

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE DEFESA**

MARCUS ALBERT ALVES DA SILVA

**COMBINANDO TÉCNICA E DOUTRINA POR MEIO DE CONCEITOS
ONTOLÓGICOS PARA REPRESENTAR CENÁRIOS OPERACIONAIS
MILITARES EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES COGNITIVOS**

**RIO DE JANEIRO
2023**

©2023

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha
Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Silva, Marcus Albert Alves da.

Combinando Técnica e Doutrina por meio de Conceitos Ontológicos para Representar Cenários Operacionais Militares em Sistemas de Comunicações Cognitivos / Marcus Albert Alves da Silva. – Rio de Janeiro, 2023.

151 f.

Orientador(es): Maria Cláudia Reis Cavalcanti e David Fernandes Cruz Moura.

Tese (doutorado) – Instituto Militar de Engenharia, Engenharia de Defesa, 2023.

1. rádio cognitivo. 2. ontologias. 3. apoio a decisão. 4. comunicações militares. 5. engenharia dirigida a modelos. i. Cavalcanti, Maria Cláudia Reis (orient.) ii. Moura, David Fernandes Cruz (orient.) iii. Título

MARCUS ALBERT ALVES DA SILVA

COMBINANDO TÉCNICA E DOUTRINA POR MEIO DE CONCEITOS
ONTOLÓGICOS PARA REPRESENTAR CENÁRIOS OPERACIONAIS
MILITARES EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES COGNITIVOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia de Defesa.

Orientador(es): Maria Cláudia Reis Cavalcanti, D.Sc.
David Fernandes Cruz Moura, D.Sc.

Rio de Janeiro

2023

MARCUS ALBERT ALVES DA SILVA

Combinando Técnica e Doutrina por meio de Conceitos Ontológicos para Representar Cenários Operacionais Militares em Sistemas de Comunicações Cognitivos

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia de Defesa.

Orientador(es): Maria Cláudia Reis Cavalcanti e David Fernandes Cruz Moura.

Aprovado em Rio de Janeiro, 9 de fevereiro de 2023, pela seguinte banca examinadora:

Prof.^a Maria Cláudia Reis Cavalcanti - D.Sc. do IME - Presidente

Prof. David Fernandes Cruz Moura - D.Sc. do IME

Prof. Luis Ferreira Pires - Ph.D. da University of Twente

Prof.^a Maria Luiza Machado Campos - Ph.D. da UFRJ

Prof. João Luiz Rebelo Moreira - Ph.D. da University of Twente

Prof. Ricardo Choren Noya - D.Sc. do IME

Prof.^a Gabriela Moutinho de Souza Dias - D.Sc. do IME

Rio de Janeiro

2023

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre esteve presente me apoiando desde o meu primeiro choro, com seu amor, carinho e dedicação incondicionais. Seu exemplo de luta e força forjou em meu coração o desejo de lutar e nunca desistir dos meus sonhos. Também dedico esta tese à minha querida avó Zélia "in memoriam", pelo amor e carinho dedicados a mim e que trago diariamente em meu coração e em minhas melhores lembranças.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por guiar e iluminar meu caminho ao longo de toda esta pesquisa e por me permitir concluir-la com saúde, mesmo diante de uma pandemia que tirou a vida de amigos, colegas e familiares.

Expresso também minha gratidão aos meus Chefes, Cel Torturela e Gen Robson, pela confiança e pela oportunidade de realizar o sonho de concluir este doutorado com sucesso.

A minha gratidão à minha família, em especial à minha mãe Léa, pelo amor incondicional, exemplo de força e superação, orientações e presença singular em todos os momentos da minha vida. Agradeço também ao meu padrasto Sebastião pelos ensinamentos valiosos, amor, carinho e alegria, mesmo nos momentos mais difíceis. Às minhas filhas Agnes e Alissa, meus presentes do céu e amores do meu coração, que sempre me inspiram a dar o meu melhor a cada dia, na intenção de ser um exemplo positivo para elas. Agradeço imensamente à minha esposa, mulher, amiga e companheira Roselane, pelo amor, paciência e apoio inabaláveis, que foram fundamentais para concluir essa jornada. E não posso deixar de mencionar o meu pai do coração, Francisco, e o meu irmão Jean, pelo apoio e incentivo contínuos em vários momentos desta caminhada.

Agradeço à minha orientadora, professora e amiga Maria Cláudia (carinhosamente Yoko), que me acompanha desde os meus primeiros passos no mestrado até a conclusão deste doutorado. Agradeço por todos os valiosos ensinamentos que ultrapassam o escopo dessa pesquisa, incluindo sua presença, companheirismo, disponibilidade, carinho, atenção, tato, sensibilidade, didática e muitos outros atributos que não podem ser descritos em apenas algumas linhas. Expresso minha eterna gratidão e tenho certeza de que sem suas orientações eu não teria chegado até aqui. Agradeço também ao meu coorientador, Cel David, pelo seu compromisso, paciência e orientação durante todo o processo de pesquisa. Agradeço por seus sábios conselhos, objetividade e precisão sempre pautados na ética, comprometimento e lealdade. Sua energia positiva, equilibrada e de uma paz inestimável, transmitida ao longo do caminho.

Agradeço a todos os professores que participaram da avaliação deste trabalho e que ministraram disciplinas ao longo do curso. Em especial à professora Maria Luíza Campos, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos que foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese. Agradeço também por sua participação em todas as bancas dessa pesquisa e por colaborar com valiosas observações. Ao professor Luís Ferreira Pires, agradeço pelos ensinamentos valiosos que foram essenciais para a parte experimental desta pesquisa. Agradeço também pela oportunidade de trabalhar com o Sr. como monitor

durante suas aulas e por sua valiosa participação na banca deste trabalho, proporcionando importantes contribuições. Registro também um agradecimento especial à professora Ariane e ao professor Alex Garcia pelo apoio na validação e construção dos axiomas envolvendo diversos conceitos desta pesquisa.

Agradeço aos colegas e amigos que me apoiaram e encorajaram durante todo o trabalho. Sem a ajuda e colaboração de vocês, esta tese não teria sido possível. Em especial, agradeço "in memoriam" ao meu querido amigo Carlos Eduardo Pires Faria, sempre presente e interessado pelo andamento da pesquisa, vibrando pelo sucesso. Ele foi um amigo singular, a quem sou eternamente grato por sua amizade, carinho e exemplo como ser humano. Ao meu amigo Júlio Tesolin, agradeço pela parceria em tantas jornadas, disciplinas, publicações, além do seu apoio, companheirismo e camaradagem durante toda a jornada. À minha querida amiga Lucimar Lial, agradeço pelo carinho, apoio e amizade nos momentos difíceis, pela confiança e oportunidade de poder colaborar em sua caminhada, seja na parceria em disciplinas, grupos de estudo e pela oportunidade de contribuir e participar de seu artigo premiado. À amiga Eclenice Antunes, agradeço pela amizade, apoio e parceria em disciplinas, trabalhos e grupos de estudo.

Finalmente, agradeço à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) pelo apoio ao Projeto S2C2, convênio N°Ref. 2904/20, contrato no 01.20.0272.00, assinado em 30/12/2020 e publicado no DOU edição nº16, seção 3, página7, de 25 de janeiro de 2021. O apoio deste convênio viabilizou a participação em atividades que contribuíram significativamente para o desenvolvimento desta pesquisa.

*"Crê em ti mesmo, age e verás os resultados.
Quando te esforças, a vida também se esforça para te ajudar."
(Chico Xavier)*

RESUMO

Os avanços tecnológicos trouxeram oportunidades favoráveis para mitigar ou eliminar o problema ocasionado pelo aumento progressivo do número de dispositivos que empregam comunicações via rádio, limitando a disponibilidade do espectro eletromagnético. Os rádios definidos por software (RDS) e os rádios cognitivos (RC) possuem um papel importante nesse contexto, pela flexibilidade de mudar suas características de funcionamento em tempo real e pela capacidade de perceber o ambiente e mudar suas próprias características de maneira autônoma. Por outro lado, a automação ilimitada pode gerar o risco de violação de normas regulatórias, o que é crítico em ambientes militares. Esse fato desperta o interesse por tecnologias cognitivas baseadas em regras. Além disso, a medida em que surgem possibilidades de integração entre sistemas de comunicações e sistemas de comando e controle aumenta significativamente a gama de informações sobre as quais o rádio precisa decidir. Este fato tem motivado pesquisas no sentido de modelar as situações e cenas do mundo real que são a base para o processo de tomada de decisão desses equipamentos. Neste cenário, o uso de ontologias tem sido frequentemente abordado na literatura, uma vez que as ontologias podem representar esse universo de informações de forma precisa e concisa, servindo de base para diversas soluções tecnológicas. Este trabalho desenvolveu a ontologia CROMO, uma ontologia de referência capaz de representar cenas e situações do universo de decisão de rádios cognitivos em um contexto de comunicações em operações militares. Foi realizado um estudo de caso utilizando a ontologia CROMO na modelagem ontológica de elementos operacionais reais de uma operação militar. Também foi realizada uma prova de conceito, por meio do desenvolvimento de um sistema de simulação de um ambiente de comunicações militares, baseado em regras. Nesse experimento, a ontologia CROMO foi referência para o desenvolvimento do sistema. Seus conceitos foram utilizados na elaboração de um mecanismo baseado em regras empregando técnicas e ferramental de engenharia dirigida a modelos. A formalização dos conceitos de cena e situação e suas relações mereológicas, modeladas com base na ontologia de fundamentação Unified Foundational Ontology, representam uma ampliação do escopo de representação do conhecimento neste contexto. A ontologia CROMO surge como uma nova iniciativa de solução na área de rádios cognitivos e uma oportunidade para novas pesquisas.

Palavras-chave: rádio cognitivo. ontologias. apoio a decisão. comunicações militares. engenharia dirigida a modelos.

ABSTRACT

Technological advances have brought favorable opportunities to mitigate or eliminate the problem caused by the progressive increase in the number of radio communications devices, that limit the electromagnetic spectrum availability. Software-defined radio (RDS) and cognitive radio (CR) play an essential role in this context due to the flexibility to change their operating characteristics in real-time and the ability to perceive the environment and change their characteristics autonomously. On the other hand, complete automation can generate the risk of violating regulatory standards, which is critical in military environments. This fact arouses interest in rules-based cognitive technologies. In addition, the extent to which possibilities for integration between communications systems and command and control systems (C2) significantly increase the range of information on which the radio needs to decide. This fact has motivated research to model the situations and scenes of the real world that are the basis for the decision-making process of cognitive radios. In this scenario, the use of ontologies has been a common point in the literature, since ontologies can represent this universe of information precisely and concisely, serving as the basis for different technological solutions. This work developed the CROMO ontology, a reference ontology capable of representing scenes and situations of the decision universe of cognitive radio in the context of communications in military operations. A case study was carried out using the CROMO ontology in the ontological modeling of real operational elements of a military operation. It was also carried out as a proof of concept, through the development of a simulation system of a military communications environment, based on rules. In this experiment, the CROMO ontology was a reference for the system development. Its concepts were used in the elaboration of a mechanism based on rules employing model-driven engineering techniques. The formalization of the concepts of scene and situation and their mereological relationships, which were modeled based on the Unified Foundational Foundation ontology, represents an extension of the scope of representation of knowledge in this context. The CROMO ontology emerges as a new solution initiative in cognitive radio and an opportunity for further research.

Keywords: cognitive radio. ontologies. decision support. military communications. Student.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de Sistema de Comunicações e C ² Divisão do Exército	34
Figura 2 – Recorte de representação de um sistema SCC.	36
Figura 3 – Triângulo de Compensação	39
Figura 4 – Transceptor super-heteródino básico	40
Figura 5 – RDS básico	42
Figura 6 – Ciclo Cognitivo básico	44
Figura 7 – Fragmento da UFO-A	48
Figura 8 – Fragmento da UFO-B	50
Figura 9 – Fragmento da UFO-C	51
Figura 10 – Visão Geral da Metodologia MDE	57
Figura 11 – Componentes da Situação e sua conexão com o UFO A, B e C.	62
Figura 12 – Situação baseada no padrão Composite	63
Figura 13 – Exemplo de uma situação atômica (<i>Atomic Situation</i>)	67
Figura 14 – Exemplo de uma situação complexa <i>Complex Situations</i>	68
Figura 15 – Exemplo de uma situação complexa caracterizada por participação em evento	69
Figura 16 – Exemplo de uma situação complexa caracterizada por relator	69
Figura 17 – Ciclo cognitivo simplificado	70
Figura 18 – Estrutura da cena aplicando o padrão composite	71
Figura 19 – Processo de tomada de decisão por rádio cognitivo em comunicações militares (expresso em BPMN)	79
Figura 20 – Fragmento de ontologia CROMO-OCP - Plano de Operação e Comunicação, baseado na UFO	84
Figura 21 – Fragmento de ontologia CROMO-OCP - Planos e Compromissos	86
Figura 22 – Construtos de elaboração de Planos e Regras em CROMO-OCP	88
Figura 23 – Canal de Controle na Comunicação	89
Figura 24 – Fragmento de CROMO-MOS representando uma Operação Militar Ofensiva	91
Figura 25 – Fragmento CROMO-MOS, que representa cenários técnicos e táticos em operações militares ofensivas.	94
Figura 26 – Escopo da Comunicação.	96
Figura 27 – Fragmento CROMO-SCA representando componentes e ações do cenário de operação militar ofensiva	97
Figura 28 – Fragmento CROMO-SCA representando ações realizadas por um Rádio Cognitivo em Ambiente de Comunicação Militar.	99

Figura 29 – Cenário Operacional, Rádio Cognitivo e suas ações em uma Comunicação Militar.	100
Figura 30 – Fragmento CROMO em um Planejamento de Operacional de Comunicações Militares	103
Figura 31 – Situação Eletromagnética Ruidosa (<i>Noisy Electromagnetic Situation</i>) do mundo real.	105
Figura 32 – Regras de configuração em um Cenário Operacional hipotético.	106
Figura 33 – Exemplo de uso da CROMO na modelagem conceitual de um Cenário Operacional	107
Figura 34 – Elementos integrantes de um cenário operacional hipotético.	109
Figura 35 – Contexto Geral do Cenário Operacional hipotético.	110
Figura 36 – Variações no Contexto Geral do Cenário Operacional hipotético.	111
Figura 37 – Visão Geral do Processo de Simulação.	112
Figura 38 – Fragmento do <i>Log</i> de Dados simulados oriundos do Espectro Eletromagnético.	113
Figura 39 – Fragmento do <i>Log</i> de Dados simulados oriundos do Sistema c ²	113
Figura 40 – Modelagem do Cenário Aplicando os Constructos da CROMO.	115
Figura 41 – Metamodelo para Construção de Regras	117
Figura 42 – Gramática, baseada no Metamodelo	118
Figura 43 – Proposições para o modo de operação do canal C1	119
Figura 44 – Proposições para o modo de operação do canal C4	119
Figura 45 – Proposições para as estratégias de modulação dos canais C1-C4	120
Figura 46 – Recorte de CROMO-RSL	120
Figura 47 – Recorte de CROMO-RSL convertida em código Java	121
Figura 48 – Recorte do Relatório de Saída da Simulação	121
Figura 49 – A inserção de políticas no Ciclo Cognitivo	125
Figura 50 – Conversão de Regra em SML para plataforma baseada em regras	128
Figura 51 – Níveis de consciência situacional	129
Figura 52 – Principais Classes da Ontologia STO	130
Figura 53 – Principais Classes da Ontologia STO-L e fragmento da Ontologia STIX	131
Figura 54 – Contexto intrínseco e contexto relacional (estrutural), alinhados a UFO	132
Figura 55 – Contexto intrínseco e contexto relacional (temporal), alinhados a UFO	133
Figura 56 – Visão Geral da Ontologia SAO	134
Figura 57 – Visão Geral da Ontologia SAW	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicadores do ambiente eletromagnético	20
Tabela 2 – Indicadores derivados do ambiente eletromagnético	20
Tabela 3 – Indicadores do ambiente das Operações Militares	21
Tabela 4 – Indicadores e Funções do ambiente das Operações Militares	21
Tabela 5 – Classificação das Operações Militares	29
Tabela 6 – Classificação das Operações Militares quanto à Finalidade	30
Tabela 7 – Operações Comuns às Operações Terrestres	31
Tabela 8 – Aplicativos,origens e escalões de emprego	33
Tabela 9 – Princípios das Comunicações na F Ter	38
Tabela 10 – Fatores do Triângulo da Compensação aplicados a Subsistemas	38
Tabela 11 – Operações, Fatores, Princípios e Tecnologias	39
Tabela 12 – Requisitos funcionais da descrição de cenas e situações	60
Tabela 13 – Requisitos funcionais para representar os Planos de Operação e Comunicação.	82
Tabela 14 – <i>Tipos de situações</i> com base nos limites de <i>SNR</i>	90
Tabela 15 – Situações Táticas, com base na participação do rádio cognitivo nas Operações	93
Tabela 16 – Cenas táticas baseadas nas variações de distância.	93
Tabela 17 – Estratégias de modulação aplicadas à Situações Ruidosas detectadas .	104
Tabela 18 – Os principais cenários envolvendo rádios cognitivos nas pesquisas dos últimos 20 anos.	124
Tabela 19 – Referências com Cenas e/ou Situações apoiando decisões	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1stOT	First-Order Type
2ndOT	Second-Order Type
AACR	Adaptive, Aware, or Cognitive Radio
BPMN	Business Process Model and Notation
CN	Centros Nodais
CCom	Centro de Comunicações
COp	Centro de Operações
C ²	Comando e Controle
EB	Exército Brasileiro
EBNet	Rede Corporativa Privativa do Exército
EIR	Equipamentos de Interface de Rede
ERB	Estação Rádio Base
F Ter	Força Terrestre
GFO	General Formal Ontology
HF	High Frequency ou Frequência Alta
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
iof	Instance of
MLT	Multi-Level Theory
MDE	Model-Driven Engineering
MMS	serviço de mensagem multimídia ou <i>multimedia message service</i>
NA	Nós de Acesso
OM	Organização Militar
Op Cj	Operações conjuntas

PD	Problema de Decisão
PC	Posto de Comando
PC DE	Posto de Comando da Divisão de Exército
PCT	Posto de Comando Tático
QoS	Qualidade do Serviço
RC	Rádio Cognitivo
RDS	Rádio Definido por Software
RITEx	Rede Integrada de Telecomunicações do Exército
RRSEC	Redes Rádio do Sistema Estratégico de Comunicações
SABiO	Systematic Approach to Build Ontologies
SAM	Sistema do Assinante Móvel
SEC	Sistema Estratégico de Comunicações
SCA	Sistema de Comunicações de Área
SCC	Sistema de Comunicações de Comando
SISTAC	Sistema Tático de Comunicações
SML	Situation Model Language
SMS	serviço de mensagens curtas ou <i>short message service</i>
TDMA	Time Division Multiple Access ou Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo
UFO	Unified Foundational Ontology
UHF	Ultra High Frequency ou Frequência Ultra Alta
UML	Unified Modeling Language
VHF	Very High Frequency ou Frequência Muito Alta
Z Aç	Zona de Ação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	MOTIVAÇÃO	18
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	21
1.3	OBJETIVOS	24
1.4	JUSTIFICATIVA	25
1.5	METODOLOGIA DE PESQUISA	26
1.6	ESTRUTURA DO TEXTO	27
2	CONCEITOS BÁSICOS	28
2.1	OPERAÇÕES MILITARES, SISTEMAS E TECNOLOGIAS	28
2.1.1	AS OPERAÇÕES MILITARES	28
2.1.2	SISTEMAS DE COMANDO E CONTROLE (C2)	32
2.1.3	SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES EM PROVEITO DAS OPERAÇÕES MILITARES	33
2.1.4	RÁDIOS DEFINIDOS POR SOFTWARE	40
2.1.5	RADIO COGNITIVO	43
2.2	MODELAGEM CONCEITUAL	45
2.2.1	ONTOLOGIAS	45
2.2.1.1	UNIFIELD FOUNDATIONAL ONTOLOGY - UFO	47
2.2.2	A TEORIA DA ENCARNAÇÃO RÍGIDA E VARIÁVEL APLICADA NA ONTOLOGIA DE CENAS E SITUAÇÕES	52
2.2.3	ENGENHARIA DE ONTOLOGIAS	55
2.2.4	ENGENHARIA DIRIGIDA A MODELOS	56
3	CONCEITOS DE FUNDAMENTAÇÃO PARA MODELAGEM DE CENÁRIOS APLICADOS A RÁDIOS COGNITIVOS	60
3.1	SITUAÇÃO	61
3.2	CENA	70
4	DESENVOLVIMENTO DA ONTOLOGIA CROMO	76
4.1	O PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO EM UM RÁDIO COGNITIVO MILITAR	77
4.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SABIO	79
4.2.1	MODELAGEM DOS PLANOS DE OPERAÇÕES E COMUNICAÇÕES (CROMO-OCP)	83
4.2.2	MODELAGEM DO CENÁRIO OPERACIONAL MILITAR (CROMO-MOS)	89

4.2.3	MODELAGEM DOS COMPONENTES E AÇÕES DO CENÁRIO OPERACIONAL (CROMO-SCA)	95
5	ESTUDO DE CASO E PROVA DE CONCEITO	102
5.1	EXEMPLO DE USO DA CROMO	102
5.2	APLICAÇÃO DA CROMO EM UM SISTEMA SIMULADO DE COMUNI- CAÇÃO COGNITIVA	108
5.2.1	VISÃO GERAL DO CONTEXTO	109
5.2.2	DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO	111
5.2.3	MODELANDO O CENÁRIO COM A CROMO	114
5.2.4	METAMODELAGEM DE REGRAS E TRANSFORMAÇÕES APPLICANDO MDE	116
6	TRABALHOS RELACIONADOS	123
6.1	ABORDAGENS BASEADAS EM LINGUAGEM OU CODIFICAÇÃO	126
6.2	ABORDAGENS BASEADAS EM ONTOLOGIAS	128
6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
7	CONCLUSÃO	137
7.1	CONTRIBUIÇÕES	139
7.2	TRABALHOS FUTUROS	141
	REFERÊNCIAS	143

1 INTRODUÇÃO

O processo de tomada de decisão é de grande importância em dispositivos autônomos e tem atraído o interesse de pesquisas da área da ciência da computação. Um exemplo disso, está na área de rádios cognitivos, que têm parte de seus componentes desenvolvidos por software e são capazes de sensorear, processar dados e mudar a própria forma de funcionamento.

