objetivo G do estado inicial I e I' é um novo estado inicial da qual o novo estado objetivo G' deve se atingido.

Deve-se assumir que os domínios onde se trabalha são dinâmicos, mudanças podem ocorrer no estado inicial ou nas metas, mas são relativamente pequenas a cada ocorrência de mudança. Estas mudanças podem se manifestar como contradições entre os estados esperados e observados do mundo, ou como uma mudança nas metas a serem alcançadas pelo plano.

Ao substituir um plano uma consideração importante é o plano de estabilidade. Em Fox et al. (2006), os autores compararam duas estratégias alternativas para alcançar o reparo estável de um plano: um é simplesmente para voltar a planejar a partir do zero e o outro é adaptar o plano existente ao novo contexto, eles demonstram empiricamente que a estratégia de reparo de plano atinge mais estabilidade do que replanejamento e pode produzir mais eficientemente planos reparados que o replanejamento.

5.5.1 Estabilidade do plano

Medir a diferença entre dois planos é difícil, mesmo porque um plano pode compartilhar das mesmas ações que o outro, mas elas estão organizadas em uma ordem diferente, assim não fica totalmente claro se os planos devem ser considerados semelhantes ou não.

Definimos uma medida da diferença entre dois planos como:

Definição: Dado um plano original, π_0 , e um novo plano, π_1 , a diferença entre π_0 e π_1 , $D(\pi_0, \pi_1)$, é o número de ações que aparecem em π_1 e não em π_0 mais o número de ações que aparecem em π_0 e não em π_1 .

Supõe-se que uma definição assimétrica é usada, onde somente o número de ações que aparecem no novo plano e não no plano original são contados. A simetria dessa definição é importante, assim como mostra o seguinte exemplo: suponha-se que uma definição assimétrica é usada, onde somente, é contado o número de ações que aparecem no novo plano e não as que aparecem no plano original.

Vamos examinar o exemplo extraído de Fox et al. (2006), Seja um plano π_0 que contém uma sequência de 12 ações *drive* levando um pacote p de Roma para Glasgow.

As ações são:

- a) (drive p Roma Florence);
- b) (drive p Florence Bologna);
- c) (drive p Bologna Brécia);
- d) (drive p Londres Glasgow).

Supor que se muda o objetivo, de modo que o pacote deve ser entregue em *Edinburgh* em vez de *Glasgow*. O plano, π_1 resulta então da estratégia de adaptação, a ação de transporte final, é substituído por (*drive p Londres Edimburgo*), enquanto que o resto do plano permanece inalterado.

Outra estratégia pode resultar no plano π_2 , que é o resultado de **replanejamento**, onde toda a sequência de ações *drive* é substituída por (*FLY p Roma Edimburgo*)

O valor $D(\pi_0, \pi_1)$ é 1. Pode ser visto que sob a definição assimétrica $D(\pi_0, \pi_1) = D(\pi_0, \pi_2)$, mas o plano π_2 é claramente substancialmente diferente do plano π_1 .

Embora eles tenham o mesmo valor de D , π_2 não pode ser dito tão estável em relação ao π_0 como é π_1 , uma vez que π_2 não contém ações em comum com π_0 , enquanto π_1 contém 11 ações comuns.

Sob a definição simétrica $D(\pi_0, \pi_1) = 1$, enquanto $D(\pi_0, \pi_2) = 12$, que é uma reflexão muito mais realista da sua relativa estabilidade.

Definição Estabilidade de plano: Dado um problema de planejamento dinâmico (I, G, π_0, I', G') , uma estratégia de planejamento, P_1 , alcança maior estabilidade do plano do que uma estratégia de planejamento P_2 , se os planos produzidos por P_1 e P_2 , π_1 e π_2 , respectivamente, satisfizerem $D(\pi_0, \pi_1) < D(\pi_0, \pi_2)$.

Em Fox et al. (2006), os autores apresentam argumentos para apoiar a alegação de que a Estabilidade de plano é uma propriedade valiosa, eles demonstram empiricamente que a

estratégia de reparo de plano atinge mais estabilidade que o replanejamento pode produzir planos reparados mais eficientemente que por replanejamento.

5.6 Replanejamento de planos de operações em missões espaciais

As agências espaciais internacionais, tais como a NASA, estão trabalhando para o objetivo de estabelecer uma presença virtual no espaço através de frotas heterogêneas de exploradores robóticos conforme citado em Muscettola et al. (1998). Um dos principais motivos de Muscettola et al. (1998) se apresentarem em apoio a este objetivo, é uma série de descobertas no final de 1990 que sugerem novas possibilidades para a vida no espaço. Missões espaciais para confirmar ou negar tais descobertas são extremamente dispendiosas, tendo valores excedendo a bilhões de dólares, e exigindo uma equipe de solo de 100 a 300 pessoas durante a missão. A solução que a NASA visualiza é o uso de *Agentes Remotos*, pequenos exploradores capazes de interagir de forma contínua e robusta com um ambiente incerto e muitas vezes a priori desconhecido. O objetivo é reduzir o custo para menos de 100 milhões de dólares para uma missão a ser desenvolvida em 2-3 anos, e operada por uma pequena equipe de terra.

Os autores em Muscettola et al. (1998) identificam quatro propriedades principais do domínio da nave espacial.

Em primeiro lugar: *uma nave espacial deve realizar operações autônomas por longos períodos de tempo sem intervenção humana.*

Isto é importante, por exemplo, para sondas a grande distância, para as quais o atraso de comunicação é proibitivamente grande, ou quando as sondas estão em eclipse com um planeta.

Em segundo lugar: *as operações autônomas devem garantir o sucesso, dado prazos limitados e limitações de recursos.*

Os prazos em curta duração podem ocorrer, por exemplo, quando um asteroide passa perto, ou um cometa mergulha em um planeta.

Em terceiro lugar: *naves espaciais são caras e muitas vezes são projetadas com uma única missão em mente.*

Portanto, as operações da nave espacial requerem alta confiabilidade. A sonda deve ser capaz de detectar e compensar a falha de hardware, pois o estado do veículo espacial só é observável a um alcance limitado.

Uma nave espacial típica tem um ou mais computadores de voo, uma série de sensores sofisticados (giroscópios, sensores de estrelas), atuadores (propulsores, motores) e instrumentos científicos (câmeras, equipamentos de medição). Estes sistemas interagem uns com os outros, e a nave espacial deve perceber os processos simultâneos que estão acontecendo. Por exemplo, enquanto uma foto é tirada, o motor deve estar desligado, ou ele vai produzir muita vibração.

Um exemplo é apresentado em Van Der Krogt (2005), onde uma sonda espacial está voando para um cometa para tirar fotos e uma série de medidas, tais como a quantidade de radiação, a densidade do núcleo, ou outras características de interesse para os cientistas na Terra. Um plano simplificado para esta sonda espacial, como mostra a Figura 5.9, pode parecer da seguinte forma:

Figura 5.9 - Plano simplificado para uma sonda espacial

1. Ative o propulsor esquerdo e vire 45 graus, de frente para o cometa
2. Vire os painéis solares de face para o sol
3. Desligue o motor principal
4. Ative o equipamento de medição
5. Tire as fotos nos momentos adequados
6. Desligue o equipamento de medição no momento apropriado
7. Ative o motor principal
8. Ative o propulsor esquerdo e vire 135 graus, em direção à Terra
9. Ligue os painéis solares de face para o sol
10. Envie fotos e medições

Fonte: Adaptada de Van Der Krogt (2005).

Uma falha típica pode ser mau funcionamento dos motores que dirigem os painéis solares, fato que será detectado quando a sonda quiser executar a etapa dois do seu plano. Isto leva a uma diminuição da potência disponível, e uma maior procura de energia da bateria. Supondo que não haja bateria suficiente para executar integralmente esse plano

então ele tem de ser adaptado. Neste caso, uma solução pode ser: *desligar sistemas adicionais que estão sendo utilizados, mas não são estritamente necessários para o êxito de tirar as fotos e medições. Possivelmente, poderemos ter que usar os propulsores para mover toda a nave espacial de tal modo que os painéis solares estejam voltados ao sol para recarregar as baterias, antes de enviar os dados acumulados para a terra.* O plano adaptado, com novas ações em negrito, como mostra a Figura 5.10 poderia ter o seguinte formato:

Figura 5.10 - Plano reparado para uma sonda espacial

1. Ative o propulsor esquerdo e vire 45 graus, de frente para o cometa.
2. Desligue o motor principal, bem como sensores e sistemas que não são estritamente necessárias.
3. Ative o equipamento de medição
4. Tire fotos nos momentos adequados
5. Desligue o equipamento de medição no momento apropriado
6. Ative o motor principal
7. Ative o propulsor esquerdo e vire 90 graus, na direção do Sol.
8. Carregue as baterias por completo
9. Ative propulsor esquerdo e virar 45 graus, em direção à Terra
10. Envie fotos e medições

Fonte: Adaptada de Van der Krogt (2005)

A ESA, a Agência Espacial Europeia, também tentou aplicar planejamento e reparação de plano para missões espaciais. No entanto, essa missão Beagle 2 (ESA, 2004) foi perdida quando tentou pousar na superfície marciana. Se não fosse isso, o planejamento teria procedido em um cenário de iniciativa mista, devido às interações muito complexas entre subsistemas. Cientistas deveriam criar uma proposta de plano e submeter a um validador de plano automático chamado (*plan validation*) Val de Howey et al. (2004), que verificaria se havia inconsistências, após isso, os cientistas chegariam a um outro plano. No futuro, o validador pode ser estendido e propor como reparar planos. No

entanto, é mais provável que um plano semelhante seja aceito pelo utilizador do que aquele que é completamente diferente. Esta é outra razão para a utilização de métodos de reparação de plano que tentam produzir planos que são semelhantes aos iniciais. Nos capítulos seguintes serão apresentadas algumas aplicações de replanejamento de planos em missões espaciais.

5.6.1 ASPEN -*Automated Scheduling and Planning Environment* (Chien et al., 2002)

Como já apresentado no capítulo anterior, no ASPEN nas experiências científicas e procedimentos de operações é permitida a geração automatizada de sequências de ações para veículos espaciais. Usando uma técnica chamada reparação iterativa, ASPEN classifica as violações de restrição e tenta reparar cada uma executando uma operação de planeamento, ou escalonamento. Deve decidir sobre quais conflitos resolver em primeiro lugar e que método de reparo tentar para o dado conflito. ASPEN está atualmente sendo utilizado no desenvolvimento de sistemas de planeador / escalonador automatizados para vários veículos espaciais, incluindo o UFO-1 satélite de comunicações navais *Citizen Explorer* (CX1), bem como para as operações *Rover* planetários e automação de antena de sistemas terrestres.

No ASPEN, o principal algoritmo para planeamento automatizado é baseado em uma técnica chamada reparação iterativa (Zweben et al., 1994). Durante o reparo iterativo, os conflitos na agenda são detectados e tratados a um determinado tempo, até que não existam conflitos, ou um limite de tempo definido pelo usuário seja excedido. Um conflito é uma violação de uma reserva, de dependência de parâmetro, ou de restrição temporal. Os conflitos podem ser reparados por meio de vários métodos pré-definidos. Os métodos de reparação são: mover uma atividade; adicionar uma nova instância de uma atividade; excluir uma atividade; detalhar uma atividade; abstrair uma atividade; fazer uma reserva de uma atividade; cancelar uma reserva; conectar uma restrição temporal; desconectar uma restrição temporal; e alterar um valor de parâmetro. O algoritmo de reparo pode usar qualquer um desses métodos na tentativa de resolver um conflito.

O ASPEN organiza as suas buscas em torno de vários tipos de restrições que devem reter os planos válidos. O ASPEN, em seguida organiza em torno de cada tipo de restrição,

uma classificação das maneiras em que a restrição pode ser violada. Essas violações são chamadas conflitos. Há um conjunto de métodos de reparação organizado em torno de cada tipo de conflito. O espaço de pesquisa consiste de todos os métodos possíveis de reparação aplicados a todos os possíveis conflitos em todas as ordens possíveis.

O algoritmo de reparo iterativo procura o espaço de possíveis escalonamentos, tomando decisões em certos pontos escolhidos, e modifica o escalonamento com base nessas decisões. Os pontos de escolha são:

- a) Seleção de um conflito;
- b) Seleção de um método de reparação;
- c) Seleção de uma atividade para o método de reparação escolhido;
- d) Seleção de uma hora de início da atividade escolhida;
- e) Selecionando uma duração para a atividade escolhida;
- f) Seleção prazos para reservas;
- g) Seleção de uma decomposição para detalhar;
- h) Parâmetros de Seleção para mudar;
- i) Seleção valores para os parâmetros.

Dado um escalonamento com um conjunto de conflitos de todos os tipos, o primeiro passo no algoritmo iterativo de reparação consiste em selecionar um dos conflitos a ser atacado. Em seguida, um método é selecionado para reparar o conflito. É definida a eventual reparação de métodos como:

- a) Mover uma atividade existente para um novo local;
- b) Criação de uma nova atividade e inserção em um local;
- c) Exclusão de uma atividade existente;
- d) Conectando uma restrição temporal entre duas Atividades;

- e) Desligar uma restrição temporal entre duas atividades;
- f) Detalhamento uma atividade;
- g) Abstraindo uma atividade;
- h) Fazer reservas de uma atividade;
- i) Cancelamento de reservas de uma atividade;
- j) Ligação à terra um parâmetro em uma atividade;
- k) A aplicação de uma função de dependência entre dois Parâmetros.

Como trabalho de melhoria, foi proposto pelos autores Chien et al. (2002) a inclusão e integração do planejamento de reparo com a execução do plano. A ideia é replanejar continuamente em torno de informações atualizadas vindo de controle da execução. Como um sistema embarcado, ASPEN permitiria resposta rápida a eventos imprevistos com pouca ou nenhuma interação humana.

Atualmente ASPEN contém várias inovações que não estão disponíveis em outros sistemas de planejamento e Escalonamento em uso. Entre os quais, os mais importantes são:

- a) Linguagem de Modelagem fácil de usar - A linguagem de modelagem ASPEN foi desenhada por especialistas não pertencentes à área de IA, para ser fácil de usar. O sistema não requer nenhum conhecimento do usuário nas áreas de programação de computadores, planejamento ou escalonamento;
- b) Framework reconfigurável - ASPEN contém uma arquitetura genérica que permite que o usuário escolha entre vários motores de busca diferentes e algoritmos de propagação para otimizar o processo de planejamento;
- c) Autonomia escalonada - ASPEN contém um algoritmo iterativo de busca e reparação que permite ao usuário interagir com o Escalonamento e replanejar de forma rápida e eficiente;

- d) Replanejamento e resposta em tempo real - ASPEN permite o replanejamento durante a execução do plano. Este recurso permite o planejamento contínuo em tempo real para veículo espacial a bordo e outras aplicações embarcadas.

5.6.2 Planning and Replanning for a Constellation of Agile Earth Observation Satellites – (Grasset et al. – 2011)

O contexto do trabalho é o projeto europeu de defesa *Multinational Imaging System* (MUSIS) baseado no espaço para vigilância, reconhecimento e observação e mais precisamente a gestão dos ágeis satélites MUSIS que estão equipados com instrumentos ópticos de observação de alta resolução. O sistema multinacional de imagem baseado no espaço (MUSIS) é um programa de próxima geração das forças armadas europeia. O sistema está programado para começar serviços a partir de 2015.

O programa MUSIS foi inicialmente lançado por seis estados membros da União Europeia, incluindo a Bélgica, Alemanha, Grécia, França, Itália e Espanha, enquanto a Polônia também aderiu ao programa em dezembro de 2010. Ele permitirá que as nações envolvidas no programa compartilhem imagens de vários países usando satélites militares, em um segmento comum de usuário genérico em solo, de acordo com as regras acordadas.

Como de rotina, esses satélites são gerenciados a partir do solo por um sistema de planejamento de missão que recebe solicitações de usuários de observação, constrói regularmente os planos de atividade de satélite ao longo de um horizonte limitado à frente (geralmente um dia), e recebe relatórios de execução do plano. Estes planos devem cumprir todas as restrições físicas e satisfazer o melhor possível às solicitações do usuário.

As limitações físicas que devem ser atendidas podem ser classificadas em seis classes: atitude de trajetória, observação, download, memória, instrumentos, e energia. Qualquer plano gerado deve satisfazer todas as limitações citadas. O problema de planejamento pode ser modelado usando para cada satélite as seguintes variáveis de estado:

- a) O tempo atual e, a posição orbital;
- b) A posição de atitude e velocidade ao longo dos três eixos;

- c) A memória e a energia disponível;
- d) Para cada instrumento, o seu status (*ON* ou *OFF*);
- e) As temperaturas da antena e do plano focal visível.

Para resolver este problema de planejamento, foi implementado um algoritmo específico de busca cronológica para frente, com heurísticas de decisão dedicadas, verificação de restrição, e recuo em caso de violação de restrição, o que garante a produção de um plano que pode não ser ideal, mas é realmente executável pelos satélites.

No entanto, esse sistema de gestão não é muito reativo. Qualquer pedido de observação, que chega a qualquer momento durante o dia, deve esperar para o dia seguinte para ser considerado. Isso levou os gerentes de projeto a considerar um sistema de gestão mais reativo que iria tirar o máximo proveito da presença de várias estações de controle de solo e maior visibilidade do satélite associada.

Em tal cenário, replanejamento pode ser chamado antes de qualquer janela de visibilidade por satélite. Problema de replanejamento de dados é, por um lado, um plano de atividade atual envolvendo centenas de observações e, por outro lado, alguns pedidos urgentes de observação, de no máximo algumas dezenas.

No replanejamento, a principal questão em termos de modelagem é a forma de gerir os dois objetivos possivelmente contraditórios:

- a) A qualidade intrínseca do novo plano, que pode ser medida utilizando o mesmo critério que o utilizado durante o planejamento;
- b) A estabilidade do plano que pode ser medida pela diferença entre o novo e o plano anterior.

Para resolver o problema os autores não optaram por usar métodos de busca local, principalmente por causa do potencial custo elevado de uma alteração local, pois adição ou remoção de uma ação no meio de um plano requer computar e verificar a trajetória do sistema novamente a partir do ponto adição ou remoção para o final do horizonte de planejamento. Os dados de um problema de replanejamento são muito semelhantes ao do planejamento: mesmos requisitos, variáveis de estado, ações e restrições.

Os algoritmos de planejamento e replanejamento foram implementados em uma ferramenta, chamada *PLanner for Agile observatioN satElliTes* PLANET , que foi desenvolvida para esta missão. Algumas experiências foram feitas com algoritmos em uma instância realística de tamanho real, construído pela Agência Espacial Francesa (CNES).

5.7 Discussão dos fundamentos para replanejamento de planos de voo

Os planos são construídos usando modelos abstratos dos ambientes em que estão sendo executados. Inadequação do modelo de previsão pode significar que a execução do plano leva o executivo a um estado que diverge das expectativas do planejador. Fox et al. (2006) afirmam que o comportamento de outros agentes do ambiente pode mudar o estado, de tal maneira que o planejador não pode prever, e o contexto em que o plano original foi formado pode mudar para que novas metas devam ser satisfeitas

Para realização do controle de operações, um plano de voo executa em tempo real as tarefas que foram elaboradas e agendadas durante a fase de planejamento da missão, essas tarefas serão responsáveis pela ativação e desativação dos equipamentos de carga-útil dos satélites, e pela obtenção de dados da missão. As medidas de posição e apontamentos são obtidas para ser processadas pela dinâmica de voo.

A geração de planos de operações em voo constitui o objetivo principal do planejamento de operações. A fim de se realizar o planejamento de operações, é necessário conhecer com precisão a posição e a trajetória do satélite. Isto é realizado pela dinâmica de voo, a partir de medidas de rastreamento. A partir destas informações, é possível calcular os ângulos de apontamento de antenas de controle (TOMINAGA, 2010).

O controle do satélite durante uma passagem é realizado por atividades planejadas e elaboradas por projetistas de satélite ou especialistas de sistema, que analisam o estado corrente do satélite. O controle tem por objetivo manter os parâmetros controláveis dentro da faixa de nominal de operação, ou tirar o satélite do modo degradado para um modo de operação normal. A execução bem sucedida de atividades especiais leva o satélite a um modo de operação em rotina, regida por atividades rotineiras. Já uma execução mal sucedida pode levar o satélite a um modo de operação emergencial (TOMINAGA, 2010).

Uma situação onde os problemas de planejamento podem mudar durante a execução, ocorre quando se realiza um plano para um satélite de observação, onde os novos pedidos de observação podem surgir durante a execução de um plano. Ainda como parte do processo de replanejamento, segundo Fox et al. (2006) caso ocorram falhas que foram detectadas durante o controle do satélite, serão consideradas as necessidades de se construir um novo plano, ou reaproveitar parte do plano que já foi executado, com adição ou remoção de ações. Também, como critério adotado para escolher entre Replanejamento ou Reparo, aplica-se análise de estabilidade de Plano,

A métrica, *Estabilidade de Plano*, é uma consideração importante na avaliação de um plano. Em tais situações um plano reparado deve ser o mais próximo possível do plano original. O termo "Estabilidade de Plano" é utilizado para se referir a uma medida da diferença que um processo induz entre um plano original (fonte) e um novo plano (alvo).

No contexto do controle de satélites do INPE, a execução de um plano, diante de falhas monitoradas por sinais de telemetria, pode exigir a tomada de medidas de contingência, para que o plano possa continuar sendo executado. Essas medidas implicam em adições ou subtrações de ações, que podem ser conjuntos de telecomandos, para reparar a falha em resposta a algum valor de telemetria fora do esperado. A Estabilidade de Plano será aplicada no processo de Replanejamento, para determinar qual a melhor estratégia de Replanejamento a ser utilizada para gerar o novo plano.

No próximo capítulo será apresentada uma arquitetura para o agente de planejamento e replanejamento, a visão dinâmica dessa arquitetura e as técnicas que foram empregadas.

6 UM AGENTE DE REPLANEJAMENTO DE PLANO DE VOO

Neste Capítulo serão apresentados os tópicos para aplicação de replanejamento de plano nas operações de controle em solo, para os satélites do INPE, com o uso de técnicas de IA em Engenharia de Conhecimento como forma de representação do conhecimento do domínio de controle de satélites; e técnicas de Planejamento e Replanejamento Automáticos para criação de reparo de planos automáticos de voo. Também será discutido o processo de aplicação das técnicas de replanejamento aplicadas em caso de ocorrências de falhas, e serão apresentadas as características do problema real e as limitações no contexto do controle de satélites do INPE.

Neste capítulo também é dada uma visão dinâmica da arquitetura para o contexto do ambiente real com aplicação das técnicas adequadas. Por último, a apresentação e discussão dos resultados obtidos e análise de desempenho das abordagens escolhidas e para o processo de replanejamento.

6.1 A Necessidade de replanejamento em controle de missão

O controle de operações de satélites pelo INPE ocorre dentro de um ambiente dinâmico em função da rotina dinâmica de controle, que se faz pelo envio de telecomando e recepção de telemetria. Há possibilidade de ocorrer algum comportamento inesperado por parte de subsistemas do satélite, tornando-se necessário reavaliar e refazer um plano de controle preestabelecido.

A base da operação de rotina em solo do satélite é a detecção de falha potencial comparando as condições atuais com a descrição do estado gerado a partir da sequência de execução de ações em bordo, para isso estão previstos procedimentos para tratar essas falhas nos satélites. As atividades emergenciais são causadas por alguma anomalia, sendo normalmente resultantes de uma ou mais falhas. Procedimentos de atividades emergenciais são elaborados e documentados por projetistas de equipamentos embarcados com base em previsões de falhas. Estas atividades têm como finalidade conter uma maior degradação do satélite e levá-lo rapidamente a um modo seguro de operação.

Em controle de missão espacial os sistemas de planejamento e escalonamento automáticos codificam o conhecimento complexo sobre os veículos espaciais, tais como as restrições de operabilidade, as regras de voo, o hardware dos veículos espaciais, as experiências científicas e os procedimentos de operações para permitir a geração automática de sequências de operações de baixo nível. Além disso, classificam também as violações de restrição, ou seja, os conflitos e as tentativas de reparar cada um deles, através da realização de um planejamento e escalonamento de operações.

Como de rotina, esses satélites são gerenciados a partir do solo por um sistema de planejamento de missão que recebe as solicitações de usuário, constrói os planos de atividade regular de satélite, ao longo de um horizonte de tempo limitado à frente, e recebe relatórios de execução do plano. Estes planos devem atender a todas as limitações físicas e satisfazer as solicitações do usuário, o melhor possível.

Como foi descrito nos capítulos anteriores existe uma busca constante da comunidade de controle de operação na área espacial para encontrar soluções de automatização aplicadas às atividades de operação de satélites artificiais. Isto já se apresenta como necessidade dos grandes centros de controle pelo mundo, para diminuir os custos das missões. O interesse de automatizar o processo de replanejamento tem com metas principais, obter autonomia maior em controles de satélites, segurança na execução de procedimentos operacionais, e ganho na economia em reduzir equipes de controle.

Nos sistemas de automação importantes apresentados na seção 4.9 que foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas, o uso de técnicas de IA está sendo extensivamente aplicado para fornecer soluções de automatização nas operações de missões espaciais. O uso de agentes de planejamento é uma das áreas da IA que estão sendo empregadas nestas soluções.

6.2 O Cenário escolhido para a aplicação

O cenário para aplicação da arquitetura desta tese é o ambiente operacional de controle do satélite da série CBERS do INPE.

A missão do satélite CBERS tem como requisitos principais:

- a) Gerar imagens com bandas espectrais, e resoluções radiométrica e geométrica com qualidade adequada à suas aplicações;
- b) Gerar imagens do Brasil, da China e de outra superfície do globo terrestre com revisita adequada com acesso rápido e alta resolução;
- c) Distribuir os produtos de imagem através de internet em tempo adequado para utilização;
- d) Grupos e sequências de telecomando devem ser utilizados durante a operação de carga útil;
- e) O tempo de imagem não deve ser superior a 15 minutos durante uma passagem.

Um conjunto de quatro câmeras (PAN, MUX, IRS, WFI) permite imagens pancromáticas e multiespectrais, da banda azul até o termal. Essas imagens são fornecidas com resolução espacial de 5 a 80 metros e faixa no solo de 60 a 800 km.

Para aplicação do processo de replanejamento de plano, foram escolhidos procedimentos operacionais para controle da câmera Pancromática e Multiespectral (PAN). Esses procedimentos são aplicados na forma de sequência de telecomandos, para inicialização e ativação do processo de imageamento pela câmera. O grupo de comandos é uma sequência de telecomandos especiais, gerada pelo *On-Board Data Handling* (OBDH) para operar o equipamento de carga útil para executar uma função específica. Os detalhes dos telecomandos e das telemetrias associadas serão apresentados em capítulos posteriores.

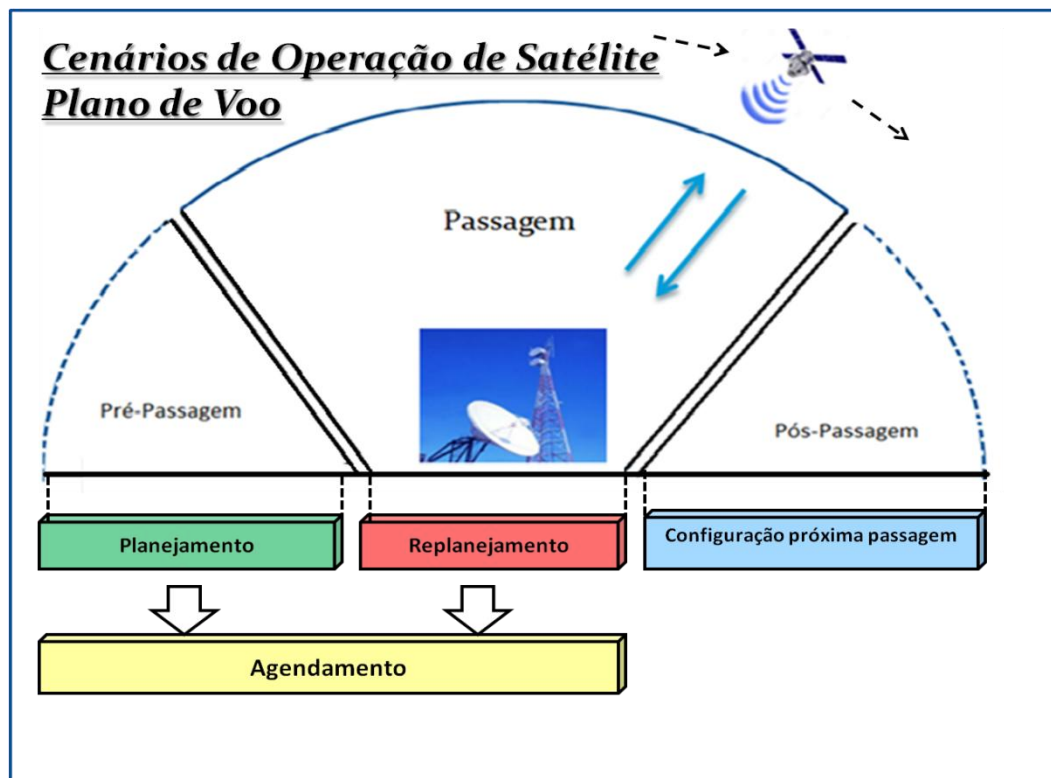
A câmera PAN recebe imagens da terra com 60 km de largura. Cada pixel representa uma área de 10 x 10 metros para bandas multiespectrais e 5 x 5 metros para banda pancromática. Estas bandas e estas resoluções permitem observar fenômeno que exigem maior detalhamento para o seu estudo, como processos agrícolas, urbanos, desmatamento e mapeamento.

O planejamento de operações define e agenda as tarefas que devem ser desempenhadas para possibilitar a execução de operações de missão para cada satélite. Este processo é realizado em cima de previsões de contato entre o satélite e antenas de controle,

fornecidos pela dinâmica de voo. A execução de procedimentos consiste na realização, em tempo real, de tarefas agendadas conforme o planejamento de operações. É através desta execução que equipamentos de carga-útil dos satélites são ligados para a obtenção de dados missão, e medidas de posição e apontamento são obtidas para serem processadas pela dinâmica de voo (TOMINAGA, 2010).

A carga útil do satélite, tal como uma câmera tem a capacidade de imageamento global, para a formação de imagens fora da visada da estação terrena. Entretanto o satélite pode fazer gravação de dados, e quando passar pelo alcance de sinal da estação terrena poderá fazer a descarga da imagem armazenada. A Figura 6.1 mostra os cenários de operação de satélite, Pré-passagem, Passagem e Pós-passagem que foram descritos no Capítulo 2.

Figura 6.1- Cenário de operação de satélite



Fonte: Produção do autor.

Para a realização deste trabalho, tomou-se como base o cenário de operação de satélite do INPE aqui descrito, e aplicação dos métodos de replanejamento apresentados na seção 5.3. O objetivo principal é considerar os procedimentos operacionais para controle de carga útil do satélite CBERS, onde deverão ser observadas as possíveis anomalias

durante uma passagem com a visibilidade da antena, e aplicar as técnicas mais indicadas em tempo real, como medidas de contingência.

6.3 Técnicas em inteligência artificial aplicadas ao modelo do agente

Para elaboração dessa tese, inicialmente como ponto de partida, foi feita a escolha de técnicas a serem aplicadas. Após os estudos realizados, considerou-se a natureza do ambiente a ser controlado, que é caracterizado como um ambiente dinâmico, e a necessidade de menos intervenção humana em situações que requerem o monitoramento do plano de voo em missões espaciais. Para tanto, foi adotada a técnica de **Agentes Inteligentes**, por ter habilidade de perceber seu ambiente e de responder por intermédio de atuadores. Para a construção do tipo de agente, considerou-se a classificação do ambiente a ser controlado, e uma linguagem de representação a fim de descrever o problema de planejamento para o qual o agente buscará soluções.