Na Teoria da Decisão proposta por Peterson[1], o primeiro passo na decisão é determinar o *problema de decisão* (PD), os elementos que o compõem e o universo de escolhas do decisor. Esse universo de discurso que contém o problema de decisão, no contexto de rádios cognitivos (RC) [2], é o marco inicial do ciclo cognitivo, proposto inicialmente por Mitola e Maguire[3]. Nele incide a ação de observar o contexto em que a comunicação acontece para atingir um objetivo definido. De forma semelhante, Haykin[4], em sua proposta simplificada do ciclo cognitivo, chama de *análise de cena* a ação de observação e compreensão sobre o universo do problema de decisão. Esse tipo de análise, considera o(s) objeto(s) envolvido(s), sua(s) característica(s), eventos e as relações nas quais possam estar envolvidos, levando em conta tempo e espaço. Ainda, com base na análise, um motor de decisão seleciona uma decisão adequada às possibilidades e capacidades de cada dispositivo. Uma falha na representação do universo de discurso compromete todo o processo de decisão. Isso aumenta a importância da transparência semântica neste tipo de representação, ou seja, o quanto claro, não ambíguo e objetivo ela pode ser.

Na maioria dos casos, o universo de discurso do PD em rádios cognitivos está direcionado à observação do espectro eletromagnético com foco em aspectos técnicos, como gestão do uso do espectro eletromagnético, melhoria na qualidade do serviço, economia de energia, dentre outros problemas. Entretanto, ao inserir um rádio cognitivo em um ambiente de comunicações militares, o universo de discurso do PD cresce em complexidade e em relevância. Neste caso, o comportamento não está mais condicionado somente à solução de problemas ligados a aspectos técnicos, passando a considerar aspectos táticos da doutrina militar, como o tipo de operação em que o equipamento está inserido, qual o seu papel naquela operação, onde estão seus inimigos etc. Estas informações chegam ao rádio por meio dos sistemas de comando e controle (C^2), nos quais o rádio está inserido. Além disso, existem princípios inerentes às comunicações militares [5] que representam requisitos operacionais relevantes, dentre eles podemos destacar a *rapidez*, que indica a necessidade que as ligações sejam estabelecidas em tempo útil para surtir os efeitos desejados; a *simplicidade*, ressaltando a importância de que haja alternativas simples que atendem aos requisitos para os quais foram concebidas e a *flexibilidade*, que indica a necessidade de uma rápida adequação às mudanças das operações militares. Corroborando com isso,

redes de comunicações envolvendo questões de segurança nacional e operações militares dependem de quantidades cada vez maiores de dados, impactando diretamente na tomada de decisão e na necessidade de adequação rápida ao ambiente [6]. Observando o cenário em questão, muitas são as possibilidades de pesquisa, contudo foram identificados três desafios de pesquisa que vão ao encontro de elementos que se apresentam como relevantes no domínio dos rádios cognitivos usados em operações militares;

- A importância de uma modelagem conceitual objetiva e com precisão sintática e semântica dos elementos que compõem o universo de discurso do problema de decisão;
- A inclusão dos elementos relacionados a aspectos táticos da doutrina militar no universo de discurso do problema de decisão; e
- Uma arquitetura de implementação, alinhada ao modelo conceitual, que possa favorecer a rapidez, a simplicidade e a flexibilidade no processo de tomada de decisão.

1.1 Motivação

O crescimento global de redes e dispositivos móveis sem fio, como *smartphones*, *laptops* e rádios, consome grande parte do espectro de radiofrequência, gerando uma escassez de faixas de frequência disponíveis nesse ambiente. Esses tipos de equipamentos transmitem voz, dados, vídeos, imagens e mensagens de texto, reduzindo a disponibilidade de bandas de frequência. Além disso, o Relatório Anual de Internet da Cisco (2018-2023)¹, considerando a Taxa de Crescimento Anual Composta, aponta que os dispositivos e conexões estão crescendo mais rapidamente (10%) do que a população (1,0%) e os usuários da Internet (6%).

Por outro lado, os avanços tecnológicos também trouxeram oportunidades favoráveis para resolver ou mitigar esse problema de escassez, como os rádios definidos por software (RDS) e os rádios cognitivos (RC). Um RDS é um rádio no qual a maioria de seus componentes físicos são construídos por software [3] [2], além de máquinas virtuais e agentes inteligentes [7]. Como uma evolução dos rádios tradicionais, em um RDS, funções como modulação, demodulação e filtragem podem ser implementadas por software sem alterações de hardware. Reconfigurabilidade, flexibilidade e modularidade são alguns dos principais recursos do RDS. Além disso, o RDS traz vantagens como a redução de custo, a capacidade de reuso de componentes e a flexibilidade de adoção de várias aplicações em uma mesma plataforma de hardware.

¹ <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html#Trends>

Por sua vez, o rádio cognitivo é um tipo de RDS capaz de sensorear o ambiente, alterar as suas características e modo de funcionamento para atingir objetivos como a melhoria do desempenho, a economia de energia e a adaptação às condições operacionais do ambiente [3] [7]. Apesar do congestionamento do espectro, grande parte do espectro atualmente licenciado (usuários primários - PU) permanece sem uso em diferentes momentos ou locais. Essas fatias ou lacunas espectrais podem estar em torno de 15-85% do espectro licenciado [8]. Uma das possibilidades de rádios cognitivos (usuários secundários – SU) é identificar e utilizar essas lacunas espectrais, minimizando a interferência potencial sobre os usuários licenciados [8].

No entanto, em um ambiente de comunicações militares, os rádios cognitivos precisam considerar que o espectro eletromagnético também abriga sinais de outros rádios militares, sistemas de guerra eletrônica (bloqueadores, interferidores, etc), armas antiaéreas ou lançadores de foguetes, instrumentos de auxílio à navegação aérea, marítima ou terrestre, radares e outros tipos de sensores. Além disso, com base na doutrina militar, devem ser considerados fatores como o papel de cada tipo de dispositivo de comunicação, as localizações de dispositivos amigos e inimigos e seus tipos de movimento, bem como questões táticas e fisiográficas para cada tipo de operação militar.

A estrutura de dados sensoreada por um RC durante uma atividade de observação do ambiente de radiocomunicação, necessita ser organizada com critério e consciênciia para a correta compreensão [2]. Não basta apenas observar os dados da estrutura, mas questões como espaço e tempo devem ser consideradas. Em relação ao tempo, as decisões podem ser baseadas em dados coletados instantaneamente, representando um instante de realidade, ou em dados coletados durante um intervalo de tempo, caracterizando uma cena observada.

Assim, observar o ambiente de forma instantânea pode ser suficiente para atingir a compreensão e tomar decisões; contudo, um conjunto de observações capturadas dentro de um período de tempo podem ser essenciais ao correto entendimento do contexto. Por exemplo, a observação de um indicador de nível de bateria indicando 5%, em um instante no tempo, pode ser suficiente para identificar uma situação de baixo nível de bateria, ensejando a decisão por sua troca. Por outro lado, verificar o nível da bateria em um determinado intervalo de tempo permite a identificação de problemas mais complexos, como uma redução abrupta no nível da bateria, indicando um comportamento anormal do equipamento ou da bateria. Essas variações das características e/ou composição do(s) objeto(s) ao longo de uma janela temporal caracterizam uma cena.

Do mesmo modo, ao verificar exemplos sob o viés da doutrina militar, temos que a detecção da localização de um dado equipamento inimigo em um instante no tempo pode representar a presença inimiga em uma região. No entanto, a observação das variações na localização de um mesmo equipamento ao longo de um determinado intervalo de tempo

Tabela 1 – Indicadores do ambiente eletromagnético

Símbolo	Significado
S	Potência do sinal
N	Ruído
I	Interferência
R	Taxa de símbolos
B	Largura de banda
Mod	Tipo de modulação
BER	Taxa de erro de Bit
$SNIR$	Relação Sinal Ruído Mais Interferência

Tabela 2 – Indicadores derivados do ambiente eletromagnético

Indicador	Funções Aplicadas	Modo de Observação	
		Instante	Intervalo de Tempo
BER	$f_{BER}(S, N, I, R, B, Mod)$		X
$SNIR$	$f_{SNIR}(S, N, I)$	X	

pode representar uma aproximação inimiga durante uma dada operação militar. Desse modo, percebe-se que ambas as observações, embora assemelhadas, podem resultar em decisões distintas.

A fim de exemplificar essa questão, a Tabela 1 mostra indicadores possíveis em um sensoreamento da dados em uma hipotética conexão entre equipamentos de radiocomunicação.

Conforme descrito na Tabela 2, com base nos indicadores da Tabela 1, algumas funções podem fornecer indicadores indiretos para a tomada de decisão, como BER (Taxa de erro de Bit)² e SNIR (Relação Sinal Ruído mais Interferência)³.

Observa-se que cada função tem um conjunto específico de indicadores (ponto focal) necessários aos seus resultados e modos de observação diferentes. Por sua vez, com base na doutrina militar, outros indicadores devem ser considerados. Para tal, a Tabela 3 apresenta alguns indicadores aplicados a esse contexto.

Eles são a operação militar (*MilOp*), o dispositivo de comunicação (*ComDev*), a localização (*Loc*) de um determinado dispositivo de comunicação ou pessoa, a área ou região onde uma determinada operação ocorre (*OpReg*), a função (*OpRole*) que uma pessoa assume em um contexto operacional (ou seja, Comandante, Oficial de Operações) ou o escalão (*Ech*) ao qual os militares ou a organização que participa da operação pertencem, como brigada, batalhão, companhia, pelotão, dentre outros.

Conforme apresentado na Tabela 4, com base nos dados descritos na Tabela 3, algumas funções podem fornecer indicadores indiretos, como o (*MovT*), *Tipo de Movimento*,

² Do inglês *bit error rate*

³ Do inglês: *signal to noise plus interference ratio*

Tabela 3 – Indicadores do ambiente das Operações Militares

Indicador	Significado
<i>MilOp</i>	Operação Militar
<i>Loc</i>	Localização
<i>OpReg</i>	Região da Operação
<i>OpRole</i>	Papel na Operação
<i>Ech</i>	Escalão
<i>ComDev</i>	Equipamento de Comunicações

Tabela 4 – Indicadores e Funções do ambiente das Operações Militares

Funções Aplicadas		Modo de Observação	
Indicador	Dados focais	Instante	Intervalo de tempo
<i>MovT</i>	$f_{MovT} (ComDev, Loc, OpRole, Time)$		X
<i>DevL</i>	$f_{DevL} (ComDev, Loc, OpRole)$	X	

que descreve o tipo de movimento ou trajetória de um equipamento e o (*DevL*), versando sobre a *Localização do dispositivo*. Isso posto, tem-se que essas variações no modo de sensorear e avaliar o ambiente são parte do universo de discurso do problema de decisão em rádios cognitivos.

1.2 Caracterização do Problema

A crença em torno da observação e compreensão de fatos do mundo real estudada por Barwise[9] em sua obra "*Teoria das Cenas e outras Situações*", ganha importância no contexto de tomada de decisões no trabalho de Endsley[10], voltado para a consciência situacional e seus níveis de observação, compreensão e projeção.

Desta forma, modelar situações do mundo real que influenciam a tomada de decisões tem sido um objetivo perseguido por pesquisas que destacam a importância da precisão sintática e semântica dos elementos que compõem o universo de discurso em um problema de decisão. Com base nesses modelos, métodos cognitivos baseados em modelos matemáticos ou em algoritmos de aprendizado de máquina apresentados por Xu et al.[11] alteram definições de comportamentos do rádio voltadas à economia de energia, redução de níveis de ruído, dentre outras.

Por outro lado, quando a decisão se baseia em regras doutrinárias rígidas, seriam apropriados modelos baseados em regras[11], onde estruturas de conhecimento, tais como tabelas e árvores de decisão são desejáveis. Além disso, Mitola[12] aponta que um rádio cognitivo com um alto grau de autonomia, proveniente de suas capacidades cognitivas, pode involuntariamente se reprogramar e acabar violando restrições de agências regulatórias. No caso das comunicações militares, violar regras doutrinárias pode custar a perda de vidas humanas durante uma operação militar. Isso aumenta a importância da precisão

sintática e semântica nos modelos sob os quais as regras são construídas.

No contexto supracitado, foram observados trabalhos acerca da modelagem conceitual de situações, considerando essas questões. Com base nos trabalhos de Barwise[9] e Endsley[10], Kokar, Matheus e Baclawski[13] propõem uma representação formal criando uma ontologia como uma alternativa para facilitar a tomada de decisões em contextos genéricos. Da mesma forma, pode-se destacar outras iniciativas na criação de ontologias aplicadas à modelagem de situações [14] e contextos intrínsecos e contextos relacionais [15] [16].

Todas essas iniciativas tinham o intuito de reduzir o universo de dados a ser analisado na identificação de situações relevantes em grandes volumes de dados. Essas pesquisas atuam em áreas diversificadas, como a da segurança cibernética proposta por Kokar e Endsley[17], agindo sobre *logs* de dados; das operações militares como no trabalho de Pai, Yang e Chung[18], agindo sobre dados do fluxo de mensagens durante as operações; ou no desenvolvimento de aplicações na área de controle de tráfego proposto por Baumgartner et al.[19].

Outros estudos representam situações com base em ontologias de fundamentação como a *General Formal Ontology (GFO)* e a *Unified Foundational Ontology (UFO)* [20][21] [22]. Estes trabalhos são aplicados a contextos de decisão ligados à gestão de desastres, gestão de negócios e emergências ligadas a pacientes cardíacos. Além disso, aplicam técnicas de engenharia dirigida a modelos na implementação de suas soluções.

Nenhum dos trabalhos até então apresentados, contempla a representação conceitual de cenas e suas relações com os objetos e eventos do contexto. Outros trabalhos usam plataformas computacionais (SCENE e Drools) baseadas em regras, que permitem a implementação de raciocínio temporal, regras existenciais e funções descritivas multivariadas e de agregação para lidar com cenas [23] [24]. Contudo, nessas plataformas não é possível criar modelos conceituais capazes de representar cenas, suas relações com as situações, objetos e outros tipos de abstrações do mundo real.

Por outro lado, cabe destacar iniciativas de criação de uma linguagem de domínio mais amigável aos usuários que não são desenvolvedores de software. Por meio dessa linguagem, os especialistas do domínio podem criar suas próprias aplicações, mesmo sem saber programar, uma vez que a linguagem é transformada em código por meio de técnicas de engenharia dirigida a modelos, do inglês "*Model-Driven Engineering*". O uso dessas técnicas pode ser notado em trabalhos aplicados em áreas que envolvem sensoriamento de dados em tempo real por meio de dispositivos de radiofrequência, em contextos que exigem rapidez na tomada de decisão [20] [21] [23] [24]. Esta técnica se apresenta como uma oportunidade positiva na simplificação do processo decisório, favorecendo a rapidez, a flexibilidade e a simplicidade nas atividades ligadas à tomada de decisão. Contudo, até onde foi possível investigar, não foram encontradas abordagens dessa natureza aplicadas

ao domínio de rádios cognitivos.

O rádio cognitivo surge como uma alternativa para mitigar o problema de escassez do espectro eletromagnético, partindo da ineficiência da alocação estática de bandas de frequência em aplicações *wireless*, apontadas pela Comissão Federal de Comunicações americana (*FCC-Federal Communication Commission*) em 2002, [25]. Nesse contexto, observa-se a realização de pesquisas buscando métodos e abordagens que possam melhorar a eficácia dos agentes cognitivos, evidenciado por trabalhos envolvendo algoritmos baseados em regras de decisão, aprendizado de máquina [26] [27] e [28], inteligência artificial [26] e o uso combinado das abordagens anteriores [11] [29]. Mesmo assim, estes estudos também destacam a importância da aquisição dos dados e do tratamento deles, uma vez que são o elemento base para a operação dos algoritmos cognitivos. Segundo [11], a correta estruturação dos dados pode aumentar显著mente a eficácia e reduzir os custos computacionais do sistema, fator relevante para os rádios cognitivos, posto que tradicionalmente contam com recursos computacionais limitados.

Além disso, outros trabalhos aplicam ontologias na estruturação dos dados ligados a rádios cognitivos. Como pôde ser visto nos trabalhos de Bahrak, Park e Wu[30] ao tratar da estruturação de políticas de comunicações usando ontologias em uma rede de rádios cognitivos, bem como nos trabalhos de Kokar e Lechowicz[31] e [32], que criaram e usaram uma ontologia cobrindo o domínio de rádios cognitivos no mapeamento das estruturas de componentes eletrônicos baseados em software e seus comportamentos durante a geração de formas de onda. Nenhuma dessas pesquisas tinha como foco a inclusão de aspectos operacionais de operações militares no processo decisório.

Desta maneira, com base no que foi possível investigar, e com base na teoria de metodologia científica proposta por Lakatos[33], foram identificadas as seguintes lacunas, problemas e hipóteses:

- **Lacuna 1** - *os modelos conceituais aplicados no universo de discurso do problema de decisão baseados em situações não contemplam a representação de cenas, suas relações com os objetos e eventos do contexto;*
 - **Problema 1:** No modelo conceitual do domínio de rádios cognitivos, a falta de representação de cenas e suas relações com situações, identificadas como uma lacuna limita a capacidade do modelo representar elementos do universo de discurso necessários à tomada de decisão?
 - **Hipótese 1:** Um modelo conceitual que supra as deficiências de representação identificadas pode permitir a representação dos elementos do universo de discurso necessários à tomada de decisão dos rádios cognitivos.

- **Lacuna 2** - *o universo de discurso do problema de decisão em rádios cognitivos não contempla os elementos relacionados a aspectos táticos da doutrina militar;*
 - **Problema 2:** A não inclusão dos elementos relacionados a aspectos táticos da doutrina militar no processo decisório impede que decisões baseadas nesses aspectos sejam tomadas pelo rádio?
 - **Hipótese 2:** A inclusão dos elementos relacionados a aspectos táticos, como base para a tomada de decisão em rádios cognitivos possibilita que decisões baseadas na doutrina militar sejam tomadas pelo rádio.
- **Lacuna 3** - não foi encontrada na literatura uma arquitetura de implementação, implantação e atualização de regras de negócio para a tomada de decisão no domínio dos rádios cognitivos, que favoreça a rapidez, a simplicidade e a flexibilidade.
 - **Problema 3:** Qual seria a arquitetura de implementação, implantação e atualização de regras de negócio que poderia favorecer a rapidez, a simplicidade e a flexibilidade na tomada de decisão no domínio dos rádios cognitivos?
 - **Hipótese 3:** A criação de uma arquitetura de implementação, implantação e atualização de regras de negócio agiliza, simplifica e flexibiliza a tomada de decisão no domínio dos rádios cognitivos.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ontologia bem fundamentada contendo as abstrações do mundo real que envolvem cenas e situações do universo de discurso do processo de tomada de decisão de rádios cognitivos em operações militares. Espera-se que os modelos aqui desenvolvidos sejam uma estrutura de conhecimento de referência que colabore e possa servir de base para aplicações que atendam a outros requisitos específicos do mesmo domínio do conhecimento. O objetivo pressupõe a hipótese de que isso possa permitir a representação dos elementos do universo de discurso necessários à tomada de decisão, bem como possibilitar que decisões dos rádios sejam também baseadas na doutrina militar. Adicionalmente, assume-se que o modelo desenvolvido sirva de base para o desenvolvimento de uma arquitetura que poderá favorecer a rapidez, a simplicidade e a flexibilidade na implantação e atualização de regras de negócio para a tomada de decisão.

A proposta deste trabalho é seguir os seguintes objetivos específicos:

- *Objetivo 1* – Desenvolver uma ontologia de referência, baseada em ontologia de fundamentação, constituindo um modelo conceitual capaz de representar cenas e situações do universo de discurso do processo de tomada de decisão de rádios cognitivos em operações militares.

- *Objetivo 2* – De forma complementar ao objetivo 1, a ontologia deve cobrir todos os elementos que influenciam no comportamento do rádio cognitivo, incluindo as fontes de conhecimento da fase de planejamento operacional; a representação de cenas e situações do cenário operacional; os respectivos elementos constituintes e o conjunto de ações que compõem o cenário operacional, incluindo os aspectos técnicos e táticos da doutrina militar.
- *Objetivo 3* – Propor uma arquitetura de implementação, alinhada ao modelo conceitual que possa favorecer a rapidez, a simplicidade e a flexibilidade na atualização de regras de negócio no processo de tomada de decisão de rádios cognitivos em operações militares.

1.4 Justificativa

Ao considerar o objetivo de integrar informações das operações militares provenientes de sistemas de comando e controle para apoiar decisões em sistemas de comunicação cognitivos, podemos identificar uma conexão entre os temas de projetos estratégicos do Exército Brasileiro e do Ministério da Defesa: o projeto de sistemas de sistemas aplicado a sistemas de C2 (S2C2) e o projeto RDS-Defesa.

No contexto do Exército Brasileiro, o projeto de Sistema de Sistemas de Comando e Controle (S2C2) tem como objetivo atender às demandas de interoperabilidade da Família de Aplicativos de Comando e Controle da Força Terrestre (FAC2FTer). Esses produtos de interoperabilidade, além de serem úteis para a Defesa e para a atuação conjunta de Forças Armadas e Agências Governamentais, são de extrema valia para todas as instituições públicas que empregam vários sistemas. Além disso, os sistemas de C2, se comunicam e compartilham dados entre si, por meio dos sistemas de comunicações, onde os rádios desempenham um papel de destaque. Este fato reforça a importância da interoperabilidade entre esses sistemas, onde tanto o rádio pode receber informações dos sistemas C2, que poderão ajudar em processos decisórios do equipamento, bem como o sistema C2 poderá receber informações dos sistemas de comunicações acerca das capacidades e possibilidades de comunicações. O projeto S2C2 é objeto de um convênio assinado entre a Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP e a Fundação de Apoio à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação - Exército Brasileiro - FAPEB. O projeto tem como executor o Departamento de Ciência e Tecnologia e como instituições coexecutoras o Centro de Desenvolvimento de Sistemas (CDS), o Instituto Militar de Engenharia (IME) e a Universidade de Twente. O convênio foi publicado no Diário Oficial da União, edição nº 16, seção 3, página 7, em 25 de janeiro de 2021, e o contrato foi assinado em 30/12/2020.

No Brasil, o Ministério da Defesa tem investido em pesquisas na área de rádios cognitivos por meio do projeto RDS-Defesa, que teve início em 2012 e vem sendo aprimorado

desde então. O objetivo principal do projeto é promover a interoperabilidade entre as Forças Armadas do Brasil, desenvolvendo uma família de equipamentos rádio multibanda que operem nas faixas de HF, VHF e UHF, capazes de operar em diversas formas de onda. Essa iniciativa tem contribuído significativamente para o desenvolvimento científico e tecnológico do país, além de fortalecer a Base Industrial de Defesa brasileira [34]. Neste contexto, por meio da Portaria no 2.110/MD, de 09 de agosto de 2012, o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento em RDS foi aprovado e determinado para execução sob a coordenação do Exército Brasileiro. Nesse sentido, o Centro Tecnológico do Exército (CTEx) tem sido responsável pela gerência do projeto, que conta com a participação de Instituições de Ciência e Tecnologia das três Forças Armadas, além de universidades, centros de pesquisa e empresas civis.

Diante dessa realidade, espera-se que o presente trabalho possa contribuir com ambos os projetos, no sentido de constituir uma possibilidade de integração e interoperabilidade entre sistemas de comando e controle e sistemas de comunicações, por meio de uma indicação de uso que pode beneficiar ambos os sistemas.

1.5 Metodologia de Pesquisa

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa investigativa do estado da arte nos seguintes temas: Operações Militares; Sistemas de Comando e Controle; Sistemas de comunicações em Proveito das Operações militares; Rádios Definidos por Software e Rádios Cognitivos; Ontologias; Engenharia de Ontologias; e Engenharia Dirigida a Modelos. Esta atividade foi constante em todo o decorrer da pesquisa. Como segunda etapa, foram identificados e formalizados construtos de ontologias de fundamentação capazes de representar situações e cenas do mundo real. A partir desses conceitos foram abordados e formalizados aspectos mereológicos, envolvendo desde a composição de uma situação atômica, suas relações com os *substantials* e *moments*, passando pela definição de situações complexas e chegando a definir cenas atômicas e complexas, envolvendo um conjunto de combinações de cenas e situações diversas. Também foram estabelecidas relações entre o conceito de cena e os conceitos de disposição, proposição, eventos, observando inclusive a participação de cenas em relações de causalidades de eventos. Tudo isso, com foco em atender ao Objetivo 1.

Em seguida, empregando a metodologia de engenharia de ontologias SABiO, a partir da definição de um escopo de representação, foi elaborada uma ontologia de rádios cognitivos aplicada a operações militares, que descreve objetos do mundo real do processo de tomada de decisão em rádios cognitivos. A ontologia buscou cobrir os elementos da fase de planejamento operacional, incluindo as fontes de conhecimento técnico e doutrinário que influenciam no comportamento do rádio. Além disso, também representou cenas e situações presentes em cenários de operações militares, com seus elementos constituintes

detectáveis por um rádio cognitivo e o conjunto de ações que este mesmo rádio pode executar, neste tipo de cenário operacional. Esta etapa foi centrada no Objetivo 2.

Como uma das estratégias de validação foram realizadas análises acerca das capacidades da ontologia de responder às questões de competência que representam seus requisitos funcionais e que foram definidos durante o seu desenvolvimento.

Em seguida, foi desenvolvido um estudo de caso, onde foram elaborados modelos baseados na ontologia, que foram convertidos em uma linguagem específica de domínio. A criação dessa linguagem representa uma iniciativa no sentido de criar uma alternativa para agilizar a atualização de regras doutrinárias que incidem sobre o comportamento do rádio cognitivo. Esta etapa está alinhada com o Objetivo 3.

Como foi possível descrever, trata-se de um método hipotético dedutivo, constituído de um ciclo que se inicia com uma pesquisa exploratória em torno do problema e de suas conjecturas (hipóteses), em seguida é construída uma arquitetura e são realizados testes para verificar a falseabilidade das hipóteses. Os resultados poderão gerar novos ciclos até uma possível comprovação [33].

1.6 Estrutura do Texto

O documento está estruturado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura envolvendo conceitos básicos acerca de temas como Operações Militares; Sistemas de Comando e Controle; Sistemas de comunicações em Proveito das Operações militares; Rádios Definidos por Software e Rádios Cognitivos; Ontologias; Engenharia de Ontologias; e Engenharia Dirigida a Modelos. No Capítulo 3 são abordados aspectos formais e mereológicos dos Conceitos de Cena e Situação harmonizando definições UFO/GFO. No Capítulo 4, é apresentada a CROMO, uma Ontologia de referência de Rádios Cognitivos aplicada às Operações Militares. Por sua vez, o Capítulo 5 apresenta alguns estudos de caso buscando validar os objetivos de pesquisa. No Capítulo 6 são apresentados os Trabalhos relacionados. Por fim, o Capítulo 7 traz as considerações finais, as contribuições já atingidas e a indicação de trabalhos futuros.

2 CONCEITOS BÁSICOS

Em busca de uma ambientação em torno dos objetivos de pesquisa, foi necessária uma revisão em diferentes áreas do conhecimento associadas ao tema, buscando conectar conceitos e compartilhar características e capacidades.

2.1 Operações Militares, Sistemas e Tecnologias

2.1.1 As Operações Militares

O objetivo desta seção não é apresentar uma descrição minuciosa acerca de cada tipo de operação militar, mas demonstrar a amplitude do tema diante da diversidade de operações e formas combinadas de emprego. Esta amplitude provoca impacto direto na forma de emprego dos recursos durante as operações, em particular nos meios e equipamentos de comunicação.

Em meio a diferentes maneiras de se definir o que é uma operação militar, os manuais doutrinários das Forças Armadas brasileiras [35] indicam que uma operação militar é o conjunto de ações realizadas com forças e meios militares, coordenadas em tempo, espaço e finalidade, de acordo com o estabelecido em uma diretriz, plano ou ordem para o cumprimento de uma atividade, tarefa, missão ou atribuição. É realizada no amplo espectro dos conflitos, desde a paz até o conflito armado/guerra, passando pelas situações de crise, sob a responsabilidade direta de autoridade militar competente.

As variações entre as situações de paz e conflito armado classificam as operações militares em *operações de guerra* e *não guerra*. Nas operações de guerra, onde há conflito armado, o poder militar é empregado, explorando a plenitude de suas características de emprego da força, ou seja, a violência militar em sua maior expressão. Já nas operações de não guerra, em situações de paz, o poder militar é empregado em tarefas não relacionadas ao combate propriamente dito, exceto em circunstâncias especiais, em que esse poder bélico é usado de forma limitada [36].

As operações militares são desenvolvidas prioritariamente em um ambiente conjunto, excluindo raras situações em que uma força armada a conduz de forma singular. A pluralidade de participantes, associada à diversidade de meios empregados e de formas de atuação, dá origem a inúmeros tipos de operações distintas, que são executadas em prol de um objetivo comum.

As operações militares podem ser classificadas quanto às forças empregadas e quanto à sua finalidade. Quanto às forças empregadas, podem ser singulares, conjuntas

ou combinadas. Por outro lado, quando observadas sob seu aspecto finalístico podem ser classificadas como básicas ou complementares. No contexto das forças empregadas, as operações singulares são desenvolvidas por apenas uma das forças armadas. O recebimento de pequenas frações e/ou meios de outra força não modifica este conceito.

De maneira diferente, as operações conjuntas (Op Cj) são caracterizadas pelo emprego de meios ponderáveis de mais de uma força singular, com propósitos interdependentes ou complementares, sob um comando único, com representantes das forças singulares no estado-maior (grupo de assessores de alto nível diretamente ligado ao comando da operação). Este tipo de junção de forças pode representar a integração de forças navais, terrestres e aéreas, a qual demanda o estabelecimento de relações de comando e de um sistema de comando e controle adequados para que se tenha êxito.

Adicionalmente, observando as operações de forma mais ampla, constata-se que as operações combinadas são empreendidas por elementos ponderáveis de forças armadas multinacionais, sob a responsabilidade de um comando único. São realizadas com forças e meios de duas ou mais nações no âmbito de uma aliança ou coalizão, adquirindo a qualificação de conjunto-combinadas quando requerem a participação de diferentes forças singulares e nações.

Sob o viés finalístico, tem-se que as operações básicas são aquelas que, por si mesmas, podem atingir os objetivos determinados por uma autoridade militar ou civil, em situação de guerra ou em situação de não guerra. Em situações de guerra, as operações básicas podem ser ofensivas ou defensivas, podendo contar também com operações de cooperação e coordenação com agências (agências ou entidades de segurança nacionais e internacionais) - estas últimas, mais comuns em situações de não guerra. A Tabela 5 apresenta de forma resumida uma classificação geral das operações militares.

Tabela 5 – Classificação das Operações Militares

Critério	Tipo
Quanto às forças empregadas	Singulares
	Conjuntas
	Combinadas
Quanto à finalidade	Básicas
	Complementares

Ainda com foco na finalidade, as operações complementares se destinam a ampliar, aperfeiçoar e/ou complementar as operações básicas, a fim de maximizar a aplicação dos elementos do poder de combate terrestre. Abrangem também as operações que, por sua natureza, características e condições em que são conduzidas, exigem especificidades quanto ao seu planejamento, preparação e condução, particularmente, relacionadas às táticas, técnicas e procedimentos ou aos meios (pessoal e material) empregados. Por sua vez, a fim de demonstrar os níveis de complexidade que essas operações podem atingir, a Tabela 6

apresenta os tipos de operações Básicas e Complementares, considerando que todas estas operações também podem ocorrer de maneira singular, conjunta ou combinada.

Tabela 6 – Classificação das Operações Militares quanto à Finalidade

Tipo de Operação	Operação
Básicas	Ofensivas Defensivas Cooperação e Coordenação
Complementares	Aeromóveis Aeroterrestres De Segurança Contra Forças Irregulares De Dissimulação De Informação Especiais De Busca, Combate e Salvamento De Evacuação de não combatentes De Junção De Interdição De Transposição de Curso de Água Anfíbias Ribeirinhas Contra Desembarque anfíbio De Abertura de Brecha Urbanas

No contexto das operações militares terrestres, observa-se um rol de ações comuns às operações, listadas na Tabela 7, podendo ser realizadas por tropas de qualquer natureza desde que estas tenham as capacidades necessárias. Estas ações relacionam-se às funções de combate, bem como às atividades e tarefas a serem conduzidas pelos elementos da F Ter (Força Terrestre) e apresentam um grau de intensidade variável, de acordo com a operação militar planejada e conduzida. Cabe destacar que cada uma das operações, básicas ou complementares, pode ser constituída de uma ou mais operações comuns.

Tabela 7 – Operações Comuns às Operações Terrestres

Tipo de Operação
Reconhecimento, Vigilância e Segurança
Coordenação e Controle de Espaço Aéreo
Planejamento e Coordenação de Apoio de Fogo
Substituição de Unidades de Combate
Assuntos Civis
Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (DQBRN)
Guerra Cibernética
Operações Psicológicas
Guerra Eletrônica
Defesa Antiaérea
Comunicação Social

2.1.2 Sistemas de Comando e Controle (C²)

Os sistemas C² formam um ambiente onde comandantes manifestam intenções de comando e executam ações para atingir objetivos, de forma controlada. Além disso, podem determinar funções, responsabilidades e estabelecer regras e restrições ao contexto e aos elementos subordinados [37]. Essas ações caracterizam comportamentos definidos com base no entendimento pelo monitoramento e avaliação do contexto do ambiente. A agilidade nesse entendimento é um fator relevante para o sucesso na tomada de decisões em tempo útil, podendo representar vantagem sobre o inimigo. O êxito nas operações militares está associado à manutenção do fluxo de informações durante a operação, dada a necessidade de transmitir aos chefes a situação atualizada do ambiente de batalha, apoiando decisões e definindo ações. Além disto, a manutenção de tal fluxo permite conduzir as ordens e acompanhar as respectivas execuções, percorrendo todos os níveis hierárquicos. Tudo isso é viabilizado pela atividade de Comando e Controle. Depreende-se de todo o exposto que esta atividade envolve a autoridade, um processo decisório e uma estrutura, constituída do pessoal, da doutrina e da tecnologia.

No Exército Brasileiro (EB), o comandante planeja, dirige e controla forças e operações [38], por meio dos sistemas C² apoiados em sistemas de comunicações e informações, bem como alinhados com a doutrina de emprego das comunicações [39]. Esses sistemas são fundamentados na necessidade de acompanhamento das operações em tempo real por parte das autoridades e dos comandantes militares em diversos níveis. Essa demanda exige equipamentos e técnicas para se ter um C² eficiente, dado que é um ambiente marcado pela volatilidade, incerteza e complexidade acerca das comunicações. Características oriundas do advento da robótica, informática, novos materiais, biotecnologia, inteligência artificial são incorporadas, buscando-se consolidar comunicações mais rápidas e com maior capacidade de transmissão de dados, imagens e vídeos entre equipamentos para toda parte do mundo [40].

A Portaria número 203/Cmt Ex, de 17 de março de 2015 [41], estabelece a criação da Família de Aplicativos de Comando e Controle da Força Terrestre (FAC2FTer) para atender as necessidades operacionais do Sistema de Comando e Controle da Força Terrestre (SC2FTer), cujos principais sistemas são o C² em Combate e o Pacificador Móvel, sendo que o primeiro é voltado para atuação em tempos de guerra, enquanto o segundo se presta para tempos de não guerra [40].

Assim, a FAC2FTer vem sendo desenvolvida para apoiar as atividades e processos de comando e controle em todos os escalões de uma Força Terrestre Componente (FTC) e se desdobra em três aplicativos principais [42]: *Alpha*, *Bravo* e *Charlie*, levando em consideração as diferentes situações operacionais em que esses escalões podem se encontrar.

- **Alpha** – apoia o Processo de Planejamento e Condução das Operações Terrestres

Tabela 8 – Aplicativos, origens e escalões de emprego

Aplicativo	Sistemas de origem	Escalão
<i>Alpha</i>	SC2Cmb e Pacificador	Exército de Campanha até o Nível OM (Organização Militar)
<i>Bravo</i>	GCB	PCT de todos os escalões e missões motorizadas
<i>Charlie</i>	Pacificador Móvel	Subunidades, Pelotões, seções e militares isolados em missões específicas

(PPCOT), realizado pelos Estados-Maiores (da FTC até o nível Unidade). Representa a convergência das funcionalidades providas pelos sistemas *Pacificador* e *C² em Combate*, e deverá ser disponibilizado tanto para elementos desdobrados quanto para elementos aquartelados.

- **Bravo** – focado no combate continuado, tem a finalidade de apoiar elementos embarcados em viaturas operacionais — Subunidades e suas frações, além de Posto de Comando Tático (PCT) de Unidades. Representa uma evolução do sistema *Gerenciador do Campo de Batalha (GCB)*.
- **Charlie** – De forma semelhante ao Bravo, possui foco na construção da consciência situacional e na sincronização das ações. Destina-se a apoiar os comandantes de Subunidades e frações, quando desembarcados. Pode ser caracterizado como uma evolução da versão móvel do sistema *Pacificador*.

A Tabela 8 indica a origem de cada um dos aplicativos que compõem a FAC2FTer, bem como os escalões nos quais são empregados.

2.1.3 Sistemas de comunicações em Proveito das Operações militares

Um Sistema de Comunicações é uma malha de dispositivos desdobrada em uma zona de ação para atender aos elementos de um escalão. Tal estrutura possibilita o fluxo de dados, voz e imagens por uma rede de centros nodais interconectados por diversos meios de comunicação. Considerando o rádio como meio de comunicação, diferentes formas de enlace podem ser empregadas, como enlaces por satélite, micro-ondas em visada direta ou tropodifusão, utilizando diferentes formas de onda.

As condições e circunstâncias do ambiente das operações militares interferem na escolha dos meios de comunicações e nas suas formas de operação e emprego. Em outras palavras, as comunicações poderão ocorrer, dentre outras formas, por meio do aproveitamento de faixas do espectro eletromagnético, que podem viabilizar comunicações radiofônicas empregando até satélites; pelo uso de redes cabeadas com fios metálicos ou fibras ópticas, considerando, em ambos os casos, questões de segurança dos ambientes de guerra eletrônica e cibernético.

Segundo a estruturação proposta por Salles [43] para descrever o sistema de comunicações do Exército Brasileiro, um exército é composto por divisões, formadas por brigadas, que por sua vez são formadas por batalhões e suas companhias, que possuem pelotões e seus grupos de combate. Durante as operações, tal exército pode ser fracionado em suas unidades e subunidades proporcionando mobilidade e agilidade.

Desta forma, observando a descrição da estrutura de comunicações de uma Divisão de exército, apresentada por Camilo, Moura e Salles[36], o Sistema de Comunicações do Exército é composto pelo Sistema Estratégico de Comunicações (SEC) e pelo Sistema Tático de Comunicações (SISTAC).

O SEC estabelece as ligações de longa distância no território nacional, atendendo necessidades estratégicas do Exército, podendo, de forma eventual, apoiar em comunicações a qualquer escalão do EB no exterior. O presente sistema é composto pela EBNet (Rede Corporativa Privativa do Exército), pelas RRSEC (Redes Rádio do Sistema Estratégico de Comunicações) e pela RITEEx (Rede Integrada de Telecomunicações do Exército).

A EBNet é uma rede de dados que interliga todas as OM (Organização Militar) do EB (Exército Brasileiro) e tem por finalidade o tráfego de dados dos sistemas administrativos. Já a RRSEC é um conjunto de rádios fixos cuja finalidade é transmissão de dados em caso de indisponibilidade da EBNet. Por fim, a RITEEx é uma rede que possibilita a comunicação telefônica entre as OMs do EB.

O SISTAC é o conjunto de meios de comunicações e informática, destinado ao preparo e emprego de tropas. É empregado em missões de adestramento ou em operações reais, possuindo enlaces com menor capacidade e maior mobilidade [43]. Esse Sistema é subdividido em Sistema de Comunicações de Área (SCA) e Sistema de Comunicações de Comando (SCC).

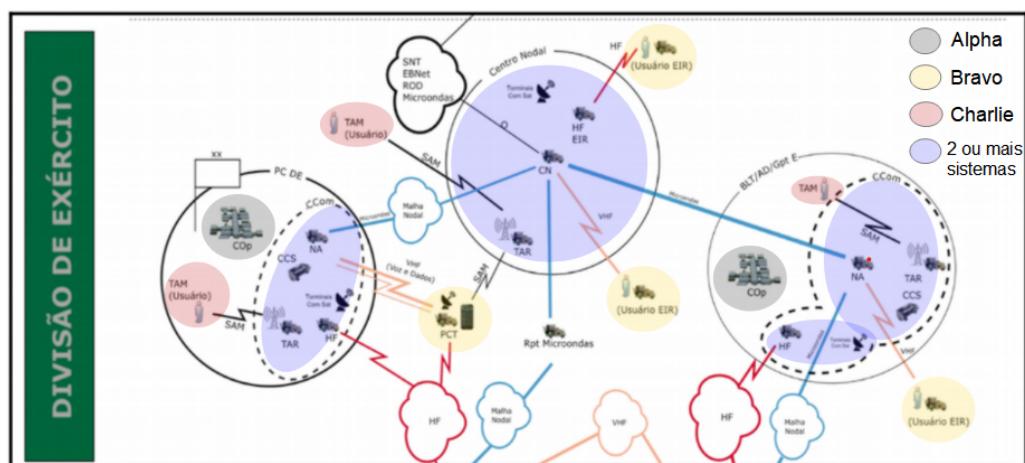


Figura 1 – Representação de Sistema de Comunicações e C² Divisão do Exército [44].

O SCA está concebido para atender desde o escalão Corpo de Exército até o

PC(Posto de Comando) da Unidade/SU independente, e tem como finalidade prover ligações automatizadas de grande capacidade e resiliência. O sistema tem concepção nodal e deve abranger toda a zona de ação (Z Aç).