Agentes em geral são sistemas computacionais em ambiente dinâmico e complexo, isso motivou a geração de um Protótipo dos agentes de Planejamento e Replanejamento, como sendo um elemento de software, o qual permitiu a análise dos procedimentos adotados para o planejamento e a avaliação dos resultados obtidos como base para aplicação das técnicas de planejamento. Na automatização do controle de satélites é feito o uso do agente de planejamento.

O **Agente de Planejamento**, como descrito na seção 3.5, é o tipo básico de programa de agente baseado em objetivos. Este tipo de agente necessita da descrição do estado atual do ambiente e informações sobre objetivos que descrevem situações desejáveis. O programa de agente, em posse das informações (estado atual e objetivo) e dos resultados das ações possíveis, escolhe uma sequência de ações que permitam que o objetivo seja alcançado. No contexto de controle de satélites, estas sequências de ações podem representar uma sequência de comandos, ou seja, um plano que atuará na carga útil do satélite. As sequências elaboradas para a operação de rotina podem conter telecomandos específicos, pedidos de medidas de distância e velocidade. Os objetivos podem ser os mais diversos possíveis, como a obtenção de imagens do espaço, experimentos científicos em ambientes de microgravidade, ou a retransmissão de dados e voz em sistemas de telecomunicação. Na fase de execução do plano, durante o cenário de passagem de um satélite, foi utilizado o conceito de **Agente Reativo de Replanejamento**, que tem a

função de observar a execução de um plano, perceber as possíveis falhas no decorrer da execução, e agir reativamente para consertar um plano vigente, para que o objetivo seja alcançado. Os processos do planejamento e replanejamento utilizam a técnica de **Busca**, conforme Russell e Norvig (2004), que é uma subárea de IA que visa determinar a sequência de ações que leva o agente ao objetivo pelo melhor caminho, isso porque o agente poderá ter que considerar longas sequências de ações encadeadas para poder atingir sua meta. A busca local começa com todas as variáveis do CSP inicializadas. Se em algumas das atribuições feitas as variáveis violam restrições impostas ao problema, o algoritmo tenta aproximar iterativamente os valores das variáveis de um objetivo, onde todas as restrições são satisfeitas.

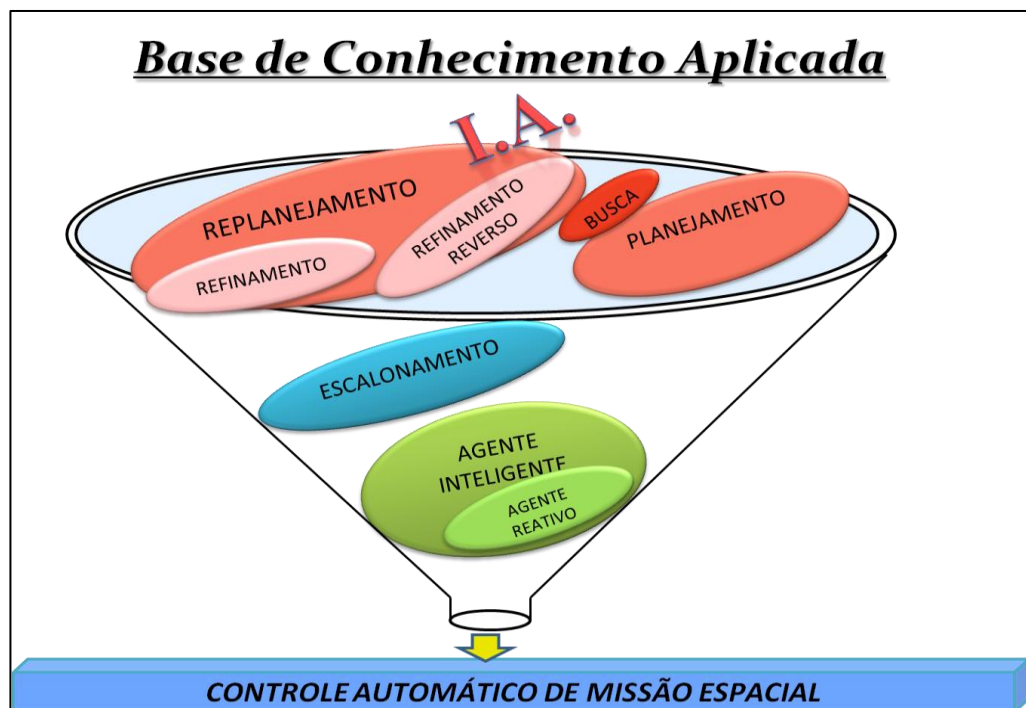
Para solucionar a questão do instante exato de execução das tarefas em bordo foi empregada técnica de **Escalonamento** de tarefas, isso permite realizar uma sequência específica de tarefa em instantes determinados. A integração do Planejamento com o Escalonamento é um tema de grande interesse de pesquisa especialmente na comunidade de planejamento. A integração geralmente significa a adição de restrições de tempo e recursos para o problema de planejamento. Nesta tese o escalonamento terá como base principal a execução de comandos ao satélite dentro de uma janela de tempo, que é a duração de uma passagem.

Na fase de execução do plano podem-se detectar as falhas pelo processo de monitoração. Nesse instante, começa o estágio de reparo de plano. Intuitivamente espera-se reutilizar uma quantidade importante do plano original, minimizando, assim, o processo de adaptação. Entretanto, em alguns casos, o replanejamento pode se mostrar mais razoável, especialmente nos casos em que as discrepâncias são significativas e o plano ter sido seriamente danificado. No ambiente de controle de satélites, o processo de replanejamento será aplicado reativamente, quando uma resposta a um dado telecomando, representar uma anomalia a bordo, em termos de valores de telemetria, fazendo-se necessárias algumas medidas de reparo por meio de um plano de contingência. Os modos alternativos de reparo de plano, tais como **Refinamento e Refinamento Reverso** se referem respectivamente, à inclusão de novas ações e à remoção de ações que impedem a execução do plano, que será mais bem detalhado nos próximos capítulos.

No contexto desta tese adotou-se o uso de técnica de **refinamento** apresentada na seção 5.3.4, por possuir características similares ao reparo de plano de voo na forma convencional utilizada no CRC/INPE, ou seja, realizando a inclusão de subplanos caracterizando o refinamento. Na aplicação desse procedimento, observa-se a inclusão de algumas ações que já estão presentes no plano, causando repetição mantendo-as defasadas na escala de tempo. Com isso é necessário identificar essas ações e removê-la do plano, pelo processo de **refinamento reverso** e refazer o agendamento das ações do novo plano reparado. O uso dessas técnicas e os algoritmos que as implementam, serão apresentados e discutidos no capítulo 7.

A Figura 6.2 apresenta os principais elementos dentro da área de IA, que foram estudados nesse trabalho e aplicados na solução de automatização do controle de satélite pelo INPE.

Figura 6.2 - Base de conhecimento aplicada ao replanejamento de plano



Fonte: Produção do autor.

A aplicação e a integração dos elementos em IA aqui empregados serão apresentadas nos próximos capítulos, indicando a dependência funcional entre eles.

6.4 Uma arquitetura para o agente de planejamento e replanejamento

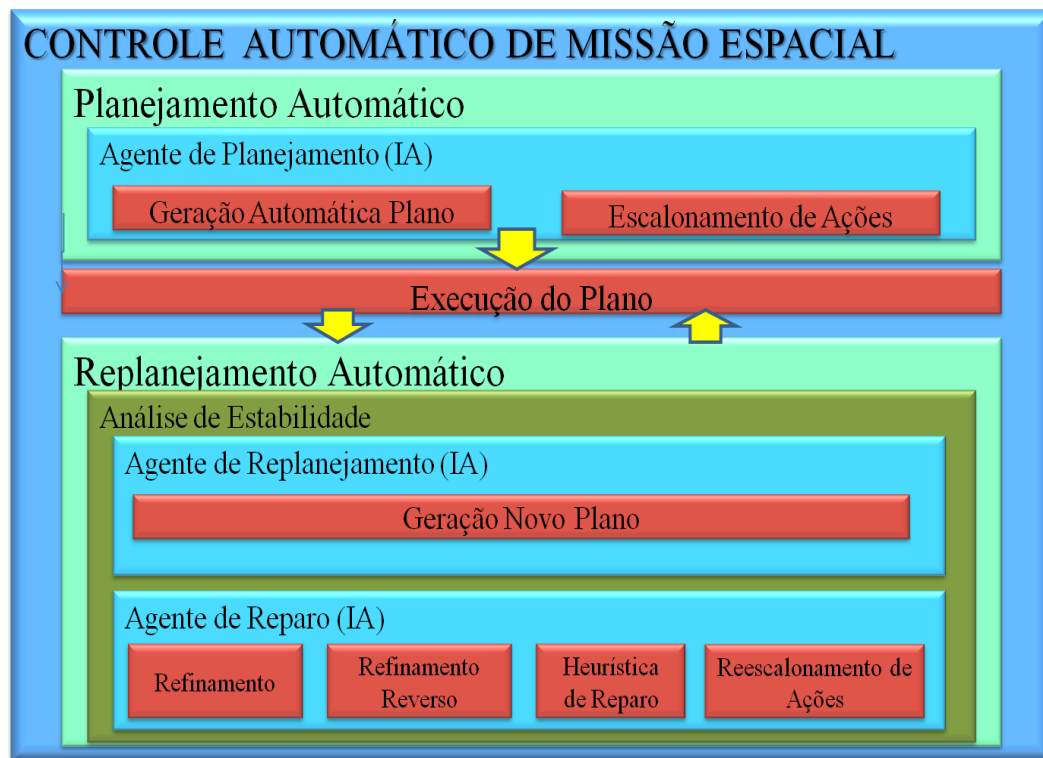
Para contextualizar o problema da automatização no cenário do INPE, foram necessários estudos na área de IA com enfoque na construção de planos automáticos. Nesta etapa procurou-se também, estudar os procedimentos de controles dos satélites operados pelo CRC, para ajustar o método de agente planejamento ao procedimento de controle convencional vigente. Com apoio da equipe de controle foi possível compreender os procedimentos rotineiros organizados no formato de plano de voo, com isso, foi possível criar a Base de Conhecimento e os Arquivos de Problemas, para que pudessem ser aplicados na geração de planos de voo, com uso de planejamento em IA. Como fase subsequente, foi necessário, junto ao pessoal de operação, conhecer os procedimentos específicos para controlar o funcionamento de carga útil do satélite, tais como, a ativação e utilização de uma câmera de sensoriamento remoto, o controle térmico em subsistemas, etc. Estes procedimentos são codificados em grupos de telecomandos temporizados, enviados ao satélite e executados em instantes predeterminados. Como essas ações se apresentam em uma forma agrupada e enviada em um único bloco, houve a necessidade de analisar esses grupos para facilitar o entendimento da função dos comandos isoladamente. Os planos serão executados como sequência de telecomando em tempo real, ou seja, na forma de comandos imediatos.

A concepção da arquitetura para solução do problema se baseou em técnicas descritas em artigos técnicos da comunidade científica, algumas dessas arquiteturas apresentadas na seção 5.3, para concepção da estrutura foram identificadas as seguintes funções:

- a) Geração inicial do plano original;
- b) Execução e monitoração do plano em tempo real;
- c) Análise de falhas e tratamento de contingências de voo;
- d) Análise do replanejamento ou reparo para adoção de um novo plano;
- e) Replanejamento de um novo plano;
- f) Reparo do plano original em tempo real.

Os elementos principais que compõe a arquitetura do Agente de Replanejamento de plano automático para controle de voo estão apresentados na Figura 6.3 e serão detalhados nos próximos capítulos. O modelo apresentado buscou caracterizar uma representação hierárquica na forma de camadas temáticas mostrando as áreas de capacitação envolvidas, e representar a ordem de realização das etapas. No nível superior da estrutura estão representados os processos de planejamento e escalonamento e em nível inferior está representado o replanejamento. Portanto, numa visão global, tem-se representado o domínio geral do problema do Controle Automático de Missão e, em camadas mais internas da estrutura, chega-se a solução do problema do replanejamento com aplicação das técnicas de IA.

Figura 6.3 - Arquitetura geral do agente de planejamento e replanejamento



Fonte: Produção do autor.

Nesta estrutura estão representados os módulos que propõem a solução do planejamento automático em missão espacial com possibilidade de monitoramento da execução do plano e a reformulação de plano original na ocorrência de falhas durante sua execução. Na visão geral da Figura 6.3 podem-se identificar dois grandes módulos importantes, em cor verde, o módulo de Planejamento e o de Replanejamento.

Com base nas características de elementos que definem os ambientes de tarefa, como apresentado na seção 4.4, é possível classificar os agentes de planejamento e replanejamento. É importante observar que as fases de planejamento e replanejamento ocorrem em cenários distintos durante o controle de missão, são módulos funcionalmente independentes, ou seja, o planejamento é realizado em fase de pré-passagem com até alguns dias de antecedência da passagem, e o replanejamento ocorre em tempo real, ou seja, terá sua atuação na fase da passagem propriamente dita.

Para construção do plano original na fase Pré-passagem, o ambiente se caracteriza como planejamento clássico é o tipo de problema para o qual são fornecidos o estado inicial do ambiente, o conjunto de ações e um objetivo a ser atingido. O ambiente de um planejamento clássico (completamente observável e determinístico) com restrição de tempo e recurso (sequencial, dinâmico e contínuo), conforme as definições da seção 4.4.

Na fase do replanejamento o ambiente tem como característica o planejamento não-clássico, pois em um ambiente de planejamento não-clássico, o agente não pode simplesmente executar o plano inteiro. Na execução de um plano de voo neste tipo de ambiente, o agente deve usar suas percepções para descobrir o que está acontecendo enquanto o plano é executado e, possivelmente, modificar ou substituir o plano se algo inesperado acontecer. Modificar um plano implica em identificar os eventos exógenos que poderão ocorrer em uma passagem controlada do satélite, e adicionar ou remover ações no plano original.

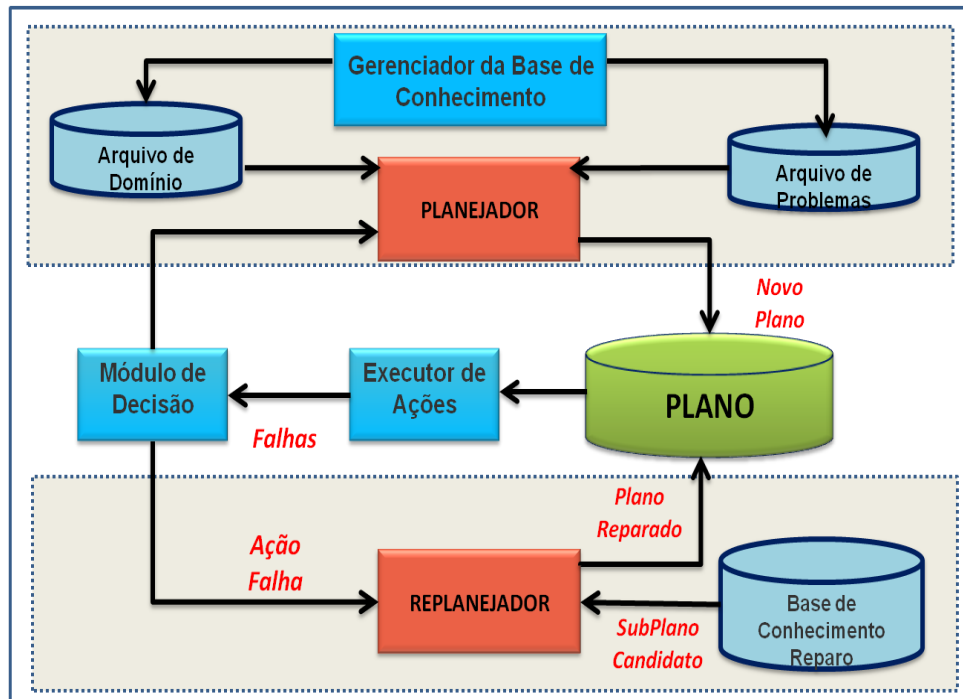
No problema de planejamento temporal, outros fatores são levados em conta além de elementos do planejamento clássico como: o tempo gasto para a execução do plano, o início e a duração de cada ação e em problemas mais complexos, também a restrição de recursos. Um único recurso não pode ser utilizado por duas ações diferentes e esta restrição deve ser levada em consideração durante a geração do plano pelo planejador.

6.5 Visão dinâmica da arquitetura de planejamento e replanejamento

A arquitetura para o problema de replanejamento é composta de três módulos: um módulo de Planejamento para geração do plano inicial, um de Execução e Monitoração e outro módulo de Replanejamento para os planos que apresentarem falhas na deliberação das ações. Seus componentes estão apresentados na Figura 6.4 e serão descritos neste

capítulo. Uma proposta desta arquitetura foi apresentada por Ribeiro (2012) no SPACEOPS 2012.

Figura 6.4 – Visão dinâmica da arquitetura de planejamento e replanejamento



Fonte: Produção do autor.

Todo processo inicia-se com a preparação de um plano de voo, que utiliza dado de previsão de passagem para um período de uma semana gerado para cada par satélite - estação terrena (ET), a partir dos dados de órbita e atitude, incluindo o instante de tempo (dia/mês/ano, hora, minuto e segundo), e os valores dos ângulos de azimute e de elevação do satélite neste instante para o apontamento da antena da estação terrena.

Após a geração dos arquivos de previsão de passagem, parte-se para a atividade de geração do plano de operação de voo que é realizada para cada satélite. O período em que o plano de voo será gerado corresponde ao período do arquivo de previsão de passagem, no caso igual a uma semana.

As ações típicas de um plano de voo dos satélites controlados pelo INPE durante uma passagem sobre a estação de rastreo são os seguintes:

- a) Antes do início da passagem:

- Execução de medidas de calibração do equipamento de medida de distância;
- b) Durante toda passagem:
- Recepção de telemetria, ou seja, o sistema de telemetria fica disponível durante toda passagem para receber automaticamente as telemetrias enviadas pelo satélite;
 - Envio de telecomando, cada satélite possui um conjunto diferente de telecomandos. Os telecomandos podem ser classificados de acordo com o seu envio, isto é, para todas as passagens, Diário e Periódicos para dias específicos da semana;
 - Execução de medida de distância entre o satélite e a estação, quantas vezes forem possíveis durante a passagem, mas não pode ser concorrente com a ação de envio de telecomando. As medidas coletadas são usadas na geração da previsão de passagem futura;
 - Execução de medida de velocidade do satélite em relação a ET. Esta ação também deve ser executada durante toda a passagem, e são entradas para a geração do próximo plano de previsão de passagem.

No plano de operação de voo são indicadas todas as ações de operação que o operador do satélite deve executar antes, durante e após cada passagem do satélite. As atividades sempre estarão associadas aos instantes correspondentes aos das linhas de informação lidas nos arquivos de previsão de passagem.

Nesta arquitetura foi utilizado o recurso de geração automática do plano de voo apresentado em Cardoso (2006), com o propósito da integração das fases de planejamento, execução e por ultimo o replanejamento do plano. Nos capítulos seguintes serão detalhados os componentes dessa estrutura

6.5.1 O Planejador de ações

O maior desafio no planejamento dos planos de voo é garantir que todas as ações a serem executadas sejam inseridas no plano em instantes adequados, respeitando as janelas de visibilidade do satélite em relação a ET responsável por rastreá-lo. Além da restrição das

janelas de visibilidade, todas as restrições para inserção de cada ação no plano devem ser respeitadas, considerando-se tanto restrições de tempo, como de recursos.

No nível mais alto da arquitetura na visão dinâmica, apresentado na Figura 6.4, o plano de voo é gerado utilizando um *Planejador*, que é responsável por estabelecer metas a ser alcançadas e restrições a ser seguidas, além de ser uma interface entre o usuário e o sistema. Sua função principal é gerar os arquivos de plano de voo.

O planejamento é a enumeração do conjunto de instâncias de ações aplicáveis ao domínio de um problema. O planejador terá como entradas o arquivo de Domínio e os arquivos de Problema.

O Domínio é o conjunto de todos os estados e de todas as ações aplicáveis a um determinado ambiente. O Arquivo de Domínio, no contexto de controle de missão espacial, deve modelar o comportamento do domínio de planejamento por meio dos seguintes elementos:

- a) Tipos – representam as classes dos objetos que fazem parte do modelo. São definidos após a instrução, com exemplo tem-se: Número da passagem, Código do Satélite, Código da Estação, o Número do grupo de calibração, de Medidas de *Ranging* e de *Range Rate*, e o Código de telecomando;
- b) Predicados – representam atributos que definem os estados dos objetos instanciados, podem indicar: Eventos realizados, como, por exemplo, um envio de telecomando; Estado inicial de um ambiente, como, por exemplo, uma estação disponível para rastreo; e objetivos a ser alcançados;
- c) Funções – representam valores numéricos obtidos com a associação entre objetos, como, por exemplo, associar um valor a um telecomando, ou a uma passagem;
- d) Ações – representam regras de inferência não instanciadas. Uma ação possui parâmetros, tais como uma pré-condição para que seja executada e um efeito que ocorre após a sua execução. Para ações com duração, faz-se necessário definir também a duração da execução da ação. Por exemplo, a ação de envio de telecomando, deve receber parâmetros relativos ao código do telecomando,

código da estação, etc., e deve-se definir a duração da ação e o efeito que deverá causar após sua execução.

O Problema é composto do estado inicial do ambiente e do estado objetivo que se deseja atingir no plano. Um problema bem definido deve ter os elementos do Domínio instanciado com valores específicos para uma passagem, para uma estação e para um satélite, além dos códigos de telecomandos, duração, pré-condição e efeitos das ações.

A partir da Base de Conhecimento composta pelos arquivos do Domínio e de Problema descritos em linguagem de representação (ex. PDDL), o planejador é capaz de encontrar uma sequência de ações que atinja o objetivo proposto no arquivo de Problemas. O Arquivo de Domínio é o arquivo que contém a base de conhecimento do domínio de rastreo de satélite, e é codificado em linguagem de representação para ser usado por agentes de planejamento. Os arquivos de Problemas são os arquivos que são gerados para cada passagem a ser rastreada e contém o estado inicial do ambiente da passagem e o objetivo a ser atingido no plano de voo. Um processo para a modelagem de uma base de conhecimento para um domínio de planejamento pode usar a linguagem PDDL. A PDDL é uma das principais linguagens utilizadas na área de pesquisa de Planejamento Automático, sua escolha é justificada na seção 4.3.

Na etapa da modelagem de uma base de conhecimento, é importante extrair do especialista da missão e registrar todas as informações que permitam entender como o domínio realmente funciona. As informações podem ser, por exemplo:

- a) Ações que podem existir no plano;
- b) As ações que são temporizadas;
- c) Tipos de parâmetros fixos e variáveis do ambiente.

Isso é feito utilizando-se uma modelagem do mundo a qual se deseja interferir, com seus comportamentos, possíveis ações, estados iniciais e estados finais, ou seja, a “Especificação do Domínio de Planejamento” e a “Especificação do Problema de Planejamento”.

A modelagem pode ser feita utilizando-se de ferramentas de software. Uma ferramenta de modelagem *Computer Aided Software Engineering* (CASE), que permite a geração do código em PDDL a partir de diagramas de *Unified Modeling Language*, (UML) software *ItSimple* (VAQUEIRO, 2007). Nestes diagramas são criadas classes de elementos que compõem o domínio de planejamento, suas relações, ações e efeitos podem ser aplicado para gerar modificações no estado atual do sistema.

Informações adicionais que definem o contexto de cada passagem de satélite pode constituir uma *Base de Dados de Configuração* que deve permitir a inserção, a remoção e a edição de dados gerais relacionados ao ambiente de controle de satélites; e geram informações de configuração, a ser rastreada. Nesta base é possível editar:

- a) Os parâmetros necessários para a configuração das estações que podem ser usadas para o rastreo de satélites;
- b) Os parâmetros dos satélites a ser rastreados, que inclui os parâmetros de telecomandos;
- c) Os relacionamentos entre as estações e os satélites, que contém os cenários de operação específicos de cada dupla (satélite, estação).

Nesta etapa do planejamento e com base no ambiente de tarefa identificado, pode-se classificá-lo como: completamente observável, determinístico, sequencial, dinâmico, contínuo e agente único.

6.5.2 O Executor de ações

Após o processo de planejamento, com um plano já elaborado, pode-se iniciar sua execução no instante determinado para o início de uma passagem. O Módulo Executor de Operações terá como função a seleção e execução do plano que deve ser executado de acordo com o Escalonamento das ações, disponibilizando uma interface que possibilite a comunicação com o software de tempo real de controle de satélites do CRC. O Executor das ações foi implementado em linguagem C++ no Ambiente Visual C++ da Microsoft, e possui as seguintes e principais funções:

- a) *Parser* para obter a ação, interpretar e verificar sua validade em termos sintáticos;

- b) Simulação de um modelo simples do ambiente de bordo, para simular falha em bordo com base nas informações de telemetria;
- c) Análise da execução em bordo;
- d) Ativação do processo de reparo do plano;
- e) Análise da Estabilidade de plano;
- f) Agenda de ações controlando o tempo de início de término de acordo com restrições de tempo;
- g) Visualização do Plano original, e do Plano reparado.

A simulação do comportamento em bordo terá como base os valores de telemetria, indicando estado *ligado/desligado* de um equipamento, faixa mínimo / máximo de valores de telemetria, média de valores de telemetria, valores de temperatura, corrente, e voltagem de equipamentos em bordo. Os valores gerados por simulação serão comparados com valores esperados e definidos no *HandBook* do satélite (XSCC; CAST, 2009), que está disponível e modelado em arquivo *eXtensible Markup Language* (XML). Após a execução de uma ação o Executor deve analisar o resultado em resposta, e decidir entre a ativação do Replanejamento, ou a ativação da próxima atividade do plano.

6.5.3 O Replanejador de plano

O Módulo de Replanejamento deverá estar ativo, durante uma passagem em rastreo, para receber eventos da operação do software de controle, analisar os eventos e classificá-los como eventos esperados ou como eventos não esperados. Para os eventos não esperados que caracterizem os casos onde ocorram conflitos gerados pelo próprio plano, o módulo de replanejamento deverá fornecer recursos para que se possa refazer um novo plano em tempo real. O replanejador de posse da *Base de Conhecimento de Reparo*, por meio da aplicação de algoritmos de estrutura de dados para inclusão e eliminação de ações em árvore, filas ou listas, e de uso de heurísticas do domínio, encontra uma sequência de ações que atenda o objetivo proposto reparando o plano original. Se após análise de custo de reparo de um plano original, conforme técnicas apresentadas no capítulo 5, pode-se decidir pela geração de um novo plano aplicando o processo de replanejamento

apresentado, e assim é realizada uma geração automática de um novo plano usando dados da base de conhecimento.

Nos próximos capítulos serão apresentados:

- a) A caracterização do ambiente operacional;
- b) A motivação para escolha de agentes inteligentes da IA;
- c) A escolha do agente específico para o problema de replanejamento;
- d) A modelagem da Base de Conhecimento do controle de satélites;
- e) A aplicação de agentes na solução do problema de controle automático de missão espacial;
- f) Um Estudo de Caso com aplicação do ambiente de controle de satélites do INPE;
- g) Os resultados do uso das técnicas de planejamento e replanejamento;
- h) Uma análise de resultados obtidos e limitações das técnicas empregadas.

6.6 Um modelo geral do agente de replanejamento de plano de voo

Esta seção apresenta a aplicação das técnicas de planejamento e replanejamento para planos de operação de satélites do INPE. É dada uma visão detalhada do problema a ser tratado, é mostrado como aplicar a Engenharia de Conhecimento da IA, para representação do conhecimento no contexto de controle, e também é discutida a forma de integração das técnicas de replanejamento em IA adaptadas ao contexto do problema.

Será apresentado o processo aplicado para a implantação do agente de replanejamento no caso de um cenário real e, além disso, será descrita a análise da modificação dos planos e critério de adoção de soluções por meio de novos planos.

Para concepção do modelo do agente de replanejamento de plano operacional de missão, foram tomadas como base as técnicas de replanejamento na seção 5.3. Como o objetivo desse trabalho é propor uma solução para o replanejamento de plano de controle de missão, foi necessária a concepção de um modelo, cujas funções atendessem os requisitos necessários. As funções desse modelo são apresentadas a seguir:

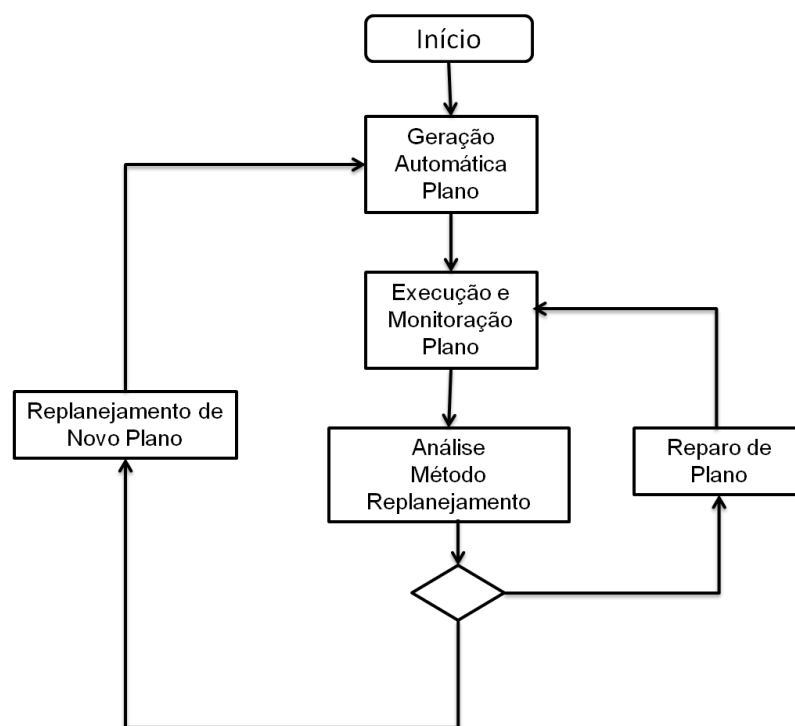
- a) Receber um plano original que execute um procedimento em bordo, para acionar uma carga útil, utilizar seus recursos e por fim desativá-la;
- b) Interpretar uma ação do plano e utilizando um procedimento de *parse* gerar um comando correspondente a ser executado em bordo;
- c) Analisar resultado da execução do comando, comparando com valores predefinidos de telemetria esperada;
- d) Adotar medida de reparo de plano em função do valor de telemetria recebido, conforme plano de contingência de bordo;
- e) Analisar o custo do reparo e da geração de novo plano;
- f) Gerar um novo plano ou reparar o atual.

Os estudos realizados neste trabalho sobre técnicas de replanejamento permitiram identificar os elementos principais que possam compor um modelo de replanejamento aplicado ao contexto de controle de satélites do INPE. Os elementos principais da estrutura foram apresentados na Figura 6.4 e podem ser detalhados como:

- a) Módulo para geração automática de plano;
- b) Módulo de execução e monitoração de plano;
- c) Módulo de análise e escolha de método de replanejamento;
- d) Módulo de replanejamento ou reparo do plano.

A Figura 6.5 apresenta os elementos que compõem o modelo do Agente de Replanejamento e o fluxo das funções a serem executadas.

Figura 6.5 - Modelo geral do agente de replanejamento



Fonte: Produção do autor.

Nos capítulos a seguir serão descritos os módulos que compõem a estrutura, focando as técnicas em IA, tanto de planejamento como de replanejamento que cada módulo irá utilizar. Também serão descritos como essas técnicas são aplicadas à Engenharia de Conhecimento e ao Planejamento, para desempenhar seu papel no contexto geral.