A Figura 1, apresenta um recorte de um sistema de comunicações entre o escalão Divisão de Exercito e alguns elementos subordinados, por meio de canais de comunicações, apoiados por um Centro Nodal de comunicações [44]. Com base nas características e aplicações de cada sistema de C² da Força Terrestre, foi destacado na Figura 1 a participação de cada aplicativo de C² (Alpha, Bravo ou Charlie) neste cenário. Participam desse sistema de comunicações os seguintes recursos de comunicação:

- **Centros Nodais (CN)** – são centros de comunicações empregados nos SCA, cuja principal função é operarem como nós troncais. São dispostos ao longo da área de operações para permitir a ligação entre os nós de acesso que apoiam os diversos Postos de Comando (PC) e propiciar, ainda, o acesso à malha nodal para elementos isolados em toda a zona de ação apoiada. São compostos por equipamentos que permitem o estabelecimento de enlaces micro-ondas e multibanda, bem como equipamentos de VHF, HF, satelitais e Estação Rádio Base (ERB) do SAM, além de outros;
- **Nós de Acesso (NA)** – também empregados nos SCA, são centros de comunicações que proveem a interface dos PC dos diversos escalões táticos com a malha nodal. Os NA, assim como os CN, são compostos por equipamentos que permitem o estabelecimento de enlaces micro-ondas e multibanda, bem como equipamentos de VHF, HF, satelitais e ERB do SAM, além de outros;
- **Sistema do Assinante Móvel (SAM)** – é um sistema de concepção celular empregado para transmissão de voz e/ou dados. Pode oferecer, ainda, os serviços de geolocalização, VoIP, navegação web, serviço de mensagens curtas (*short message service*) (SMS), serviço de mensagem multimídia (*multimedia message service*) (MMS) e *streaming* de áudio e de vídeo. O SAM é composto por ERB e as estações de usuários, chamadas de terminais de assinantes móveis (TAM). Pode integrar um SCA ou ser usado isoladamente;
- **Equipamentos de Interface de Rede (EIR)** – são equipamentos de rádio que funcionam como ponto de integração ao SCA para usuários que estejam operando rádios típicos do SCC, ampliando a área de cobertura dos CN e NA;

O Posto de Comando da Divisão de Exército (PC DE) é composto pelo seu Centro de Operações (COp) e um Centro de Comunicações (CCom). O COp elabora o planejamento e a coordenação das operações em que a Divisão está envolvida, fazendo uso do aplicativo *Alpha*. O CCom da DE é responsável pela coordenação e gerenciamento do uso dos meios de comunicações disponíveis para a divisão. Neste caso, o CCom conta

com um Centro de Controle de Sistemas (CCS), que controla os sistemas de comunicações, um Nô de Acesso e dispositivos que possibilitam a conexão via satélite, VHF, HF e por meio do SAM. Uma vez que o CCom é um ponto de conexão entre sistemas *Alpha*, *Bravo* e *Charlie*, todos esses sistemas devem estar presentes no mesmo.

Nesse cenário, os militares isolados que estão se comunicando por meio de Terminais de Assinantes Móveis (TAM) fazem uso do aplicativo *Charlie*. Por outro lado, os elementos embarcados em viaturas como o Posto de Comando Tático (PCT), ou usuários que necessitem utilizar os Equipamentos de Interface de Rede (EIR) para se integrarem ao SCA, usam o aplicativo *Bravo*.

O Sistema de Comunicações de Comando (SCC) é formado por um conjunto de meios de comunicações destinados a atender às necessidades específicas das Unidades/SU independentes e inferiores em operações, ligando, basicamente, o comando a seus subordinados sem a necessidade de acesso à malha nodal do SCA. Caso isso seja necessário podem ser empregados os equipamentos de EIR. Essa estrutura integra os centros de comunicações dos centros de C², que apoiam postos de comando ou centros de coordenação de operações de diversos escalões [5].

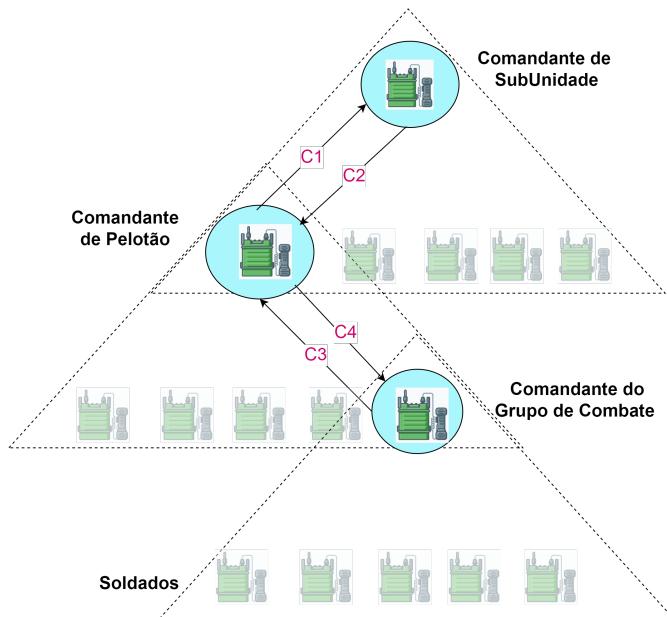


Figura 2 – Recorte de representação de um sistema SCC. [44].

A Figura 2 mostra uma recorte de um SCC, cobrindo os escalões de nível SubUnidade (*SubUnit*), Pelotão (*Platoon*) e Grupo de Combate (*Combat Group*). Nesse tipo de estrutura, as comunicações ocorrem entre os comandantes de cada escalão com seu elemento subordinado e com seu superior direto. Desse modo, por exemplo, o comandante de Pelotão (*Platoon Commander*) se comunica com seu superior, o Comandante de SubUnidade (*SubUnit Commander*), por meio dos canais de comunicação *C1* e *C2*, e se comunica com seu subordinado, o Comandante do Grupo de Combate (*Combat Group Commander*), por meio dos canais de comunicação *C3* e *C4*.

Commander), por meio dos canais *C3* e *C4*.

Em meio à diversidade de tipos de operações militares, a doutrina militar [39] impõe variações nas ações e procedimentos que afetam os comportamentos dos sistemas de comunicações e consequentemente dos sistemas de C^2 . Em outras palavras, de acordo com o tipo de operação, características da forma de onda, tais como a estratégia de modulação, as faixas de frequência, o nível de potência de sinal podem ser alteradas, para adequar os equipamentos às necessidades operacionais que a operação militar requer. Além disso, tais mudanças também provocam mudanças nos sistemas C^2 , uma vez que cada tipo de forma de onda possui características distintas que podem limitar funcionalidades dos sistemas C^2 , tais como a transmissão de *streaming* de vídeo e imagens.

Nesse caso, podemos observar o sistema de comunicações como um sistema que pode e deve operar de forma colaborativa com os sistemas de C^2 , recebendo informações do contexto operacional, como a localização de amigos, inimigos e operações em andamento, bem como informando aos sistemas de C^2 as condições atuais para transmissão de dados, como banda, vazão de dados, qualidade do serviço *QoS*, dentre outras informações.

A Tabela 9 apresenta requisitos operacionais inerentes às redes de comunicações militares da F Ter. A maior parte desses princípios foram considerados por [36], exceto os princípios de interoperabilidade e simplicidade, que são incluídos no manual de campanha das comunicações na F Ter [5] e também são apresentados nesta seção.

Com base nos princípios apresentados, é possível perceber que um único meio de comunicação ou uma única tecnologia não será capaz de atender, simultaneamente, a todos estes princípios, dado que cada meio de comunicação e cada tecnologia existente possuem características técnicas específicas, que podem atender somente a alguns dos princípios apresentados. Desta maneira, para que todos os requisitos possam ser atendidos de forma satisfatória, as comunicações militares precisam empregar meios e tecnologias de forma combinada ou coordenada.

Conforme apresentado por Ryan e Frater[45], existem três fatores que constituem um forte compromisso no sistema de comunicações militares: o alcance, a capacidade e a mobilidade. Estes fatores compõem o chamado Triângulo de Compensação, que se constitui em uma forma rápida e simples de avaliação da pertinência de uma determinada tecnologia de comunicação quanto ao emprego em uma operação militar. Tal triângulo permite observar a existência de um forte relacionamento entre os fatores, ou seja, ao variar um dos fatores, os outros dois também variam. Na verdade, ao se maximizar dois fatores o terceiro acaba sendo minimizado.

A Figura 3 demonstra como cada tipo de operação, apresentada na Tabela 10, demanda fatores específicos descritos no triângulo, envolvendo tecnologias diferentes. Desta maneira, em cada um dos subsistemas de rádio, a tecnologia a ser empregada varia em

Tabela 9 – Princípios das Comunicações na F Ter

Princípio	Descrição
Tempo Integral	Operam 24(vinte e quatro) horas por dia e 7(sete) dias por semana
Rapidez	Estabelecem as ligações em tempo útil para surtir os efeitos desejados.
Amplitude de desdobramento	A estrutura integrada estende-se por todo espaço de batalha em largura e em profundidade.
Integração	Assegura que a informação possa fluir entre todos os envolvidos.
Interoperabilidade	Formam estruturas integradas entre todos os níveis de escalão.
Flexibilidade	Possibilita uma rápida adequação às mudanças das operações militares.
Apoio em Profundidade	O escalão superior apoia os escalões subordinados com os meios (pessoal e material) que se fizerem necessários
Continuidade	Operam ininterruptamente, mantendo as ligações do escalão considerado, restabelecendo-as quando interrompidas.
Confiabilidade	Apresenta resiliência e manutenção da eficácia, quando exposto a eventos provenientes do ambiente operacional.
Emprego Centralizado	A concentração dos meios de comunicações, permite um melhor aproveitamento de suas funcionalidades.
Apoio Cerrado	A concentração dos meios de comunicações, permite um melhor aproveitamento de suas funcionalidades.
Segurança	Negam ou dificultam o acesso não autorizado às informações das forças amigas
Prioridade	As prioridades variam em função do exercício do comando e da conduta das operações.
Simplicidade	Estruturadas da maneira mais simples possível e atendem aos requisitos para os quais foram concebidas

Tabela 10 – Fatores do Triângulo da Compensação aplicados a Subsistemas

SubSistema	Operação	Alcance	Mobilidade	Capacidade	Tecnologia
Rádio 1	Ofensiva	médio	alta	média	VHF
Rádio 2	não guerra	alto	baixa	alta	Rede Troncalizada

Tabela 11 – Operações, Fatores, Princípios e Tecnologias

Operação	Fator	Princípio	Tecnologia
Ofensiva	Alcance	Amplitude de Desdobramento	A
		Apoio Cerrado	
		Emprego Centralizado	
	Mobilidade	Apoio Cerrado	A
		Rapidez	
		Flexibilidade	B
	Capacidade	Simplicidade	
		Tempo Integral	A
		Integração	B
		Interoperabilidade	B
		Continuidade	A
		Confiabilidade	A
		Segurança	A
		Prioridade	B

função dos fatores de alcance, mobilidade e capacidade impostos pelo tipo de operação.

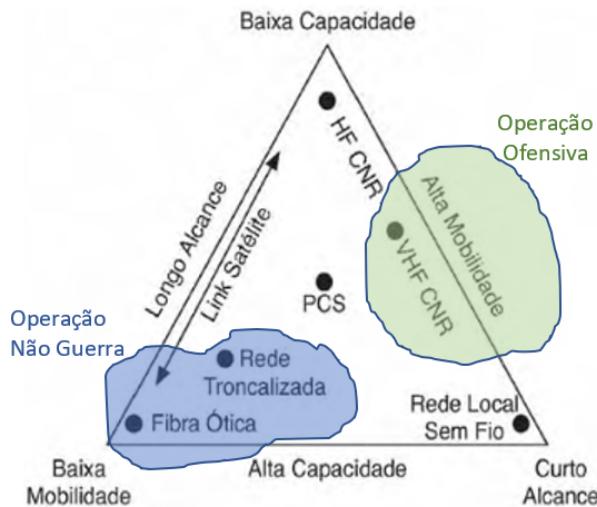


Figura 3 – Triângulo de Compensação, adaptado de [45]

Além de alinhar os princípios das comunicações aos fatores do triangulo de compensação, a Tabela 11 mostra que cada tipo de operação, como exemplo uma operação ofensiva ou mesmo outra qualquer, podem fazer uso de tecnologias variadas para atender suas necessidades de mobilidade, capacidade e alcance, ajustadas a cada princípio das comunicações. Em outras palavras, para cada tipo de operação, os valores associados aos princípios e aos fatores poderão variar, alterando as tecnologias a serem empregadas em função das características e requisitos das operações.

2.1.4 Rádios Definidos por Software

No início da década de 90, a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (DARPA) dos Estados Unidos, inicia o projeto *SPEAKEasy* [46], primeiro programa militar a definir que um rádio possua componentes da camada física implementados em software. A ideia era fornecer rádios flexíveis e prover interoperabilidade com rádios militares de outras agências governamentais, ou seja, equipamentos capazes de se adaptarem a diferentes padrões operacionais. Pesquisas como essa deram origem ao Rádio Definido por Software (RDS).

Um RDS é um tipo de rádio cuja maior parte dos componentes físicos que o compõe são construídos por meio de software [47] [3], podendo usar máquinas virtuais e agentes inteligentes [7]. Ele é considerado uma evolução dos rádios tradicionais, onde funções como modulação, demodulação e filtragens podem ser implementadas por software e não por hardware.

Para facilitar o entendimento acerca da arquitetura de um RDS é preciso entender como um rádio transceptor (rádio que recebe e transmite sinais) tradicional lida com sinais que podem ser de áudio, ou dados (textos, imagens ou vídeos) provenientes de sistemas. Os rádios tradicionais têm utilizado esquemas heteródinos há quase um século, a Figura 4 mostra um diagrama em blocos de um transceptor super-heteródino básico nas operações de recepção e transmissão.

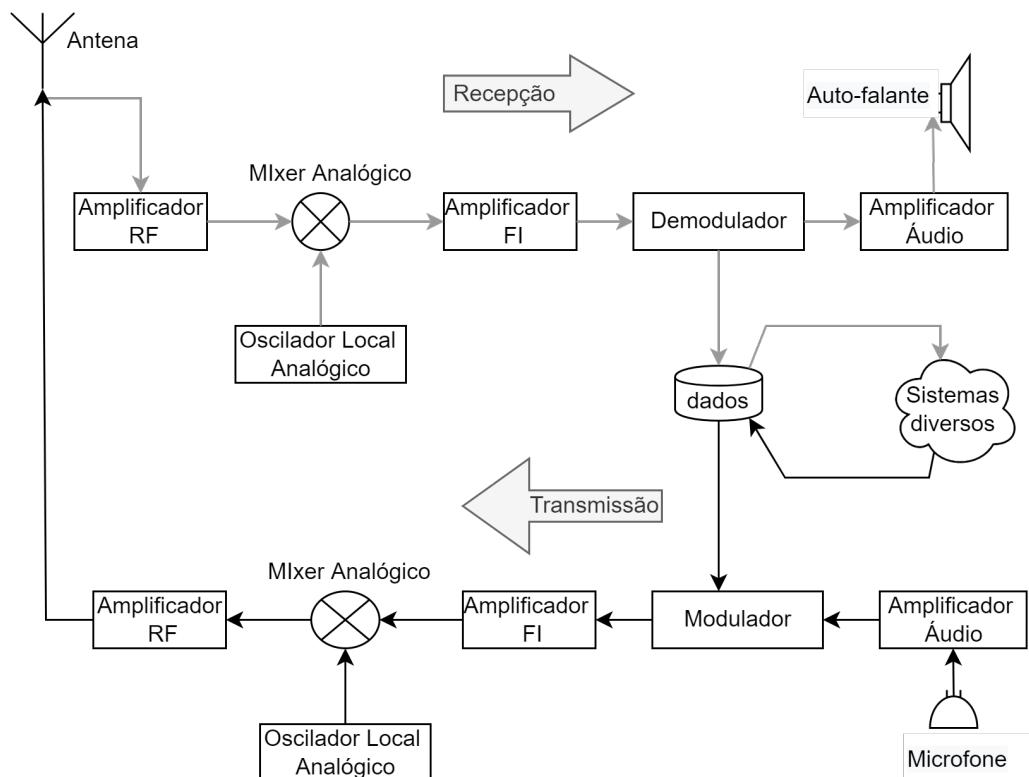


Figura 4 – Transceptor super-heteródino básico [48].

Conforme Gibson[48], durante o processo de transmissão os sinais a serem transmitidos sofrem um tratamento específico para adquirir as propriedades adequadas de frequência, forma de onda e intensidade que viabilizem a propagação no espectro eletromagnético. De acordo com o diagrama de exemplo da Figura 4, os sinais de origem podem ser sinais de áudio captados por um microfone e em seguida amplificados, ou podem ser dados oriundos de sistemas. Ambos os tipos de informação são submetidos a um processo de modulação, onde um sinal base tem suas características alteradas (amplitude, frequência, fase, etc.) em função dos dados que serão transmitidos. Isso produz um sinal resultante modulado. Este sinal possui uma frequência de valor intermediário, que varia de acordo com o tipo de modulação. Em seguida, este sinal é amplificado e passa por um misturador que realiza uma combinação com o sinal produzido por um oscilador local, produzindo um sinal na frequência em que se deseja transmitir. Após passar por mais uma etapa de amplificação, o sinal é transmitido pela antena.

Por outro lado, na atividade de recepção, o sinal de radiofrequência (RF) sintonizado pelo rádio é detectado pela antena. Em seguida, é amplificado e passa por um *mixer* ou misturador analógico, onde por meio de uma combinação entre sinais, o sinal resultante atinge a frequência intermediária. Na próxima etapa, ocorre o processo de demodulação, no qual o sinal que havia sido modulado na transmissão é recuperado. Caso o sinal recuperado seja um sinal de áudio ele é amplificado e reproduzido por um alto-falante, caso seja um dado ele será armazenado em algum tipo de memória e atenderá a algum sistema específico.

Cabe destacar que todos os módulos descritos são implementados por meio de hardware, e qualquer mudança de característica que tenha que ser implementada, como por exemplo uma mudança no tipo de modulação, implica obrigatoriamente em uma alteração física no hardware do equipamento, ou seja, um novo projeto de hardware e a inserção de novos circuitos.

A Figura 5 descreve um diagrama em blocos de um RDS básico, compatível com um transceptor super-heteródino básico. Dois conjuntos de processamentos são apresentados, o analógico e o digital. O processamento analógico envolve as funcionalidades que processam os sinais analógicos recebidos e transmitidos pelo rádio. O processamento digital se refere aos sinais digitais que representam funções essenciais no funcionamento equipamento, como modulação, demodulação, etc.

Na parte analógica, a função da antena é receber ou transmitir a informação em forma de sinais de RF, em seguida na recepção, um sintonizador seleciona a frequência desejada e o sinal coletado é amplificado.

O conversor Analógico digital (AD) converte o sinal analógico recebido em sinal digital. Na Próxima etapa (*processamento digital*), o módulo Digital Down Converter (DDC) faz a re-amostragem do sinal digital de frequência intermediária para um sinal

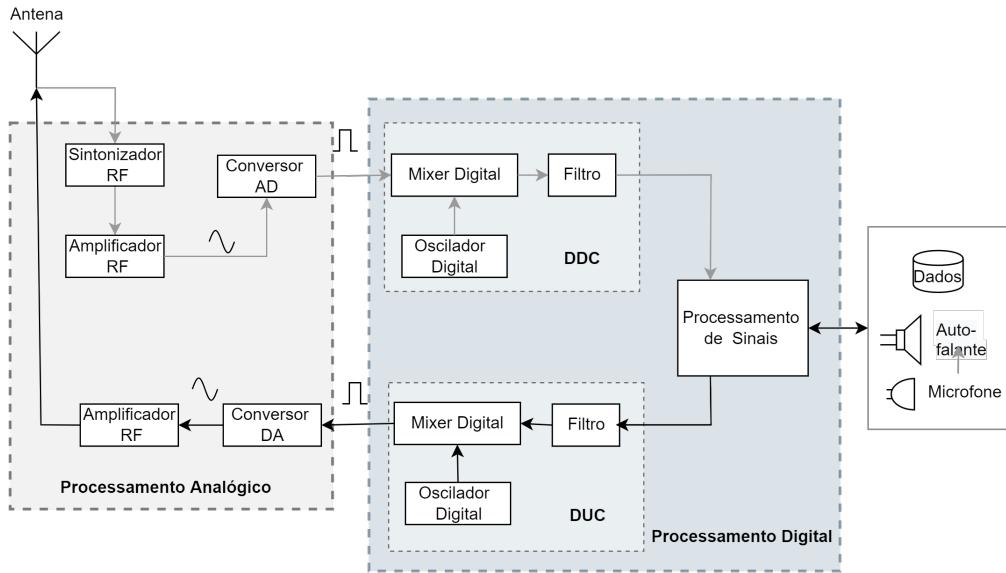


Figura 5 – RDS básico, adaptado de [47] [49] e [50].

digital de banda base e o entrega para a etapa de processamento de sinais. Na transmissão, o módulo Digital Up Converter (DUC) tem função inversa ao DDC entregando um sinal Digital ao Conversor Digital Analógico (DA), que faz a operação inversa ao conversor AD entregando um sinal analógico de RF para ser amplificado e transmitido pela antena. A atividade de processamento de sinais interage com os meios de entrada e saída de dados (repositório de dados, microfones e auto-falantes), processando os dados a serem transmitidos ou recebidos.

A secção de processamento de sinais executa, dentre outras atividades, operações como modulação, demodulação, equalização, salto de frequência, codificação/descodificação, e correlação, podendo ainda implementar protocolos de comunicação. O DDC/DUC e as operações de processamento de sinais exigem computação de grande dimensão e, num rádio digital convencional, são implementadas em hardware dedicado [50].

De acordo com Wyglinski, Nekovee e Hou[50] e Mitola[47], em um RDS as operações de processamento de sinais são implementadas em software. Além disso, as funcionalidades de DDC/DUC podem ser executadas utilizando hardwares como os circuitos integrados específicos de aplicação (ASICs) e arquiteturas de hardware como as FPGAs (matrizes de portas programáveis de campo), processadores de sinais digitais (DSP), processadores de uso geral (GPP), ou uma combinação deles. Isso permite a programabilidade tanto do DDC/DUC como do processamento de sinais por meio de softwares. Assim, características de funcionamento do rádio, tais como codificação, tipo de modulação e banda de frequência, podem ser alterados à vontade, simplesmente por carregar um novo software. Desta forma, ao invés de precisar utilizar vários dispositivos de rádio para empregar modulações diferentes, um único equipamento de rádio poderá realizar a mesma tarefa, bastando apenas uma reprogramação, sem alterações no hardware.

Essas possibilidades tornam os sistemas de comunicação capazes de operar em mais de um modo, com diferentes formas de onda, com o mesmo hardware [51]. Uma forma de onda carrega desde informações que descrevem mecanismos de segurança na transmissão de dados, codificação de fonte (voz, imagem e compressão de vídeo), até mecanismos de retransmissão e técnicas de modulação e demodulação, dentre outras funcionalidades. [52].