6.6.1 Módulo de geração automática de plano

Inicialmente constrói-se um plano para operação de satélite com objetivo de automatizar as operações espaciais. Nesta fase é aplicada a tecnologia de agente de planejamento da Inteligência Artificial (IA) na geração automática do plano para a fase operacional de rotina de satélites artificiais. Este enfoque busca satisfazer os anseios da comunidade científica quanto ao processo de automatização das operações de satélites no INPE.

O planejamento é dirigido para a fase operacional de rotina porque nesta fase se concentram as tarefas mais repetitivas com possibilidades maiores de falhas em operação quando executadas manualmente, e por isso, mais conveniente de ser programadas

automaticamente. Portanto o uso de técnicas de planejamento temporal da IA, também se justifica para a geração automática de planos de voo para atender à fase operacional de rotina.

Na elaboração de um plano de voo são necessárias algumas atividades essenciais. Inicialmente são gerados arquivos de Previsão de Passagem, para um período de uma semana para cada par satélite e estação terrena a partir dos dados de órbita e atitude. Esses arquivos gerados contêm várias linhas de informações, cada linha contendo, o instante de tempo (dia/mês/ano, hora, minuto e segundo), os valores dos ângulos de azimute e elevação do satélite neste instante para o apontamento da antena em direção ao satélite, a distância entre a ET e o satélite, a variação temporal desta distância e o valor do desvio de Doppler na frequência do sinal portador enviado ao satélite.

Após a geração do arquivo de previsão de passagem é realizada a seleção das passagens do satélite sobre a estação que serão realmente utilizadas, feita por meio da aplicação de um conjunto de critérios. Os critérios adotados consideram regras de prioridades de rastreamento de satélites, levando em conta, os conflitos de passagens simultâneas entre satélites sob uma mesma estação, e passagem de um mesmo satélite sobre duas estações ao mesmo tempo, e um intervalo mínimo entre o fim da passagem de um satélite e o início da passagem de outro satélite que se possa considerar a passagem como útil.

Após a geração e compatibilização dos Planos de Previsão de Passagem, a geração do Plano de operação de voo é realizada para cada satélite, onde nesse plano são indicadas todas as ações de operação que o operador do satélite deve executar antes, durante e após cada passagem do satélite.

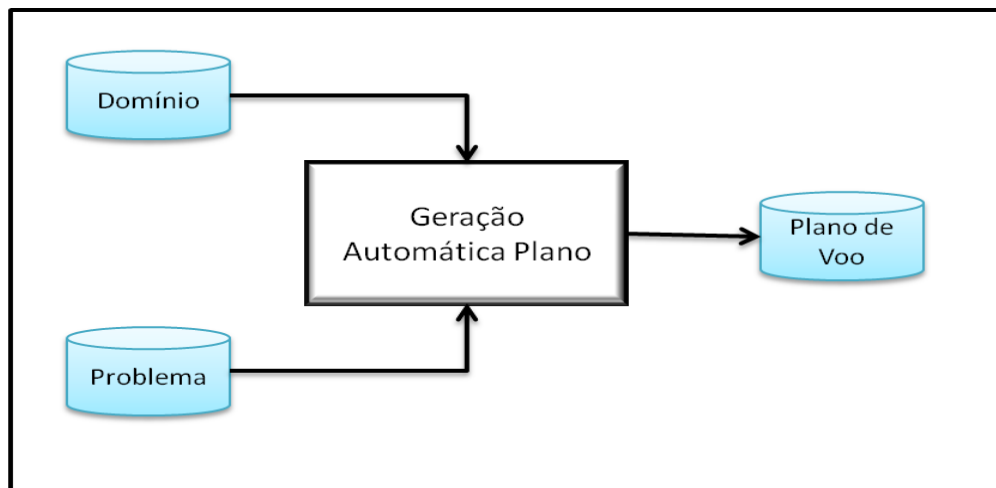
Uma solução para automatização da geração de plano de voo para satélites do INPE usando agente de planejamento em IA foi proposta em Cardoso (2006) e considerou:

- a) Uso da tecnologia de agente de planejamento para problemas de planejamento temporal da área da IA;
- b) Restrições de tempo e recursos impostas pelo problema de planejamento;
- c) Linguagem PDDL para modelar o domínio de rastreamento de satélite, por este ser um problema de planejamento temporal com restrições de tempo e de recurso;

- d) Planejador para a geração do plano com capacidade de manipular o formato da linguagem PDDL e gerar a solução para o problema de planejamento que envolve eventos exógenos incondicionais determinísticos.

A geração do plano é feita simulando o ambiente onde será aplicado um conjunto de ações representando as atividades a serem cumpridas. O comportamento do ambiente utiliza uma representação lógica com objetivo de conseguir uma sequência de ações que leve de um estado inicial ao estado final-objetivo com sucesso. Para que isso seja possível é necessário que o planejador tenha a representação codificada do modelo de ambiente, contendo o conhecimento do domínio, e definição do problema a ser resolvido. A Figura 6.6 , apresenta o cenário de geração do plano.

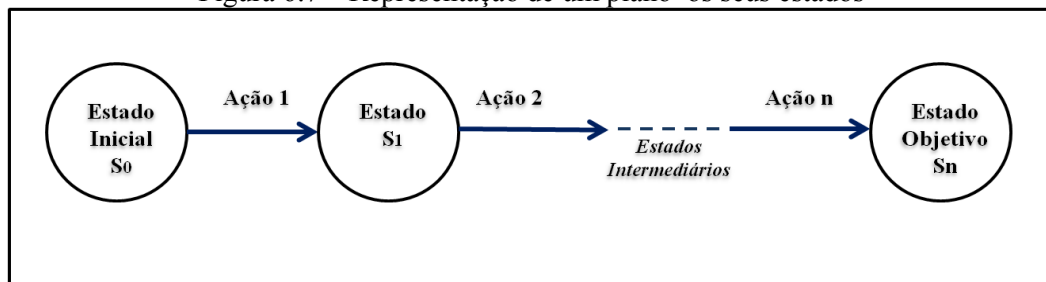
Figura 6.6 - Geração automática de plano



Fonte: Produção do autor.

O processo é realizado de forma interativa onde são verificados os efeitos de cada ação e as precondições para sua execução, e caso estas sejam verdadeiras, é incluída a ação no modelo. Quando o estado objetivo, previamente definido no contexto do problema é atingido durante o processo de geração, pode-se considerar o resultado do processo como um plano concluído. A Figura 6.7, mostra a representação de um plano como uma sequência de *Estados* e as respectivas *Ações* aplicadas ao estado levando a um próximo estado, obedecendo às precondições estabelecidas na definição do modelo do problema.

Figura 6.7 – Representação de um plano os seus estados



Fonte: Produção do autor.

As ações do plano são caracterizadas por sequência de telecomandos, de medida de velocidade e de distância associados aos respectivos tempos de execução em bordo, utilizando o conceito de *link causal*, apresentado na seção 5.3.1. Isso significa que trataremos o problema do planejamento de operações de missão, considerando que existe um efeito p da ação A que é uma pré-condição para ação B , e também significa que p deverá permanecer verdadeiro entre as ações A e B . Esta restrição é bem definida no caso de satélites de observação, no caso do INPE, o CBERS. Como exemplo, tem-se o procedimento de obtenção de imagens da terra durante uma passagem do satélite, o qual exige uma sequência de telecomandos temporizados para acionar e ativar sistemas de câmeras, e seguidamente a realização do processo de imageamento.

6.6.2 Módulo de execução e monitoração de plano

Este módulo é responsável pela execução de um plano original, previamente elaborado com uso das técnicas de IA descritas anteriormente. O plano original, para um problema bem definido no domínio de rastreo de satélite, se apresenta na forma de um arquivo texto contendo informações sobre as ações a serem executadas pelo plano em determinados instantes.

A execução de plano de voo sempre busca a garantia de que todas as ações inseridas no plano sejam executadas em instantes adequados, respeitando as janelas de visibilidade do satélite em relação à estação responsável por rastreá-lo. Além da restrição das janelas de visibilidade, todas as restrições para inserção de cada ação no plano devem ser respeitadas, considerando-se tanto restrições de tempo quanto de recursos.

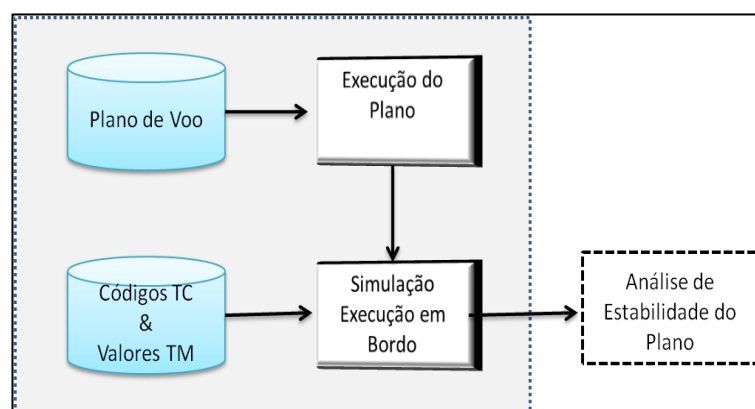
O módulo de execução deve atuar no ambiente de operação e também deve executar as ações do plano de forma a ativar as funções do sistema de controle de satélite que correspondem às ações definidas no plano. A execução de procedimentos consiste na realização, em tempo real, de tarefas agendadas conforme o planejamento de operações. É através desta execução que equipamentos de carga-útil dos satélites são ligados para a obtenção de dados da missão, e medidas de posição e de apontamento são obtidas para ser processadas pela dinâmica de voo.

Para validação de um plano pronto a ser executado, pode-se fazer o uso de simuladores em *software* de satélites, que validam os procedimentos operacionais aplicados tanto às situações de modo normal como anormal de operação, esses procedimentos são feitos por especialistas da equipe de operação na fase de preparação da missão.

Existe uma área de pesquisa no INPE com experiência em desenvolvimento e especificação de simuladores de satélites. O uso destes simuladores tem sido voltado à validação do sistema de execução de procedimentos (planos). Estes simuladores têm sido projetados para testes de aceitação de sistemas de controle e treinamento de seus operadores. Estes simuladores são compostos de interfaces com aplicativos de monitoramento de telemetrias, envio de telecomandos e disparo de medidas de rastreo, para simular a comunicação entre satélite e estação terrena, e entre estação terrena e centro de controle. Estes simuladores devem possuir mecanismos de recepção de mensagens, de telecomandos e solicitações de medidas de rastreo, a fim de retornar valores de telemetrias e mensagens de medidas.

Foi implementado um modelo simples de simulador para simular o comportamento de equipamentos em bordo, manipulando os valores esperados de parâmetros de telemetria, para que se possa analisar o comportamento da execução do plano e as resposta de ações de replanejamento em função das falhas geradas durante o processo. Se for o caso, um novo plano deve ser elaborado incluindo novas ações ou eliminando ações originais, baseado em análise de *Estabilidade de Plano*. A Figura 6.8 apresenta os elementos que compõem esse módulo.

Figura 6.8 - Módulo de execução e monitoração de plano



Fonte: Produção do autor.

6.6.3 Módulo de análise e seleção de método de replanejamento

O objetivo final do planejamento é a construção de planos para execução. No entanto, quando um plano é executado em um ambiente real, ele pode encontrar diferenças entre o resultado esperado e o contexto real de execução, ou uma alteração nos objetivos a serem atingidos pelo plano. Em ambos os casos, o plano (velho) original deve ser substituído por um novo. Em substituição do plano, uma consideração importante é a estabilidade do plano. Existem duas estratégias alternativas para se alcançar a reparação estável de um plano: uma é simplesmente a de replanejar a partir de zero, e a outra é a de adaptar o plano existente ao novo contexto.

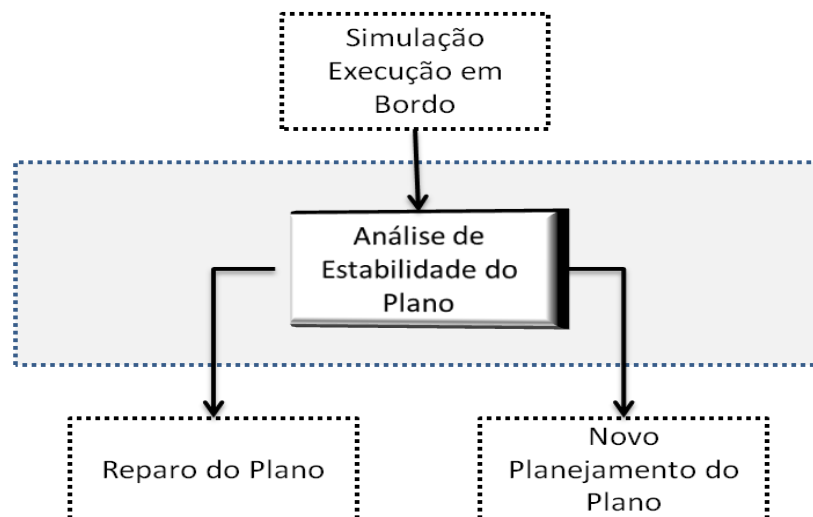
No trabalho de Fox et al. (2006) são apresentados os argumentos para apoiar a alegação de que a estabilidade do plano é uma propriedade valiosa e propõe uma implementação de uma estratégia de reparação do plano, com base na abordagem que explora a estratégia de busca local usando planejador LPG-TD de Gerevini e Serina (2002), que adapta um plano para seu novo contexto. Neste trabalho de Fox et al. (2006), mostrou-se empiricamente que a sua estratégia de reparação de plano consegue mais estabilidade do que replanejamento e pode produzir planos reparados de forma mais eficiente do que replanejados. Em alguns casos, uma parte significativa do plano original pode ser totalmente reutilizada, com certo grau de estabilidade (ou seja, a manutenção de parte das

ações originais) evitando que o executivo use um plano inteiramente novo e desconhecido que induz claramente a muitas diferenças entre o original e o novo plano.

Em processos de replanejamento, existe um interesse enorme em se alcançar a estabilidade do plano, a fim de se preservar o conteúdo da informação presente em um plano original. Para este efeito, um plano deve ser considerado mais estável se está próximo de outro, não só em termos dos passos que contém, mas também em termos da ordem desses passos, isso pode ser observado modelando a estabilidade e usando-a como uma métrica na determinação dos benefícios da abordagem adaptativa.

Este módulo faz uma análise do custo de reparo de um plano, verificando o segmento de plano a ser alterado, utilizando o conceito de *cabeça*, e *cauda* de um plano. Por questões de simplicidade para Garrido et al. (2010), cada plano é dividido em dois subplanos a serem concatenados: i) uma cabeça, e ii) uma cauda. A Cabeça é criada com as ações que são executadas a partir de um estado inicial S_i até um estado intermediário S_j e a cauda com as ações executadas a partir de S_j até o S_n estado objetivo. O módulo de apoio à decisão prevê dois novos planos para resolver essas discrepâncias com base do plano original. A Figura 6.9 apresenta esse processo da análise.

Figura 6.9 - Módulo de análise e seleção de método de replanejamento



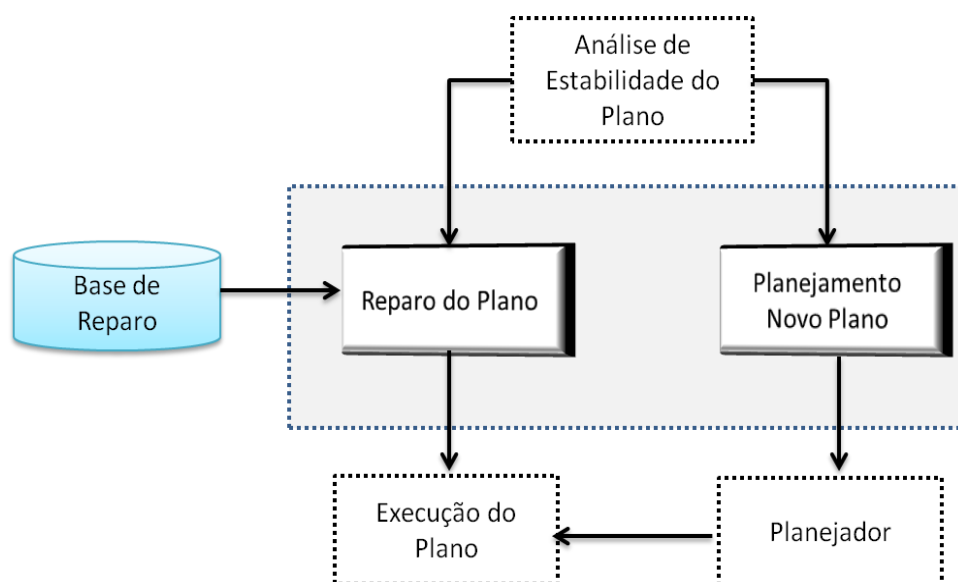
Fonte: Produção do autor.

6.6.4 Módulo de replanejamento e de reparo do plano.

Este módulo é responsável pela detecção de falhas na execução de um plano original. Durante o processo de envio de telecomando e execução do mesmo em bordo, as telemetrias associadas têm seus valores correspondentes gerados de forma aleatória, dentro e fora de limites de faixa, indicando a ocorrência de sucesso ou falhas das ações executados do plano para controle de satélites.

A Figura 6.10 mostra a estrutura do módulo com seus componentes principais, que tem como entradas um relatório das falhas de execução das ações do plano, e a relação dos telecomandos com descrição dos seus códigos e dos parâmetros de telemetria correspondentes.

Figura 6.10 - Módulo replanejamento e de reparo do plano de voo



Fonte: Produção do autor.

Como resultado da Análise de Estabilidade de plano este módulo pode determinar qual estratégia adotar, o Reparo, ou o Replanejamento de um novo plano.

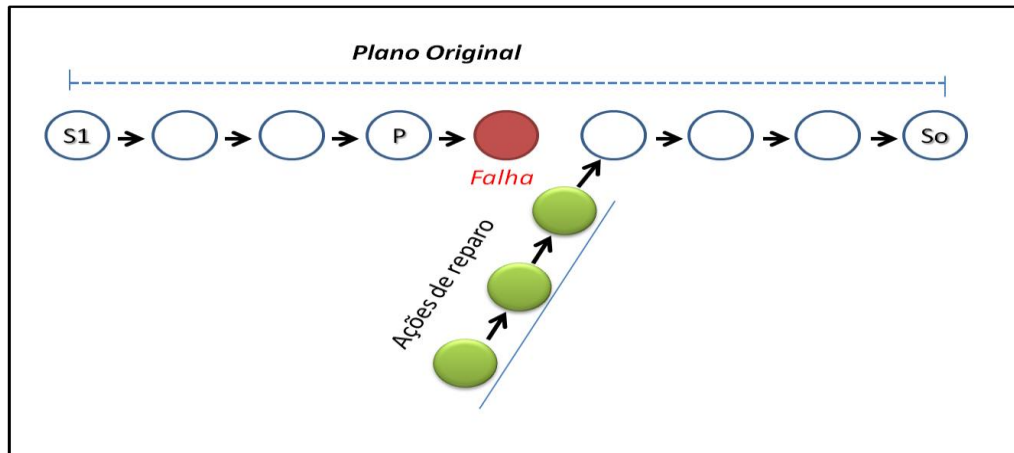
Durante o controle de operação são disponibilizados métodos previstos e procedimentos para evitar as falhas de satélites, que são a base da operação de rotina em solo do satélite. Os procedimentos adotados para tratamento de falhas estão descritos nos documentos que

servem de apoio à operação. O tratamento de uma falha faz uso dos seguintes termos para caracterizar um cenário de falha:

- a) Código de identificação de falha;
- b) Nome para identificar facilmente a falha;
- c) Código do subsistema onde ocorreu a falha;
- d) Grau de severidade da falha, tais como: perda do satélite, perda da carga útil, perda de redundância ou outras perdas;
- e) Método de recuperação de falha indica qual método deve ser usado para recuperação de falha, Telecomando ou Automático;
- f) Indicativos de falha, aqui são apresentados os sintomas da falha, tais como: Valor errado de telemetria, sinal anormal ou qualidade ruim de imagem;
- g) Fase de operação na qual ocorreu a falha, tais como: Inicial, Rotina, Transferência de Órbita ou Ajuste de Órbita;
- h) Plano de recuperação, onde são apresentadas as ações necessárias para superar, ou mitigar essa falha.

Se a opção de reparo for a mais viável para o caso em questão, esse módulo deverá identificar que ação causou a falha no caso, qual telecomando, e deverá buscar as medidas para a contingência. Os planos de contingência são elaborados pelos especialistas do satélite, e são representados por comandos adicionais que procuram reparar o plano vigente através de uma ponte, ligando o estado em que ocorreu a falha com o estado que seria o próximo a ser executado no plano. A Figura 6.11 mostra esse procedimento.

Figura 6.11 - Processo de reparo do plano



Fonte: Produção do autor.

Na execução de um plano de controle de satélite, quando uma ação falhar em bordo, se o satélite estiver fora de passagem, o sistema de bordo aplicará o procedimento de reparo automático e se ocorrer durante a passagem, a equipe da operação pode enviar telecomandos diretos, para poder recuperar o plano ainda em execução. Esta tese tem como objetivo o reparo do plano em tempo real, ou seja, enquanto o satélite estiver em janela de visibilidade.

Um caso típico que pode ser dado como exemplo de uma falha, pode ocorrer com a Câmera PAN do satélite CBERS, nesse caso, existe um procedimento que pode recuperar o plano em execução.

A Figura 6.12, apresenta as informações envolvidas, no procedimento de recuperação de falhas.

Figura 6.12 - Modelo do procedimento de recuperação de falhas

CÓDIGO DE FALHA	<i>FLG05</i>
NOME PARA FALHA	<i>PAN Subsystem can't Power on</i>
CÓDIGO DO SUBSISTEMA	<i>SYSC</i>
GRAU DE SEVERIDADE	<i>Redundancy Lost</i>
INDICATIVOS DE FALHA	<i>After TCG03 is sent, the TMG002 is "0"</i>
FASE DA FALHA	<i>In Orbit</i>
PLANO DE RECUPERAÇÃO	<i>TCG04 and TCH03 are sent again</i>

Fonte: Produção do autor.

Para esta falha específica, na Figura 6.11 os telecomandos *TCG04* e *TCH03* seriam os representados pelos círculos verdes, como estratégia de recuperação que deverão ser inseridos no ponto onde o plano falhou.

Uma característica significativa oferecida pelo reparo plano é que ele pode se beneficiar de planos iniciais de boa qualidade para chegar a planos reparados de qualidade mais elevadas. A estratégia base de adaptação é apresentada em Gerevini e Serina (2000).

6.7 Análise crítica e limitações identificadas no modelo proposto

No problema do planejamento em IA, as duas entradas fundamentais para se gerar planos eficientes são os arquivos que representam o Domínio do problema e o Problema a ser resolvido. A representação do conhecimento pode determinar e definir o sucesso ou o fracasso de um sistema planejador.

As representações de conhecimento, mais utilizadas são baseadas em predicados, herdados do STRIPS, da PDDL e da *Object-Centered Language* (OCL), linguagens modernas de planejamento em IA. Estas formas de representação possuem algumas limitações, levantadas por Kucinskis e Ferreira (2007), que dificultam seu uso em domínios complexos como o espacial, dentre as quais se destacam:

- a) A carência no que se refere à representação de recursos e de seus consumos;

- b) A forma limitada de descrição de precondições e efeitos – não há estruturas de *loops* ou seleções de casos, e nem todas as linguagens baseadas em predicados possuem condicionais (ifs);
- c) O fato é que modelos descritos nestas linguagens devem ser interpretados por um analisador (parser) e convertidos em estruturas de dados, antes de ser utilizados pelo planejador.

Para o modelo proposto o uso de linguagem de representação de conhecimento é plenamente aplicável na fase de Planejamento, pela característica da rotina de preparação de plano. Isto se deve aos planejamentos rotineiros que constituem uma categoria de operações, composta por planejamentos de atividades rotineiras de controle de satélites. No CRC, planejamentos em rotina vêm sendo realizados via software, de forma automatizada, com antecedência de até uma semana. Embora haja ambientes integrados de manipulação de linguagem de representação de conhecimento, tal como a PDDL, a preparação dos arquivos, é uma tarefa árdua, exigindo experiência e conhecimento dos seus atributos e recursos. Um arquivo de problema sempre representa um problema de planejamento previamente bem definido. Portanto, o uso de linguagem de representação de domínio se torna impraticável para replanejamento em tempo real, pois a tabela “percepções x ações” seria muito grande para representar todos os possíveis e observáveis estados de falha. Isso eliminaria a autonomia e flexibilidade do sistema reparador, pela impossibilidade de converter o modelo em linguagem de representação antes de compilar ou adicionar um *parser*.

O modelo de replanejamento proposto nessa tese trata o modelo geral como dois módulos, um para as fases do preparo e a outro para o reparo do plano, que não se integram dinamicamente, ou seja, o planejamento será realizado off-line, isto é fora de passagem e o replanejamento on-line, ou seja, durante uma passagem. O elemento de interface entre os dois módulos será o arquivo do Plano propriamente dito. A impossibilidade de integração leva a duas tarefas bem distintas, com uso de recursos diferenciados de computação e de implementação. Na fase do planejamento pôde-se utilizar uma linguagem de representação para a construção do plano, facilitando a construção de planos de forma automática. Por outro lado, na fase de replanejamento, devido ao requisito de processo em tempo real, foi necessário o desenvolvimento de uma

aplicação, que pudesse analisar as falhas (percepção) e adotar medida corretiva (ação) predefinidas no projeto da missão, de forma a realizar o reparo do plano de voo.

No desenvolvimento do processo de replanejamento optou-se pelo uso de uma linguagem de programação, no caso o C++, que possui recursos avançados de estruturas condicionais, e estrutura de repetição, que são ausentes nas linguagens de descrição de domínios para planejamento, como a PDDL. Outros recursos de linguagens de programação utilizados foram o uso de ponteiros e chamadas a serviços de classe, que implementam as funcionalidades do modelo. Com esse recurso foi possível tratar o problema de reparo de plano em tempo real, fazendo uso de arquivo em XML, com o modelo completo de falhas previstas e descritas no *HandBook* do satélite, no caso o CBERS (XSCC; CAST, 2009).

Outra questão observada é a elaboração trabalhosa do arquivo com todos os procedimentos de recuperação de falhas, possibilitando identificar a falha e sugerir as medidas corretivas, para validar o plano em execução. Nesse trabalho, o arquivo foi modelado utilizando as descrições para os telecomandos e telemetrias e foi codificado em formato XML permitindo uma maior representatividade da base com os dados dos telecomandos e telemetrias do satélite. Os manuais disponíveis para operação do satélite contêm tabelas das possíveis falhas que podem ocorrer. Para tanto existe uma correspondência (falha / ação), exigindo atuação de pessoal experiente em controle. Para algumas situações, adotam-se procedimentos de reenvio do mesmo telecomando, ou em caso extremos, o abandono do plano, para análise detalhada da falha fora de passagem. Neste caso a limitação se refere à dificuldade de representar todas as combinações possíveis de conjuntos de falhas e medidas corretivas, sem que haja decisões humanas.

Outro aspecto que se pode claramente delinear é a aplicação desse modelo em ambientes multimições, onde o gerenciamento das bases de conhecimento para reparo de plano geraria enorme quantidade de informações, em função da diversidade de satélite e por sua vez, uma necessidade de um controle especializado, o que demandaria mais pessoal capacitado. Com a escassez do quadro de pessoal, a criação de mais uma atividade de apoio operacional, seria inviável e haveria uma sobrecarga na atual equipe de controle.

Neste estudo foi possível constatar a inviabilidade do replanejamento partindo de zero, pois isso remeteria ao problema do planejamento como discutido em capítulos

anteriores. O reparo de plano em tempo real, na preparação de planos de carácter temporal, na maioria das vezes não se dispõe de tempo suficiente, considerando o tempo de preparação dos arquivos de problemas em linguagem de representação, mais o tempo da geração do novo plano.

7 O MODELO FORMAL DO AGENTE DE REPLANEJAMENTO

Durante a execução e monitoramento do plano quando houver detecção de falhas, o agente de reparo será ativado, para identificar as características da falha, e aplicar os procedimentos indicados para manter a integridade do plano em execução, para isso fará uso da técnica de refinamento para introduzir novas ações no plano original, a partir da ação onde ocorreu a falha.

Entretanto o **Refinamento** em alguns casos pode induzir a inserção de novas ações que estarão repetidas nos passos subsequentes gerando, portanto a redundância de ações no plano. Alguns procedimentos preestabelecidos como medidas de contingência, e que são utilizados pelo pessoal do controle, em alguns casos replicam sequência de ações que já estão inseridas no plano original, e que seriam imediatamente as próximas a ser executadas na fila de execução, portanto devem ser eliminadas da fila de execução.

Para um plano original $P = \{a1, a2, ..., a3\}$, e um subplano reparador $Pr = \{ar1, ar2, ..., ar3\}$, em alguns casos a interseção $P \cap Pr \neq \text{vazio}$, em instantes próximos da falha, o subplano reparador, pode conter algumas ações já presentes no plano original.

No controle atual de forma manual, o controlador insere novos comandos na forma de subplanos removendo da fila as possíveis duplicidades de comandos. A execução imediata de ações repetidas, pode não ter efeito consistente para os padrões do controle de satélites, como exemplo, a execução de um comando que liga um equipamento, considerando que o mesmo já esteja ligado, pela mesma ação que já o ligou instantes atrás. A identificação de ações a ser eliminadas do plano é realizada por processo de **Busca Local** para frente no plano, *Search Forward*, conforme Russell e Norvig (2004), depois de identificadas as ações, o agente de reparo ativará o processo de **refinamento reverso** para remover estas ações do plano.

Após os procedimentos de inclusão e exclusões de ações, implica na necessidade de refazer o **agendamento** da sequência das ações, pois novas ações são inseridas em um plano onde as ações já estariam previamente agendadas. Da mesma forma após a eliminação de ações redundantes aplica-se o processo de **reagendamento** das ações. Para

garantir a mesma integridade do plano original, o agendamento para o restante do plano tem compromisso de não exceder ao tempo da passagem do satélite.

A seção seguinte apresenta como essas técnicas podem ser combinadas para realizar o processo de reparo de plano.

7.1 Técnicas combinadas em IA para reparo de plano

As técnicas de reparo de plano, apresentadas na seção 5.3.4, que aplicam o refinamento e o refinamento reverso de modo geral atuam de forma independente em instantes e cenários distintos. Este trabalho de tese adotou como solução ao problema de replanejamento de controle no INPE, a integração das duas técnicas, pois o refinamento introduz ações que devem ser removidas por refinamento reverso, para isso após o refinamento será necessária análise do plano restante para detectar possíveis repetições de ações em janela de tempo vizinha a ocorrência de falhas.

Para que esta integração fosse possível, foi necessária a criação de um módulo de análise da necessidade de se integrar as duas técnicas criando uma relação de dependência entre elas. O caso do controle do plano de voo em estudo, apenas a técnica de refinamento, ou seja, a inclusão de ações no plano, não se mostrou totalmente suficiente, pelo fato de duplicar ações no plano, exigindo a imediata remoção do plano.

7.1.1 Módulo de análise e integração de técnicas de reparo

Para que fosse possível integrar duas técnicas com funções adversas, adotou-se como solução, a criação de um módulo para analisar a integridade do plano após a inclusão de novas ações (refinamento), identificando a necessidade de excluir ações que violam a integridade do plano, com bases em restrições, como mostra a Figura 7.1, para permitir que os dois métodos de reparo sejam aplicados de forma integrada.