Reconfigurabilidade, flexibilidade e modularidade são características marcantes do RDS [53]. A capacidade de se reconfigurar permite que o RDS altere seu funcionamento de acordo com a necessidade sem ações físicas no hardware. A flexibilidade está associada a facilidade de aplicar essas alterações no rádio. Já a modularidade indica que as funcionalidades do sistema estão agrupadas e são executadas em módulos distintos, contribuindo com a flexibilidade.

2.1.5 Radio Cognitivo

Um Rádio Cognitivo (RC) é um RDS capaz de sensorear o ambiente, mudar suas características e funcionamento, podendo adaptar sua operação para atingir objetivos como melhoria de desempenho, economia de energia e adequação às condições operacionais do ambiente no qual está inserido [3], [51].

A base para o entendimento do processo de tomada de decisão de um RC é o *Ciclo Cognitivo*. A Figura 6 ilustra este ciclo, proposto por Mitola[12], considerado a base cognitiva de um RC. Durante este processo, estímulos são captados pelo rádio cognitivo e entregues ao ciclo cognitivo, onde é processado e retorna na forma de uma resposta. Neste ciclo, de maneira sequencial, o RC observa o ambiente (*mundo exterior*), orienta-se, cria planos, decide e, em seguida, age. Além disso, em alguns casos o RC é capaz de aprender com base nas experiências anteriores para decidir em situações novas ou até então, desconhecidas.

Esse ciclo iterativo também é chamado de “momento de vigília”, pois durante essa atividade de raciocínio o rádio permanece vigilante e reativo ao ambiente. Também podem haver momentos de hibernação, para que ocorra um raciocínio mais introspectivo ou um solicitação de ajuda a uma autoridade superior. Durante o momento de vigília, o recebimento de um novo estímulo em qualquer um dos sensores ou a conclusão de um ciclo de cognição anterior inicia um novo ciclo de cognição.

Durante a fase de “*Observar*”, o RC verifica seu ambiente analisando os estímulos recebidos. Nessa fase, o RC associa dados sensoreados como localização, temperatura, sensores de nível de luz e assim por diante para inferir informações de contexto. A capacidade de ligar os estímulos a identificação de padrões (situações e cenas) ao longo do tempo é fundamental nessa etapa. O RC deve persistir em memória todos os padrões de situações cenas de rádio que se pode experimentar.

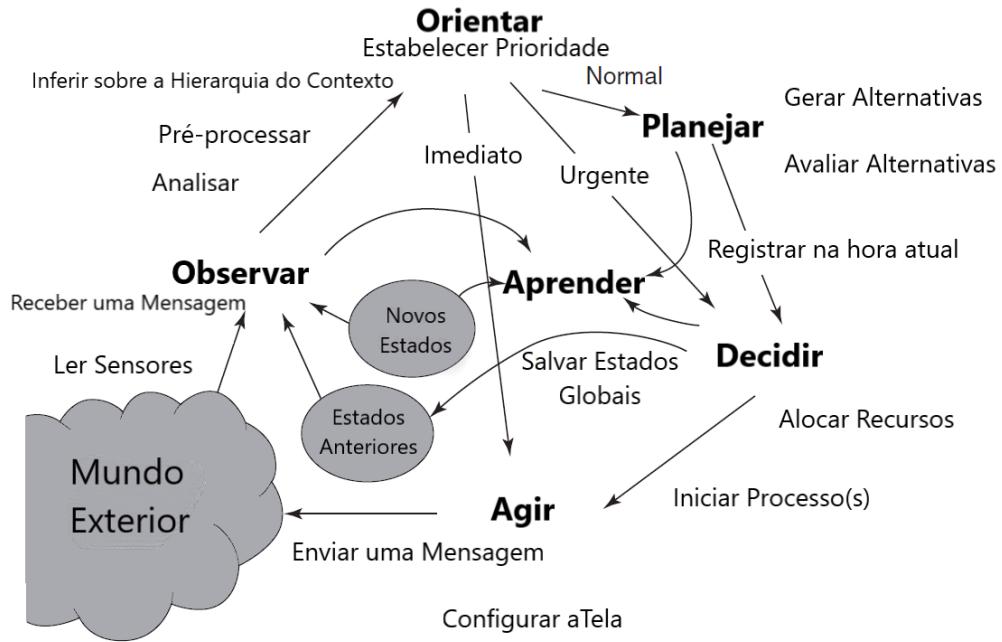


Figura 6 – Ciclo Cognitivo básico apresentado por Mitola[12].

Na fase de “*Orientar*”, identifica-se o significado de uma observação, associando os estímulos a um conjunto de proposições que identificam cada padrão de informação que pode representar uma situação ou cena no contexto do rádio. Essa identificação pode causar ações que podem ser classificadas com tipos distintos de prioridades, i.e.: imediata, urgente ou normal. Uma ação imediata representa um comportamento reativo de estímulo-resposta. Por exemplo, uma falha de energia pode invocar diretamente a ação de salvar o dados. Por outro lado, uma falha como a perda de sinal em uma rede, que demandaria uma realocação de recursos e a busca de canais alternativos de RF, poderia ser classificada como “*urgente*”. A classificação “*normal*” está associada a estímulos que precisam receber um tratamento prévio antes que seja definida uma ação a ser executada.

A fase “*Planejar*” tem relação como situações onde as respostas aos estímulos necessitam de um processamento mais elaborado, como o uso de modelos formais de causalidades, aplicação de regras ou aprendizado baseado em experiências anteriores.

A fase “*Decidir*” representa o momento em que o rádio seleciona dentre as alternativas identificadas como resposta aos estímulos detectados, qual será executada. A execução da ação definida na fase de decisão representa a etapa de “*Agir*”, onde o rádio atua modificando em suas características internas e provocando um mudança de comportamento perceptível ao mundo exterior.

O RC também é capaz de aprender com o comportamento passado, empregando técnicas de aprendizado de máquina, buscando melhorar seu funcionamento ao longo do seu tempo de operação, análogo ao que um humano faria [54].

Segundo Doyle [2], o rádio cognitivo é um dispositivo que percebe entradas ou visões do mundo real, e a partir do entendimento dessas entradas, toma decisões autônomas, podendo autoconfigurar-se para tarefas de comunicações. Este tipo de entendimento é dividido em quatro áreas principais: ambiente; requisitos de comunicações; políticas, regras e doutrinas; e as próprias capacidades do rádio. O entendimento do ambiente se caracteriza pela correta detecção e decodificação dos sinais que são captados pela antena e por conhecer a operação em que se está inserido e o seu papel nela. Os requisitos de comunicações estão ligados a quais capacidades o equipamento deve possuir para atender às demandas dos sistemas de comunicações (qualidade de serviço, nível de ruído tolerado, etc.) Em um ambiente operacional militar, as políticas e regras envolvem tanto normas para a exploração e uso do espectro eletromagnético, como manuais de doutrina militar de comunicações [39] [5]. Conhecer as próprias capacidades significa saber os limites de percepção e de operação do equipamento, tais como potência máxima ou formas de onda sensoreadas ou transmitidas.

Diferentes tipos de métodos cognitivos podem ser aplicados aos rádios cognitivos. Em meio a este rol, alguns baseados em modelos matemáticos ou em algoritmos de aprendizado de máquina apresentados por Xu et al.[11] poderiam ser adequados a definições de comportamentos do rádio ligadas a questões técnicas, como economia de energia, redução de níveis de ruído, dentre outras. Por outro lado, quando a decisão se baseia em regras doutrinárias rígidas, seriam apropriados modelos baseados em regras [11], onde estruturas de conhecimento, tais como tabelas e árvores de decisão são desejáveis.

Corroborando com este entendimento, Mitola[12] aponta que um rádio cognitivo com um alto grau de autonomia, utilizando-se de técnicas como aprendizado de máquina e inteligência artificial, pode involuntariamente se reprogramar e acabar violando restrições de agências regulatórias. No caso das comunicações militares, violar regras doutrinárias pode custar a perda de vidas humanas durante uma operação militar. Neste caso, não é viável que a autonomia do rádio, no contexto militar, ultrapasse as normas regulatórias e preceitos doutrinários, reforçando a importância de um sistema baseado em regras. Neste sentido, no mundo existem várias pesquisas e iniciativas voltadas ao desenvolvimento de soluções que possam evitar ou mitigar esses riscos ao se empregar os rádios cognitivos no meio militar.

2.2 Modelagem Conceitual

2.2.1 Ontologias

De forma incremental, ao longo do tempo pesquisadores como Gruber[55], Borst e Borst[56], Studer, Benjamins e Fensel[57] e Guarino, Oberle e Staab[58] vêm construindo o entendimento de que uma ontologia é uma especificação *formal* e *explícita* de uma

conceitualização compartilhada. A expressão "uma conceitualização", refere-se a um modelo abstrato e visão simplificada de alguns fenômenos no mundo real que se quer representar. Ser "*explicita*" significa que o tipo de conceitos, propriedades, relações, funções, restrições, axiomas utilizados, são explicitamente definidos. Ser "*formal*" refere-se ao fato da ontologia usar uma forma de representação formal que pode ser legível por máquina, o que exclui a linguagem natural. Por sim, dizer que uma ontologia é "*compartilhada*" reflete a noção de que uma ontologia capta conhecimentos consensuais, ou seja, não é privado para um único indivíduo, mas aceitos por um grupo.

A ontologias podem ser classificadas levando-se em conta vários critérios, dentre eles o nível de generalidade. De acordo com este critério [59], as ontologias podem ser classificadas como:

- ontologias de fundamentação (Foundation Ontologies) - consideradas ontologias de alto nível ou de topo, descrevem conceitos muito gerais como espaço, tempo, matéria, objeto, evento, ação, etc., que são independentes de um problema particular ou domínio do conhecimento;
- ontologias de domínio (Domain Ontologies) - descrevem a conceitualização relacionada a um domínio específico. Desta forma os objetos, eventos, ações, dentre outros conceitos irão descrever domínios específicos, tais como o domínios de operações militares, sistemas de comunicações ou, simplesmente, de relações de amizade.
- ontologias de núcleo (Core Ontologies) - são ontologias de nível intermediário, posicionadas entre as ontologias de topo e as ontologias de domínio. Essa ontologia especifica conceitos que cobrem um grande domínio, ou seja, pode apresentar conceitos comuns a mais de uma ontologia de domínio.
- ontologias de referência (Reference Ontologies) - são um tipo especial de modelo conceitual. Essas ontologias são representadas por meio de uma linguagem de modelagem inteligível aos humanos e que serve de base para a construção de ontologias operacionais. Uma mesma ontologia de referência pode ser utilizada para produzir diferentes alternativas de implementações de softwares [60]. Além disso, essas ontologias fazem uma descrição clara e precisa das entidades do domínio e podem melhorar a comunicação, a aprendizagem e a resolução de problemas.
- ontologias Operacionais (Operational Ontologies) - ao contrário das ontologias de referência, as ontologias operacionais utilizam linguagens de modelagem inteligíveis por máquinas. Além disso, são concebidas com o objectivo de garantir propriedades computacionais desejáveis [60].

2.2.1.1 Unifield Foundational Ontology - UFO

As ontologias de fundamentação aplicam teorias formais para representar aspectos da realidade e descrever, com a maior precisão possível, o conhecimento do mundo real, independentemente do domínio, linguagem ou estado de coisas. Além disso, dizem respeito ao desenvolvimento sistemático de teorias axiomáticas que explicam formas, modos e visões de estar em diferentes níveis de abstração e granularidade [61]. O conceito de existência por si só é relevante, uma vez que uma ontologia descreve um aspecto distinto das coisas que existem apenas na medida em que existe [62].

Na modelagem conceitual, a análise ontológica aplica ontologias de fundamentação, que fornecem um conjunto de princípios e categorias básicas [63]. Essas ontologias também trouxeram avanços significativos, fornecendo uma boa base para o desenvolvimento de modelos conceituais e melhorando as representações de artefatos computacionais, especialmente esquemas conceituais [64].

A Ontologia de Fundamentação Unificada (UFO) [65] é uma das ontologias de que tem sido amplamente aplicada para conceber ontologias de domínio e modelos conceituais em inúmeras e diferentes áreas. Ela fornece instrumentos para descrever o mundo real como explicado pela cognição humana. A UFO não lida meramente com a representação de coisas tangíveis, como pedras ou animais, mas também com coisas intangíveis como matrículas, empregos, mandatos presidenciais, sintomas, títulos covalentes, festas de aniversário e jogos de futebol, cores e cargas elétricas, organizações e constituições, sistemas de software e contratos derivados [66]. A UFO é fruto de uma iniciativa de unificar DOLCE [63] e General Formal Ontology (GFO¹) [61], incorporando ideias da metodologia OntoClean [65] para produzir uma ontologia de fundamentação de referência para modelagem conceitual. A UFO tem sido continuamente atualizada e aplicada no desenvolvimento de ontologias de núcleo ou *core* e de domínio em diversas áreas [64], como por exemplo, a modelagem conceitual no domínio Jurídico [67] e a modelagem do processo de tomada de decisão [65]. A UFO também foi utilizada em nossos trabalhos anteriores nas áreas de comunicações críticas [68] e no apoio à tarefa de pré-processamento de conjuntos de dados de treinamento e teste para mineração de dados [69]. A ontologia UFO é uma estrutura descritiva que representa universais (tipos) *Universals*, particulares (*Particulars*), substanciais (*Substantials*), individuais (*Individuals*), endurantes (*Endurants*) e perdurantes (*Perdurants*).

A UFO tem três fragmentos principais: UFO-A (Ontologia de Endurantes), UFO-B (Ontologia de Perdurantes) e UFO-C (Ontologia de Entidades Sociais e Intencionais).

A UFO-A lida com os aspectos estruturais da modelagem conceitual e refere-se aos tipos (*Endurants*) e seus indivíduos (*Individual*) (objetos e entidades do mundo real). Os *Endurants* são indivíduos que existem no tempo com todas as suas partes. Além disso, eles

¹ GFO é uma ontologia de alto fundamentação que vem sendo desenvolvida na Universidade de Leipzig desde 1999.

têm propriedades essenciais e accidentais e podem mudar suas qualidades, porém mantendo sua identidade numérica (ou seja, permanecendo o mesmo indivíduo) [66]. A Figura 7 mostra um fragmento UFO-A com alguns construtos e suas relações.

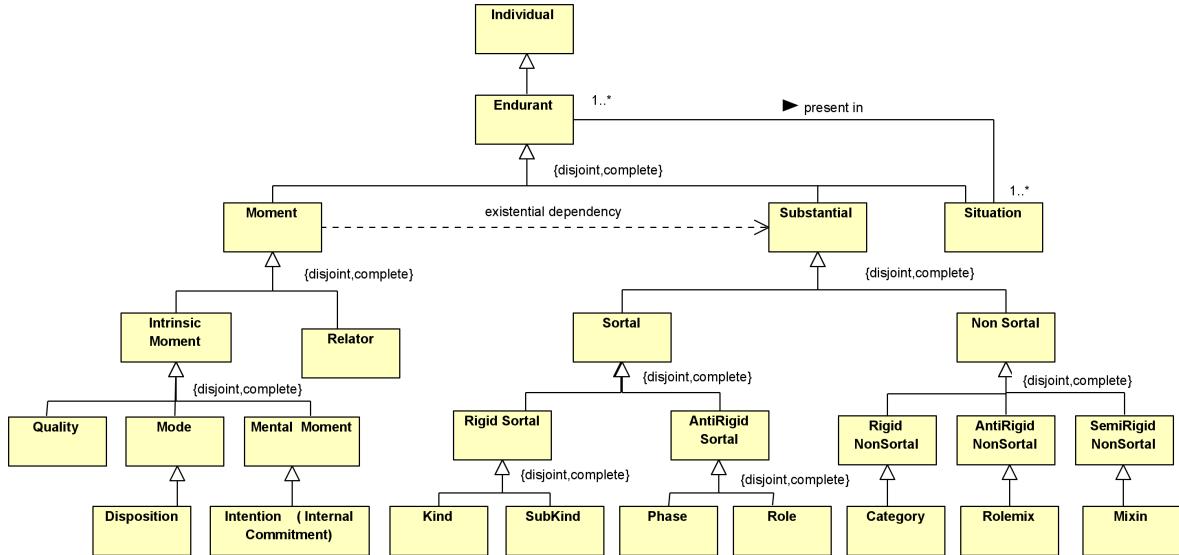


Figura 7 – Fragmento da UFO-A, baseado em [66] [70] [71]

Ao descrever os conceitos apresentados na Figura 7, observa-se que uma situação (*Situation*) é um tipo particular de *Endurant*, e esta entidade é constituída por um ou mais *Endurants* (incluindo outras *Situations*) [71]. Por outro lado, os substanciais (*Substantial*) podem ser dos tipos sortal (*Sortal*) ou não-sortal (*Non-Sortal*).

Os tipos *Sortal* carregam um princípio de identidade próprio que os identificam, já os *Non-Sortal* agregam propriedades de diferentes *Sortals*. Assim, *Sortals* descrevem objetos do mundo real usando conceitos fortes ou rígidos. Um *Rigid Sortal*, como é o caso do tipo (*Kind*) fornece princípios uniformes de identidade e persistência para suas instâncias; i.e., pessoa, cão, carro e computador são *Kinds*. Já os subtipos (*SubKinds*) são uma especialização de um *Kind*, como, por exemplo, um carro do modelo hatch é um *SubKind* de carro, e uma mulher é um *SubKind* de uma pessoa, porém em ambos os casos, os *Subkinds* não perdem o princípio de identidade de seus *Kinds* de origem, ou seja, um carro hatch sempre será um carro e uma mulher sempre será uma pessoa. Contudo, em uma especialização de um *Kind*, todos os *Sortals* que não são *Kind*, e o especializam somente podem estar especializando exatamente um único *Kind*, em outras palavras, como no exemplo anterior, o *SubKind* mulher não poderia estar especializando outro *Kind* além do *Kind* pessoa.

Conceitos anti-rígidos, como papéis (*Roles*), classificam elementos rígidos sob condições transitórias, e sua instanciação ocorre sob condições relacionais [66]. Um "*Aluno*" é um exemplo de *Role* que especializa um *Kind* pessoa, em uma condição transitória

de estar matriculada em alguma instituição de ensino. Já uma fase (*Phase*) classifica os elementos rígidos com base em suas propriedades intrínsecas. Por exemplo, a idade é uma propriedade intrínseca para o *Kind* pessoa, e pode indicar fases, como as da infância e da juventude. Assim, um *Kind* pessoa pode ser especializado em *Phases* criança, adolescente, adulto e idoso.

Por outro lado, os *Non-Sortals*, como o conceito de categoria (*Category*), aplicado a *Rigid Sortals*, de mix ou mistura de papéis (*RoleMixin*), aplicado a *AntiRigid Sortals* e de mistura (*Mixin*), aplicado a uma combinação de *Rigid Sortals* e *AntiRigid Sortals*, generalizam diferentes princípios de identidade com base em características comuns, abstraindo dois ou mais elementos de acordo com suas características. Como exemplo, podemos dizer que a *Category* "veículos com rodas" generaliza os *Kinds* (*Rigid Sortals*) carro e avião.

Os momentos (*Moments*) são entidades existencialmente dependentes, ou seja, só podem existir se outra entidade existir. Em outras palavras, podem ser propriedades intrínsecas de um dada entidade, como é o caso dos *Intrinsic Moments*, que são existencialmente dependentes de um único indivíduo. Como exemplos de *Intrinsic Moment* temos os conceitos de qualidade *Quality*, como cor, altura ou carga elétrica; de modo (*Mode*), que descreve um estado individual, como doente ou fraco, e o de disposição (*Disposition*) é uma especialização de *Mode*, que representa uma capacidade ou habilidade de um determinado indivíduo.

Os momentos mentais (*Mental Moments*) referem-se a elementos com capacidades cognitivas ou afetivas, uma vez que representam estados mentais, como intenções, crenças e desejos. Um relacionador (*Relator*) é um tipo de *Moment* que depende existencialmente de pelo menos duas entidades, ou seja, relaciona ou medeia pelo menos dois indivíduos que compartilham o mesmo fundamento [71]. Considerando a dependência existencial, um *Relator* como um casamento não pode existir sem dois objetos ou Sortais como um homem (*Subkind*) e uma mulher (*Subkind*).

A UFO-B lida com os *Perdurants*, ou seja, entidades que persistem com base em características temporais. *Perdurants* são indivíduos que se desdobram no tempo, acumulando partes temporais. Além disso, os *Perdurants* são sempre dependentes dos substanciais que participam deles. Na UFO-B, os *Perdurants* são entidades que representam o passado e não podem mudar. As mudanças só podem ocorrer em algum *Endurant* que é o foco ou participa de um *Perdurant* [66].

Este segmento da UFO-B representa eventos (*Events*), que são *Perdurants* que agem sobre as *Situations*, transformando, criando ou destruindo suas partes componentes. Como mostrado na Figura 8, uma *Situation* é um *Endurant* obtido em um instante no tempo da realidade do mundo real, provocado ou criado por um *Event* com características mereológicas e classificado como atômica ou complexa. Além disso, UFO-B também

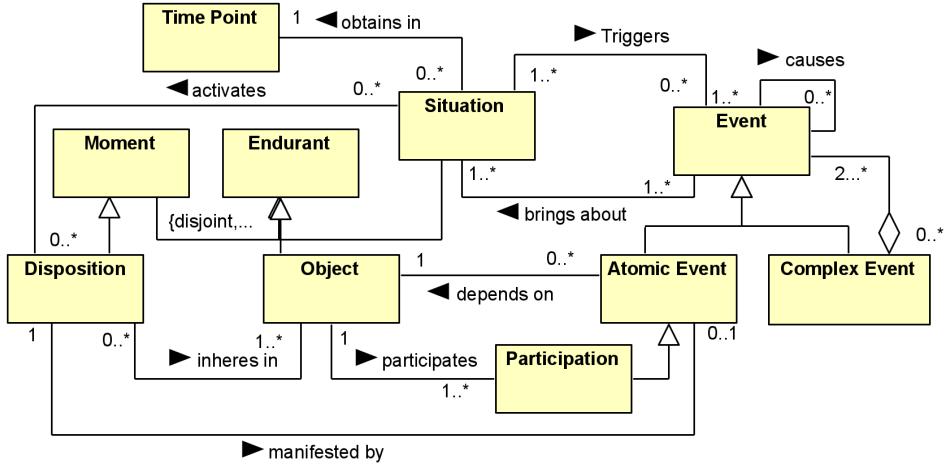


Figura 8 – Fragmento da UFO-B, baseado em [66] [70] [71]

representa *Dispositions*, pontos no tempo (*Time Point*) e as conexões entre *Endurants* e *Perdurants* [72] [73].