Após a aplicação da técnica de Refinamento, o **Módulo de Análise e Integração** tem as seguintes funções principais:

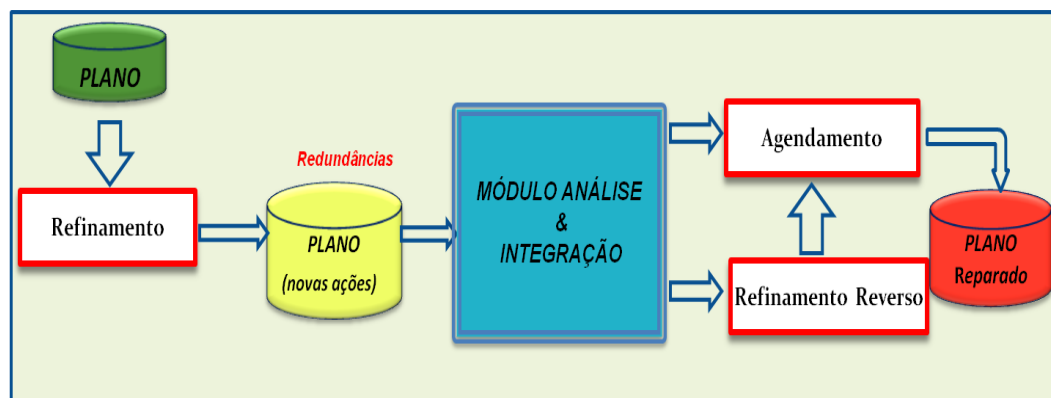
- a) Examinar o plano reparado a partir do ponto de falha;
- b) Identificar as ações redundantes do plano original com o trecho que foi reparado;
- c) Avaliar tempo restante em função do tempo útil da passagem;

- d) Ativar o Refinamento reverso retirando do plano as ações duplicadas, se necessário;
- e) Manter um histórico de refinamento.

A solução adotada estabelece primeiramente a aplicação do refinamento para reparo do plano, onde se observou a inclusão de ações já existente no plano, essa estratégia pareceu ser mais natural, no sequenciamento de operações, e também mais prático. Outro procedimento válido seria analisar os subplanos de reparo, confrontando com o plano original antes da inclusão, e aplicar refinamento reverso nos subplanos para eliminar e evitar inclusão de ações repetidas, antes de sua inserção no plano original.

Este módulo terá como saída principal o plano reparado, com inclusão de novas ações e as possíveis exclusões, o plano reparo deverá passar pelo processo de reagendamento de ações, para finalmente ser executado.

Figura 7.1 - Integração de técnicas de reparo



Fonte: Produção do autor.

7.2 Conceitos básicos para representação do modelo formal

Para o modelo formal do Agente de replanejamento, são necessários alguns conceitos a seguir, que serão aplicados na construção do modelo formal.

Definição 1 - (Problema de Planejamento) Um problema de planejamento é dado pela 5-tupla $P = (S, Si, Sg, O)$, onde S é um conjunto de variáveis estado associadas com um domínio finito ou infinito Dv , onde a cada variável em S é atribuído um determinado

valor em Dv . Si é o estado inicial em S , Sg é uma variável parcial atribuída em S , sendo o estado objetivo do problema. O é um conjunto finito de operadores sobre S , que quando aplicado, seus efeitos alteram os valores das variáveis.

Definição 2 – (Plano como uma sequência linear de estados) Um plano é definido como uma sequência cronologicamente ordenada de estados $\pi = \{S1, S2, \dots, Sg\}$, onde todos os Si são uma instância dos resultados dos efeitos das ações sobre o estado $Si-1$, $S1$ é o estado inicial e Sg é o estado objetivo satisfeito no último do plano. A descrição mais bem detalhada de um plano de voo é apresentada na seção 8.1.1.

Definição 3 – (Base de reparo) – Br é o conjunto de subplanos candidatos $Br = \{Pc1, Pc2, Pc3, \dots, PcN\}$, a serem inseridos durante o processo de refinamento no reparo de plano do plano original.

Definição 4 – (Heurística de reparo) é o método que permite selecionar em um conjunto de subplanos candidatos na base de reparo Br , o subplano ideal Pci para o processo do refinamento. Usando o conceito de *ação durativa*, definida na seção 5.3.1 e a *restrição temporal* das ações, a heurística de reparo é implementada por uma função que retorna um plano candidato a ser utilizado.

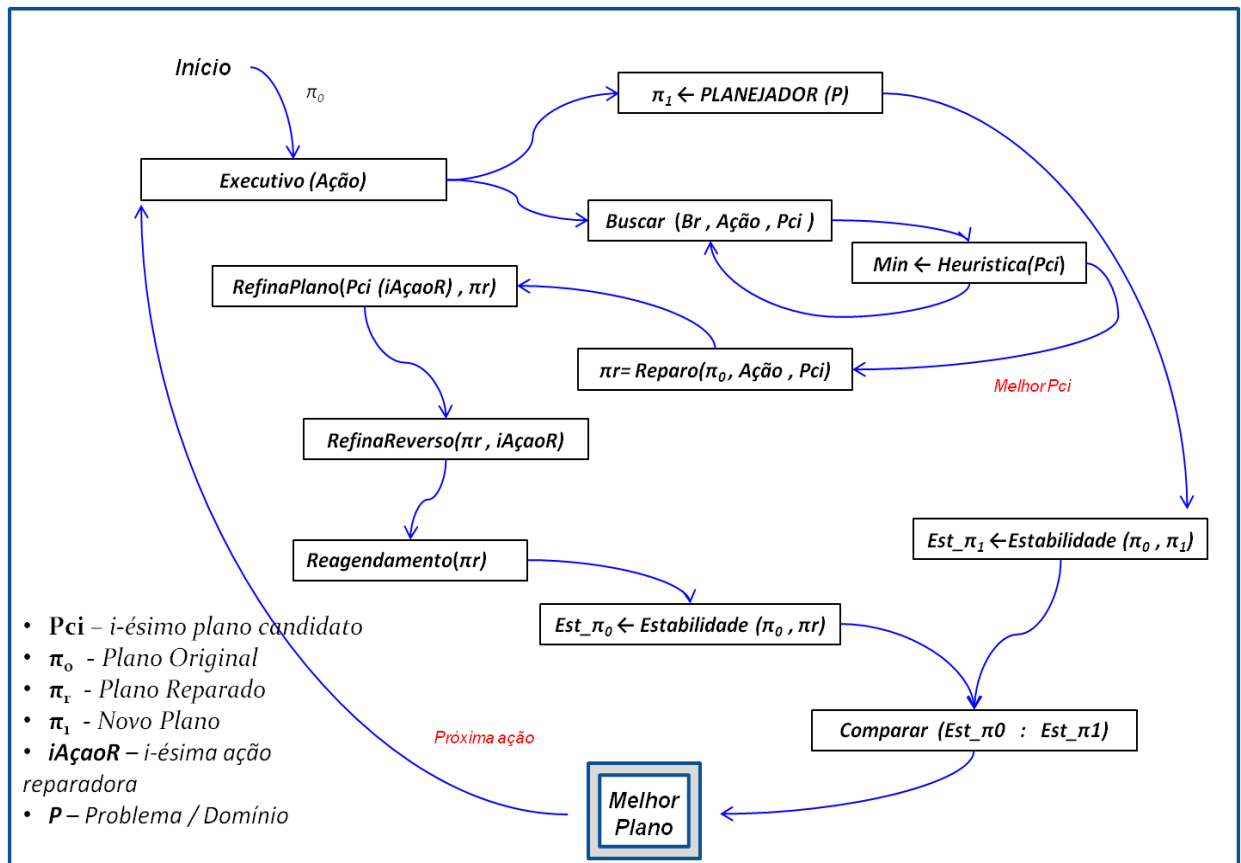
Definição 5 – (Tratamento de Falha) – a uma relação Binária (a,b) onde a é uma ação do plano de voo e b é um valor da resposta da ação tal como, sucesso, falha, telemetria indicativas (ligado/desligado, valor de voltagem, etc.)

Objetivo do agente é executar e monitorar um plano $P = (S, Si, Sg, O)$, e se qualquer discrepância entre o contexto esperado e o observado, durante a execução, atingir um estado inesperado, isto poderá ser devido aos eventos exógenos que alteraram algumas informações estáticas no ambiente de controle, ou que uma ação falhou ao executar ou cumprir uma parte dos seus efeitos. Portanto torna-se necessário um mecanismo para reparar o plano por meio de Reparo.

A formalização do Módulo de análise e integração de técnicas de reparo e suas funcionalidades estão detalhadas no Apêndice E, com apresentação dos algoritmos que o implementam.

A Figura 7.2 mostra o fluxo de integração das técnicas utilizadas

Figura 7.2 - Fluxo de integração das técnicas em replanejamento



Fonte: Produção do autor.

Os algoritmos descritos no Apêndice-E serviram de base para a construção de um protótipo que será detalhado na seção 8.4.

7.3 Análise de casos de reparo

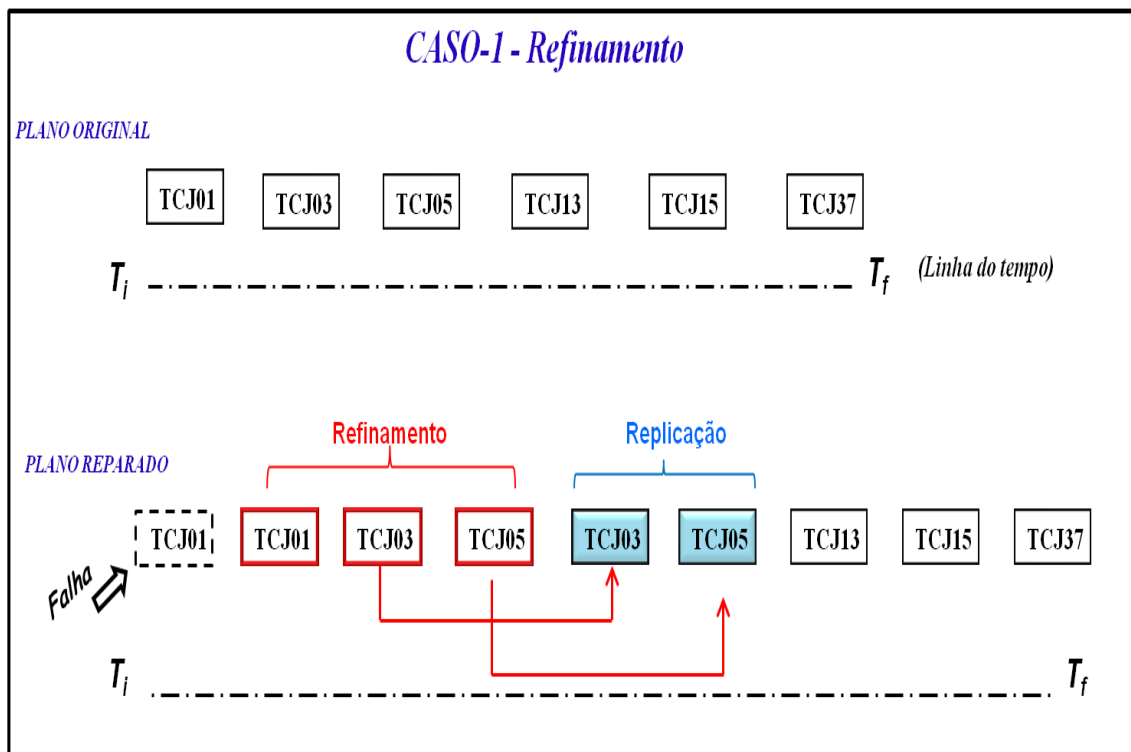
A seguir são apresentados três casos opcionais que podem ser adotados durante o processo de reparo que serão detalhados a seguir. Para o controle de contingência de um plano de operação em execução, são disponibilizadas sequências de ações na forma de subplanos, apresentados em três casos, que permitem a reparação de um plano que

falhou. Esses subplanos são candidatos para reparar um plano original, será adotado o subplano que atender melhor as restrições causais e temporais.

Quando ocorrer uma falha na execução do TCJ01 do plano de voo, que é identificada por “*TWTA in Low voltage protection*”, que tem como causa a “*Tensão de alimentação principal abaixo da faixa de 24V +/- 0.5V*”, será indicada durante o rastreo pelas telemetrias TMJ001=0; TMJ002=0; TMJ003=0, como descrito na Figura 8.10. Para esse tipo de falha têm-se três medidas de contingência onde se insere subplanos opcionais no plano original, esses casos são descritos a seguir.

No caso-1, Figura 7.3, no instante imediato a ocorrência da falha, utiliza-se a técnica de *Refinamento* para inserir os telecomandos TCJ01, TCJ03, TCJ05, destacados em caixas vermelhas, a inserção dessas sequências causará a duplicidades de ações, TCJ03 e TCJ05 em caixas azuis, que já estão inicialmente presentes no plano, tornando-se necessária a eliminação das ações que se repetem aplicando a técnica de *Refinamento Reverso*.

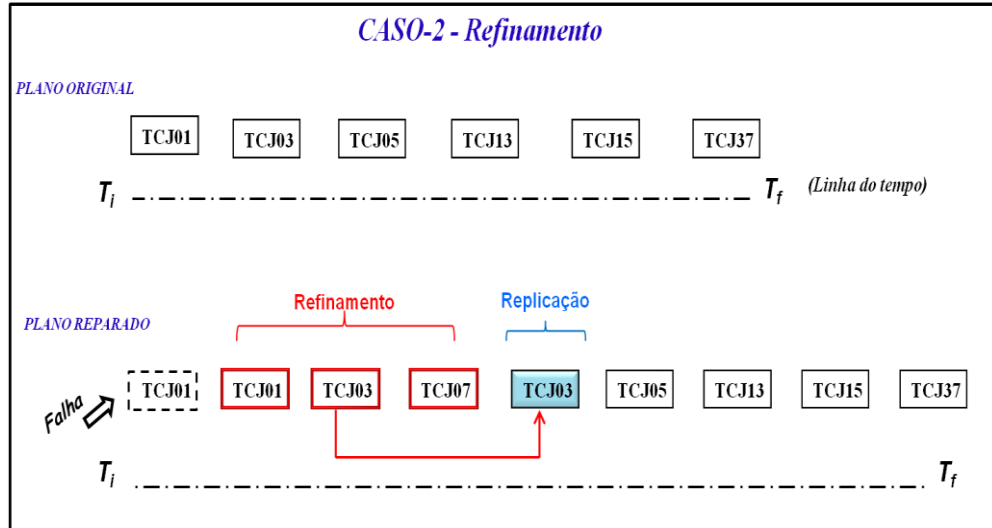
Figura 7.3 - Caso-1 de reparo por refinamento



Fonte: Produção do autor.

O caso-2, Figura 7.4, mostra o refinamento inserindo os telecomandos TCJ01, TCJ03, TCJ07, também destacados em caixas vermelhas, causando assim a duplicidade do telecomando TCJ03 devendo esse ser eliminado do plano por refinamento reverso.

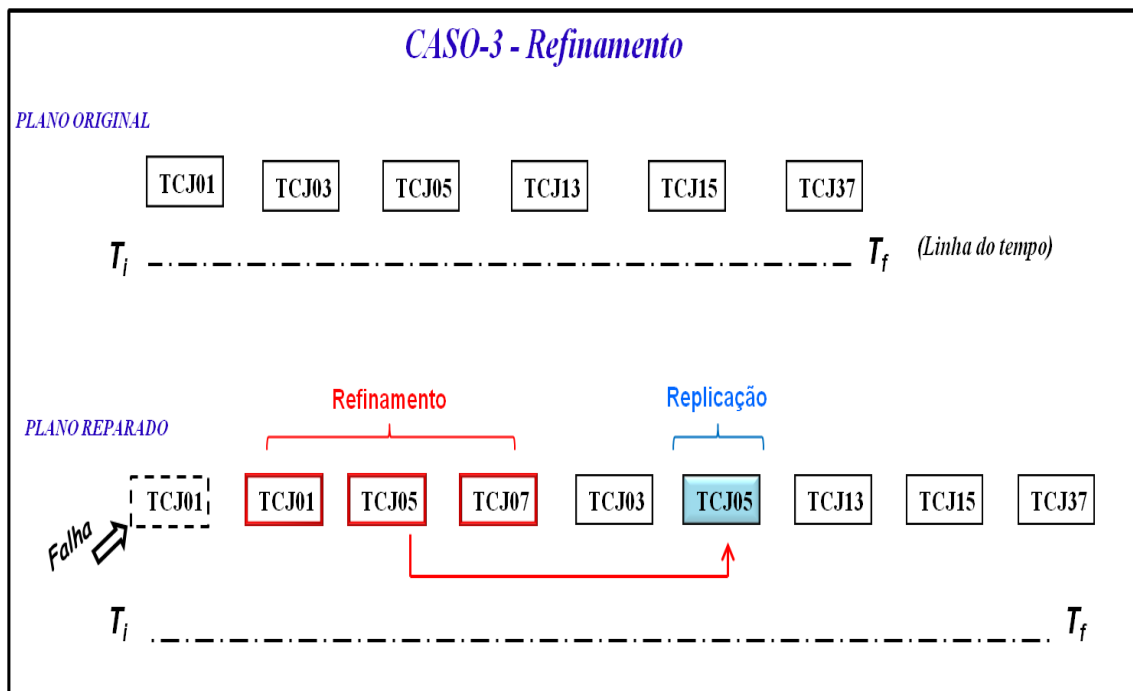
Figura 7.4 - Caso-2 de reparo por refinamento



Fonte: Produção do autor.

O mesmo ocorre no caso-3, Figura 7.5, para os telecomandos TCJ01, TCJ05, TCJ07 para o refinamento, e refinamento reverso para o telecomando TCJ03.

Figura 7.5 - Caso-3 de reparo por refinamento



Fonte: Produção do autor.

Todos esses casos são complementados com o procedimento de reagendamento levando em consideração o tempo ainda disponível inicial T_i e final T_f da passagem.

8 DETALHAMENTO DA ARQUITETURA DO AGENTE DE REPLANEJAMENTO

No capítulo anterior, a arquitetura de replanejamento de plano, apresentou os recursos em IA utilizados para resolver o problema de replanejamento automático, dispostos em módulos de tal forma que se pudesse visualizar a integração existente. Essa integração entre eles é que promove a base para se implementar um modelo completo no nível de automação das operações. Uma arquitetura do agente de replanejamento no aspecto estático está apresentada na Figura 6.3, com os elementos importantes dispostos em camadas representando os níveis de conhecimento.

A arquitetura de desenvolvimento do agente de replanejamento, implementa a integração das técnicas de IA já discutidas em seções anteriores, que são as seguintes:

- a) Agente reativo;
- b) Técnica de reparo por refinamento;
- c) Técnica de reparo por refinamento reverso;
- d) Heurística de refinamento;
- e) Técnica de estabilidade de plano

O desenvolvimento da arquitetura para o problema de replanejamento com base no estudo de outros modelos, identificou os seguintes módulos a ser implementados:

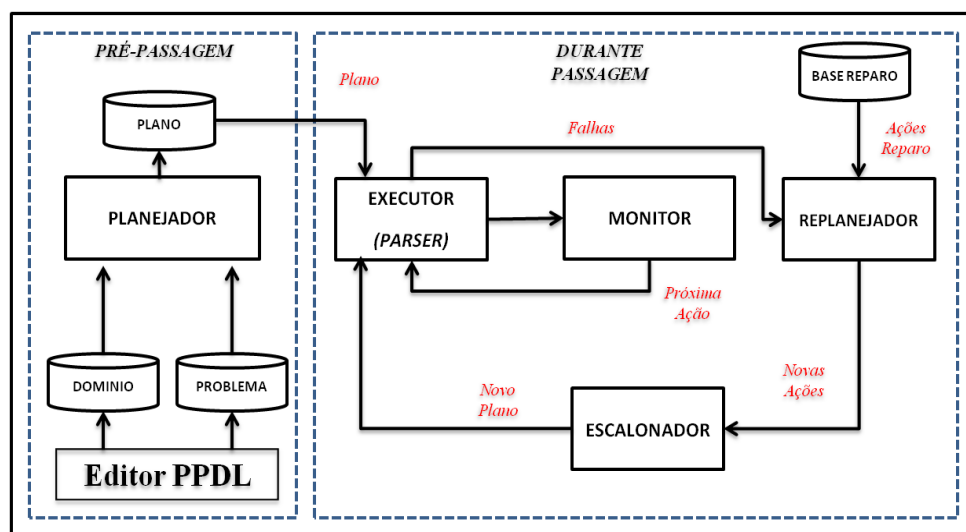
- a) Módulo de planejamento, para geração do plano original;
- b) Módulo de execução para interpretar as ações e simular o comportamento em bordo;
- c) Módulo de monitoramento para detectar falhas na execução das ações e tomar decisões de reparo do plano;
- d) Módulo de replanejamento, para reparar o plano original;
- e) Módulo de escalonamento para adequar as novas ações em uma janela de tempo.

Os módulos atuarão em fases distintas do controle de satélite, em dois cenários, antes da passagem, na fase de preparação quando o plano é elaborado, e durante a passagem, quando o plano é executado e replanejado.

Cada passagem de um satélite é preparada configurando-se os sistemas de solo de forma a suportar as necessidades de rastreo, de transmissão de telecomandos e recepção de telemetria. Uma vez que o satélite torna-se visível para a estação terrena, o canal de comunicação é ligado. No final da passagem, o canal de comunicação é desligado.

Existem dois tipos básicos de plano de voo, normalmente confeccionados para uma missão espacial. O primeiro é desenvolvido para a fase crítica de lançamento e órbitas preliminares em que a órbita do satélite deve ser determinada pela primeira vez e os subsistemas do satélite devem ter o funcionamento verificado em órbita. O segundo tipo é desenvolvido para atender a fase de rotina, na qual a operação é constituída pela aplicação de procedimentos operacionais repetitivos, permitindo o uso de um procedimento automático para sua geração. Neste caso, o plano é gerado para atender um determinado período que depende da missão. Esta arquitetura é apresentada na Figura 8.1, e sua funcionalidade será descrita nas próximas seções.

Figura 8.1 - Arquitetura de desenvolvimento do replanejamento



Fonte: Produção do autor.

8.1 Módulo do planejamento em pré-passagem

Na Figura 8.1, à esquerda, está representada a fase de planejamento automatizado para geração do plano de operações a ser realizadas em bordo. A solução para geração de um plano é encontrada pela aplicação de técnicas de planejamento que tratam problemas de planejamento com restrição de tempo e de recurso.

O problema do planejamento tem que tratar com dois subproblemas, 1) construção do **Domínio** do problema , 2) construção do **Problema** propriamente dito, ou seja as condições para criar um novo plano de voo. O arquivo de domínio consiste da descrição de todos os elementos que são necessários para modelar o comportamento do domínio para o qual o planejador deve encontrar um plano. Neste arquivo são definidos os tipos, as funções, os predicados (literais) e todas as ações do domínio. Para cada ação é necessário definir a precondição para execução da ação e o efeito que ocorre após a sua execução. A precondição é uma conjunção de literais que declara qual deve ser o estado do ambiente para que a ação possa ser executada. De modo análogo, o efeito é, também, uma das literais que define qual será o estado do ambiente após a execução da ação. Para ações com duração, é necessário definir também a duração de execução. A definição de duração foi introduzida na versão PDDL 2.1 em Fox e Long (2003). Um exemplo de um **arquivo de domínio** codificado em PDDL é apresentado na Figura 8.2 a seguir:

Figura 8.2 - Exemplo do arquivo de domínio de satélite em PDDL

```
;; Dominio - Medida de Distancia, Medida de Velocidade, Telecomando
(define (domain CBER4DOMAIN)
  (requirements :equality :typing :fluents :durative-actions :timed-initial-literals)
  (:types PassNumber SatCode GSCode CalibGroupNumber RangeGroupNumber RangeNumber
  RRateGroupNumber TCCode)
  (:predicates
  ;;Internal Events
    (TCSent ?pass - PassNumber ?sat - SatCode)
    (CalibrationOK ?pass - PassNumber ?cgroup - CalibGroupNumber)
    (Calibrate ?cgroup - CalibGroupNumber ?pass - PassNumber ?sat - SatCode ?gs - GSCode)
    (FirstRange ?pass - PassNumber ?sat - SatCode ?gs - GSCode)
    (CalibrationAvailable ?pass - PassNumber ?gs - GSCode)
    (FirstTc ?pass - PassNumber ?sat - SatCode ?tc - TCCode)
    (LastTC ?pass - PassNumber ?sat - SatCode ?tc - TCCode)
  ;;Goals
    (RangeOk ?pass - PassNumber ?rgroup - RangeGroupNumber ?num - RangeNumber)
    (RRateOK ?pass - PassNumber ?sat - SatCode ?gs - GSCode ?RRGroup - RRateGroupNumber)
    (TimedTCOK ?pass - PassNumber ?sat - SatCode ?tc - TCCode)
```

Fonte: Adaptada de Cardoso (2006)

Para o exemplo da Figura 8.2, definiu-se com *types* as entidades PassNumber – Número da passagem, SatCode- Código do Satélite, número de grupos de Medidas de *Ranging*, *Range Rate* e de calibração. Como *predicates* foram definidos os eventos associados às condições para realização, são eles: TCSent, CalibrationOK, Calibrate, etc. Os Goals, são as metas a serem atingidas, que no exemplo, são as funções RangeOk, RRateOK TimedTCOK, que indicam a realização das funções Medidas de *Ranging*, *Range Rate*, e

envio de TC Temporizado. As metas são atingidas, obtendo valores lógicos verdadeiros, quando as operações associadas a elas forem realizadas com sucesso.

O arquivo de problema é que instancia o domínio para o ambiente desejado. Nos arquivos de problemas são definidas as seguintes informações: objetos (*objects*), estado inicial do ambiente (*init*) e o estado objetivo (*goal*). Os objetos são instanciações dos tipos definidos no arquivo de domínio. Um exemplo de um **arquivo de problema** codificado em PDDL é apresentado na Figura 8.3, onde apresenta um problema relacionado à operação de uma câmera de sensoriamento remoto.

Figura 8.3 - Exemplo do arquivo de problema em PDDL

```
;;Arquivo de problema para a passagem:CBERS4CBAProblemPASS971
(define (problem CBERS4CBAProblemPASS971)
  (:domain CBER4DOMAIN)
  ;;Definição dos Objetos
  (:objects
    PASS971 - PassNumber
    CBERS4 - SatCode
    CBA - GSCode
    CGroup03 - CalibGroupNumber
    Range02 - RangeNumber
    Range04 - RangeNumber
    RGroup6 - RRateGroupNumber
    TCJ01 - TCCode;; TWTA LV ON
    TCJ03 - TCCode;; TWTA-A HV ON
    TCJ05 - TCCode;; TWTA-B HV ON
  )
  ;;Definição das Funções
  (:init
    ;; (= (CalibrationTime CBA CGroup03) 90.0)
    ;; (= (PassTime PASS971) 500.0)
    (= (RangeTime CBA RGroup03) 5.0)
    (= (TcTime TCJ01) 1.0)
    (= (TcTime TCJ03) 1.0)
    (= (TcTime TCJ05) 1.0)
  )
  (:goal (and
    (TimedTCOK PASS971 CBERS4 TCJ01)
    (TimedTCOK PASS971 CBERS4 TCJ03)
  ))
)
```

Fonte: Produção do autor.

A geração automática do plano de voo utilizou o planejador LPG-TD de Gerevini e Serina. (2002), e a linguagem de planejamento PDDL, conforme foi apresentado em Cardoso (2006).

O LPG-TD é um planejador completamente automático e incremental para problemas que envolvam os seguintes elementos: Ações com duração; Ações e objetivos com

expressões numéricas; Operadores com efeitos de quantificação universal; Operadores com precondições implicativas. Literais iniciais temporizados (eventos exógenos incondicionais determinísticos). Outra característica importante deste planejador é que ele é compatível com a linguagem PDDL.

O módulo Planejamento é responsável por gerar o Plano de voo. Este módulo, a partir da base de conhecimento descrita em PDDL (arquivo do Domínio e de Problemas) é capaz de encontrar uma sequência de ações que atinja o objetivo proposto no arquivo de Problemas. A solução é encontrada pela aplicação de técnicas de planejamento que tratam problemas de planejamento com restrição de tempo e de recurso. O arquivo de saída do planejador é o plano para o satélite da passagem especificada no problema.

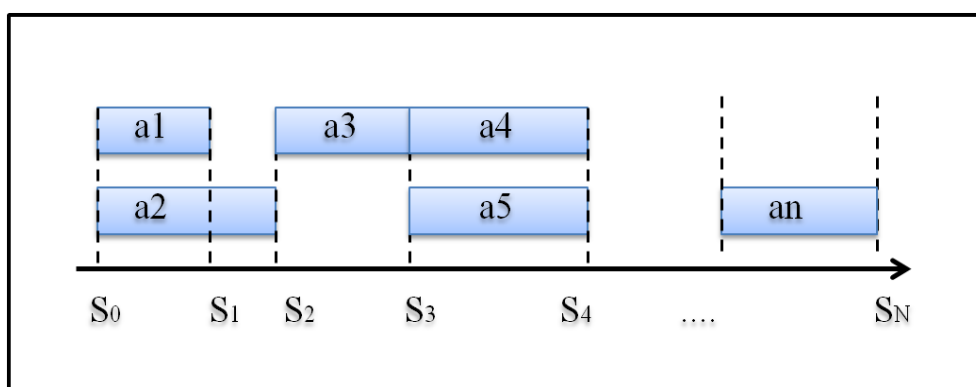
Este módulo de planejamento é responsável pelas seguintes funções:

- a) Acessar os arquivos de Domínio e de Problema, codificados na linguagem PDDL;
- b) Ativar a execução do aplicativo LPG-TD 1.0, como processo em *background* no ambiente do Windows;
- c) Controlar a geração do plano, informando status de sucesso e ocorrência de falhas, devido à má formulação dos arquivos PDDL.

8.1.1 Características típicas de um plano de voo

Um Plano de voo para controle dos satélites do INPE leva em consideração todas as restrições de tempo e recursos impostas pelo problema de planejamento. Os Planos são vistos como uma sequência de estados S_i , que em geral são sequências de ações a_i para realizar alguma atividade relacionada ao satélite, como mostra Figura 8.4.

Figura 8.4 - Representação da ordem cronológica de ações em um plano



Fonte: Produção do autor.

Essa representação é válida para os planos sequenciais, paralelos e até mesmo temporais.

Um exemplo de plano, no contexto de controle de satélite, pode ser uma sequência de telecomandos especiais gerados pelo OBDH para operar um equipamento de Carga Útil para executar uma função específica. O atraso entre telecomandos, em um grupo de comandos, é normalmente 1 segundo, caso contrário o atraso deve ser especificado. O atraso entre telecomandos é controlado pelo computador de bordo automaticamente. Como exemplo, pode-se citar um grupo de comandos para CBERS específico para controle de câmera de sensoriamento remoto que inclui o modo de imageamento e o ajuste de ganho de câmera.

A Figura 8.5 apresenta um exemplo de um plano para controle de uma câmera do CBERS gerado na fase do Planejamento em Pré-Passagem. Neste plano estão representadas as ações e sua ordem cronológica de execução em bordo.

Uma ação é formatada com os seguintes campos:

- Instante de sua execução no plano;
- Código da Ação;
- Parâmetros da ação, tais como, código do TC, número da passagem, código do satélite e da estação, tempo de duração da ação.

Figura 8.5 - Plano gerado pelo módulo planejamento

```
; Version LPG-td-1.0
; Seed 88190444
; Command line: lpg-td-1.0 -p /exemplo -o CBERS4DOMAIN.pddl -f CBERS4CBAProblem.pddl -
speed -out POV_CBERS2 -cputime 500
; Problem CBERS4CBAProblem.pddl
; Time 0.39
; Search time 0.02
; Parsing time 0.36
; Mutex time 0.00
; Quality 3301.00
Time 0.39
10.0002: (SENDTCTIME TCJ01 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
100.0005: (SENDTCTIME TCJ03 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
200.0007: (SENDTCTIME TCJ05 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
300.0010: (SENDTCTIME TCJ13 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
400.0013: (SENDTCTIME TCJ15 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
500.0015: (SENDTCTIME TCJ37 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
600.0018: (SENDTCTIME TCJ25 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
700.0020: (SENDTCTIME TCJ27 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
800.0023: (SENDTCTIME TCH57 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
900.0025: (RANGERATERRGROUP7 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
901.0027: (RANGERATERRGROUP6 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
1200.0031: (SENDTCTIME TCH31 PASS971 CBERS4 CBA) [1.0000]
1300.0033: (RANGE RGROUP03 RANGE02 PASS971 CBERS4 CBA) [5.0000]
1305.0035: (RANGE RGROUP04 RANGE03 PASS971 CBERS4 CBA) [5.0000]
1310.0038: (CALIBRATE CGROUP03 PASS971 CBERS4 CBA) [0.0000]
```

Fonte: Produção do autor.