Um evento atômico (*Atomic Event*) não possui partes como elementos constituintes, além disso, depende existencialmente de um único de um objeto *Object*. Em outras palavras, para que haja um evento atômico é preciso que exista um objeto participante. Por outro lado, eventos complexos (*Complex Events*) são agregações de pelo menos dois subEventos disjuntos. A participação é um Evento Atômico que materializa a participação de um objeto. Além disso, os eventos podem ser causados por outros Eventos, direta ou indiretamente. Todos esses tipos de eventos são descritos usando axiomas em [72]. Uma *Disposition* é um *Moment* existencialmente dependente de um objeto, representando uma propensão específica, capacidade ou característica de um objeto que pode ou não ser manifestada através de um *Atomic Event*. Por exemplo, o evento de um bombeamento cardíaco é a manifestação da capacidade do coração de bombear (*Disposition*); o evento de um metal ser atraído pelo ímã é a manifestação da *Disposition* do ímã para atrair material metálico [74].

Guizzardi, Guarino e Almeida[74] afirmam que a UFO-C é uma ontologia de entidades sociais construídas sobre UFO-A e UFO-B. A Figura 9 mostra alguns construtos UFO-C combinando conceitos da UFO-A e da UFO-B [75] [73] [66].

Além disso, a UFO-C fornece uma distinção entre o conceito de agente *Agent* e de objeto não-agentes. Um *Agent* é um *Substancial* e pode criar ações (*Actions*), perceber *Events* e atribuir estados mentais ou momentos intencionais (*Intentional Moment*). Os agentes podem ser físicos (*Physical Agent*), i.e, uma pessoa ou sociais (*Social Agent*), i.e, uma organização.

A UFO-C considera um agente humano um *Physical Agent*. Uma ação (*Action*) é um tipo particular de evento (*Event*) que é executado por um agente (*Agent*) que tem a intensão

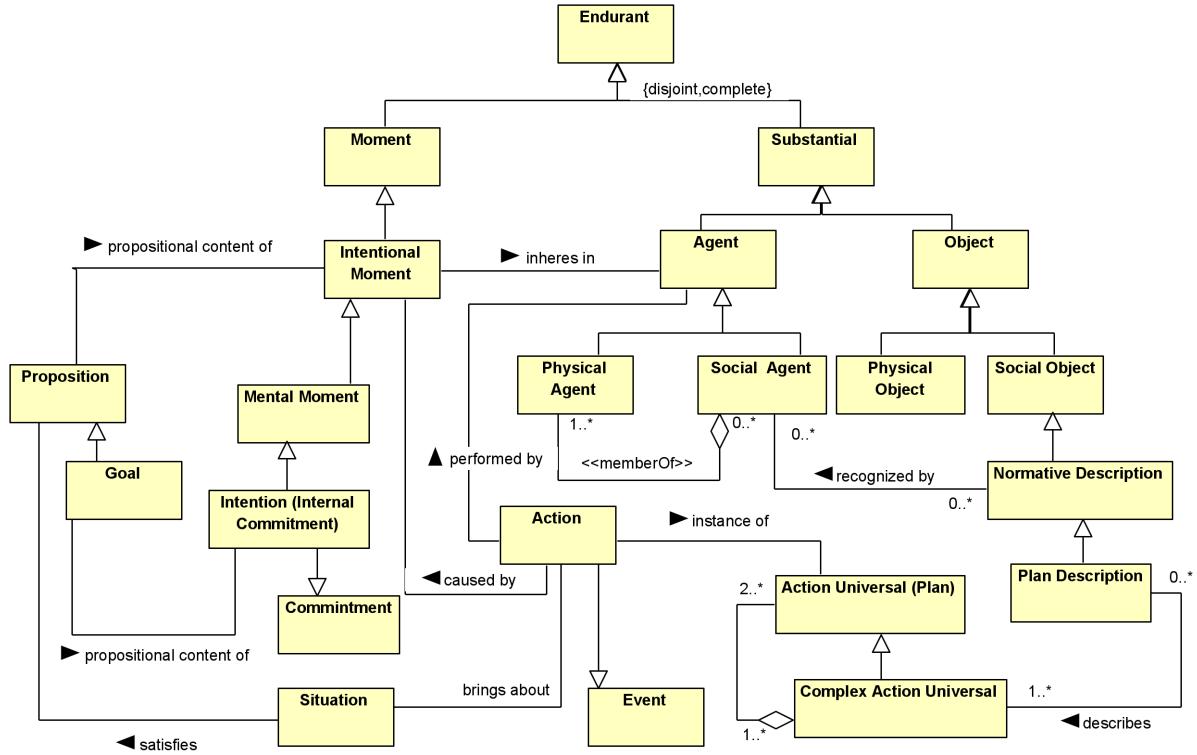


Figura 9 – Fragmento da UFO-C, baseado em [66] [70] [71]

(*Intentional Moment*) de fazê-lo. Um momento mental (*Mental Moment*) representa o estado mental de um determinado Agente e tem o significado de "*pretender algo*", representando a Intenção na UFO-C. As intenções ou compromissos internos (*Internal Commitment*) representam um compromisso intencional interno do agente que causa as ações do mesmo, e pode provocar uma situação (*Situation*) que satisfaça um conteúdo de uma proposição (*Proposition*). Por outro lado, um objeto (*Object*) não pode executar eventos *Events* ou ter intenções (*Intentional Moments*). Os *Objects* também podem ser físicos (*Physical Object*) (i.e., um livro, um carro) ou Objetos Sociais (*Social Object*) (i.e., dinheiro, linguagem). Um grupo de dois ou mais agentes ou um *Social Agent* podem compartilhar ou reconhecer um objeto social (*Social Object*). Uma Descrição Normativa (*Normative Description*) é um objeto social que define uma ou mais regras/normas reconhecidas por pelo menos um agente social (*Social Agent*). Além disso, uma *Descrição Normativa* define um objeto social, Papéis Sociais (*Social Roles*) e descreve planos (*Universal Action(Plan)*). Uma descrição de plano (*Plan Description*) é um tipo particular de uma *Descrição Normativa*, que descreve um uma ação planejada complexa (*Complex Universal Action*). Uma ação planejada (*Universal Action(Plan)*) representa uma parcela da realidade que ainda não aconteceu no momento presente, mas as ações realizadas pelos agentes podem materializar as ações planejadas na *Universal Action(Plan)*. Este trabalho tem como enfoque principal os construtos "Situação (*Situation*)" presente nas UFO-A e B; e o construto "Cena (*Scene*)" apresentado na Ontologia de Cenas e Situações [76], além de suas características mereológicas e relações

com UFO-A, B, C.

2.2.2 A teoria da Encarnação rígida e variável aplicada na Ontologia de Cenas e Situações

Fine[77] apresenta uma forma simplificada de identificar os princípios de identidade de objetos ou conjuntos de objetos como um todo, levando em conta dois conceitos distintos, a encarnação rígida e a encarnação variável. Esses princípios foram aplicados no trabalho de Almeida, Costa e Guizzardi[76], durante a elaboração da Ontologia de Cenas e Situações.

A Encarnação Rígida (do inglês:*Rigid Embodiment*) é uma teoria que tem como objetivo tratar relações parte-todo, em casos em que as partes de um objeto são fixas ou permanecem inalteradas (do inglês *timeless parts*). A teoria introduz um novo tipo de todo chamado de encarnação rígida, que pode ser considerado um tipo de objeto composto ou uma amalgama de objetos componentes. Este todo é representado por um conjunto de objetos a, b, c , etc., e uma *relação R*, que existe entre eles. A encarnação rígida é diferente de uma simples soma mereológica porque a *relação R* preserva seu papel predicativo e serve para modificar ou qualificar os componentes, resultando em um todo cujos componentes estão ligados por essa relação, diferente de um fato ou estado. A relação R é chamada de princípio de encarnação rígida, e a operação pela qual uma encarnação rígida é formada é chamada de operação de encarnação rígida. Existem cinco postulados que definem tipos operação de encarnação rígida, a saber, o postulado de existência, o postulado de localização, o postulado de identidade e os postulados de parte-todo.

- O postulado de existência afirma que uma encarnação rígida existe em um tempo (t) se e somente se R se aplica aos objetos a, b, c, etc em (t);
- o postulado de localização afirma que uma encarnação rígida (e) assume um localização em um ponto (P), em um instante (t), se ao menos uma de suas parte (a, b, c, etc), em sua relação R estiver nesse mesmo ponto (P);
- O postulado de identidade afirma que duas encarnações rígidas são iguais quando todos os objetos a, b, c, etc e as relações R de ambas as encarnações também são iguais.
- Os postulados de parte-todo indicam que uma encarnação rígida $e = a, b, c, etc$ (*partes fixas*) e sua relação R , são parte de uma outra encarnação rígida $e' = a', b', c' /R'$, quando ambas as relações (R e R') são mantidas após a composição.

Como exemplo de encarnação rígida, temos um conjunto de flores (a, b, c) e a *relação R* (de estar agrupadas). Essa combinação representa e identifica um novo objeto, as flores nessa relação se tornam um "buquê de flores" (uma amalgama ou objeto composto).

Em um outro exemplo, temos o conjunto de objetos composto por duas fatias de pão e uma fatia de presunto, neste caso a relação R adota outras características descritivas, como a posição relativa entre os objetos, ou seja, a relação R determina a sequência em que os objetos devem estar ordenados("pão-presunto-pão"), formando o novo objeto "*sanduíche de presunto*". Em ambos os exemplos, a relação R está relacionada com os postulados da existência e da localização.

Uma maneira diferente de identificar o princípio de encarnação rígida são os casos onde o princípio é representado por uma propriedade P ao invés de uma relação poliádica R . O novo objeto rígido é então da forma " a/P " e pode ser lido como " a qua P " ou como " a sob a descrição P ". Por exemplo, um passageiro de uma companhia aérea não pode ser considerado a mesma pessoa que um passageiro qualquer do aeroporto. Se isso acontecesse, ao contar os passageiros que passam por um aeroporto em um determinado fim de semana, poderíamos contar legitimamente a mesma pessoa várias vezes. Isso sugere que devemos considerar um passageiro de companhia aérea como alguém sob a descrição de estar voando em tal companhia e em tal voo. E o mesmo vale para pessoas que possuem predicados associados às funções que ocupam como prefeitos, juízes e outros "personagens" dessa natureza.

Em geral, a teoria da encarnação rígida, diferente da mereologia padrão ou de outras maneiras de formar um todo, propõe uma nova maneira de formar um todo a partir de partes fixas e uma relação, que auxilia no entendimento de como essas partes se relacionam entre si.

A encarnação variável é um conceito filosófico que se refere a uma maneira de formar um todo a partir de partes usando um princípio ou função. Este princípio determina qual quantidade ou qualidade de um objeto constitui o todo em uma determinado intervalo de tempo em que mantém uma relação com esse princípio é a encarnação variável desse princípio.

Por exemplo, a água em um rio pode ser compreendida de duas maneiras: como uma quantidade de água no rio em um determinado momento ou como uma quantidade variável de água que está no rio. No segundo sentido, a água do rio é constituída por uma quantidade de água em um momento e por outra quantidade de água em outro momento. Essa variação de água não é somente a junção das quantidades de água em qualquer um dos momentos, nem o agregado de todas essas quantidades ou a restrição do agregado a limites espaço-temporais naturais. Em vez disso, a variação de água é constituída por um princípio /F/ que determina qual quantidade de água constitui essa variação uma determinada faixa de tempo.

Um outro exemplo é uma detecção de sinal realizada por um dispositivo de comunicação D , em um determinado momento e uma nova detecção em um momento futuro. Isso produz um conjunto de valores de sinal do tipo (V_1, V_2, \dots, V_n), sendo n a

quantidade de momentos de detecção. Esses valores são submetidos ao princípio $/F/$ que representa o princípio da encarnação variável aplicado a esse contexto e pode ser expresso na forma $F(D, <V1, V2>)$. Neste exemplo, o objetivo da função F poderia ser identificar se os valores do sinal estão aumentando ou diminuindo. Assim, se ($V1 < V2$), então o dispositivo D detecta um nível de sinal crescente, que caracteriza a encarnação variável do princípio $/F/$ sobre a detecção do dispositivo. Em geral, qualquer função ou princípio pode ter uma encarnação variável correspondente e os objetos que demonstram esse princípio são as manifestações dessa encarnação.

De forma semelhante à encarnação rígida, os postulados de existência, localização e identidade também são aplicados ao princípio da encarnação variável, da seguinte maneira:

- Segundo o postulado da existência, uma encarnação variável $f = /F/$ existe em um instante (t) se e somente se houver sua manifestação em (t);
- O postulado da localização afirma se uma encarnação variável $f = /F/$ existe em um instante (t), então sua localização é a mesma do local onde ocorre a manifestação dessa encarnação;
- O postulado da identidade afirma que as encarnações variáveis $/F/$ e $/G/$ são iguais se e somente se seus princípios F e G forem iguais.

Também existem postulados voltados a descrever as partes temporárias ou mutáveis que compõem a encarnação variável. O principal deles é o que se segue:

- qualquer manifestação de uma encarnação variável em um momento qualquer (objeto que demonstre o princípio $/F/$) é uma parte temporária dessa encarnação naquele momento.

Além disso, relações de transitividade entre as partes temporárias também são demonstradas por meio de postulados. Por exemplo, se uma parte temporária a é parte de b em um instante (t) e se b é parte fixa (timeless part) de c , então a é parte de c naquele mesmo instante (t).

O princípio da encarnação variável F , designado por $/F/$, se manifesta em objetos variáveis ou com partes variáveis, em um intervalo de tempo. Assim, em contraste com a encarnação rígida, as encarnações variáveis precisam de fatias de realidade que variam para manifestar seu princípio de identidade.

Na ontologia de Cenas e Situações [76] os autores associam o conceito de situação à encarnação rígida, visto que uma situação existe somente em um instante no tempo, fazendo com que os objetos que a compõem não possam variar suas características ou composições, ou seja, são partes fixas da situação (timeless parts). No mesmo trabalho, o conceito de cena

está associado à encarnação variável, uma vez que uma cena é composta por um conjunto de situações que foram capturadas em momentos diferentes e podem apresentar características diferentes (variações). Neste caso as situações são partes temporárias (Temporary parts) da cena.

2.2.3 Engenharia de Ontologias

As ontologias têm sido desenvolvidas por diferentes grupos, sob diferentes abordagens e utilizando diferentes métodos e técnicas [74]. Dessa forma, algumas abordagens metodológicas relevantes em engenharia ontológica, como Methontology [78], Neon [79] e a Abordagem Sistemática para Construção de Ontologias (do inglês: Systematic Approach for Building Ontologies) (SABiO) [80], têm sido propostas como uma prática para construir ontologias de domínio fundamentadas em meta-ontologias ou ontologias de fundamentação. Essas práticas tornam a análise ontológica capaz de explicar conceitos e relações à luz de tais ontologias superiores, o que fornece uma base sólida para uma melhor representação da realidade através da aplicação de modelagem conceitual. Além disso, a análise ontológica suporta a definição rigorosa de modelagem semântica do mundo real, identifica problemas na definição, uso ou interpretação de conceitos e recomenda melhorias na modelagem formal.

Em particular, a metodologia SABiO se concentra no desenvolvimento de ontologias de domínio baseadas em UFO como ontologia superior. Aplicando a metodologia SABiO, podemos desenvolver dois tipos de ontologias de domínio: ontologias de referência e operacionais. Uma ontologia de referência é um tipo particular de modelo conceitual porque faz uma descrição clara e precisa das entidades de domínio e pode melhorar a comunicação, a aprendizagem e a resolução de problemas. Por outro lado, uma ontologia operacional é uma versão de implementação legível por máquina da ontologia de referência. O processo de desenvolvimento do SABiO tem cinco fases principais: (i) identificação do Propósito e elicitação de requisitos; (ii) captação e formalização ontológica; iii) concepção ou design; iv) Implementação; e (v) teste. As fases (i) e (ii) são necessárias para desenvolver uma ontologia de referência e as fases (iii) e (iv) para o desenvolvimento da ontologia operacional. A fase (i) comprehende atividades que identificam a finalidade e os usos pretendidos da ontologia. Com base nisso, a próxima atividade prescreve a definição de requisitos funcionais ou não funcionais, define questões de competência (tópicos possivelmente responsáveis pela ontologia) e modulariza a ontologia. A fase (ii) sugere que os conceitos e relações em um domínio de referência ontologia devem ser analisados à luz de uma ontologia fundamental. As fases (iii) de projeto e (iv) implementação se concentram em uma linguagem ontológica legível por máquina específica (por exemplo, OWL). Entre os motivos que justificam a utilização da Metodologia SABiO neste trabalho estão a reutilização de ontologias e padrões de ontologia, o alinhamento de ontologias e a incorporação de conceitos taxonômicos em

ontologias, todos considerados uma das melhores práticas na construção de ontologias. [79], [80]. Além disso, a metodologia SABiO já foi aplicada com sucesso em nosso trabalho anterior [69].

2.2.4 Engenharia Dirigida a Modelos.

A capacidade cognitiva humana faz uso de modelos mentais compatíveis com o conhecimento individual de cada um. O homem observa porções de realidade do mundo a sua volta e aplica modelos compatíveis a própria capacidade de percepção e compreensão. Neste contexto, modelos são uma forma abstrata capaz de classificar, agrregar ou generalizar objetos do mundo real, dentro de certos limites do entendimento humano.

Modelos podem reduzir o universo de observação, dando foco a um escopo definido e, também podem de mapear e conectar representações abstratas a realidades de individuais do mundo real. Mas para que esse mapeamento seja o mais próximo da realidade os modelos se valem da sua função semântica, que pode ter como instrumento de apoio o uso de ontologias, conforme descreve Brambilla, Cabot e Wimmer[81]

Na área de desenvolvimento de softwares, os modelos facilitam a compreensão dos sistemas, diante da complexidade e da constante evolução, pelo surgimento contínuo de novas necessidades e funcionalidades. Além disso, merece destaque a crescente necessidade de interação com agentes que não são desenvolvedores, mas que assumem papéis na definição de regras que impactam no funcionamento dos sistemas de informação. O Desenvolvimento Dirigido a Modelos, do inglês Model Driven Development (MDD), usa modelos como artefato primário do processo de desenvolvimento. Com base no MDD, o Object Management Group (OMG) criou a Arquitetura Dirigida a Modelos do inglês Model Driven Architecture (MDA), onde linguagens de modelagem e de transformação padronizadas pela OMG são utilizadas no processo de desenvolvimento [81].

A engenharia dirigida a modelos, do inglês Model Driven Engineering (MDE), emprega metodologias que concebem modelos como sendo artefatos elementares no processo de desenvolvimento de software e não apenas como documentação do projeto [82]. Em outras palavras, o modelo é parte constituinte do sistema e, mesmo passando por transformações, estará sempre alinhado com a implementação física dele. Com uma proposta diferente do paradigma proposto por Wirth[83], onde “*Algoritmos + Estruturas de Dados = Programas*”, para a Engenharia Dirigida a Modelos aplicada a engenharia de Software o paradigma passa a ser “*Modelos + Transformações = Softwares*”. No contexto da engenharia de software, um modelo é uma forma de representação gráfica ou textual de um sistema, onde as abstrações e os relacionamentos empregados são descritos por um metamodelo [11]. Modelos são úteis em um projeto de software, por possibilitarem a todos os envolvidos, sejam eles da área técnica ou não, uma visão concreta, clara e comum do sistema a ser projetado [82]. MDE pode ir além das atividades básicas de desenvolvimento de

software, como modelar a evolução de um sistema, mas também pode ser aplicado em tarefas de engenharia reversa em sistemas legados, geração de código, interoperabilidade e manutenção de software [81].

Conforme mostra a Figura 10, a Metodologia de Desenvolvimento de MDE é um conjunto de princípios, técnicas e ferramentas que busca soluções baseadas em dimensões ortogonais, onde nas colunas da figura observa-se a dimensão de conceitualização, já nas linhas está representada a dimensão de implementação.