8.2 Módulo da execução do plano e monitoramento

Quando a construção do plano estiver concluída, o trabalho da sua execução começa. Qualquer agente executando um plano deve monitorar seu ambiente e os efeitos reais de suas ações, porque há mais maneiras em que um plano pode dar errado do que há ações que um agente pode executar.

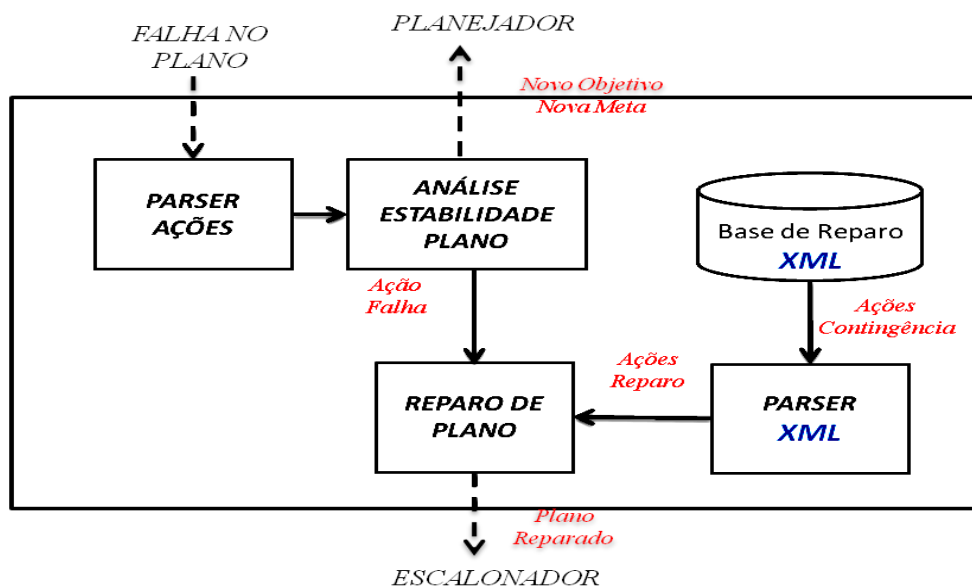
Durante a execução de um plano é necessário detectar os conflitos de tempo em cada tarefa, violação de restrições de recursos, ou falha operacional em algum subsistema do satélite. Essas anomalias devem ser detectadas e tratadas a um determinado tempo, até que não existam conflitos, ou até um limite de tempo, definido pelo usuário ou pelo tempo útil de uma passagem. Um conflito é uma violação de uma reserva, de dependência de parâmetro ou de restrição temporal.

O módulo de Execução do Plano e Monitoramento é responsável pelas seguintes funções:

- a) Receber um plano na linguagem PDDL em formato bem definido;
- b) Ler cada linha do plano e realizar o *Parser* da sintaxe das ações do plano;
- c) Notificar erros na semântica da estrutura do plano;
- d) Ativar a execução das ações;
- e) Simular o comportamento de um subsistema do satélite;
- f) Monitorar resultado da execução das ações;
- g) Recuperar valores de telemetria em arquivo XML;
- h) Ativar o Replanejador em caso de falha.

O processo começa com a leitura de cada ação do plano. Nesta fase é validada a estrutura das ações em termos de seus atributos, tais como tempo de execução em bordo, se o comando é temporizado, identificação da estação de rastreo e do satélite, número da passagem, tempo de duração da ação. O processo de execução do plano se caracteriza como o **Monitoramento de Ações** visto no capítulo 5. Na verificação do sucesso da execução das ações, o **Simulador** produzirá valores aleatórios de acordo com a faixa de limites válidos para as telemetrias, e assim gerando situações correspondentes à falha ou sucesso. Esses status correspondem a valores de telemetria recebidos pelo software de controle definidas em manual de operação do satélite. A Figura 8.6 apresenta os elementos que compõem esse módulo.

Figura 8.6 - Módulo de execução do plano e monitoramento



Fonte: Produção do autor.

8.3 Módulo de replanejamento do plano

Durante a fase da execução do plano monitora-se o sucesso da execução das ações, e em caso de falha, inicia-se o processo de reparo do plano, para verificar a viabilidade de ainda se aproveitar parte do plano que não foi executada e que ainda se encontra na linha de tempo do agendamento, ou optar por confeccionar um novo plano, com novas condições iniciais e os objetivos a ser alcançados. Para a concepção da técnica de replanejamento de planos de voo, foi necessário tomar como base, os estudos dos conceitos necessários para caracterização do modelo de replanejamento a ser empregado, tais como:

- a) Ambiente de tarefa;
- b) Agente de Planejamento;
- c) Caracterização da natureza do plano quanto à ordem das ações;
- d) Escolha da técnica de replanejamento;
- e) Análise da Estabilidade do Plano.

A seguir serão apresentados e discutidos em subitens esses conceitos essenciais para a concepção da solução para o replanejamento.

8.3.1 Caracterização do ambiente de tarefa

O projeto de um agente exige a definição clara da natureza do ambiente, de forma a poder determinar o projeto apropriado e a técnica de implementação de agentes a ser aplicada. Para isso, é necessário definir o **ambiente de tarefa** do agente a ser desenvolvido e classificá-lo, como apresentado na seção 4.4. No domínio de planejamento não-clássico, os agentes têm que lidar com informações incompletas e incorretas. Considerando também o fator do não determinismo classificado como limitado e ilimitado, o agente tem que estar preparado para rever os seus planos e sua base de conhecimento modificando-os em tempo de execução (replanejamento). Um agente pode lidar com o não determinismo limitado fazendo planos que funcionam em todas as circunstâncias possíveis ou incluindo ações de percepção do plano (plano condicional). Por outro lado, com o não determinismo ilimitado, o conjunto de pré-condições ou efeitos possíveis é desconhecido, ou grande demais para ser enumerado completamente.

No ambiente de controle de satélites podem-se identificar algumas características que permitem identificar o ambiente de tarefas, tais como:

- a) **Dinâmico**, no caso em que o ambiente pode se alterar enquanto o agente está deliberando. A execução de algum procedimento a bordo pode levar a um novo estado não previsto no plano, como por exemplo, falha por falta de recursos renováveis ou não renováveis em algum subsistema, isso identificado por valores de telemetria de bordo;
- b) **Não determinístico**, no caso em que o próximo estado não é completamente determinado pelo estado atual e pela ação executada pelo agente. Como em geral o ambiente é dinâmico, algum evento pode mudar um estado atual em execução, levando a um estado inesperado;

Essas duas características do ambiente deram suporte para adoção do método de Planejamento não-clássico, mais especificamente o replanejamento, ou reparo de plano.

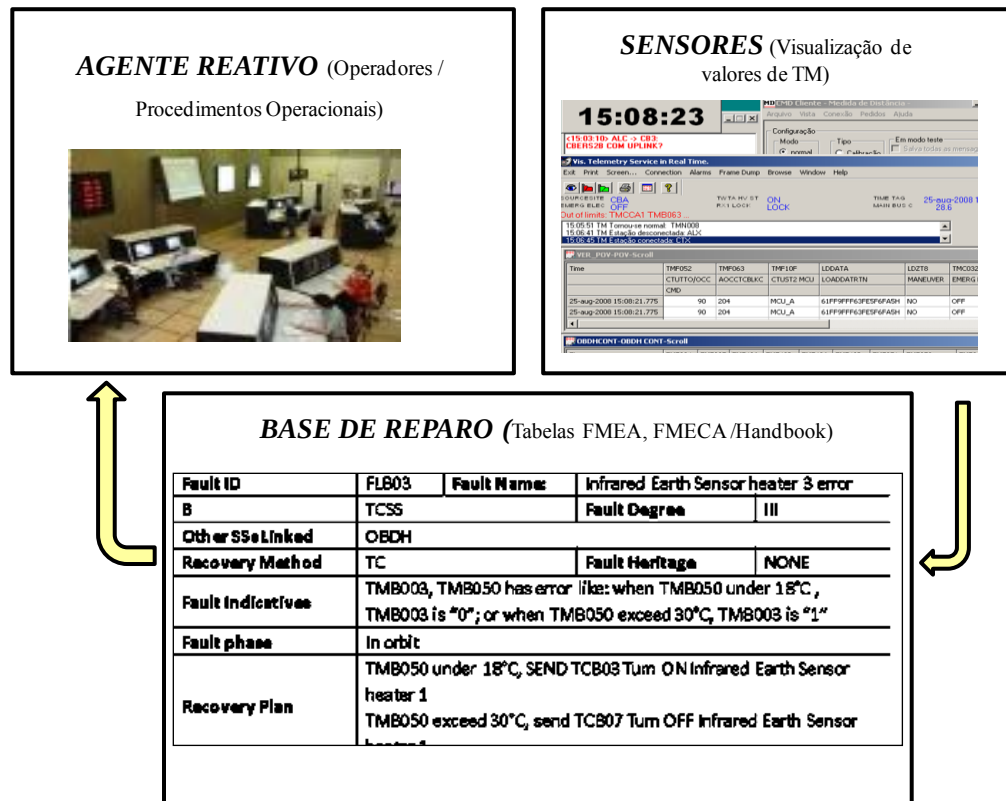
8.3.2 Contextualização do agente de replanejamento

O agente de planejamento incorpora o tipo básico de programa de agente baseado em objetivos. O agente necessita da descrição do estado atual do ambiente e informações sobre objetivos que descreve situações desejáveis. O agente de planejamento, como o próprio nome indica, é dedicado à resolução de problemas de planejamento. O agente inicia com a especificação inicial das situações do ambiente (estado inicial), e em seguida, detalha os objetivos a serem atingidos com o plano e do universo de ações disponíveis.

Na execução de um plano de voo, algumas combinações de falhas e anomalias são imprevisíveis, e suas ocorrências devem ser tratadas de forma a permitir atualizações no plano vigente. Segundo Tominaga (2010), os planos de execução de procedimentos listam passos a ser seguidos por operadores, informando as pré-condições necessárias e os efeitos esperados associados à execução de cada etapa do procedimento. Documentos de processamento de falhas indicam ações a serem tomadas, por meio de tabelas de Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA), e/ou Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA), listando possíveis causas de falhas e sintomas observáveis. (XSCC; CAST, 2009).

Observando a arquitetura descrita de agente reativo no capítulo 5.3.2, os elementos podem ser identificados e associados à descrição de planos de execução de procedimentos no CRC/INPE, (TOMINAGA, 2010) como mostra a Figura 8.7.

Figura 8.7 - Relação agente IA x ambiente CRC/INPE



Fonte: Produção do autor.

Um Agente Reativo segue regras do tipo “condição-ação”, ver seção 3.3, por meio de representação inteligível, modular e eficiente, não podendo armazenar uma sequência perceptiva, tem pouca autonomia e age através de um comportamento do tipo estímulo/resposta para responder ao estado atual do ambiente no qual está inserido.

O conjunto de características que permitiu definir o tipo de agente de replanejamento, nesse trabalho foram os seguintes:

- O Agente está situado em um ambiente dinâmico;
- O Ambiente pode mudar independentemente das ações do agente;
- As ações podem ter efeitos não determinísticos, , ou seja, uma ação poder gerar uma falha inesperada;

- d) Uma ação pode resultar em um conjunto de efeitos alternativos;
- e) Não existe correspondência perfeita entre o ambiente de estado real e a representação do agente.

Assim, em ambientes incertos, os agentes precisam lidar com informações incompletas e incorretas, devendo usar seus sensores para descobrir o que está acontecendo no ambiente enquanto o plano está sendo executado, e modificar ou substituir o plano se algo inesperado acontecer.

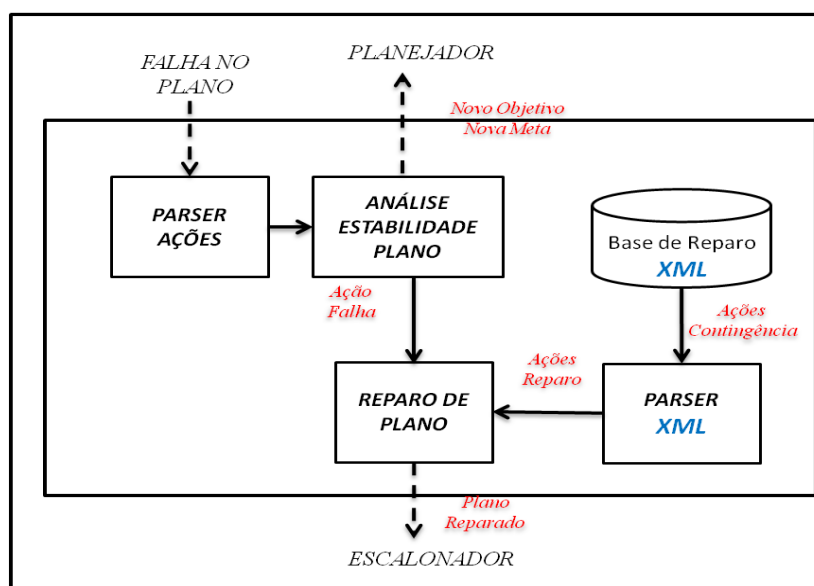
8.3.3 Concepção da estrutura do replanejador

A função de Monitoramento se encarrega de detectar as falhas decorrentes da execução do plano, comparando valores recebidos de telemetria de bordo com os valores esperados que identificam o perfeito funcionamento das cargas úteis definidos nos procedimentos operacionais. Na ocorrência de falhas o Replanejador deve atuar para decidir em reparar ou não o plano e tem as seguintes funções principais:

- a) Identificar a ação falha;
- b) Analisar a viabilidade do reparo em função do tempo disponível da passagem;
- c) Escolher conjuntos de ações candidatas reparadoras;
- d) Aplicar o algoritmo de reparação;
- e) Passar uma nova sequência de ações ao escalonador de tarefas;
- f) Passar o novo plano ao Escalonador.

Primeiramente, foi necessário caracterizar a natureza do Agente de Replanejamento, como foi apresentado na seção 8.3.2, o modelo de Agente Reativo foi o escolhido, resumidamente, pelas seguintes razões principais: ambiente dinâmico e efeitos não determinísticos das ações. A Figura 8.8 apresenta o modelo geral da estrutura do replanejador.

Figura 8.8 - Modelo geral da estrutura do replanejador



Fonte: Produção do autor.

Na ocorrência de falha esse módulo identifica a ação e o grau de severidade da falha, determina a posição relativa dentro do plano, para estabelecer a análise de Estabilidade e verificar qual procedimento de reparo deve disparado, identifica a falha pelo código e busca na base de reparo em XML medidas a serem aplicadas. A seção 8.3.4 seguinte apresenta os critérios adotados para escolha dos métodos de reparo de plano.

8.3.4 Escolha do método de reparo

O comportamento do Agente Reativo é controlado por um circuito de detecção, que monitora a execução para ver se o plano pode ter sucesso no atual estado ou se precisa ser revisado repassando-o para o planejador de refinamento. Alguns conceitos fundamentais vistos na Seção 5.3.1 foram utilizados, para que pudesse caracterizar a natureza do replanejador.

A *definição 2* de *Ação Durativa* da seção 5.3.1, com a noção de tempo inicial e tempo final de atuação de uma ação, permite estabelecer uma relação equivalente com a duração de ações de plano destinado a controle de carga útil no segmento espacial.

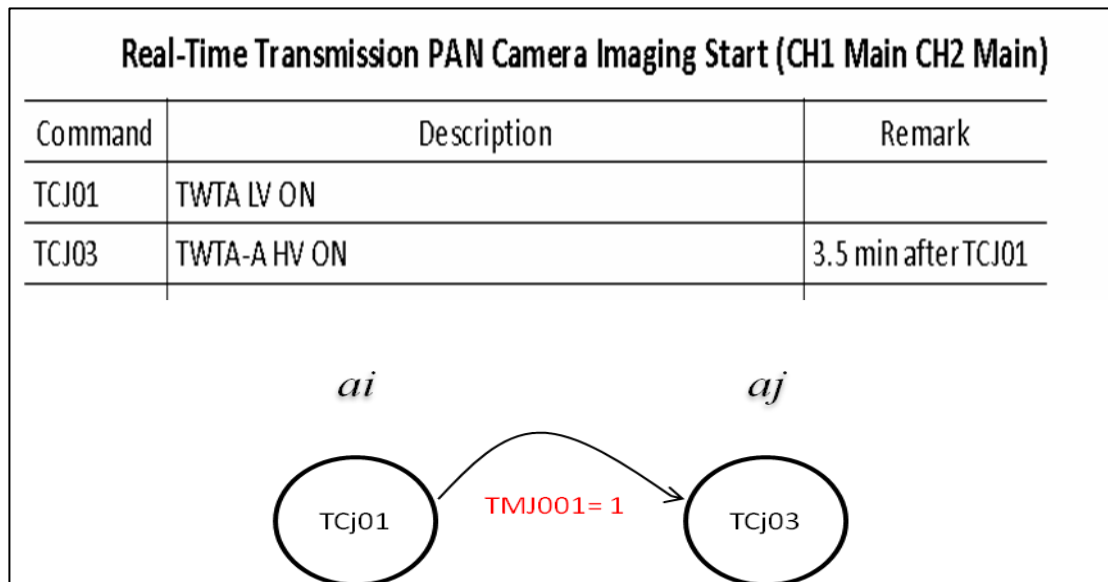
A *definição 3* de *Link Causal* da seção 5.3.1, onde ai e aj são duas ações durativas, com a ligação causal CL , denota que ai gera a condição p para aj ; ai é dito ser uma ação

produtora para aj e aj é dito ser uma ação consumidora de ai , representado como:

$$(ai \xrightarrow{p} aj).$$

Uma sequência de telecomandos possui essas duas propriedades importantes para composição de um plano. No exemplo a seguir, têm-se um caso típico de restrição temporal em um link causal, o telecomando $TCJ03$ só pode ser executado em plano após 3.5 minutos da execução do $TCJ01$, ou seja, o transmissor TWTA-A HV de alta voltagem só pode ser ligado 3,5 minutos após o transmissor TWTA-A LV de baixa voltagem, ter sido ligado. Esses dois transmissores TWTA têm a função de transferir as imagens na banda X de rádio (entre 8 e 12 GHz) por TWTA-A HV. A Figura 8.9 a seguir ilustra o caso de link causal no ambiente do CBERS.

Figura 8.9 - Link causal entre telecomandos do CBERS



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 8.9, tem-se um caso real da dependência entre ações, onde o efeito causado pela ação TCJ01 gera a condição p (valor da telemetria TMJ001=1), para ativação da ação TCJ03, indicando que o equipamento TWTA-A LV foi ligado.

Para contextualização do ambiente do problema e os elementos que o compõem, tais como: ambiente de tarefa, estrutura de um plano, relação entre as ações, causal e temporal, pode-se escolher o modelo para desenvolvimento do Replanejador. Os procedimentos utilizados pelos especialistas de satélite, em caso de contingência, se

resumem na ideia de adição e eliminação de ações apresentados na seção 5.3.3. Nos atuais esquemas de controle e rastreamento de satélites do INPE, esses procedimentos embora manuais, empregam maneiras que se assemelham às técnicas de planejamento, refinamento e refinamento reverso de plano, como foi explanado na seção 5.3.

Conforme o conceito de níveis de automação, apresentados na seção 4.8, sem o emprego da automatização, os procedimentos planejados especiais de reparo são elaborados por projetistas de satélite ou especialistas de sistema. A partir de análise de estado corrente, o modo sem automatização, se resume em analisar valor de telemetria e enviar telecomandos diretos para levar o satélite de um modo degradado para um modo de operação normal. A Figura 8.10 apresenta exemplo de um procedimento para recuperação de falhas, extraído de (XSCC; CAST, 2009).

Figura 8.10 - Procedimento de recuperação de falha de operação CBERS

FALHA ID	<i>FLJ01</i>	
NOME DA FALHA	<i>TWTA in Low voltage protection</i>	
SUBSYSTEM	<i>PIT linked to PAN</i>	
MÉTODO RECUPERAÇÃO	<i>TC</i>	
INDICATIVOS DA FALHA	<i>Tensão de alimentação principal abaixo da faixa de 24V +/- 0.5V</i>	
TELEMETRIAS INDICATIVAS	<i>TMJ001=0; TMJ002=0; TMJ003=0</i>	
ESTRATÉGIA RECUPERAÇÃO	<i>Ligar TWTA LV, e após 3 minutos ligar TWTA HV (A+B) (A+C) ou (B+C)</i>	
PLANOS ALTERNATIVOS DE RECUPERAÇÃO	<i>Plano-1</i>	<i>TCJ01, TCJ03, TCJ05</i>
	<i>Plano-2</i>	<i>TCJ01, TCJ03, TCJ07</i>
	<i>Plano-3</i>	<i>TCJ01, TCJ05, TCJ07</i>

Fonte: Produção do autor.

Antes de aplicar a técnica de reparo é necessário aplicar um método que estima o custo de uma ponte que liga entre o estado observado a qualquer estado meta alcançável no plano original, para melhorar a qualidade do plano em termos do problema de estabilidade e de métrica. Isto visa também evitar que o executor use um plano

inteiramente novo e desconhecido que produz claramente muitas diferenças entre o original e o plano novo conforme os autores Fox et al. (2006).

Por questões de simplicidade, cada plano é dividido em dois subplanos que são concatenados; *Cabeça* que é criada com as ações executadas de *Si para Sj* intermediária, e *Cauda* com as ações executada a partir de *Sj para Sn*. A *Análise de Estabilidade* apresentada na seção 5.5 prevê dois novos planos para resolver essas discrepâncias sobre a base do plano original, como apresentado na seção 5.3.3.

A aplicação da Análise de Estabilidade terá como indicador de qualidade, o tamanho e quantidade de ações, do novo plano reparado. Como esse trabalho propõe uma técnica a ser aplicada em tempo real, é possível também calcular a Estabilidade para conjuntos de subplanos, gerados a partir de procedimentos alternativos de reparo, como apresentado na Figura 8.10.

Uma vez estabelecida a estratégia de recuperação, o modelo poderá aplicar a ideia de planejamento por refinamento aplicada ao replanejamento, que consiste em começar com o conjunto de todas as sequências possíveis de ações e reduzir este conjunto, adicionando restrições até que todos os planos que correspondem às restrições sejam soluções para o problema. No caso de plano de controle de satélites, uma ação em que ocorreu uma falha, pode ser refinada por conjuntos de ações reparadoras, como já apresentadas na Figura 8.10 (XSCC; CAST, 2009). Pode-se observar que a aplicação do refinamento reverso, ou seja, a eliminação de ações que comprometem a execução do plano, só foi aplicada na eliminação de ações individuais, isso pela restrição temporal e causal, apresentadas na Figura 8.9, ou seja, um procedimento aplicado à carga útil do CBERS, por exemplo, a ativação de uma câmera de sensoriamento remoto, requer uma sequência de ações que obedeçam as restrições de *link* causal e temporal.

A quantidade e a duração das ações contidas em subplanos candidatos podem servir de base para o cálculo Heurístico, para a reparação do plano original.

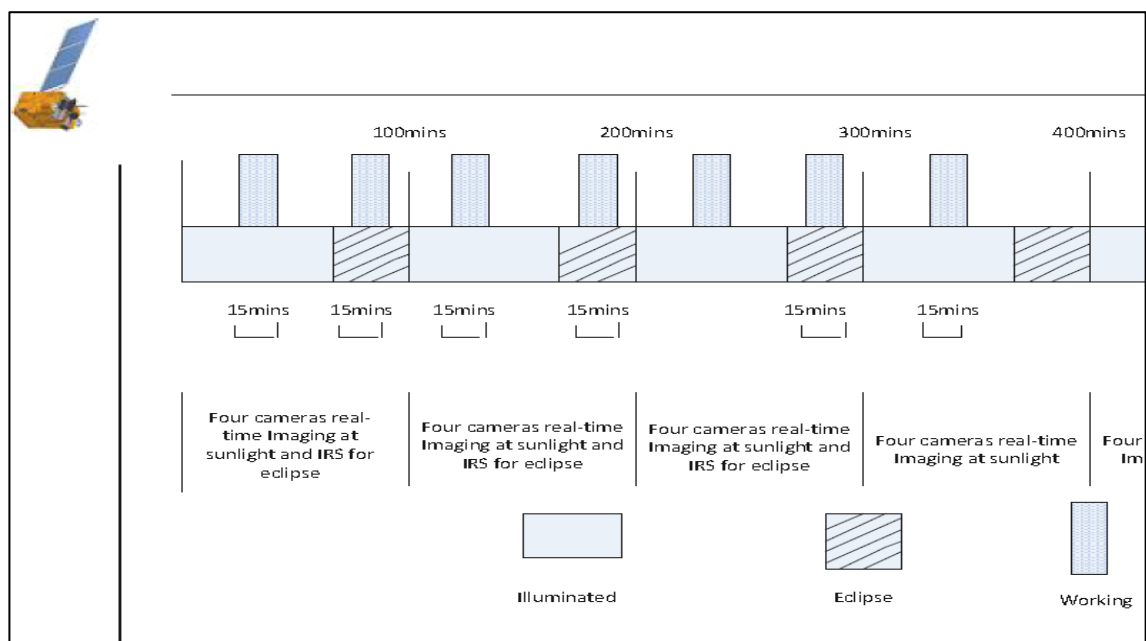
8.3.5 Reagendamento de ações

Após o processo de reparo do plano, tem-se um novo plano que deve ser submetido novamente ao executor de ações no ponto onde ocorreu a falha, retomando a execução, a partir da primeira ação inserida no processo de reparo. Portanto será necessário rearranjar

os instantes de tempo de cada ação compatibilizando-os com o tempo restante disponível da duração útil da passagem. Nesta fase pode-se também decidir pelo cancelamento de um plano reparo, nas condições de não haver tempo suficiente para atingir o objetivo. Nesse caso um plano de contingência deve se aplicado para desligar os equipamentos que foram acionados até o ponto da falha.

O CBERS trabalha em oito ciclos a cada dia como mostra a Figura 8.11. Uma análise do desempenho inicial em relação à potência e temperatura pode conduzir a uma revisão de tais esquemas e no futuro poderá permitir um aumento no tempo de imageamento e do volume de dados adquiridos por CBERS.

Figura 8.11 - Ciclo operacional diário do CBERS



Fonte: (XSCC; CAST, 2009).

O algoritmo de Reagendamento tomará como base:

- Instante da falha;
- Tempo total das ações que ainda faltam;
- Tempo restante da passagem.

Segundo Tominaga (2010), o preenchimento de lacunas de tempo é realizado conforme requisitos de operação preestabelecidos. Estes requisitos de operação encontram-se

codificados na forma de padrões de operações de satélites. Esta ideia pode ser usada para inserir ações no plano em execução, aproveitando tempo ainda disponível da passagem.

8.4 Um protótipo do agente de replanejamento

O Capítulo anterior apresentou um modelo de replanejamento e as abordagens escolhidas para a representação de um modelo geral, que se adequasse ao cenário de controle de plano de voo, de forma a direcionar a sua implementação. Este capítulo apresenta os elementos de software, e o ambiente de desenvolvimento que se baseou nas seguintes atividades:

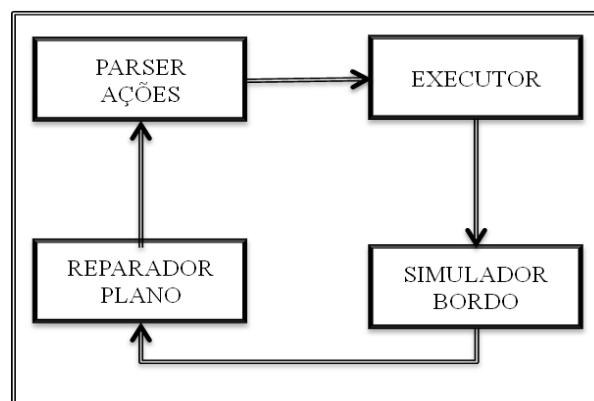
- a) Ambiente do controle da missão;
- b) Procedimentos para identificar falhas operacionais;
- c) Procedimentos de tratamento de contingências operacionais.

8.4.1 Estrutura do elemento de software

O Elemento de Software que implementa o Agente é composto de 4 módulos funcionais principais para atuam no cenário “Durante Passagem” conforme foi detalhado na Figura 8.12. Os módulos são:

- a) Parser de Ações;
- b) Executor de Ações;
- c) Simulador de Bordo;
- d) Reparador do Plano.

Figura 8.12 - Os Componentes de software do agente reparador



Fonte: Produção do autor.

A implementação do protótipo do sistema utilizou as seguintes ferramentas e linguagens no desenvolvimento:

- a) Microsoft Visual Studio 2008;
- b) Linguagem C++;
- c) Planejador LPG-TD-1.0.exe que suporta a linguagem PDDL 2.2;
- d) Biblioteca *XmlNodeWrapper* para extração de informações em XML;
- e) Editor XML do Microsoft Visual Studio 2008.

Para representar a estrutura do software implementado, serão apresentados no Apêndice C os diagramas de construção e execução do componente.

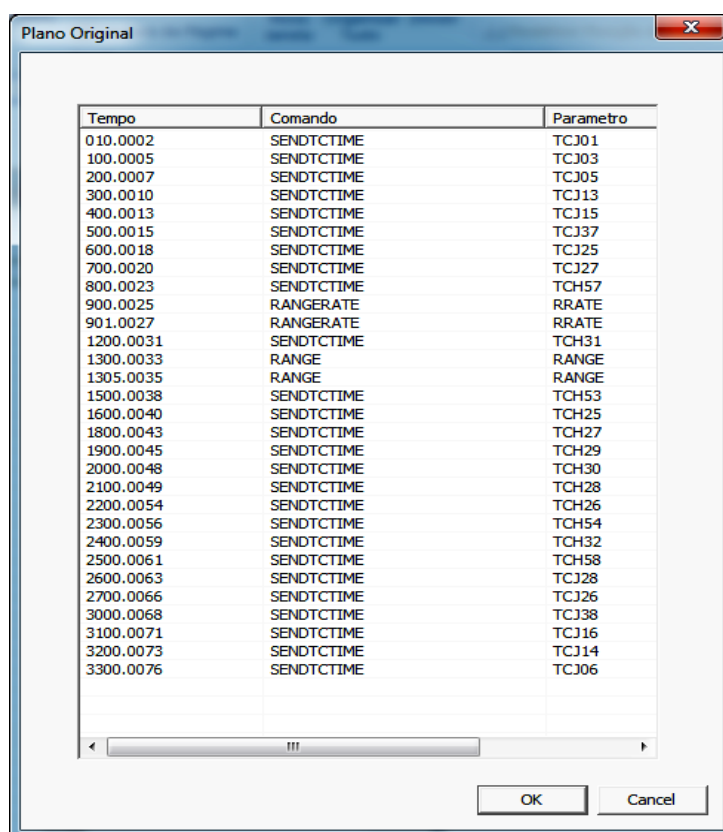
8.4.2 Formatação do plano original

Na fase de desenvolvimento da aplicação foi necessário adotar um formato para o plano gerado pelo Planejador LPG-TD para simplificar o processo de *parser* do conjunto de ações para ser executadas em bordo. O modelo para cada ação e os seus campos são listados a seguir:

- a) **Tempo**: Corresponde ao tempo de execução em Bordo;
- b) **Mnemônico da Ação**: Código da ação, no exemplo acima *SENDTCTIME* significa “envio de telecomando temporizado”;
- c) **Parâmetro da Ação**: O parâmetro que acompanha a ação identificada pelo seu mnemônico, por exemplo, o código do telecomando TCJ01;
- d) **Passagem**: Indica o número da passagem do satélite;
- e) **Satélite**: Indica o código do satélite a ser rastreado;
- f) **Estação**: Indica a estação terrena que realiza o rastreo.