Sob o viés de implementação, o nível de modelagem é onde os modelos são definidos. A partir desses modelos, no nível de automação as correspondências de modelagem para o nível de realização são colocadas em prática, por meio de transformações que ocorrem de maneira automatizada. Por fim, no nível de realização os modelos submetidos às transformações são implementados em forma de artefatos, ou seja, códigos (no caso de software) compatíveis com plataformas específicas. Sob o ponto de vista da conceitualização, para os níveis de modelagem e transformação existirão, no Meta-nível, meta-linguagens que definirão as regras conceituais das linguagens do domínio de aplicação, sejam elas aplicadas a construção dos modelos (Linguagens de modelagens), sejam elas linguagens aplicadas à descrição de transformações. Assim, os modelos definidos pelas linguagens de modelagens são transformados pelas linguagens de transformação e passarão a ser código que usa uma plataforma, em sua execução. O fluxo principal do MDE é dos modelos de aplicação até a realização em execução, através de subsequentes transformações de modelos. Isso permite a reutilização de modelos e a execução de sistemas em diferentes plataformas. Comparando MDE com abordagens como a programação estruturada (que não usa modelos)

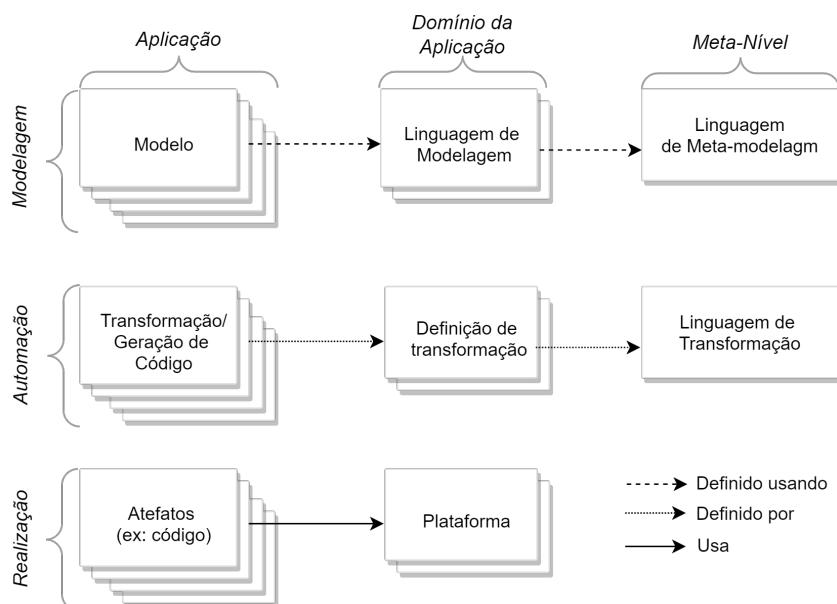


Figura 10 – Visão Geral da Metodologia MDE, adaptado de [81]

e a programação orientada a objetos (POO); a Programação Estruturada somente enfatiza

a divisão do código em blocos bem definidos e sequenciais, a POO enfatiza a criação de classes e objetos que encapsulam dados e comportamentos relacionados, enquanto a MDE, que também é orientado a objetos, enfatiza a criação de modelos que representam as diferentes perspectivas do sistema.

Na Programação Estruturada, o código é organizado em blocos de código bem definidos, como funções e procedimentos, com o objetivo de criar um programa claro e fácil de entender. Na POO, o código é organizado em classes que encapsulam dados e comportamentos relacionados, com o objetivo de criar um programa modular, extensível e reutilizável. Já na MDE, os modelos são criados para representar o sistema em diferentes níveis de abstração, com o objetivo de criar um sistema complexo, adaptável e com maior simplicidade na propagação de mudanças. Essa característica se justifica pela geração automática de código executável a partir dos modelos do sistema, por meio do uso combinado de técnicas de meta-modelagem e transformações entre modelos (M2M) e de modelo para texto (M2T) [82]. As transformações Modelo-para-Modelo permitem a transformação de um modelo em outro, normalmente para um nível de abstração menor do que o original, ou simplesmente para que o novo modelo seja mais conveniente aos envolvidos no projeto. Neste caso, os modelos podem ser diferentes, entretanto modelos mais concretos são para facilitar a implementação. Já as transformações Modelo-para-Texto geram, a partir dos modelos, artefatos de software através de uma técnica chamada de geração de código. A definição de uma linguagem específica de domínio (DSL) possibilita o uso de transformações M2T.

Uma Linguagem Específica de Domínio (DSL) é uma linguagem de programação projetada para atender a um domínio específico de aplicação, que é geralmente mais limitado em escopo e abrangência do que uma linguagem de programação geral. No contexto de MDE, as DSLs são usadas para representar e expressar modelos em diferentes níveis de abstração, permitindo que o desenvolvedor se concentre nos aspectos relevantes do domínio de aplicação, em vez de se preocupar com a complexidade da linguagem de programação subjacente. As DSLs podem ser classificadas em duas categorias principais: a textual e a gráfica. As DSLs textuais são escritas em uma linguagem de programação específica, como uma extensão de uma linguagem de programação existente. As DSLs gráficas, por outro lado, são criadas a partir de elementos gráficos que representam conceitos e relações do domínio de aplicação [81].

Alguns exemplos de DSLs no contexto de MDE incluem:

- BPMN (Business Process Model and Notation), uma DSL gráfica para modelagem de processos de negócios;
- UML (Unified Modeling Language), uma DSL gráfica para modelagem de sistemas orientados a objetos;

- SysML (Systems Modeling Language), uma DSL gráfica para modelagem de sistemas complexos;
- VHDL (VHSIC Hardware Description Language), uma DSL textual para modelagem de circuitos digitais;
- SQL (Structured Query Language), uma DSL textual para manipulação de banco de dados.

A partir de uma DSL textual, que representa um formato específico em um determinado domínio, por meio de uma ferramenta de geração de código, pode-se converter o texto na DSL em um texto em outro formato. Por exemplo, um modelo UML pode ser representado em uma DSL textual específica, como XMI (XML Metadata Interchange), e então uma ferramenta de geração de código pode ser usada para gerar código Java a partir do modelo UML. Isso permite que os desenvolvedores criem e gerenciem diferentes versões do mesmo texto (DSL) em diferentes formatos, de forma automatizada e eficiente.

3 CONCEITOS DE FUNDAMENTAÇÃO PARA MODELAGEM DE CENÁRIOS APLICADOS A RÁDIOS COGNITIVOS

Esta seção tem como objetivo representar, modelar e identificar como os conceitos de *cena* e *situação* podem contribuir para o processo de tomada de decisão em sistemas de rádios cognitivos, atendendo aos seus requisitos funcionais desses sistemas em cenários de comunicações militares. Nessa atividade, foram considerados conceitos e padrões presentes no UFO, nos seus fragmentos A, B e C [66] [73] [72] [75] [84] [85] [86], e conceitos presentes na ontologia de Cenas e Situações [76]. Esses conceitos e padrões já estão descritos e axiomatizados em inúmeras publicações. No entanto, alguns pontos ainda não foram detalhados na literatura, como por exemplo aspectos mereológicos envolvendo cenas e situações.

Mereologia é a disciplina que investiga as características das relações de parte e todo e algumas outras relações conectadas. Além disso, a Mereologia é geralmente aplicada para determinar a existência e a identidade das entidades. No entanto, não é fácil lidar com entidades complexas [87]. Uma das iniciativas para apoiar a solução desse problema foi o padrão de modelagem conhecido como *Composite*, inicialmente proposto por Gamma et al.[88] e que foi aplicado às descrições mereológicas de eventos na UFO-B.

Outro ponto que merece destaque é o fato de que alguns autores utilizam diferentes abordagens para interpretar os conceitos de *cena* e de *situação*, adaptando-as para representar realidades e necessidades específicas. Essas diferentes interpretações tornam necessária a elaboração de definições formais desses conceitos, possibilitando uma compreensão mais precisa de seus significados.

No presente trabalho, foram levadas em conta as definições da UFO, apresentadas nos trabalhos indicados no início deste capítulo, bem como as definições da Ontologia

Tabela 12 – Requisitos funcionais da descrição de cenas e situações

Questões de Competência	
QC	Descrição
C1	Quais são as relações de parte e todo que envolvem o conceito de <i>situação</i> (<i>situation</i>)?
C2	Qual é a relação temporal entre uma <i>situação</i> e as situações que podem ser parte dela?
C3	Quais são as relações de parte e todo que envolvem o conceito de <i>Cena</i> (<i>scene</i>)?
C4	Qual é a relação entre uma cena e o conceito de <i>proposição</i> (<i>proposition</i>)?
C5	Qual é a relação entre uma cena e o conceito de <i>disposição</i> (<i>disposition</i>)?
C6	Qual é a relação entre uma cena e um evento?

Formal Geral (GFO) (do inglês: General Formal Ontology) [89] [61] [90]. Vale destacar que a principal contribuição do nosso formalismo é um modelo estendido para cenas e situações, que apresenta informações precisas e detalhadas sobre estes conceitos, que até então, não haviam sido tratadas em modelos apresentados em trabalhos anteriores.

Para definir esse detalhamento, um conjunto de questões de competência está listado na Tabela 12. Essas questões visam eliciar alguns conceitos e relações relacionadas a *cenas* e *situações* à luz dessas ontologias de fundamentação. No final desta seção, as questões de competência são respondidas de acordo com exemplos de domínio que ilustram o modelo proposto.

3.1 Situação

O primeiro ponto abordado é o conceito de situação. Almeida, Falbo e Guizzardi[73] descrevem uma situação como uma configuração particular de uma parte da realidade entendida como um todo. Essa afirmação confirma a definição de Herre[61], de que uma situação é uma configuração particular entendida como um todo, que satisfaz certas condições de unidade, que são impostas por relações e categorias associadas à situação, ou seja, proposições. Neste contexto, são as proposições que descrevem as relações que são estabelecidas entre os componentes de uma situação. Adicionalmente neste caso, pode-se afirmar que uma proposição descreve as relações *R* ou *P* do *princípio da encarnação rígida* proposto por Fine[77].

Levando em conta que ambas as definições indicam que uma situação é um tipo de configuração, a definição desse conceito se torna essencial. Uma configuração é uma coleção de estruturas materiais, propriedades e relações que constituem um todo [61] . Assim, como mostrado na Figura 11, uma Situação é uma coleção de estruturas materiais (Substanciais) que envolvem os Sortais, que podem ser rígidas (*kind*, *Subkind*) ou anti-rígidas (*Role* , *Phase*). Além disso, os Não-sortais (*Category*, *Rolemixin*, *Mixin*), outros Substanciais (*Object*, *Coletive*, *Quantity*), com suas propriedades e relações descritas através de aspectos (*Moments*) (*Quality*, *Mode*, *Intention*, *Relator*) [66] [84]. Tudo isso, dá a "situação" (*Situation*) uma diversidade de configurações possíveis em sua composição.

Como a UFO-B descreve, uma Situação é provocada ou criada por um evento e pode desencadear ou disparar um outro evento. Cada mudança em seus elementos constituintes (*Substantial*) é o produto de ações de um Evento (*Event*), que são manifestações de Disposições (*Dispositions*) desses *Substantials*, sobre os quais eles agem [73] [72] [84]. Além disso, eventos (*Events*) também podem causar outros eventos.

O segundo aspecto do conceito de *situação* a ser abordado, é a temporalidade de sua existência. Existem diferentes entendimentos sobre essa questão. Alguns trabalhos consideram uma *situação* um estado de coisas ou objetos [20], [21], onde esse estado

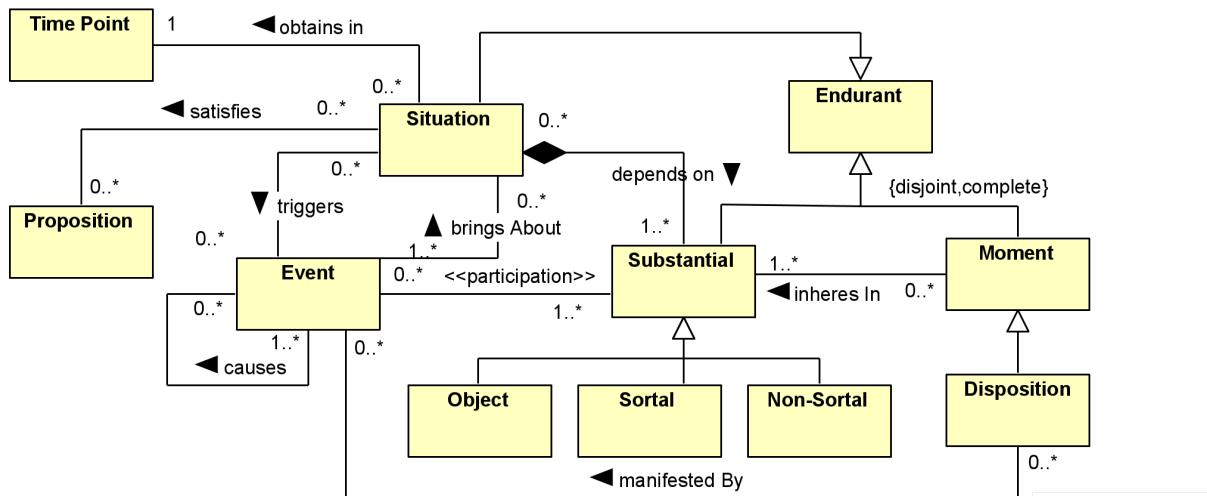


Figura 11 – Componentes da Situação e sua conexão com o UFO A, B e C.

pode persistir ao longo do tempo, atribuindo um ponto inicial e um ponto final. Essa interpretação dá ao conceito de *Situação* uma conotação compatível com o conceito de perdurante (*Perdurant*).

Por outro lado, as situações existem em um ponto específico como uma fatia da realidade obtida a partir de um instante no tempo [72]. Assim, duas situações idênticas que ocorrem em diferentes pontos no tempo são consideradas distintas (por exemplo, o *Situação* de "João tem febre de 38° C agora" e "João esteve com febre de 38° C em algum momento no passado" são diferentes). Na mesma linha, Herre[61] sustenta que uma situação não pode ter extensões temporais, ela só pode ter extensões estruturais. Em outras palavras, as situações podem estender sua composição adicionando novas qualidades, relações e objetos materiais, mas não podem se estender ao longo do tempo. Esta tese, adota o conceito defendido por Guizzardi et al.[72] e Herre[61], definindo as situações como uma porção da realidade em um instante único no tempo. Essa característica indica que uma situação é composta por partes fixas (*timeless parts*), conforme prevê o princípio da encarnação rígida [77].

Até onde foi possível investigar, o presente trabalho é o primeiro a levar em consideração o aspecto da mereologia para modelar os conceitos de *Situações* e *Cenas*, enriquecendo e evoluindo suas definições anteriores. A Figura 12 retrata, de forma destacada, um fragmento de modelo que apresenta as diferentes relações em torno do construto *situação* (*Situation*). Envolve aspectos temporais e relações mereológicas descrevendo os elementos que compõem uma *situação* e suas relações parte-todo. Além disso, apresentamos as propriedades de irreflexibilidade, transitividade e assimetria aplicadas à Situação, as relações envolvendo proposições e dependências existenciais entre *situação* e *Substantials*.

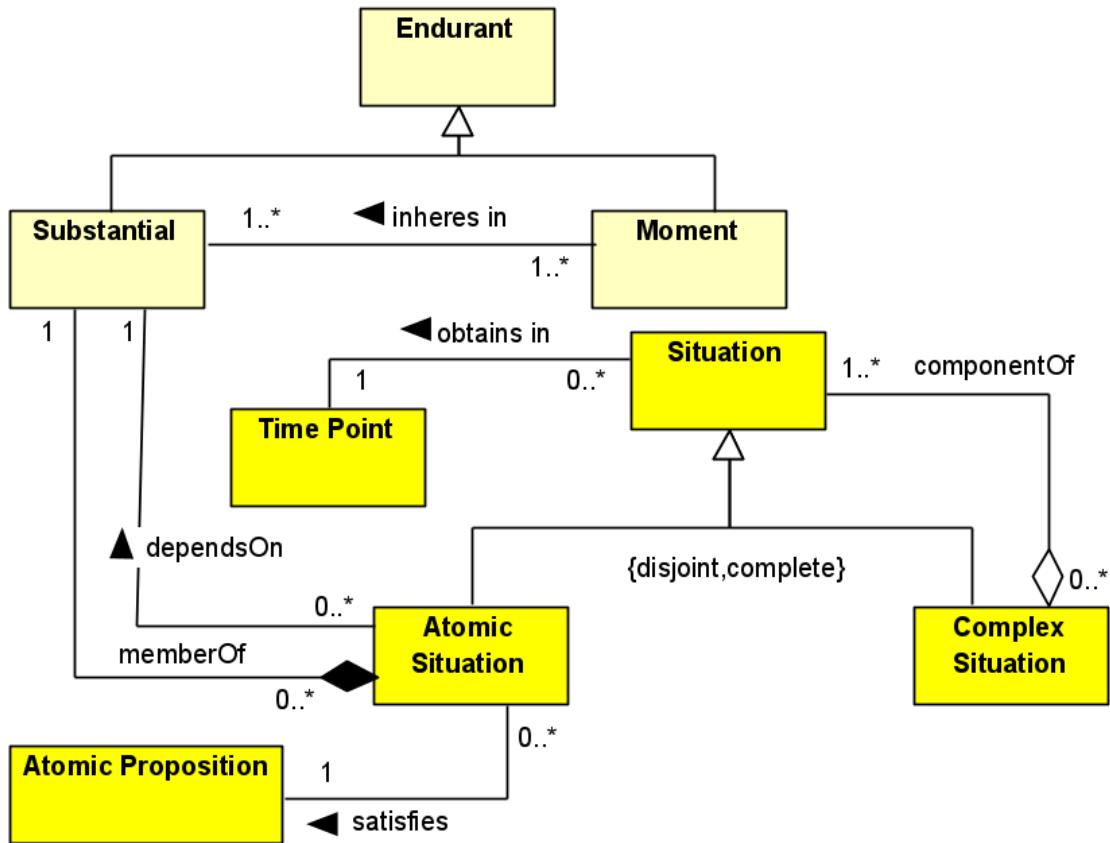


Figura 12 – Situação baseada no padrão Composite

A seguir, semelhante à descrição de eventos e suas relações, como foi feito por Guizzardi et al.[72] para descrever eventos e suas relações, elaboramos uma axiomatização usando lógica de primeira ordem para fornecer maior precisão semântica às definições do modelo de situações em evolução.

Uma *situação* pode ser atômica ou complexa. Este tipo de especialização é disjunta e completa, o que significa que não há a possibilidade de uma *situação atômica* ser uma *situação complexa* ou vice-versa, conforme é apresentado no modelo, por meio do padrão *composite*, em sua notação (*disjoint,complete*), na Figura 12 e do axioma 3.1. Todas as *situações* devem ter sido obtidas em um único "*ponto no tempo*" (*TimePoint*) (axioma 3.2). Uma situação complexa é um tipo de *situação* composta de situações atômicas (duas ou mais) ou complexas (ao menos uma), se e somente se essas situações tiverem sido obtidas no mesmo instante no tempo (*TimePoint*) (3.3), (3.4) e (3.5).

$$\forall x(Situation(x) \rightarrow (ComplexSituation(x) \leftrightarrow \neg AtomicSituation(x))) \quad (3.1)$$

$$\forall x \exists! y(ObtainsIn(x, y) \rightarrow (Situation(x) \wedge TimePoint(y))) \quad (3.2)$$

$$\forall x(Situation(x) \rightarrow (ComplexSituation(x) \leftrightarrow \exists y(Situation(y) \wedge componentOf(y, x)))) \quad (3.3)$$

$$\forall x \forall y(componentOf(x, y) \rightarrow (Situation(x) \wedge ComplexSituation(y))) \quad (3.4)$$

$$\forall x \forall y(componentOf(x, y) \rightarrow \exists! z(TimePoint(z) \wedge ObtainsIn(x, z) \wedge ObtainsIn(y, z))) \quad (3.5)$$

Uma *situação atômica* não tem uma situação como parte, o que significa que não há uma situação como componente de uma *situação atômica* (3.6). Além disso, como Herre[61] define, "as configurações contêm pelo menos um objeto material [...], e uma configuração simples é composta de exatamente um único objeto material e tem apenas propriedades inerentes a esse objeto material". Assim, uma Situação Atômica deve ser composta de exatamente um objeto material, ou seja, um *substantial* e seu *Moment* associado. Esta obrigatoriedade na composição indica uma dependência existencial entre uma situação atômica e um substancial, ou seja, para que haja uma situação atômica é preciso que exista um substancial que seja parte dela. Isso é o que representa a relação *dependsON* descrita no modelo da Figura 12 e no axioma (3.8).

Assim, uma *situação atômica* existe se e somente se tiver um único *substantial* como seu membro (3.7) e (3.8). Isso indica que uma *situação atômica* é existencialmente dependente de um *Substantial*. Portanto, um *Situação Complexa* também dependente de um ou mais *Substantials*, se e somente se houver *Situations* que são seus componentes e dependam do mesmo *Substantial*. Da mesma forma, um *Substantial* será um membro de uma *Complex Situation*, se e somente se este mesmo *Substantial* for membro de qualquer *Situation* que seja componente daquela *Complex Situation*.

$$\forall x(Situation(x) \rightarrow (AtomicSituation(x) \leftrightarrow \neg \exists y(Situation(y) \wedge componentOf(y, x)))) \quad (3.6)$$

$$\forall y \exists! x((memberOf(x, y) \rightarrow (Substantial(x) \wedge AtomicSituation(y)))) \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \forall y(Situation(y) \rightarrow (AtomicSituation(y) \leftrightarrow \exists! x(Substantial(x) \wedge \\ (memberOf(x, y)))))) \rightarrow \forall y \exists! x(dependsOn(y, x) \rightarrow \\ (AtomicSituation(y) \wedge Substantial(x))) \end{aligned} \quad (3.8)$$

De acordo com Benevides et al.[84],

"Uma Situação (Situation) é uma forma de provar que uma proposição sincrônica é verdadeira. Por exemplo, a proposição "João está acordado agora" é tornada verdadeira por uma situação (Situation) como "JohnAcordadoAgora". [...] Na opinião do autor, a realidade no tempo (t) é particionada em situações atômicas (Atomic Situations) e, a partir delas, pode-se descrever a realidade em tempo (t) por meio de proposições sincrônicas atômicas."