Um plano final gerado a partir de um arquivo de domínio no formato apresentado na Figura 8.2 e de um arquivo de problema apresentado na Figura 8.3 é composto de uma sequência de ações a ser executadas em bordo como mostra a Figura 8.13.

Figura 8.13 - Plano original gerado pelo planejador



The screenshot shows a window titled "Plano Original" with a table containing three columns: "Tempo", "Comando", and "Parametro". The table lists a series of commands, mostly "SENDTCTIME", with various parameters like "TCJ01", "TCH57", "RRATE", and "RANGE". The window has a standard Windows-style title bar and buttons for "OK" and "Cancel" at the bottom right.

Tempo	Comando	Parametro
010.0002	SENDTCTIME	TCJ01
100.0005	SENDTCTIME	TCJ03
200.0007	SENDTCTIME	TCJ05
300.0010	SENDTCTIME	TCJ13
400.0013	SENDTCTIME	TCJ15
500.0015	SENDTCTIME	TCJ37
600.0018	SENDTCTIME	TCJ25
700.0020	SENDTCTIME	TCJ27
800.0023	SENDTCTIME	TCH57
900.0025	RANGERATE	RRATE
901.0027	RANGERATE	RRATE
1200.0031	SENDTCTIME	TCH31
1300.0033	RANGE	RANGE
1305.0035	RANGE	RANGE
1500.0038	SENDTCTIME	TCH53
1600.0040	SENDTCTIME	TCH25
1800.0043	SENDTCTIME	TCH27
1900.0045	SENDTCTIME	TCH29
2000.0048	SENDTCTIME	TCH30
2100.0049	SENDTCTIME	TCH28
2200.0054	SENDTCTIME	TCH26
2300.0056	SENDTCTIME	TCH54
2400.0059	SENDTCTIME	TCH32
2500.0061	SENDTCTIME	TCH58
2600.0063	SENDTCTIME	TCJ28
2700.0066	SENDTCTIME	TCJ26
3000.0068	SENDTCTIME	TCJ38
3100.0071	SENDTCTIME	TCJ16
3200.0073	SENDTCTIME	TCJ14
3300.0076	SENDTCTIME	TCJ06

Fonte: Produção do autor.

8.4.3 Representação da base de conhecimento de procedimentos de reparo

Após a conclusão da etapa de geração do plano original, o módulo executável *ReplanPlano* ativa a execução do plano com interpretação das ações, procedendo o reconhecimento da codificação das informações relativas ao telecomando e dos dados agregados a ele.

A representação de telecomando está codificada em arquivo XML de acordo com o formato descrito no Apêndice D.1.

O elemento responsável pela execução e simulação em bordo implementa os procedimentos que simulam a variação dos parâmetros de telemetria em resposta a um telecomando, com base nos valores mínimos e máximos, que uma telemetria poderá assumir. O processo de simulação vai verificar os possíveis cenários do comportamento em bordo, tais como falha ou sucesso, como descrito na seção 2.4.2. A Figura 8.14 apresenta uma sequência de telecomandos para acionamento da câmera PAN do satélite

CBERS. Para cada ação que dispara um telecomando estão associadas às telemetrias que se espera como resposta indicando o status de sucesso ou não, da operação, e a regra de execução, considerando o conceito de *link causal* e restrição temporal, visto na seção 8.3.4. Com base nessas informações será possível reparar um plano, preservando sua validade e qualidade.

Figura 8.14 - Sequência de TC para ativação de câmera do CBERS

Código	Descrição	TM associada	Regra
TCJ01	TWTA LV ON	TMJ001= 1	1s após TCJ09/TCJ10 ou TCJ11/TCJ12
TCJ03	TWTA-A HV ON	TMJ002= 1	3m após TCJ01 ser enviado
TCJ05	TWTA-B HV ON	TMJ003= 1	3m após TCJ01 ser enviado
TCJ13	CH1 ON	TMJ014= 1	1s após TCJ03/TCJ07
TCJ15	CH2 ON	TMJ015= 1	1s após TCJ05/TCJ07
TCJ37	MAIN CLOCK 1 ON	TMJ019= 1	For real time transmission mode, sent
TCJ25	ENCODER1 ON	TMJ010= 1	For real time transmission mode, sent TCJ13
TCJ27	ENCODER2 ON	TMJ011= 1	For real time transmission mode, sent TCJ15
TCH57	BRAKE POWER ON	TMH112 = 1	Before imaging , before send TCH31
TCH31	THERMAL POWER OFF	TMH045 a 048	
TCH53	Câmera 28v5 TM ON	TMH076 = 3.5 ~4.5 V	After send TCH33, before send TCH25

Fonte: Produção do autor.

O reparo de um plano tem como base o valor da telemetria quando indicar falhas e o instante que o comando deve ser inserido no plano. A representação em XML do esquema de reparo tem como identificação o código do grupo de ações, por exemplo, *CJ01*, vinculadas a um telecomando como mostra Figura D.1. A Figura D.4 apresenta o bloco, com grupo de ações opcionais, que deve ser utilizado em caso de contingências.

O capítulo seguinte apresenta a análise dos resultados obtidos em estudos de caso.

9 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os testes realizados, as limitações encontradas na aplicação do processo de replanejamento, e análise do comportamento do Agente em função do ambiente simulado.

Os testes foram realizados utilizando grupos de telecomandos para ativação e uso da câmera PAN do CBERS. Os procedimentos se resumem em passos específicos para imageamento, gravação e transmissão de imagem obtida pela câmera PAN em tempo real. As etapas da utilização da câmera são as seguintes:

- a) Grupo 01 - Ativação da câmera;
- b) Grupo 02 - Ajuste de Ganho / 4 Bandas;
- c) Grupo 03 – Playback da Imagem e transmissão da imagem para uma estação;
- d) Grupo 04 – Desativação da câmera.

Esses grupos são numerados ficticiamente para efeito apenas de referência, embora sejam identificados com numeração própria pelos manuais do CBERS. O desempenho do Agente Reparador foi avaliado em função dos tempos envolvidos nas operações de imageamento, gravação e transmissão de imagem.

Os pontos relevantes para montar o ambiente de teste foram seguintes:

- a) O maior tempo de atividade para PAN será de 15 minutos por órbita isso baseado de capacidade em tempo de gravação do DDR - *Digital Data Record*, tempo distribuído entre 7,5 minutos de gravação para China e Brasil;
- b) Acionamento / Desligamento de câmera são estritamente comandados por sequências de TC;
- c) Quando o imageamento estiver no modo em tempo real, atenção para a telemetria subsistema de Suprimento de Energia;
- d) O Planejamento deve considerar que o imageamento pela câmera PAN só deve começar após 4 minutos da execução do Grupo 01;

- e) O Planejamento deve considerar que a transmissão da imagem armazenada só deve começar em 4 minutos depois do tempo de execução Grupo 03;
- f) Tempo para acionamento da câmera, Grupo 01, igual a 223s;
- g) Tempo para ajuste de ganho / 4 bandas, Grupo 02 igual a 20s (10 Tcs);
- h) Tempo desligamento da câmera, Grupo04 igual a 12s (12 Tcs).

O tempo de uma passagem com cobertura da estação terrena é em média 10 minutos, para os testes realizados e considerando os testes como uma operação em tempo real, será utilizado 10 minutos, como tempo máximo para avaliação dos testes, embora o tempo de gravação pelo DDR seja de 15 minutos.

9.1 Inserção aleatória de falhas

O Módulo *Simulador de Bordo* terá por função a geração de valores aleatórios para simular o funcionamento de equipamentos em bordo, produzirá valores aleatórios de acordo com a faixa de limites válidos para as telemetrias, e assim gerando falha ou sucesso. Pode-se controlar a taxa de geração de falhas, restringindo a ocorrência de falhas, ou seja, gerar o mesmo tipo de falha para um mesmo valor de telemetria repetidamente, deixando o Agente Reparador em ciclos repetitivos.

As taxas de geração de falha são valores que determinam quantas vezes um mesmo tipo de falha pode ocorrer. Foram utilizados: o valor (3) para um índice alto, (2) para médio, (1) para baixo. O valor (0) representaria a execução de um plano sem ocorrência de falhas.

Esse controle simulado de falhas procura reproduzir as situações que ocorrem durante os procedimentos operacionais de rotina. Um exemplo pode ocorrer quando o envio de telecomando não tem a resposta do sucesso esperado, como por exemplo, um telecomando ON/OFF que tenta ligar um equipamento em bordo. Esse comando pode ser repetido, quantas vezes o operador achar necessário. Esse procedimento é tomado como medida para resolver problemas de contingência, quando um telecomando é reenviado várias vezes baseado em critérios da operação.

9.2 Estudos de casos

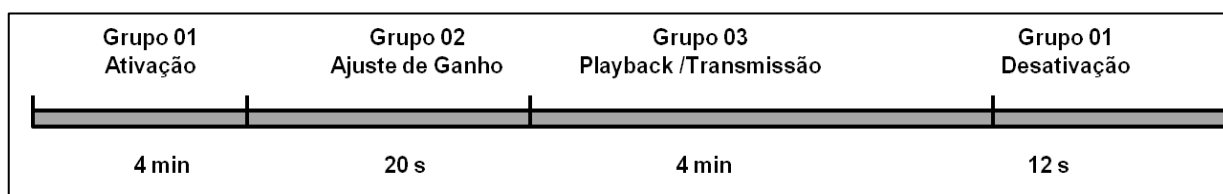
Os estudos de casos a seguir consideram três cenários de simulação, com geração de diferentes situações de falhas na execução de uma ação do plano, onde se atribui valores à telemetria recebida com indicação de falha na execução de um dado telecomando.

Para os estudos de caso, foram utilizados:

- a) Entrada: Plano Original com 30 Ações;
- b) Passagens Simuladas: 16;
- c) Base de Reparo, baseados no documento do CBERS - (XSCC; CAST, 2009), e codificados em XML como subplanos reparadores, onde o identificador “CJ01” corresponde à base de reparo, para ocorrência de falhas do telecomando “TCJ01”, e o identificador “CJ37” corresponde à base de reparo “CJ37” para falhas do telecomando “TCJ37”;
- d) Taxas de inserção de falhas (Alta, Média, Baixa).

A linha do tempo de **um plano sem ocorrência falha** é utilizada para estimar a duração da execução e reparo de um plano para a câmera PAN (Figura 9.1).

Figura 9.1 - Linha do tempo para uma passagem típica



Fonte: Produção do autor.

Nos estudos de caso a seguir, para a estimativa de tempo total deve-se considerar a *diferença, entre ações inseridas por refinamento e ações eliminadas por refinamento reverso*, multiplicada pelo tempo da execução de cada ação, e os tempos fixos necessários entre procedimentos.

9.3 Resultados obtidos de planos reparados

No Apêndice A são apresentados exemplos ilustrativos de resultados obtidos de simulações de execução e reparação de planos aplicando as técnicas de reparo. Os

resultados apresentados no Apêndice A têm-se como entrada principal o plano original da Figura 8.13.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões finais, mostrando as contribuições e limitações das técnicas estudadas e aplicadas à tese, e sugestões de possíveis expansões do tema explorado nesse trabalho.

10 CONCLUSÕES FINAIS

Esta tese tratou o problema de replanejamento em plano de voo de missão espacial. O estado da arte em planejamento e do replanejamento automáticos baseados em técnicas da IA foram apresentados nos capítulos 4 e 5 respectivamente, também foi apresentado como os grandes centros espaciais adotam soluções para automatização dos procedimentos operacionais com uso de IA. Os estudos iniciais serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho, onde a motivação principal foi para proposta de solução ao problema de replanejamento em tempo real aplicado ao controle de satélites do INPE. Usando as características do ambiente do INPE foi possível avaliar as técnicas e recursos utilizados, mostrando suas aplicabilidades para os planos gerados pelo CRC.

Como existe o anseio para expansão da automação de atividades em controle de satélites, este trabalho teve como objetivo principal a busca da solução por meio de procedimentos automáticos em planejamento e replanejamento, e isso contribui para a evolução da linha de pesquisa do planejamento automático na área acadêmica do INPE. Os resultados obtidos com essa pesquisa implicam no aumento da confiabilidade nas operações, considerando menos intervenção humana, e consequentemente a redução de custos operacionais relativos ao controle de satélites.

O objetivo principal do trabalho foi a busca pela solução do problema de replanejamento de planos de voo. Como o replanejamento é uma extensão do planejamento automático, integrados ao escalonamento de atividades com restrição temporal, a fase de pesquisa e levantamento bibliográfico, buscou o embasamento teórico na literatura científica dessas técnicas em IA, e em artigos científicos internacionais, com relatos de experiências de automatização de grandes centros, e também nos trabalhos já desenvolvidos pela área acadêmica do INPE. Os trabalhos que foram citados ao longo desse documento e que apresentam o estado da arte em planejamento no INPE, como em Cardoso (2006) e Carniello (2008), serviram de base em planejamento automático, para que esta tese fosse desenvolvida e explorasse a área de *Replanejamento Automático*.

Os pontos importantes levantados e identificados como contribuição e limitações na elaboração dessa tese serão citados a seguir.

10.1 Contribuição e limitações

Nessa seção são apresentadas as principais contribuições deste trabalho, uma análise da metodologia aplicada com uso de protótipo para avaliar as técnicas.

Como uma das contribuições pode-se destacar os resultados conseguidos durante a fase de pesquisa desse trabalho, com as análises de métodos replanejamento, alguns citados na seção 5.3, isso possibilitou a escolha de métodos mais adequados para solução do problema e que melhor se aplicasse ao contexto do INPE. Também foi possível delinear o domínio do problema de planejamento e replanejamento nas operações atuais de controle de satélite, identificando as técnicas usuais e propondo técnicas de automatização discutidas nesta tese, assim contribuindo para se montar uma base de conhecimento para a realização desse trabalho e para futuros trabalhos. Isso permitiu mostrar a viabilidade do uso de automatização no controle praticado atualmente pelo CRC.

Destaca-se também a concepção e construção de um modelo de Agente Reativo de Replanejamento adaptado ao cenário da operação do INPE, modelo que foi baseado na proposta dos autores Boella e Damiano (2002). Isso foi possível pelas características de ambiente dinâmico, onde se exige a deliberação reativa do agente, fazendo uso de recursos como biblioteca de planos reparadores. O Uso de linguagem XML permitiu construir os modelos de subplano reparadores, de acesso mais eficiente em tempo de execução, evitando os tradicionais procedimentos para se manipular um banco de dados, com isso pode-se assim representar os planos de reparo previstos nos planos de contingência do *HandBook* do satélite CBERS (XSCC; CAST, 2009).

O Agente de Replanejamento fez uso das técnicas de Refinamento (inclusão de ações) e Refinamento Reverso (exclusão de ações), apresentadas na seção 5.3.4, onde os autores em Van Der Krogt et al. (2005), afirmam que o reparo do plano constitui realmente duas atividades distintas, inclusão/remoção de ações, também mostram que o método resultante (reparo) é muito melhor do que o replanejamento do zero. Além disso, mostra-se que o modelo de reparação de plano é uma generalização de métodos existentes de reparação planos. Em Kambhampati (1997), o autor argumenta também que o modelo de reparação de plano consiste em duas fases. A primeira, a remoção das ações em relação ao plano parcial atual, que inibe o plano de alcançar seus objetivos e a segunda fase onde o plano parcial é estendido (refinado) para cumprir os objetivos.

Outro enfoque de reparo de plano usando refinamento foi apresentado em Campos (2008), onde dado um plano que falhou durante sua execução, a ação que apresentou a falha, domínio e o objetivo do problema, escolhe-se inicialmente, refinar o plano. Se não encontrar solução aplica-se o refinamento reverso utilizando um Planejador. O autor Campos (2008) propôs um sistema de reparo de plano, por refinamento reverso que utiliza como base o Versatile heuristic partial order planner (VHPOP) um planejador de código fonte aberto que implementa de forma explícita o planejamento por refinamento. O VHPOP foi desenvolvido por Younes e Simmons (2003) na Universidade Carnegie-Mellon.

Durante o refinamento, quando se adiciona restrições ao plano parcial, depara-se com um problema de reparo de planos, pois pode ser que o plano contenha novas ações, ordenações, ou outras restrições que impeçam que o plano seja expandido em uma solução. Entretanto, o objetivo de uma estratégia de refinamento reverso é remover algumas destas limitações do plano parcial, a fim de permitir que o planejador adicione outros detalhes que irão ajudar a resolver o problema. Os autores em Van Der Krogt et al. (2005) afirmam que, embora em teoria, pode-se fazer qualquer combinação de estratégias de refinamento e refinamento reverso para a criação de um método de reparação do plano, na prática, é preferível ter uma combinação de estratégias que estejam sintonizadas uma com a outra.

No desenvolvimento do trabalho decidiu-se inicialmente pela técnica de refinamento, onde se pode observar que as ações contidas em subplanos de reparo, quando inseridas eram replicadas na janela de tempo onde ocorreram as falhas, como mostram os casos da seção 7.3, esses procedimentos são indispensáveis, pois para levar o satélite de um modo degradado para um modo de operação normal, usa-se o refinamento que é previsto e aplicado em situações de contingenciamento. A solução encontrada foi o uso de Refinamento Reverso após a aplicação do Refinamento, onde se identifica o trecho que deve ser removido do plano, e com uso dos algoritmos apropriados. Como essas técnicas se aplicam de forma isolada, este trabalho de tese teve como enfoque principal o uso combinado das duas técnicas por meio de módulo analisador e controlador, como foram apresentados na seção 7.1, que permitiu avaliar a funcionalidade de duas técnicas de modo combinado.

A presente tese buscou a solução como a sintonia dessas estratégias, pois, um aspecto importante foi observado quando na aplicação primeiramente de refinamento, com ações de contingências, de forma não sistemática ocorria a replicação de ações já existentes no plano, como foi discutido no capítulo 7. Quando essa restrição foi identificada ao longo do trabalho, os esforços foram concentrados na concepção do módulo, *Análise e Integração de Técnicas de Reparo* (seção 7.1.1) que integrasse os dois processos, permitindo manter a integridade do plano original.

Também foi possível caracterizar algumas limitações: na concepção do modelo de implementação foram identificadas limitações de ordem operacional, que de certa forma levaram à idealização de uma solução própria, que tratou o problema em dois cenários distintos, o planejamento em pré-passagem, e o replanejamento em passagem propriamente dita. Entre as limitações levantadas, pode-se ressaltar o uso de uma linguagem de representação de domínio, como a PDDL aplicada às operações de tempo real. Como foi apresentado na seção 5.3.2 o modelo adotado para o protótipo foi o Agente Reativo de Replanejamento, que encontra um plano candidato em uma biblioteca de reparos. O uso de PDDL requer a fase de preparação, para edição do modelo do problema a ser resolvido, sua codificação é trabalhosa exigindo habilidade de programador, que em ambientes dinâmicos em tempo real, isso se torna impraticável, para refazer o modelo Domínio/Problema em PDDL. A solução que foi adotada fez-se o uso de programa executável na linguagem C++, onde com os recursos próprios da linguagem pode-se criar o protótipo baseado nos algoritmos apresentados no Apêndice E. O uso da análise de estabilidade do plano, não se mostrou aplicável para o enfoque desta tese, como recurso para decisão entre reparo e replanejamento, como visto na seção 5.5, pois na estratégia convencional de reparo de plano de voo do CBERS, basicamente se resumem em *inserções de ação*, ou seja, os planos reparadores resultantes sempre serão maiores que o original, como mostram os gráficos analisados no capítulo 9, de modo geral não ocorre a eliminação de ações de modo individual. Portanto o uso da métrica da estabilidade, não mostrou essencial para as análises, pelo fato de não ser indicativo para decidir na aplicação do replanejamento de um novo plano. O cálculo da estabilidade para esse trabalho foi utilizado apenas para determinar a taxa de crescimento dos planos reparadores.

Como pontos de destaque e contribuição científica deste trabalho, podem-se mencionar os seguintes:

- a) Em geral os trabalhos que exploram o problema de replanejamento, separam o problema do agente e das técnicas de reparo, tratando-os de forma isolada. Em Campos (2008) a análise das técnicas foi com uso do planejador VHPOP, independente de domínio. Um algoritmo de replanejamento de Boella e Damiano (2002) foi desenvolvido para uma arquitetura de agente reativo, para propósitos gerais e independentes de domínio. Um trabalho que trata da tomada de decisão entre a reparação ou replanejamento foi apresentado em Garrido et al. (2010), onde fez uso do planejador LPG-TD de Gerevini e Serina. (2002). Por motivos já declarados em seções anteriores, não foi possível utilizar um planejador de código aberto, por se tratar de uma aplicação em tempo real e domínio particular (controle de missão). Este trabalho contribuiu com a idealização de um protótipo de Agente Reativo de Replanejamento, em cujo modelo (seção 3.3) aplicou-se a combinação de refinamento e refinamento reverso, estabelecendo uma integração dessas técnicas, isso se completou com uso de estratégia de Busca e Agendamento da IA, aplicadas em domínio de controle de missão espacial;
- b) De acordo com Van Der Krogt et al. (2005), não são disponibilizados planejadores não determinísticos de código fonte aberto, que executam reparo de plano por meio de refinamento reverso. Outra contribuição foi a construção do modelo do agente de replanejamento com habilidade de aplicar a combinação em sintonia das técnicas (Refinamento/Refinamento Reverso), integradas à aplicação de agendamento de tarefas.

O protótipo com suas funcionalidades e a base de conhecimento, que foi utilizado para análise das técnicas aqui discutidas, seção 8.4, se mostraram adequados como um modelo de desenvolvimento para um futuro software que se integrasse ao sistema de software de controle. Um software com essas características poderia atender aos procedimentos de controle na fase de rotina, que são constituídos de procedimentos operacionais repetitivos, permitindo assim o uso de procedimentos automáticos para geração e reparação de planos. Esse protótipo se mostra também adequado com ferramenta de

treinamento de pessoal de operação, onde seus resultados podem servir de análise para os procedimentos de reparo de plano.

A aplicação do enfoque dessa tese em caráter prático esbarraria em limitações no caso de monitorar a execução de planos para o lançamento e órbitas preliminares, onde exigiria controle e monitoramento mais rigorosos até o satélite atingir a órbita nominal. Como é sabido, na fase das órbitas preliminares o controle trata com o não determinismo ilimitado, inerente dessa fase, como visto na seção 4.6. Em operação no *modo anormal*, visto na seção 2.4.1, a construção de conjuntos extensos de subplanos reparadores em XML, seria extremamente custosa, para poder representar todas as situações possíveis de contingências, essa dificuldade é dada a pouca experiência do INPE nessa fase de lançamento, pelos poucos satélites já lançados.

10.2 Proposta de trabalhos futuros

Atualmente é possível perceber a grande necessidade da expansão dos métodos de operação, principalmente voltados à implementação de técnicas de planejamento e escalonamento em IA para o segmento espacial. O quadro atual do pessoal da área de operação é limitado dificultando iniciativas de criação de novos projetos nessa área. O desenvolvimento de novos projetos buscando a automatização das operações implicaria em se criar duas linhas de pesquisa e desenvolvimento em Planejamento automático em IA, e como etapa complementar o Replanejamento em IA.

Para o seguimento dessa tese em futuros trabalhos, será necessário aplicar o Agente de Replanejamento aqui concebido utilizando novos modelos em outras missões espaciais, preferencialmente aquelas pertencentes aos programas do INPE.

Inicialmente seria um grande desafio buscar um sistema autônomo que substituísse os atuais procedimentos semiautomáticos, e ganhar a confiança da equipe de operação na utilização de processos automáticos. Uma forma de caminhar gradativamente para automatização seria aplicar modelos mais simples de reparo de plano, caracterizados como semiautomáticos, como o modelo apresentado em 5.6.1, ASPEN dos autores Chien et al. (2002), que aplica um algoritmo de reparo iterativo para a procura de possíveis soluções de reparo, com isso mantendo ainda um controle humano parcial sobre as operações.

A utilização prática do protótipo concebido nesta tese possui a questão relevante a ser considerada que é a necessidade do desenvolvimento de técnicas de verificação e validação para software autônomo, isso exigiria uma linha de pesquisas, com atividades que demandariam tempo e recursos para os estudos. Alguns trabalhos como o de Brat et al. (2006) e Blanquart et al. (2004) apresentam e discutem o problema com algumas propostas, tais como, o uso de testes exaustivos de simulação e uso de técnicas de segurança monitoradas, tais como: um supervisor ou validador.

Os pontos identificados como sugestões para continuidade desse trabalho são:

- a) A heurística utilizada foi para refazer localmente um plano em ponto de falha, isto quando era necessária a adição de ações, em trabalhos futuros pode-se também adotar o uso de heurísticas para analisar o espaço de estados do plano a ser reparado, para avaliar o custo de reparo total do fragmento do plano restante;
- b) Outra melhoria é a criação de processo de monitoramento para verificar se os subplanos reparadores sempre levam a mesma falha, evitando com isso os *loops* infinitos na busca de solução;
- c) Criação de base de conhecimento em Meta-Dados para representação de subplanos reparadores, de tal forma ser portátil para outras missões distintas;
- d) Uso de bibliotecas para representar informações de subplanos, para quando se conhece previamente o comportamento do domínio como foi abordado por Van Der Krogt et al. (2005);
- e) Busca de estratégias para validação do software de reparo, considerando a complexidade de softwares autônomos, como foi tratado por Brat et al. (2006) e Blanquart et al. (2004).

10.3 Conclusões finais

No cenário atual do INPE com relação às missões espaciais, é clara a necessidade de sistemas para automação das atividades operacionais com alta qualidade e confiabilidade. Com os resultados obtidos neste trabalho pode-se observar que o uso de protótipo para empregar as técnicas aqui discutidas, será essencial para se ter base que auxilie nas

decisões futuras de adoção de novos métodos de automação a serem integrados ao controle atual vigente do INPE.

10.4 Publicações

No decorrer do desenvolvimento desta tese alguns trabalhos foram publicados e submetidos à publicação científica, tais como:

a) Publicados:

- International Conference on Space Operations - SpaceOps 2012 Stockholm, Suécia.
An approach to space mission planning in order to solve the problem of real-time planning by using the planning and scheduling strategy from artificial intelligence area.
- WETE Workshop em Engenharia e Tecnologia Espacial - INPE 2014

Trabalho-1: Uma semântica em OWL para o Domínio de Planejamento de Rastreo de Satélite

Trabalho-2 : *Strategies from artificial intelligence area to solve the problem of real-time Planning and Re-planning*

b) Submetidos /Aceitos

- (SpaceOps 2016) 14th International Conference on Space Operations in Daejeon, Republic of Korea.: *A Proposal to Improve the INPE satellite Control By Using Planning and Replanning Strategies from Artificial Intelligence Area.* Poster;
- The Open Automation and Control Systems Journal <http://www.bentham-open.com> Importance: High: “*Replanning techniques of artificial intelligence to flight plan of Brazilian satellites*”, 2015.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AI-CHANG, M.; BRESINA, J.; CHAREST, L.; CHASE, A.; CHENG-JUNG, J.; JONSSON, A.; KANEFSKY, B.; MORRIS, P.; RAJAN, K.; YGLESIAS, J.; CHAFIN, B.; DIAS, W.; MALDAGUE, P. MAPGEN. Mixed-initiative planning and scheduling for the Mars Exploration Rover mission. **IEEE Intelligent Systems**, v. 19, n. 1, p. 8-12, 2004.

ARANGÚ M.; GARRIDO A.; ONAINDIA E. A general technique for plan repair. In IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TOOLS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 20., 2008, Dayton, Ohio, USA. **Proceeding...** Dayton: IEEE, v 1, p. 515-518 2008 .

BARTÁK, R. Integrating planning into production scheduling: a formal view. In INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATED PLANNING AND SCHEDULING 14, 2004, Columbia, Canada. **Proceedings...** Columbia Whistler, British Columbia, Canada, 2004.

BOELLA G.; R. DAMIANO. A replanning algorithm for reactive agent architecture. IN D. SCOTT, EDITOR, INTERNATIONAL CONFERENCE ARTIFICIAL INTELLIGENCE: METHODOLOGY, SYSTEMS, AND APPLICATIONS 2002, Varna, **Proceedings...** AIMS, LNCS 2443, p. 183-192. Springer Verlag, 2002.

BRAT, G.; DENNEY, E.; FARELL, K.; GIANNAKOPOULOU, D.; JONSSON, A.; FRANK, J.; BODDY, M.; CARPENTER, T.; ESTLIN, T.; PIVTORAIKO, M. A robust compositional architecture for autonomous systems. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2006, Big Sky, MT, USA. **Proceedings...** Big Sky: IEEE, 2006.

BRATMAN ME: **Intentions, plans and practical reason**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1987.

BONET, B.; GEFFNER, H. HSP: planning as heuristic search. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE PLANNING SYSTEMS 1998 (AIPS '98), 8., 1998, Pittsburgh, USA. **Proceedings...** Pittsburgh: AAAI, 1998.

BLANQUART, P.; FLEURY, S.; HERNEK, M.; HONVAULT, C.; INGRAND, F.; PONCET, J. C.; POWELL, D.; STRADY-LÉCUBIN, N.; THÉVENOD-FOSSE, P. Software safety supervision on-board autonomous spacecraft. In: EUROPEAN CONGRESS ON EMBEDDED REAL TIME SOFTWARE (ERTS), 2., 2004, Toulouse, France. **Proceedings...** Toulouse: [s.n.], 2004. p. 11.

CAMERON, G.E.; M.H.MARSHALL. Exploring the practical limits of operations autonomy. In: SPACEOPS SYMPOSIUM 1, **Proceedings...** Tokio Japao, 1998.

CAMPOS, D.R.C, **Reparo de plano por refinamento reverso**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, 2008.

CARDOSO, L. S; **Aplicação da tecnologia de agentes de planejamento em operações de satélites**. 2006. p. 167 (INPE-14092-TDI/1075). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/L3yLK>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

CARNIELLO, A. **Uma arquitetura multi-agente de planejamento de controle de satélites**. 2009. p. 220 (INPE-15666-TDI/1442). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/348MTNB>>. Acesso em: 22 fev. 2016.

CESTA, A.; CORTELLESA, G.; ODDI, A.; POLICELLA, N. Studying decision support for MARS EXPRESS planning tasks: a report from the MEXAR experience. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON PLANNING AND SCHEDULING FOR SPACE, 4, 2004, Darmstadt, Germany. **Proceedings...** Darmstadt: ESA-ESOC, 2004.

CESTA, A.; ODDI, A.; CORTELLESA, G.; FRATINI, S.; POLICELLA, N. AI based tools for continuous support to mission planning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPERATIONS (SPACEOPS), 9, 2006, Rome, Italy. **Proceedings...** Rome: AIAA, 2006.

CHIEN, S.; SMITH, B.; RABIDEAU, G.; MUSCETTOLA, N.; RAJAN, K.; Automated Planning and Scheduling for Goal-Based Autonomous Spacecraft, **IEEE Intelligent Systems**, September/October, p. 50-55. 1998.

CHIEN S.; KNIGHT, R.; STECHERT, A.; SHERWOOD, R.; RABIDEAU, G. Using iterative repair to improve the responsiveness of planning and scheduling. INTERNATIONAL CONFERENCE ON AI PLANNING AND SCHEDULING ICAPS 5 2000. **Proceedings...** Breckenridge, CO., April 2000.

CHIEN, S.; RABIDEAU, G.; KNIGHT, R.; SHERWOOD, R.; ENGELHARDT, B.; MUTZ, D.; ESTLIN, T.; SMITH, B.; FISHER, F.; BARRETT, T.; STEBBINS, G.; TRAN, D. ASPEN – Automated planning and scheduling for space mission operations. IN: THE SPACE OPERATIONS CONFERENCE SPACEOPS 2002, Houston, Texas. **Proceedings...** Houston: AIAA, 2002.

CONSULTATIVE COMMITTEE FOR SPACE DATA SYSTEMS (CCSDS).

Telemetry – summary of concept and rationale. Report Concerning Space Data Systems Standards, CCSDS 100.0-G-1. Green Book. Issue 1. Washington, D.C., USA, p. 56 December 1987.

CONSULTATIVE COMMITTEE FOR SPACE DATA SYSTEMS (CCSDS).

Telecommand – summary of concept and rationale. Report Concerning Space Data Systems Standards, CCSDS 200.0-G-6. Green Book. Issue 6. Washington, D.C., USA, December 1987.

EDELKAMP, S.; HOFFMANN, J. PDDL2.2: The language for the classical part of IPC–4. In: INTERNATIONAL PLANNING COMPETITION INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATED PLANNING AND SCHEDULING (WHISTLER 2004), British Columbia, Canada. **Proceedings...** British Columbia, Canada, 2004. p. 2–6.

EPIPHANIO, J.C.N. **Satélites de sensoriamento remoto**. Disponível em: http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.34/doc/CAP2_JCNEpiphanio.pdf, 2005. Acesso em: 15 mar. 2015.

ESA. **Beagle 2**. website. <http://www.beagle2.com/> . 2004.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. **ECSS-E-70:** space engineering – ground systems and operations – part 1: principles and requirements, ESA-ESTEC. Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands, 2000.

ERCOLANI A.; FERRI, P.; SIMONIC, A.; KOWALCZYK, A. ;ULRIKSEN, T. Operations Automation for Rosetta Mission. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPERATIONS (SPACEOPS), 2004, Montreal, Canada. **Proceedings...** Montreal, 2004.

FEBER, J. **Multi-agent systems an introduction to distributed artificial intelligence**. London: Addison-Wesley, 1999.

FERRI, P.; PECCHIOLI, M.; PENA, A. Introducing automation in ground segment operations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPERATIONS SPACEOPS , 8., 2004, 17–21 May 2004, Montreal, Quebec, Canada. **Proceedings...** Montreal, Canada: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

FIKES, R. E.; NILSSON, N. J. STRIPS: a new approach to the application of theorem proving to problem-solving. **Artificial Intelligence**, v. 2, n. p. 3-4 189-208, 1971.

FOX, M.; LONG, D. PDDL2.1: An extension to pddl for expressing temporal planning domains. **Journal of Artificial Intelligence Research**, v. 20, p. 61-124, 2003.

FOX, M.; GEREVINI A.; LONG D.; SERINA I. Plan stability: Replanning versus plan repair. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AI PLANNING AND SCHEDULING ICAPS, 2006. **Proceedings...** AAAI Press, 2006.

FRANKLIN, S.; GRAESSER, A. Is it an Agent, or just a Program? A Taxonomy for Autonomous Agents. INTERNATIONAL WORKSHOP ON AGENT THEORIES, ARCHITECTURES, AND LANGUAGES 3 – **Proceeding...** Springer-Verlag, 1996.

FRANK, J.; GROSS, M. A. K.; KÜRKLÜ, E. SOFIA's choice: An AI approach to scheduling airborne astronomy observations. In: AAAI, **Proceedings...** , p. 828–835, 2004.

FRANK, J.; JONSSON A.K. JOURNAL OF CONSTRAINTS SPECIAL ISSUE ON CONSTRAINTS AND PLANNING. Constraint-based attribute and interval planning. 2003.

GARRIDO A.; GUZMAN C.; ONAINDIA E.. Anytime plan-adaptation for continuous planning. In: PLANNING AND SCHEDULING SPECIAL INTEREST GROUP PlanSIG **Proceeding...**, 2010.

GEORGEFF M. P.; RAO A. Modeling rational agents within a BDI-architecture. In INTERNATIONAL CONFERENCE PRINCIPLES OF KNOWLEDGE REPRESENTATION AND REASONING (*KR:91*), p. 473–484, **Proceeding...** Cambridge, MA, 1991.

GEREVINI, A.; SERINA, I. Fast plan adaptation through planning graphs: local and systematic search techniques. In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLANNING AND SCHEDULING 5 . **Proceedings...** (AIPS'00).2000.

GEREVINI, A.; SERINA, I. LPG: A Planner based on Planning Graphs with Action Costs, In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON AI PLANNING AND SCHEDULING, 6., 2002. **Proceedings...** (AIPS'02), AAAI Press, p. 13-22 , 2002

GEREVINI, A.; SAETTI, A.; SERINA, I. **Planning through stochastic local search and temporal action graphs**. Journal of AI Research. 20. 2003.

GHALLAB, M., NAU, D. S.; TRAVERSO, P. **Automated Planning**: Theory and Practice. Morgan-Kaufman Publishers. 2004.

GRASSET-B. R.; ONERA G. V. Planning and replanning for a constellation of agile Earth observation satellites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AI PLANNING AND SCHEDULING (ICAPS), 21., 2011, Freiburg, Germany. **Proceedings...** Freiburg, Germany, 2011.

HADDAWY P.; HANKS S. Utility models for goal-directed, decision-theoretic planners. **Computational Intelligence**, p. 392–429 ,1998.

HOWEY, R.; LONG, D.; FOX, M. Plan validation and mixed-initiative planning in space operations. In: THE WORKSHOP ON PLANNING AND SCHEDULING: BRIDGING THEORY TO PRACTICE, 2004. **Proceedings...** Disponível em: <http://galahad.plg.inf.uc3m.es/~dborrajol/> , ecai04-workshop/accepted-papers.html., 2004.

ISO 14950:2004 – **Space systems** – unmanned spacecraft operability. Geneva, February/2004

KNUBLAUCH, H.; FERGUSON, R. W.; NOY, N. F. et al. **The protégé OWL plugin:** an open development environment for semantic Web applications. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg . p. 243, 2004.

KAMBHAMPATI, S. **AI Magazine** Refinement planning as a unifying framework for plan synthesis. v. 18, n. 2, p. 67–97, 1997.

KO A.; MALDAGUE, P.; PAGE, D.; BIXLER, J.; LEVER, S.; CHEUNG, K. Design and architecture of planning and sequence system for Mars Exploration Rover (MER) Operations, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPERATIONS (SPACEOPS), 8., 2004, Montreal, Canada. **Proceedings...** Montreal, 2004

KOLLER, M.; REGGESTAD, V.; ADAMSON, K.; Kay, R. ESOC earth observation missions and the automation of operational routine tasks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPERATIONS (SPACEOPS) , 2010, Huntsville - AL, EUA. **Proceedings...** Huntsville: AIAA, 2010.

KUCINSKIS, F. N. **Alocação dinâmica de recursos computacionais para experimentos científicos com replanejamento automatizado a bordo de satélites.** 2007. 165 p. (INPE-14798-TDI/1241). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.23.11.42>>. Acesso em: 22 fev. 2016.

MAES, P. Artificial life meets entertainment: lifelike autonomous agents. **Communications of the ACM**, v.38, n.11, 1995.

MCALLESTER, D.; ROSENBLITT, D. Systematic nonlinear planning. In: NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AAAI-91), 9., Anaheim, CA, USA. **Proceedings...** Anaheim: AAAI Press, p. 634-639, 1991.

MCDERMOTT, D.; GHALLAB, M.; HOWE, A.; KNOBLOCK, C.; RAM, A.; VELOSO, M.; WELD, D.; WILKINS, D. **PDDL** – The Planning Domain Definition Language. Yale Center for Computational Vision and Control, October, 1998. (Tech Report CVC TR-98-003/DCS TR-1165).

MCDERMOTT, D. The 1998 AI planning systems competition. **AI Magazines**, v. 21, n. 2, p. 35-56, 2000. American association for Artificial Intelligence.

MINTON, S.; KNOBLOCK, C.; KUOKKA, D. GIL; Y., JOSEPH, R.; CARBONELL, J. **Prodigy 2.0**: the manual and tutorial. Pittsburg. PA, USA, 1989. Technical Report CMU-CS-89-146, University of Carnegie Mellon. 1989.

MONHAM, A; RUDOLPH, A. Controlled Approach to Automated Operations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPERATIONS (SPACEOPS 2004), 2004, Montreal, Canada. **Proceedings...** Mondreal: CSA/ASC, 2004.

MUSCETTOLA N.; SMITH B.; FRY C.; CHIEN S.; RAJAN K; RABIDEAU G. ; YAN D.. On-board planning for new millennium deep space one autonomy. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TOOLS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 9., 1997, Newport Beach, CA, USA. **Proceedings...** Newport Beach: IEEE, 1997. ISBN 0-8186-8203-5.

MUSCETTOLA N.; NAYAK P.; PELL B.; WILLIAMS B. Remote agent: to boldly go where no Ai system has gone before. **Artificial Intelligence**, p. 5–47, 1998.

NAREYEK, A. Planning in dynamic worlds: more than external events. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (IJCAI), 18., 2003, Acapulco, Mexico, August 9-15. **Proceedings...** Acapulco: Morgan Kaufmann , 2003, p.30–35.

NEBEL, B.; KOELER ,J. Plan reuse versus plan generation: a complexity-theoretic perspective. **Artificial Intelligence**, v.76, p. 427–454, 1995.

PEDNAULT, E. ADL: Exploring the middle ground between STRIPS and the situation calculus. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRINCIPLES OF KNOWLEDGE REPRESENTATION AND REASONING (KR-89), 1., 1989, Toronto, Canada. **Proceedings...** San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989. p. 324-332.

PENBERTHY, J. S.; WELD, D. S. UCPOP: A sound, complete, partial-order planner for ADL. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRINCIPLES OF KNOWLEDGE REPRESENTATION AND REASONING (KR-92) 3., 1992, Cambridge, MA, USA. **Proceedings...** San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1992.

PEDERSEN L.; SMITH D.; DEANS M.; SARGENT R.; KUNZ C.; LEES D.;RAJAGOPALAN S. Mission planning and target tracking for autonomous instrument placement. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2005, Big Sky, MT, USA. **Proceedings...** Big Sky: IEEE, 2005.

RABIDEAU, G.; CHIEN, S.; MANN, T.; WILLIS, J.; SIEWERT, S.; STONE, P. Interactive, repair-based planning and scheduling for shuttle payload operations. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, Aspen, CO, USA. **Proceedings...** Aspen: IEEE, 1997.

RABIDEAU, G.; KNIGHT, R.; CHIEN, S.; FUKUNAGA, A.; GOVINDJEE, A. Iterative repair planning for spacecraft operations using the ASPEN system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE ROBOTICS AND AUTOMATION IN SPACE (I-SAIRAS), 5., 1999, Noordwijk, The Netherlands. **Proceedings...** Noordwijk: ESA/ESTEC. RAO A. 1999.

RIBEIRO E. A ; FERREIRA, M. G. V. An approach to space mission planning in order to solve the problem of real-time planning by using the planning and scheduling strategy from artificial intelligence area. - In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPERATIONS (SPACEOPS 2004), 12., 2004, Estocolmo Suecia. **Proceedings...** Estocolmo, 2004.

RIBEIRO, E. A.; CARRETERO, M. A. Uma semântica em OWL para o Domínio de Planejamento de Rastreo de Satélite. In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 2014. (WETE), 2014, São José dos Campos. São José dos Campos: INPE, 2014. On-line. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3HE9RSL>>. Acesso em: 22 fev. 2016.

RICHTER, S.; WESTPHAL, M., W. 2008. The LAMA planner. Using landmark counting in heuristic search. In INTERNATIONAL CONFERENCE ON AI PLANNING AND SCHEDULING IPC (ICAPS- 2008), 2008. **Proceedings...** AAAI Press, 2008.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Inteligência artificial**. 2. ed., São Paulo: Editora Campus, 2004. 1040 p. ISBN (8535211772).

SACERDOTI, E., D. Planning in a hierarchy of abstraction spaces. **Artificial Intelligence**, v. 5, n. 2, p. 115-135, 1974.

SILVA, F. V. **Planejamento automático aplicado a problemas dependentes de recursos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

SHERWOOD, R.; CHIEN, S.; TRAN, D.; CICHY, B.; CASTANO, R.; DAVIES, A. ; RABIDEAU, G. Operating the Autonomous Spacecraft Experiment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPERATIONS (SPACEOPS) 2004. Montreal, Canada. **Proceedings...** Montreal, 2004.

SMITH, D. E.; FRANK, J.; JONSSON, A. K. Bridging the gap between planning and Scheduling. **Knowledge Engineering Review**, v. 15, n. 1, p. 47-83, 2002.

SRIVASTAVA B.; KAMBHAMPATI S. **Scaling up planning by teasing out resource scheduling**. Arizona State University, 1999. Technical Report ASU CSE TR 99-005

SYCARA, K. P. The many faces of agents. **Artificial Intelligence Magazine**, v. 19, n. 2, p. 11-12, 1998.

TOMINAGA, J. **Simulador de satélites para verificação de planos de operações em voo**. 2010. 174 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.24.18.55-TDI). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37HL3J8>>. Acesso em: 22 fev. 2016.

TRAN, D.; CHIEN S.; SHERWOOD R.; CASTAO R.; CICHY B.; DAVIES, A.; RABIDEAU, G.. **The autonomous science craft experiment onboard the eo-1 spacecraft**. In AAAI, 2004.

VAQUEIRO, S. T. **ItSimple**: ambiente integrado de modelagem e análise de domínios de planejamento automático. 2007. 284p. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Van Der KROGT, R. **Plan repair in single- agent and multi-agent systems**. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2005.

Van Der KROGT, R.; DE WEERDT M. Plan repair as an extension of planning. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATED PLANNING AND SCHEDULING (ICAPS), 5., 2005, Monterey. **Proceedings...** Monterey, California, 2005.

XI'AN SATELLITE CONTROL CENTER (XSCC). CHINA ACADEMY OF SPACE TECHNOLOGY (CAST). **CBERS 02B operations handbook**. Xi'an/Beijing: XSCC/CAST, , 2009. 339p.

XI'AN SATELLITE CONTROL CENTER (XSCC). CHINA ACADEMY OF SPACE TECHNOLOGY (CAST). **Foreseen fault and avoidande procedures**. Xi'an/Beijing: XSCC/CAST, 2009.

ZWEBEN, M.; DAUN, B.; DAVIS, E.; DEALE, M. Scheduling and rescheduling with iterative repair. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**. v. 23, n. 6. P. 1588-1596, 1993.

WERTZ, J.; LARSON, W. (Ed.). **Space mission analysis and design**. 3. ed. Torrance, CA: Microcosm, Inc. and Kluwer Academic Publishers, p. 969 ISBN (978-1881883104).1999.

WILKINS, D. E. Can AI planners solve practical problems? **Computational Intelligence Journal**. v. 6, n. 4, p. 232-246, 1990.

YOUNES H. L. S.; SIMMONS , R. G.VHPOP: versatile heuristic partial order planner. **Journal of AI Research (JAIR)**, v. 20, p. 405–430, 2003.

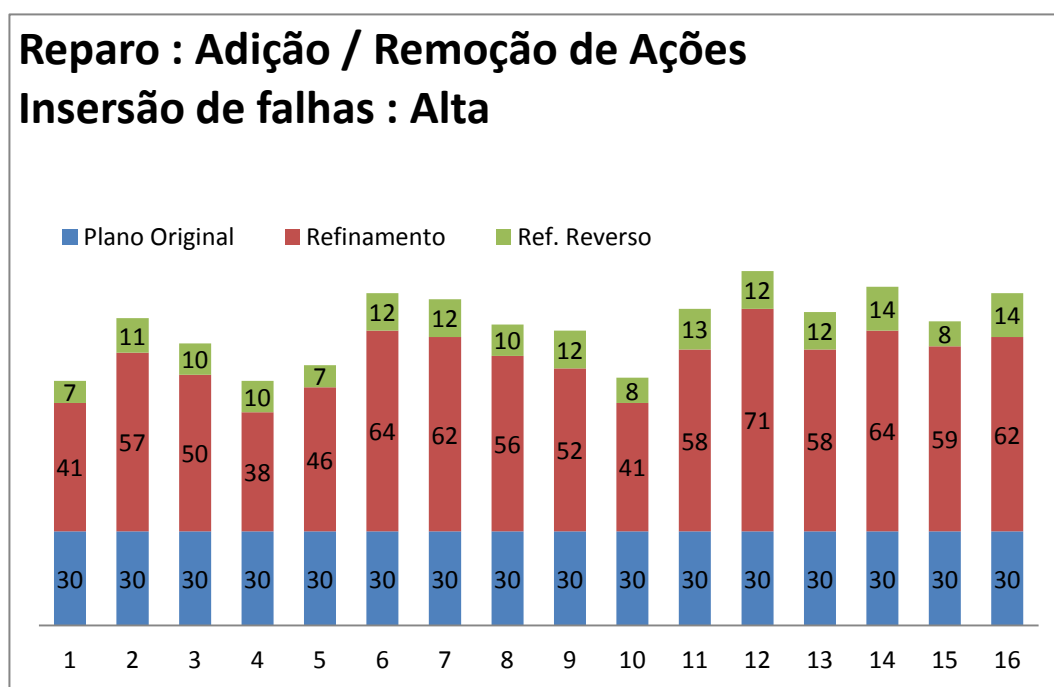
APÊNDICE A – ESTUDOS DE CASOS

Aqui são apresentados os resultados obtidos de simulações de execução e reparação de planos aplicando as técnicas de reparo para vários cenários, onde se variam as taxas de inserção de erros. Os resultados apresentados no Apêndice A, têm-se como entrada principal o plano original Figura 8.13.

A.1 - Estudo de Caso 1 - Taxa de falhas: ALTA

Este estudo de caso se baseou nos itens listados na seção 9.2, com *alta taxa* de inserção de falhas. Os testes foram realizados simulando um conjunto de 16 passagens, e obtiveram-se os seguintes resultados apresentados no gráfico da Figura A.1

Figura A.1 - Inserção de falhas (Taxa Alta)



Fonte: Produção do autor.

Este gráfico representa para cada uma das 16 passagens, o plano original em barras azuis, a quantidade de ações que foram inseridas por refinamento em barras vermelhas, e em barras em verde as ações que foram removidas por refinamento reverso. Para efeitos de avaliação da viabilidade do método em função do tempo útil da passagem, tomou-se como base a passagem de número 12, como mostra a seguir:

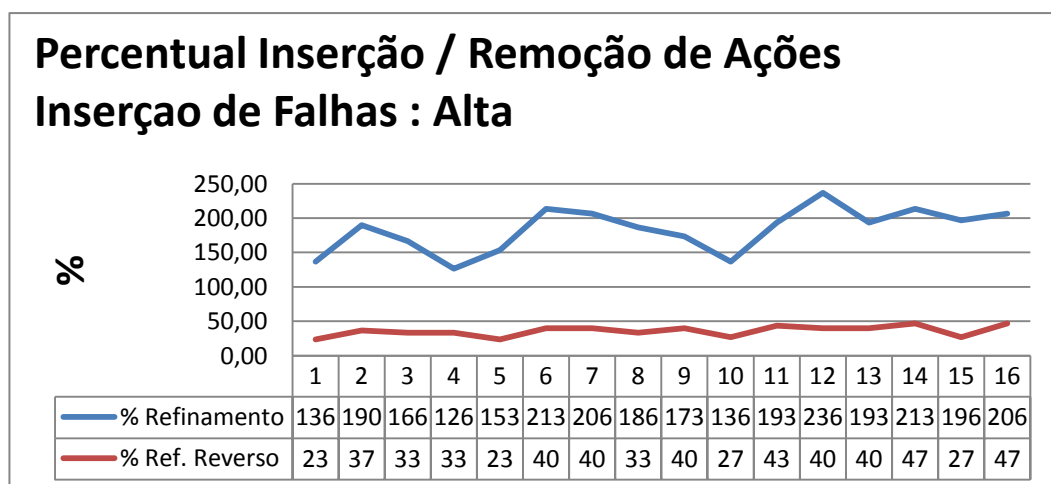
- a) Calcular o Total de Ações Executadas: (Ações inseridas – Ações removidas);

- b) $TotalAçõesExecutadas = 71 - 12;$
 $TotalAçõesExecutadas = 59;$
- c) Adicionar os *tempos fixos*, para Grupos 01, 02, 03, 04 (Figura 9.1);
 $TempoTotalExecução (segundos) = 240 + 20 + 240 + 12;$
 $TempoTotalExecução = 512 \text{ s}$
- d) Adicionar o Total do tempo de *Ações Executadas* (a);
 $TempoTotalExecução = 512 + 59;$
 $TempoTotalExecução = 571 \text{ s ou } (9,51 \text{ min.})$

Para esse caso da passagem escolhida de número 12, mostra-se que na simulação com taxa *alta* de inserção de falhas, os métodos aplicados para se reparar o plano são viáveis, pois com base no tempo da passagem (10 min.), o processo de execução e reparo gastaram 9,51min., ainda se apresentam dentro dos limites aceitáveis.

O gráfico da Figura A.2 apresenta um modelo comparativo do percentual de inserções e remoção de ações, neste gráfico é possível observar que, em todas as passagens a tendência do percentual de inserção sempre vai ser maior que o de remoção de ações, isso é possível verificar na Figura 8.10, pois para ação falha em um plano de voo, sempre terá um grupo com uma ou mais ações reparadoras.

Figura A.2 - Percentual de inserção e remoção de ações (Taxa Alta)

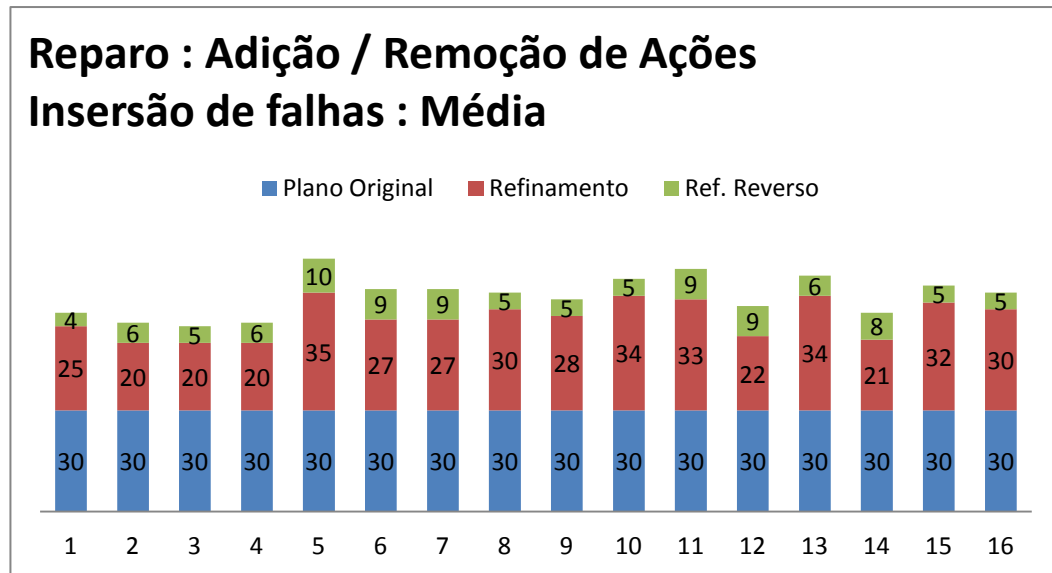


Fonte: Produção do autor.

A.2 - Estudo de Caso 2 - Taxa de falhas: MÉDIA

Este estudo de caso se baseou nos itens listados na seção 9.2, com *taxa* média de inserção de falhas. Os testes foram realizados simulando um conjunto de 16 passagens, e obtiveram-se os seguintes resultados apresentados no gráfico da Figura A.3.

Figura A.3 - Inserção de falhas (Taxa Média)



Fonte: Produção do autor.

Para efeitos de avaliação da viabilidade do método em função do tempo útil da passagem, tomou-se como base a passagem de número 5, como mostra a seguir:

- a) Calcular o *Total de Ações Executadas*: (*Ações inseridas* – *Ações removidas*);

$$TotalAçõesExecutadas = 35 - 10;$$

$$TotalAçõesExecutadas = 25;$$

- b) Adicionar os *tempos fixos*, para Grupos 01, 02, 03, 04 (Figura 9.1);

$$TempoTotalExecução (segundos) = 240 + 20 + 240 + 12;$$

$$TempoTotalExecução = 512 \text{ s}$$

- c) Adicionar o Total do tempo de *Ações Executadas* (a);

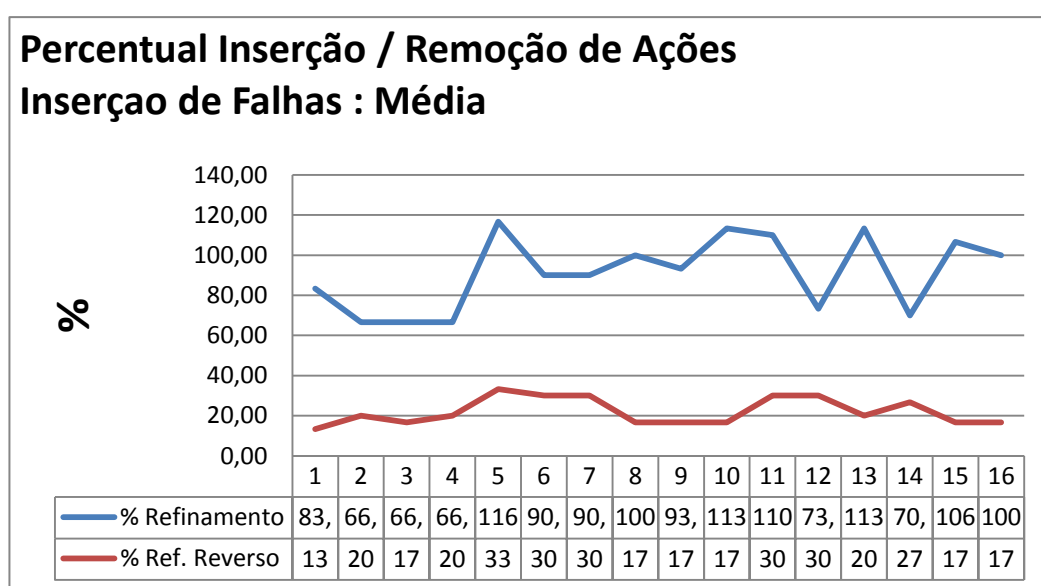
$$TempoTotalExecução = 512 + 25;$$

$$TempoTotalExecução = 537 \text{ s ou } (8,95 \text{ min.})$$

Para esse caso da passagem escolhida de número 5, mostra-se que na simulação com taxa *média* de inserção de falhas, os métodos aplicados para se reparar o plano são viáveis, pois com base no tempo da passagem (10 min.), o processo de execução e reparo gastaram 8,95 min., ainda dentro dos limites aceitáveis.

O gráfico da Figura A.4 apresenta um modelo comparativo do percentual de inserções e remoção de ações, neste gráfico também é possível observar que o percentual de inserção sempre vai ser maior que o de remoção de ações.

Figura A.4 - Percentual de inserção e remoção de ações (Taxa Média)

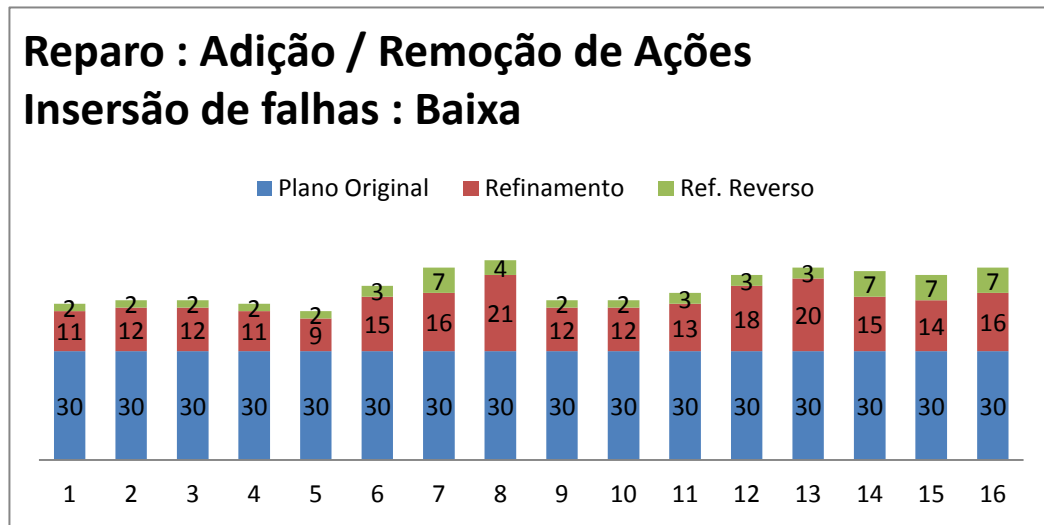


Fonte: Produção do autor.

A.3 - Estudo de Caso 3 - Taxa de falhas: BAIXA

Este estudo de caso se baseou nos itens listados na seção 9.2, com *taxa baixa* de inserção de falhas. Os testes foram realizados simulando um conjunto de 16 passagens, e obtiveram-se os seguintes resultados apresentados no gráfico da Figura A.5.

Figura A.5 - Inserção de falhas (Taxa Baixa)



Fonte: Produção do autor.

Para efeitos de avaliação da viabilidade do método em função do tempo útil da passagem, tomou-se como base a passagem de número 8 como mostra a seguir:

- a) Calcular o *Total de Ações Executadas*: (*Ações inseridas* – *Ações removidas*);

$$\text{TotalAçõesExecutadas} = 21 - 4;$$

$$\text{TotalAçõesExecutadas} = 17;$$

- b) Adicionar os *tempos fixos*, para Grupos 01, 02, 03, 04 (Figura 9.1);

$$\text{TempoTotalExecução (segundos)} = 240 + 20 + 240 + 12;$$

$$\text{TempoTotalExecução} = 512 \text{ s}$$

- c) Adicionar o Total do tempo de *Ações Executadas* (a);

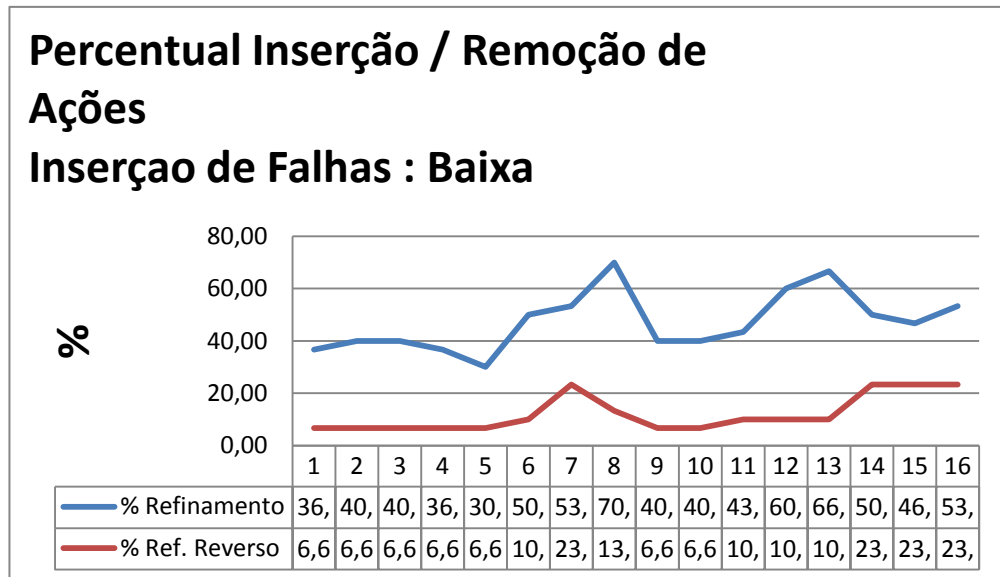
$$\text{TempoTotalExecução} = 512 + 17;$$

$$\text{TempoTotalExecução} = 529 \text{ ou } (8,81 \text{ min.})$$

Para esse caso da passagem escolhida de número 8, mostra-se que na simulação com taxa *baixa* de inserção de falhas, os métodos aplicados para se reparar o plano são viáveis, pois com base no tempo da passagem (10 min.), o processo de execução e reparo gastaram 8, 81 min., ainda dentro dos limites aceitáveis.

O gráfico da Figura A.6 apresenta um modelo comparativo do percentual de inserções e remoção de ações, neste gráfico também é possível observar que o percentual de inserção sempre vai ser maior que o de remoção de ações.

Figura A.6 - Percentual de inserção e remoção de ações (Taxa Baixa)



Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS

A seguir, serão apresentados alguns exemplos de resultados de planos reparados em diferentes cenários de execução.

Os casos a seguir, Figura B.1 e Figura B.2 apresentam resultados de testes onde foram inseridas ações durante a execução com alta e média taxa de falha, nas linhas onde os valores de *status* indicam ocorrências de falhas, significa que na execução das ações do plano, foi detectado um problema e com isso a ativação do Agente de reparo, para inclusão de novas ações na forma de subplanos reparadores.

B.1 - Plano Reparado - Taxa de falhas: ALTA

Figura B.1 - Plano reparado - alta taxa de inserção de falhas

<i>Tempo</i>	<i>Ação/TC</i>	<i>Descrição da Ação</i>	<i>Status</i>
102	TCJ01	TWTA LV ON	FALHA
105	TCJ01	TWTA LV ON	FALHA
210	TCJ01	TWTA LV ON	FALHA
315	TCJ01	TWTA LV ON	Suc
610	TCJ03	TWTA-A HV ON	Suc
905	TCJ05	TWTA-B HV ON	FALHA
1205	TCJ05	TWTA-B HV ON	FALHA
1305	TCJ05	TWTA-B HV ON	Suc
1400	TCJ13	CH1 ON	Suc
1500	TCJ15	CH2 ON	Suc
1600	TCJ37	MAIN CLOCK 1 ON	FALHA
1705	TCJ38	MAIN CLOCK 1 OFF	FALHA
1810	TCJ38	MAIN CLOCK 1 OFF	FALHA
1910	TCJ38	MAIN CLOCK 1 OFF	FALHA
2010	TCJ38	MAIN CLOCK 1 OFF	Suc
2105	TCJ34	MAIN CLOCK 1B WORK	Suc
2205	TCJ37	MAIN CLOCK 1 ON	FALHA
2305	TCJ38	MAIN CLOCK 1 OFF	Suc
2405	TCJ34	MAIN CLOCK 1B WORK	Suc
2505	TCJ37	MAIN CLOCK 1 ON	FALHA
2605	TCJ38	MAIN CLOCK 1 OFF	FALHA
2710	TCJ38	MAIN CLOCK 1 OFF	Suc
2805	TCJ34	MAIN CLOCK 1B WORK	Suc
2905	TCJ37	MAIN CLOCK 1 ON	FALHA
3005	TCJ38	MAIN CLOCK 1 OFF	Suc
3105	TCJ34	MAIN CLOCK 1B WORK	Suc
3205	TCJ37	MAIN CLOCK 1 ON	Suc
3300	TCJ25	ENCODER1 ON	Suc
3400	TCJ27	ENCODER2 ON	FALHA
3505	TCJ27	ENCODER2 ON	FALHA
3605	TCJ27	ENCODER2 ON	Suc
3700	TCH57	BRAKE POWER ON	Suc
3800	RRGR6	<< Dispara pedido de medida >>	
3801	RRGR7	<< Dispara pedido de medida >>	
4100	TCH31	THERMAL POWER OFF	FALHA
4205	TCH31	THERMAL POWER OFF	FALHA
4305	TCH31	THERMAL POWER OFF	FALHA
4405	TCH31	THERMAL POWER OFF	Suc
4500	RAGR3	<< Dispara pedido de medida >>	
4505	RAGR4	<< Dispara pedido de medida >>	
4700	TCH53	Camera 28v5 TM ON	Suc
4800	TCH25	Camera 28v1 (Control 15) ON	Suc
5000	TCH27	Camera 28v2 9.5V/11.5v) ON	Suc
5100	TCH29	Camera 28V3(control A+- 5.5V) ON	FALHA
5205	TCH29	Camera 28V3(control A+- 5.5V) ON	Suc
5300	TCH30	Camera 29V3(control A+- 5.5V) OFF	FALHA
5405	TCH30	Camera 29V3(control A+- 5.5V) OFF	FALHA
5505	TCH30	Camera 29V3(control A+- 5.5V) OFF	FALHA
5605	TCH30	Camera 29V3(control A+- 5.5V) OFF	FALHA
5705	TCH30	Camera 29V3(control A+- 5.5V) OFF	Suc
5800	TCH28	Camera 28v2 9.5V/11.5v) OFF	Suc
5900	TCH26	Camera 28v1 (Control 15) OFF	FALHA
6005	TCH26	Camera 28v1 (Control 15) OFF	Suc
6100	TCH54	Camera 28v5 TM OFF	Suc

Fonte: Produção do autor.

No exemplo da Figura B.1 foram contabilizados os seguintes valores:

- a) Total de ações inseridas no plano: 66
- b) Ações com sucesso: 39
- c) Ações com falhas: 27
- d) Percentual de ações com sucesso: 60%
- e) Percentual de ações com falhas (40%)

B.2 - Plano Reparado - Taxa de falhas: MÉDIA

Figura B.2 - Plano reparado - média taxa de inserção de falhas

<i>Tempo</i>	<i>Ação/TC</i>	<i>Descrição da Ação</i>	<i>Status</i>
102	TCJ01	TWTA LV ON	FALHA
105	TCJ01	TWTA LV ON	Suc
205	TCJ03	TWTA-A HV ON	Suc
305	TCJ05	TWTA-B HV ON	Suc
600	TCJ13	CH1 ON	Suc
700	TCJ15	CH2 ON	FALHA
805	TCJ15	CH2 ON	Suc
900	TCJ37	MAIN CLOCK 1 ON	FALHA
1005	TCJ38	MAIN CLOCK 1 OFF	Suc
1105	TCJ34	MAIN CLOCK 1B WORK	FALHA
1210	TCJ34	MAIN CLOCK 1B WORK	Suc
1305	TCJ37	MAIN CLOCK 1 ON	Suc
1400	TCJ25	ENCODER1 ON	Suc
1500	TCJ27	ENCODER2 ON	Suc
1600	TCH57	BRAKE POWER ON	FALHA
1705	TCH57	BRAKE POWER ON	Suc
1800	RRGR6	<< Dispara pedido de medida >>	
1801	RRGR7	<< Dispara pedido de medida >>	
2100	TCH31	THERMAL POWER OFF	FALHA
2205	TCH31	THERMAL POWER OFF	Suc
2300	RAGR3	<< Dispara pedido de medida >>	
2305	RAGR4	<< Dispara pedido de medida >>	
2500	TCH53	Camera 28v5 TM ON	FALHA
2605	TCH25	Camera 28v1 (Control 15) ON	Suc
2805	TCH28	Camera 28v2 9.5V/11.5v) OFF	FALHA
2910	TCH28	Camera 28v2 9.5V/11.5v) OFF	Suc
3005	TCH26	Camera 28v1 (Control 15) OFF	Suc
3105	TCH54	Camera 28v5 TM OFF	Suc
3300	TCH27	Camera 28v2 9.5V/11.5v) ON	FALHA
3405	TCH27	Camera 28v2 9.5V/11.5v) ON	Suc
3500	TCH29	Camera 28V3(control A+- 5.5V) ON	Suc
3600	TCH30	Camera 29V3(control A+- 5.5V) OFF	FALHA
4005	TCH30	Camera 29V3(control A+- 5.5V) OFF	Suc
4100	TCH32	THERMAL POWER ON	Suc
4200	TCH58	BRAKE POWER OFF	FALHA
4305	TCH58	BRAKE POWER OFF	Suc
4400	TCJ28	ENCODER2 OFF	Suc
4500	TCJ26	ENCODER1 ON	Suc
4900	TCJ16	CH2 OFF	Suc
5000	TCJ14	CH1 OFF	FALHA
5105	TCJ14	CH1 OFF	Suc
5200	TCJ06	TWTA-B HV OFF	FALHA
5305	TCJ06	TWTA-B HV OFF	Suc
5400	RRGR8	<< Dispara pedido de medida >>	

Fonte: Produção do autor.

No exemplo da Figura B.2 foram contabilizados os seguintes valores:

- a) Total de ações inseridas no plano: 47
- b) Ações com sucesso: 34
- c) Ações com falhas: 13

- d) Percentual de ações com sucesso: 73%
- e) Percentual de ações com falhas (27%)

Nos dois casos apresentados foram simuladas inserções de ações em pontos aleatórios do plano, para que o Agente pudesse aplicar as técnicas de reparo, como o Refinamento para inclusão de novas ações, analisar o segmento restante do plano para detectar ações redundantes com as já existentes no plano original e posteriormente aplicar a técnica de Refinamento Reverso para eliminar as ações replicadas e como tarefa complementar aplicar o reagendamento das ações no plano reparado.

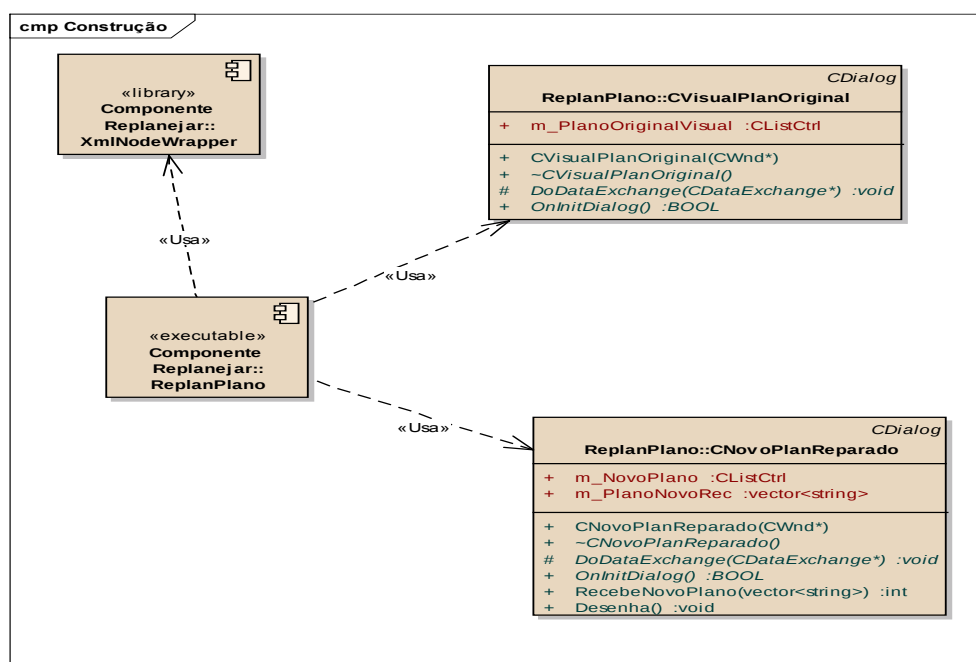
APÊNDICE C – DIAGRAMAS DO COMPONENTE DE SOFTWARE

Neste apêndice são apresentados os diagramas que compõem o elemento de software, que implementa o Agente de Replanejamento.

C1 - Diagrama de Construção do Componente

O diagrama de construção do programa executável do componente, representado na Figura C.1, apresenta os componentes de software necessários para a composição do módulo executável.

Figura C.1- Diagrama de construção do componente



Fonte: Produção do autor.

Para a construção do elemento de software que implementa o Agente de Replanejamento são necessários os seguintes componentes:

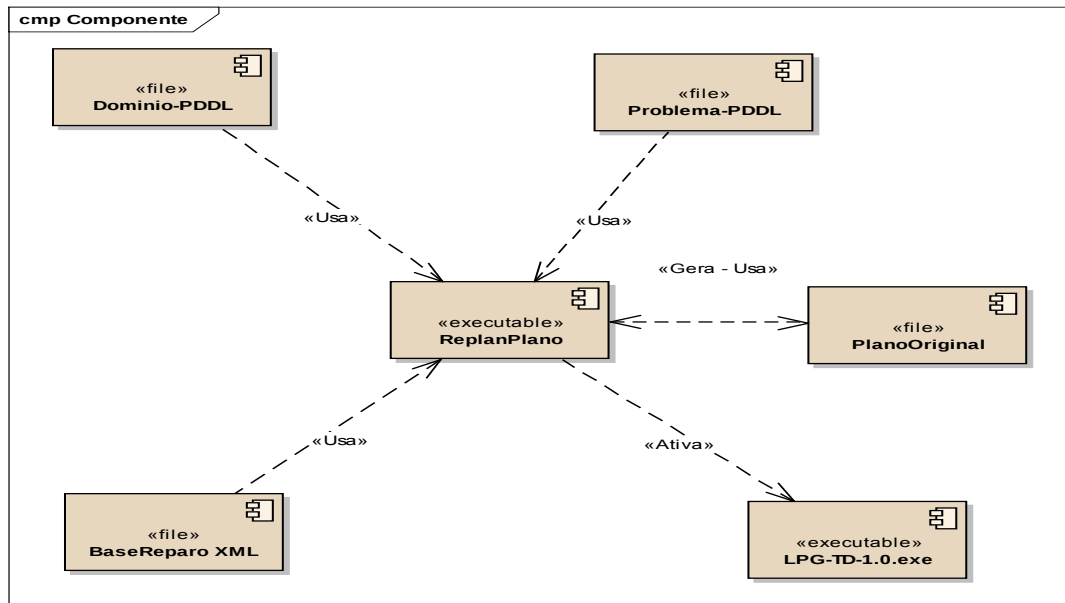
- Programa executável **ReplanPlano** artefato em código C++ ;
- Biblioteca de classes **XMLNodeWrapper**, com Ferramentas para XML;
- Classe **CNovoPlanReparado**, classe de visualização dos planos gerados;

- d) Classe **CVisualPlanOriginal** Classe com técnicas de reparo de plano.

C2 - Diagrama de Execução do Componente

O diagrama de execução do componente, Figura C.2 apresenta os componentes de software necessários para ativação do módulo executável.

Figura C.2 - Diagrama de execução do componente



Fonte: Produção do autor.

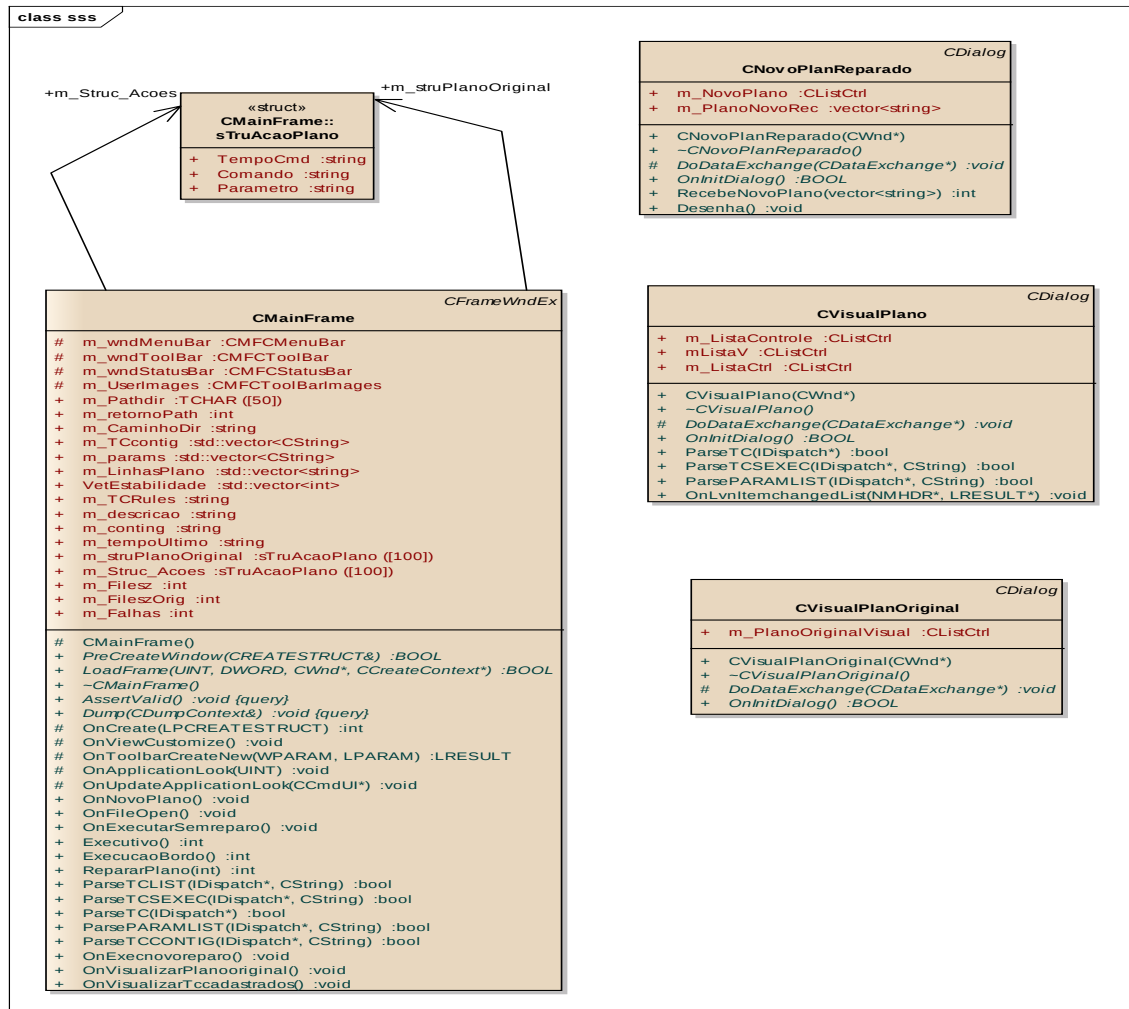
Para a execução do elemento de software que implementa o Agente de Replanejamento são necessários os seguintes componentes:

- Programa executável **ReplanPlano** artefato em código C++ ;
- Arquivo **Dominio-PDDL**, descrição do Domínio do problema;
- Arquivo **Problema-PDDL**, descrição do Problema a ser resolvido;
- Arquivo **PlanoOriginal**, Plano Original com ações a serem testadas .
- Arquivo **BaseReparo XML**, Base de conhecimento de reparo contendo subplanos reparadores

C3 - Diagrama de Classes do componente

O diagrama da Figura C.3, apresenta as classes e estrutura de dados que compõem o componente principal.

Figura C.3 - Diagrama de classes e estrutura de dados



Fonte: Produção do autor.

As principais classes e estrutura que compõem o diagrama de classes são:

- CVisualPlano** Classe de visualização do plano reparado
- CVisualPlanOriginal** Classe de visualização do plano original
- CNovoPlanReparado** Classe com serviços de reparação
- sTruAcaoPlano** Estrutura de dados com o formato de um plano típico

APÊNDICE D – BASE DE CONHECIMENTO DE REPARO

Este Apêndice apresenta exemplos das representações dos blocos que compõem a base de conhecimento aplicada ao reparo de plano. Estas representações estão codificadas em arquivo XML

D.1 - Representação de telecomando e regras

A Figura D.1 apresenta o Bloco TCLIST onde estão codificados todos os TCs aplicados aos testes.

Figura D.1 - Representação de um telecomando em XML.

<TCLIST>	<i>Lista de telecomandos</i>
<IDTC>TCJ01</IDTC>	<i>Identificação do Telecomando</i>
<IDCONTING>CJ01</IDCONTING>	<i>Identificação do grupo de ações reparadoras do plano</i>
<IDK>K436</IDK>	<i>Num da sequencia de telecomando usado pela estação</i>
<SOURCE>RBFB</SOURCE>	<i>Fonte</i>
<DESTINATION>RBJH</DESTINATION>	<i>Destino</i>
<DESCRIPTION>TWTA LVON</DESCRIPTION>	<i>Descrição do telecomando</i>
<TYPE>ROO</TYPE>	<i>Tipo de telecomando ex. Roteado ON/OFF</i>

Fonte: Produção do autor.

- b) A Figura D.2 apresenta o Bloco PARAM que representa a descrição de telemetria associada a um telecomando.

Figura D.2 - Representação de telemetria associada em XML.

<PARAM>	<i>Parâmetro de um telecomando</i>
<ID>J002</ID>	<i>Identificação da Telemetria</i>
DESCRIPTION>TWTA-A HV ON/OFF Status</DESCRIPTION>	<i>Descrição da telemetria</i>
<TYPE>BL</TYPE>	<i>Tipo da telemetria, ex: BL – bi-level.</i>
<LOWERLIMIT>0</LOWERLIMIT>	<i>Valor mínimo possível</i>
<UPPERLIMIT>1</UPPERLIMIT>	<i>Valor Maximo possível</i>
<FORMATTYPE>SEG</FORMATTYPE>	<i>Tipo de telemetria</i>

Fonte: Produção do autor.

- c) A Figura D.3 apresenta o Bloco TCSEXEC que representa a Regra para execução do TC.

Figura D.3 - Representação de regra para execução do telecomando em XML

< TCSEXEC>	
<RULE id="J01">	Identificação da Regra
<TC>TCJ01</TC>	Identificação do Telecomando
<PARAM>J001</PARAM> <OPERATOR>=</OPERATOR> <VALUE>1</VALUE>	Indica o valor do parâmetro telemetria associado à execução do TC, no exemplo telemetria J001 deve assumir valor igual a 1

Fonte: Produção do autor.

- d) A Figura D.4 apresenta o Bloco CONTINGENCY que representa os critérios para reparação de um plano.

Figura D.4 - Representação de critérios para reparação de plano

<CONTINGENCY>	
<IDCONT>	exemplo
<TC>CJ01</TC>	Identificação da ação de medida de contingência
<OPCAO>	Opções de reparo , com 3 TCs
<ACAO> <TC>TCJ01</TC> <WAITTIME>180</WAITTIME> </ACAO>	Telecomando TCJ01 Tempo de entrada em execução no plano (180 segundos)
<ACAO> <TC>TCJ03</TC> <WAITTIME>1</WAITTIME> </ACAO>	Telecomando TCJ03 Tempo de entrada em execução no plano (1 segundo)
</ACAO> <TC>TCJ05</TC> <WAITTIME>1</WAITTIME> </ACAO> </OPCAO>	Telecomando TCJ05 Tempo de entrada em execução no plano (1 segundo)

Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE E – ALGORITMOS E FUNCIONALIDADES DO MODELO FORMAL

A seguir apresenta-se os algoritmos que implementam o Modelo Formal do Agente de Replanejamento.

E.1 - Algoritmo 1 : Agente de Replanejamento

Início

1: *Entrada:*

$\pi_0 = \{S1, S2, \dots, Sg\}$, // Plano Original π_0 com Si estados e Sg meta $\in S$ (Definição-1)

$Br = \{Pc1, Pc2, \dots, Pcn\}$ // base de reparo Br (Definição 3)

2: *Saida:* $\pi_r = \{S1r, S2r, \dots, Sgr\}$ // Plano reparado

3: $Ação \leftarrow 0$, // contador ações executadas

4: *Enquanto* $Ação \neq Sg$ // Última ação

{

5: $Status \leftarrow Executivo(Ação)$ // Executa Ação e retorna Falha/Sucesso

6: *Se* $Status = Falha$

{

7: $MinMax \leftarrow \infty$ // atribui valor máximo

8: *Enquanto* $Br \neq \emptyset$ // Base de Reparo não vazia

{

9: $Buscar Br(Ação, Pci)$ // Para $Ação$ buscar planos candidatos na
// base de reparo Br

10: $Min \leftarrow Heuristica(Pci)$ // Determinar plano Pci de menor valor Heuristica

11: *Se* $Min < MinMax$ *então*

{

12: $MinMax \leftarrow Min$ // guardar menor valor de Heuristica

13: $Pc \leftarrow Pci$, // guarda melhor plano candidato

}

}

14: $\pi_r = Reparo(\pi_0, Ação, Pc)$; // Reparo em π_0 para $Ação$ e Pc

15: $Reagendamento(\pi_r)$:

16: $Si \leftarrow Ação$ // ponto da falha

17: $P \leftarrow (S, Si, Sg, 0)$; // Novo planejamento

18: $\pi_1 \leftarrow PLANEJADOR(P)$;

}

19: $Est_{\pi_0} \leftarrow Estabilidade(\pi_0, \pi_r)$ // Estabilidade do plano reparado

20: $Est_{\pi_1} \leftarrow Estabilidade(\pi_0, \pi_1)$ // Estabilidade do novo plano replanejado

21: *Se* $(Est_{\pi_0} < Est_{\pi_1})$ // então Reparo

22: $Ação \leftarrow Ação_reparo$ // reparo.

```

                Senão
23:                 $Ação \leftarrow Si$       // Replanejamento.
                }
24:    Senão // continua sem ocorrência de falhas
25:         $Ação \leftarrow Ação + 1$ 
Final

```

O Algoritmo 1, *AGENTE DE REPLANEJAMENTO* implementa o Agente de Replanejamento, na linha (1) recebe como entrada o plano original π , em (4) executa as ações do plano até o Estado objetivo Sg . Para cada $Ação$ começando da primeira em (3) até o estado Sg , chama-se o *Executivo*, em (5) passando a ação a ser executada, e em caso de falha recebe o *Status*, com informação da falha em valores de telemetria. Cada $Ação$ que falhou tem como medida de contingência subplanos reparadores (6). Em (9) com o valor da $Ação$ pode-se recuperar planos candidatos Pci na base de reparo Br .

Em (10), para cada plano candidato Pci , calcular-se o valor Heurístico do comprimento do plano, como apresentado na seção 5.4, para determinar por heurística o plano candidato que possui o menor valor em função da duração das ações, isso tem o compromisso de não exceder o tempo útil disponível da passagem, ou seja, plano deve ser reparado em tempo real dentro da janela de visibilidade do satélite. Com a seleção do menor valor heurístico *MinMAX* em (12) guarda-se o plano candidato Pc .

Escolhido o plano candidato Pc , parte-se ao reparo do plano (14), que como resultado obtém-se o plano π_r , em seguida, realiza o *Reagendamento*(π_r), em (15). Um novo plano deve ser construído por replanejamento (18), para que possa avaliar a Estabilidade comparando com o procedimento de Reparo realizado em (14), para adotar o novo plano.

É necessário determinar o quanto os planos reparado π_r e novo plano π_1 se distanciam do plano original π em termos da diferença das ações inseridas ou removidas para isso em (19) e (20), chama-se a função *Estabilidade* (), passando os planos original π_0 e reparado π_r e novo plano π_1 .

Para adotar o novo plano pelo critério da Estabilidade, então são comparados os valores da Estabilidade correspondentes obtidos em (19) e (20), o plano a ser adotado será o que tiver uma estabilidade menor, ou seja, uma diferença mínima em relação ao plano original, ai então o *Executivo* recebe a nova $Ação$, para continuar a execução do plano.

E.2 - Algoritmo 2 : $\text{Reparo}(\pi, \text{AçãoFalha}, Pci)$

Variáveis: π : Plano Original, AçãoFalha : Estado que falhou, Pci : Plano Candidato

Início :

```
1:  Entrada:       $\pi = \{S1, S2, ..., Sg\}$  // Plano Original
2:  Saida:         $\pi_r = \{S1r, S2r, ..., Sgr\}$  // Plano reparado

3:   $iAção \leftarrow 0$  // contador de ações
4:   $\text{Copia}(\pi, \pi_r, \text{AçãoFalha})$  // Copiar ações de  $\pi$  em  $\pi_r$ , ate ponto da falha :  $\text{AçãoFalha}$ 

5:  Enquanto  $iAção < \text{Tam}(Pci)$  // recupera ações em todo plano candidato
6:       $iAçãoR = \text{Busca}(Pci(\text{AçãoFalha}))$ 
        // Refinamento das ações de reparo
7:       $\text{RefinaPlan}(Pci(iAçãoR), \pi_r)$  // insere nova ação

        // Refinamento Reverso no plano reparado
8:      Para  $\forall iAçãoR \in Pci$ 
9:          Se  $iAçãoR \in \pi$  // já está no plano original
10:              $\text{RefinaReverso}(\pi_r, iAçãoR)$ 
11:  Retornar  $\pi_r$ 

Final
```

O Algoritmo 2, $\text{REPARO}(\pi, \text{AçãoFalha}, Pci)$ implementa o processo de reparo de um plano por refinamento ou refinamento reverso, recebe o plano original π , o estado onde o plano falhou AçãoFalha , e plano candidato Pci . Na linha (3) estabelece um contador da sequência de ações, para localizar no plano a ação que falhou, em (4) copia as ações do plano π em um plano vazio π_r , que será o novo plano reparado. Em (5) e (6) busca as ações reparadoras para a AçãoFalha . Na linha (7) procede ao refinamento do plano π_r , $\text{RefinaPlan}(Pci(iAçãoR), \pi_r)$, passando a ação $iAçãoR$ reparadora do plano candidato Pci . Em (8) verifica a ocorrência de replicação de ações no plano reparador, caso afirmativo procede-se ao Refinamento Reverso $\text{RefinaReverso}(\pi_r, iAçãoR)$, eliminando as duplicidades da ação $iAçãoR$.

E.3 - Algoritmo 3 : Estabilidade (π, π_r) :

Início

```
1:  Entrada:       $\pi = \{S1, S2, ..., Sg\}$  // Plano Original
```

```

                 $\pi r = \{ S1r, S2r, ..., Sgr \}$  // Plano reparado
2:   Saída      Est // Valor Estabilidade

3:   Para  $\forall iAção \in \pi$ 
      {
4:       Para  $\forall iAçãoR \in \pi r$ 
5:       Se  $iAção \in \pi r$ 
6:       Dif1  $\leftarrow$  Dif1+1 // ações original que estão em  $\pi r$ 

7:       Se  $iAçãoR \in \pi$ 
8:       Dif2  $\leftarrow$  Dif2+1 // ações reparadoras que estão em  $\pi$ 
      }
9:   Est = Dif1 + Dif2
10:  Retornar Est
Final

```

O Algoritmo 3, *ESTABILIDADE* ($\pi, \pi r$) implementa o cálculo da Estabilidade entre dois planos, tem com entradas os dois planos a serem avaliados, $\pi, \pi r$ e retorna o valor da diferença entre os dois planos. Para todas as ações pertencentes aos dois planos (3) e (4), é verificado a existência da ação i do plano π no plano πr em (5) e (6), e a existência da ação j do plano πr , no plano π em (7) e (8). As diferenças são computadas conforme a definição da seção 5.5.1.

E. 4 - Algoritmo 4 : Heurística(Pci)

```

Início
1:  Entrada:    $Pci = \{ Sc1, Sc2, ..., Scn \}$  //  $Pci$  plano candidato,  $Sci$  são ações candidatas
2:  Saída:     ValorHeuris

                ValorHeuris  $\leftarrow$  0

3:  Se  $Pci \neq \emptyset$  // não vazio
4:      Para  $\forall Sc_i \in Pci$ 
5:          ValorHeuris  $\leftarrow$  ValorHeuris + Duracao( $Sc_i$ ) // comprimento das durações
                                                das ações
6:  Retornar ValorHeuris

Final

```

O Algoritmo 4, *HEURISTICA*(Pci) implementa o cálculo do valor heurístico dos plano candidatos ao reparo, considerando as durações das ações, em (5) é realizada a somatória das durações das ações pertencentes ao plano candidato.