A partir dessa afirmação, o axioma (3.9) mostra que toda *situação atômica* satisfaz a uma única *proposição Atômica* (*Atomic Proposition*). No entanto, uma situação complexa (*Complex Situation*) pode satisfazer a uma ou mais proposições atômicas (*Atomic Propositions*), se e somente se houver uma ou mais situações (*Situations*) que sejam parte dela, e que satisfaçam essas mesmas proposições atômicas(3.10).

$$\forall x \exists! y ((\text{satisfies}(x, y) \rightarrow (\text{AtomicSituation}(x) \wedge \text{AtomicProposition}(y))) \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \forall x \exists y ((\text{satisfies}(x, y) \rightarrow (\text{ComplexSituation}(x) \wedge \text{AtomicProposition}(y))) \leftrightarrow \\ \exists z (\text{AtomicSituation}(z) \wedge \text{satisfies}(z, y) \wedge \text{componentOf}(z, x))) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Além disso, nenhuma *Situation "x"* pode ser componente de si mesma (propriedade de irreflexibilidade), conforme mostra o axioma (3.11). Se uma *Situação "x"* é componente de uma *situação complexa "y"*, esta mesma *situação complexa "y"* que não pode ser componente daquela *situação "x"*, como mostrado no axioma (3.12) (*propriedade de assimetria*). Mas, se uma situação (*Situation "x"*) é componente de uma situação (*Situation "y"*) e esta situação (*Situation "y"*) é componente de outra situação (*Situation "z"*), isso implica que "*x*" é componente de "*z*", conforme descrito em (3.13), (*propriedade de transitividade*).

Considerando duas *situações complexas* que são compostas pelas mesmas Situações, isso significa que essas situações complexas são iguais (3.14).

$$\forall x (\text{Situation}(x)) \rightarrow \neg \exists x (\text{componentOf}(x, x)) \quad (3.11)$$

$$\forall x \forall y (\text{Situation}(x) \wedge \text{ComplexSituation}(y) \wedge \text{componentOf}(x, y)) \rightarrow \neg (\text{componentOf}(y, x)) \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \forall x \forall y \forall z ((\text{Situation}(x) \wedge (\text{ComplexSituation}(y) \wedge \text{ComplexSituation}(z)) \rightarrow \\ (((\text{componentOf}(x, y) \wedge (\text{componentOf}(y, z)) \rightarrow \text{componentOf}(x, z))) \quad (3.13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \forall x \forall y ((\text{ComplexSituation}(x) \wedge \text{ComplexSituation}(y)) \rightarrow ((x = y) \leftrightarrow \\ \forall z (\text{Situation}(z) \rightarrow (\text{componentOf}(z, x) \leftrightarrow \text{componentOf}(z, y)))) \quad (3.14) \end{aligned}$$

A Figura 13 mostra um exemplo de *situação atômica* utilizando conceitos da UFO. Em um instante no tempo, temos uma *situação atômica* chamada de *bandeira branca White Flag 1*. Essa *Situation* é uma instância da *Situation Flag Color Situation*, que é composta de uma *Flag (Substantial)*, e esta *Flag* tem um atributo cor *Color (Quatily)* inerente a ela, que satisfaz uma *Color Proposition*. A cor de *Flag 1* é *white1*, e faz com que a *Flag1 Situation* satisfaça *satisfy* a proposição proposição a "bandeira é branca" ("The flag is white") tornando-a verdadeira. A presença da *Flag1* nesta *Situation* foi provocada (*brought about*) pelo *Evento Event1*, um evento atômico (*Atomic Event*).

Neste último exemplo, o ponto focal da *situação atômica* era satisfazer uma *Atomic Proposition* descrevendo uma bandeira (*Kind*) e sua propriedade cor (color (*Quality*)) como branca.

Por outro lado, estender o ponto focal, ou cobertura de uma situação (*Situation*), adicionando mais *Substantials* com seus *Moments* na estrutura da *situação* pode representar uma visão de mundo mais ampla. Isso pode melhorar a compreensão contextual evitando possíveis ambiguidades no processo de tomada de decisão. Assim, além da bandeira e sua cor, o modelo da Figura 14 também representa a propriedade que descreve a localização da bandeira (*location description*) (*Quality*). Ele nos permite construir instâncias de situações complexas (*Complex Situations*), que *satisfazem* mais de uma proposição. Neste exemplo, temos as proposições (*Propositions*) "a bandeira é branca", "A bandeira está localizada em um conflito de guerra", e "A bandeira está localizada na corrida da Fórmula Indy". No entanto, cada situação complexa satisfaz a uma combinação dessas proposições, ou seja, "a bandeira é branca E está localizada em um conflito de guerra" e "a bandeira é branca E está localizada em uma corrida de Fórmula Indy". Essa representação amplia o contexto e caracteriza uma *Situação de Rendição (Surrender Situation)*, uma vez que a bandeira localizada em uma guerra indica uma rendição e a *Situação da Última Volta*, onde uma bandeira branca localizada em uma corrida de Fórmula Indy indica a última volta (*Final Race Lap*) daquele tipo de corrida. A interpretação das situações físicas das bandeiras, no escopo do domínio, representam um nível semântico adicional.

A *Figura 15* retrata uma nova situação do tipo bandeira (*Flag Situation*). Neste exemplo, uma outra situação de rendição (*Surrender Situation*) caracterizada pela intância

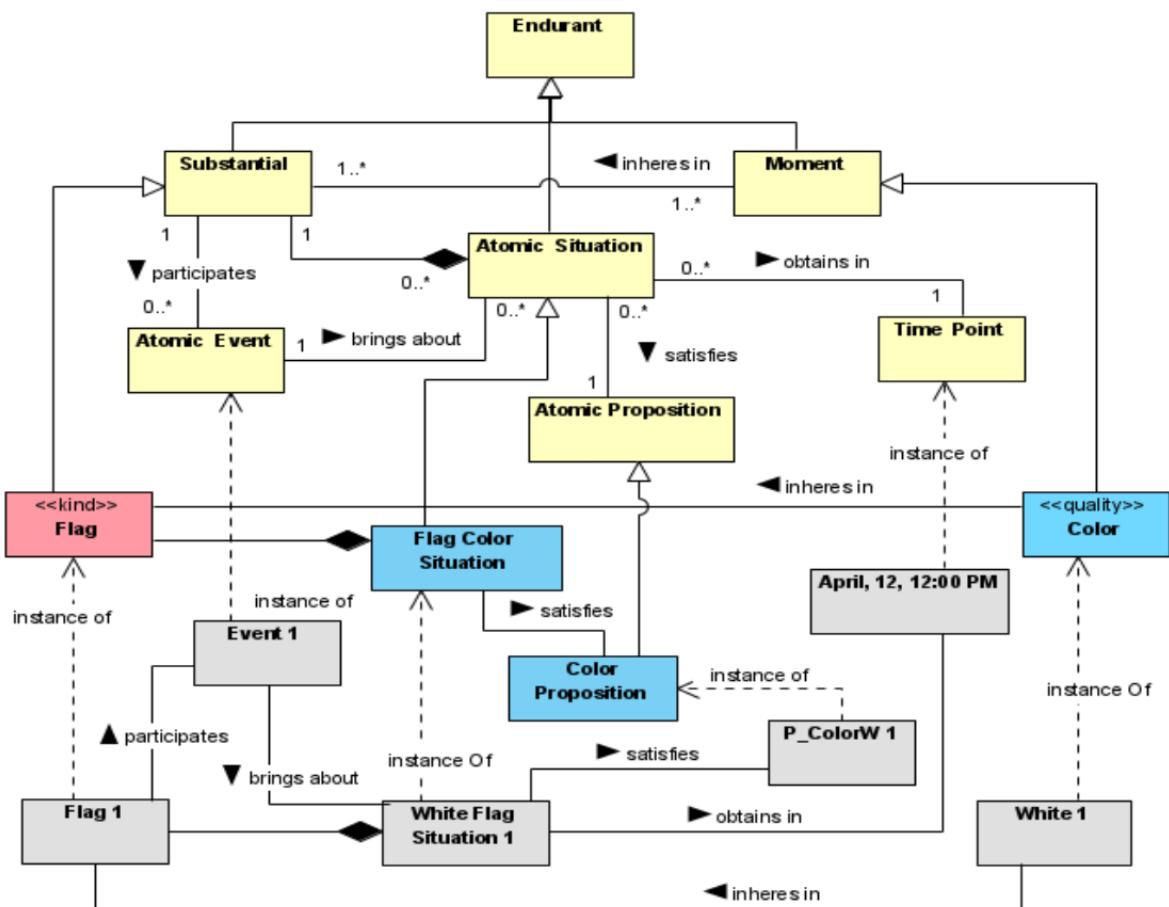


Figura 13 – Exemplo de uma situação atômica (*Atomic Situation*)

de uma bandeira (*flag (Kind)*), *Flag1*,, sua cor (*color(Quality)*), *white1*, e sua participação em uma operação de guerra (*Operation1*) (*War Operation - (Event)*). Nesse caso, temos um tipo proposição diferente, ou seja, a participação em um evento. Nesse contexto, a situação *Surrender Situation* satisfaz as *Propositions* "a bandeira é branca" e "a bandeira participa de *Operation 1*", representadas no modelo pela proposição *P_Surrender Operation* que é uma instância de *P_War_Operation*.

Ainda neste modelo, o evento *Event War Operation* provoca uma situação de bandeira (*Flag Situation*) no momento em que ele satisfizer a proposição *P_War_Operation*.

A Figura 16 retrata um tipo de *situação complexa* envolvendo mais de um *Substantial* e um *Moment*, que os relaciona (*Relator*). Neste exemplo, a situação hipotética é composta por dois papéis (*Roles (Substantials)*), representando um Exército Amigo (*Friend Army*) e um Exército Inimigo (*Foe Army*).

Eles são associados através de um *Acordo de Paz* (*Peace Agreement* (*Relator*)) que representa uma relação material entre os papéis. Esse tipo de relação caracteriza essa Situação Complexa e satisfaz a proposição $P_PeacePro$, que indica que há um *Peace Agreement* entre um *Friend Army* e um *Foe Army* por meio dessa relação.

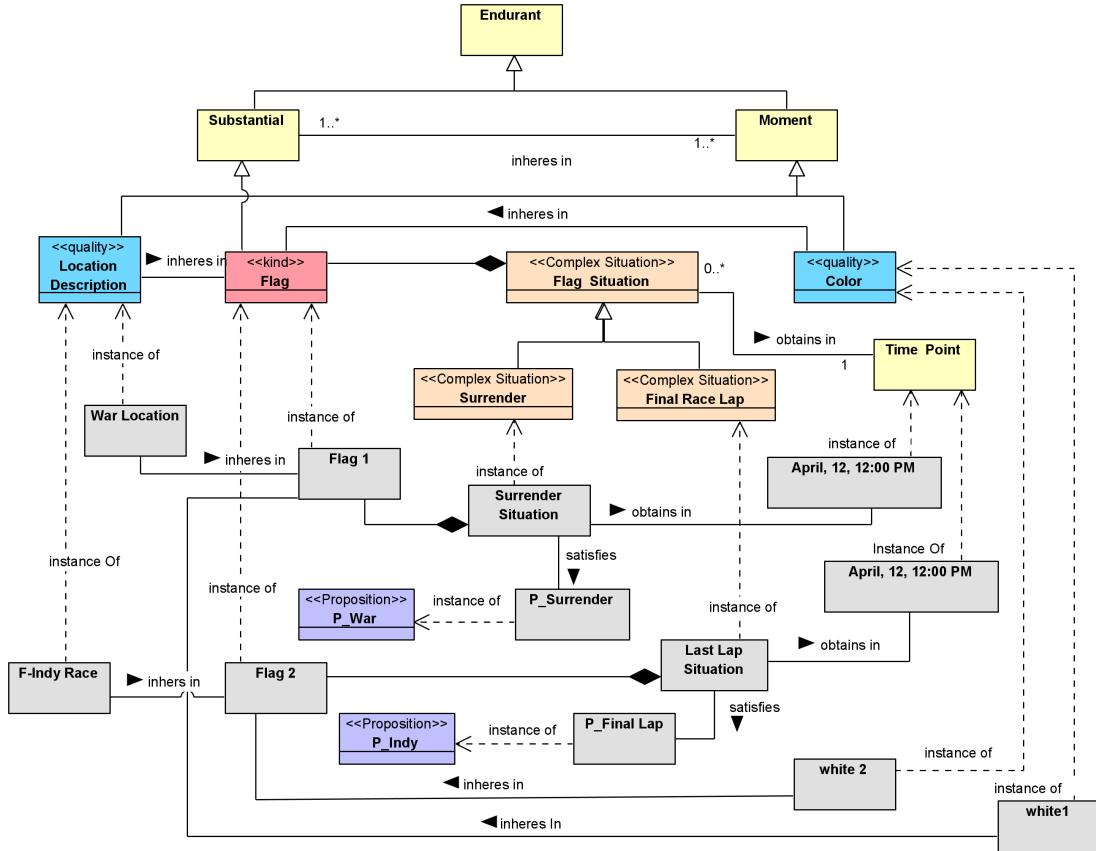


Figura 14 – Exemplo de uma situação complexa *Complex Situations*

Com base em todos esses modelos, descrições, axiomas e exemplos, é possível entender e responder às questões de competência propostas na Tabela 12:

Quais são as relações de parte e todo que envolvem o conceito de situação (situation)? (QC C1)?

Como já foi dito, uma *situação* é uma coleção de estruturas materiais (*Substantials*) que podem ser sortais rígidos (*kind*, *Subkind*), anti-rígidos (*Role*, *Phases*), e não sortais (*Non-sortals*) como os conceitos de *Category*, *Rolemixin* e *Mixin*. Além disso, uma Situação também pode ter como membro outros *Substantials*, como *Object*, *Collective*, e *Quantity*, com suas propriedades e relações representadas por *Moments* (*Quality*, *Mode*, *Intention*, e *Relator*). Os *Moments* apoiam sua caracterização, como observamos nos exemplos das Figuras 6 a 9. Nesses exemplos os *Qualities* e os *Relators* caracterizaram as situações chamadas de *Surrender*, *Last Lap* e *Peace Situations*. Assim, uma Situação tem uma diversidade de configurações possíveis em sua composição.

Uma Situação pode ser *Atômica* (*Atomic Situation*) quando satisfaz a uma única proposição atômica (*Atomic Proposition*) e se torna *Completa* (*Complex Situation*) quando satisfaz mais de uma *Proposição Atômica*, como mostrado nos modelos das Figuras 6

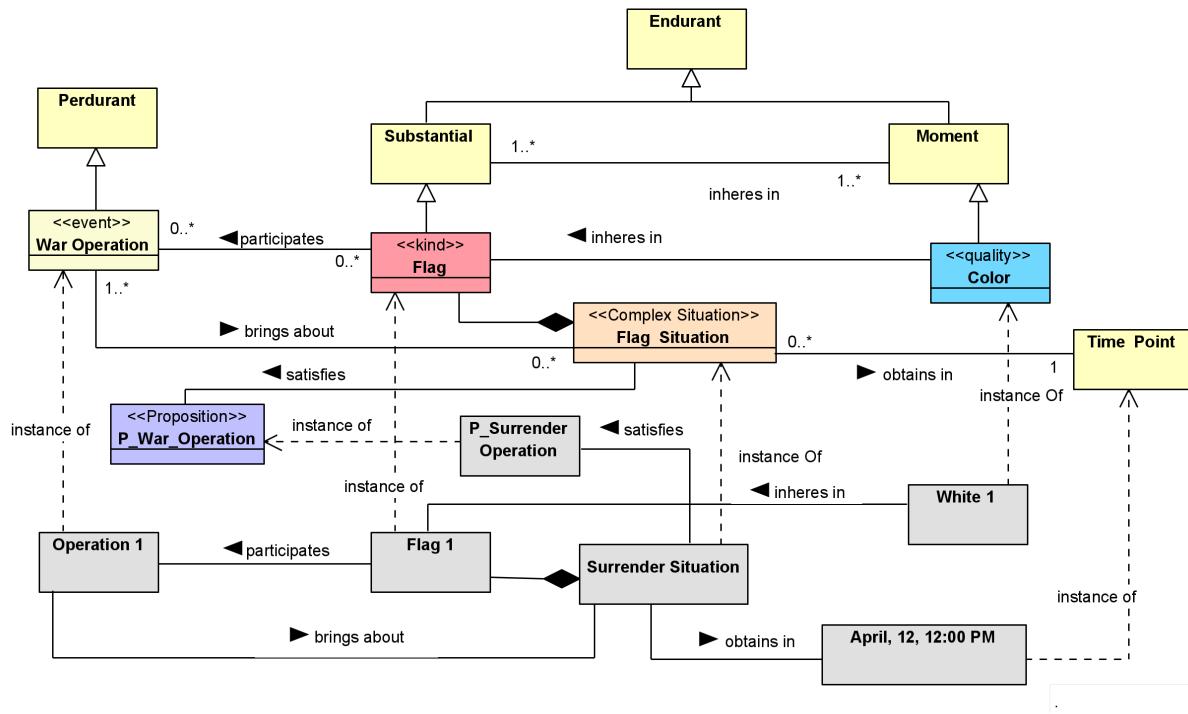


Figura 15 – Exemplo de uma situação complexa caracterizada por participação em evento

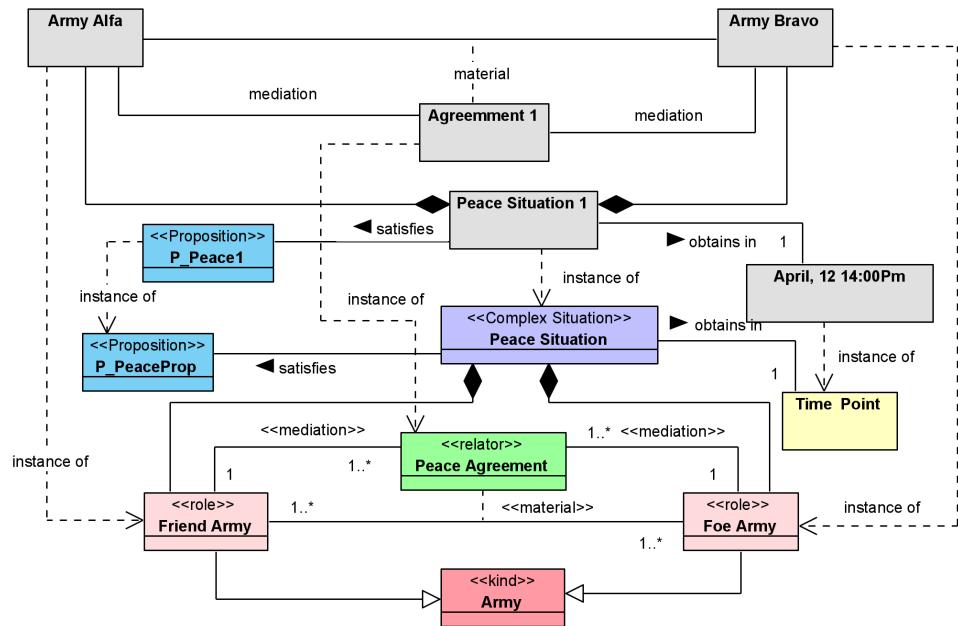


Figura 16 – Exemplo de uma situação complexa caracterizada por relator

a 9, ou quando é composta de um conjunto de Situações. Como descrevemos de forma axiomatizada (3.1 a 3.1 e 3.3), uma Situação Complexa é composta de *Situações*, *Atômicas* ou *Complexas*.

Qual é a relação temporal entre uma situação e as situações que podem ser parte dela? (QC C2)

Em uma Situação Complexa, todas as situações que a compõem devem ter acontecido ou sido obtidas no mesmo instante no tempo (3.2 e 3.4).

3.2 Cena

A importância do conceito de cena no domínio de rádios cognitivos foi ressaltada no trabalho de Haykin[4]. Nesse artigo o autor abordou o problema de gerenciamento dinâmico do espectro com base na análise da cena, conforme mostra o ciclo cognitivo simplificado da Figura 17, o rádio fará uma estimativa do estado do canal e irá executar mudanças no rádio. Nesse ciclo verifica-se também que o universo de discurso, sob o qual o rádio decide, está restrito à análise de uma cena (*Radio Scene*), que é fruto de um conjunto de observações do ambiente eletromagnético sensoreado pelo rádio (*Radio environment*). Diante desse contexto é possível verificar que os rádios cognitivos tomam decisões a partir da análise de cenas e/ou das situações observadas. A abrangência da análise está associada à complexidade de cada tipo de decisão a ser tomada.

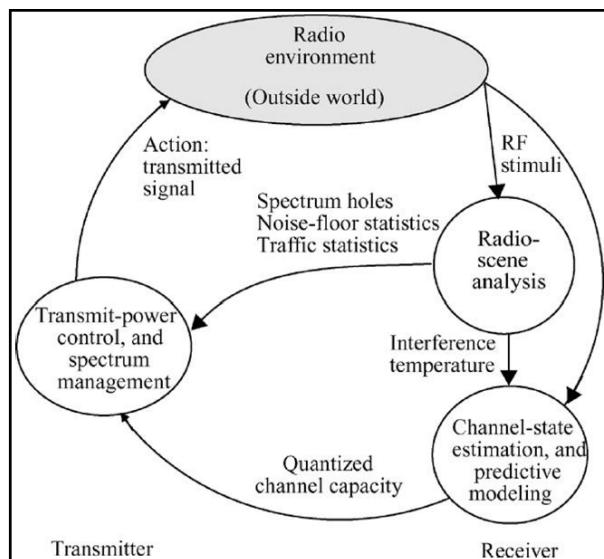


Figura 17 – Ciclo cognitivo simplificado proposto por Haykin[4]

A Figura 18 retrata o conceito de *Cena* (*Scene*), seus aspectos mereológicos, e as conexões evolvendo este conceito e alguns construtos da UFO-B, complementando os conceitos inicialmente propostos por Almeida, Costa e Guizzardi[76]. Além disso, mostra os componentes de uma cena (*Scene*) e suas relações com os *Eventos* (*Events*), que agem sobre seus componentes.

Para descrever uma cena, devemos lembrar os princípios de encarnação variável apresentados por Fine[77], adotados no trabalho de Almeida, Costa e Guizzardi[76], apresentados na Seção 2.2.2. Neste contexto, um conjunto de fotografias (situações) do ambiente constituem um conjunto de partes, com características que podem variar

(*temporary parts*), compõem a cena e sofrem a ação de um princípio /F/ que materializa o princípio da encarnação variável. Como mostrado na Figura 18, uma cena também pode ser atômica (*Atomic Scene*) ou complexa (*Complex Scene*), onde uma cena complexa é composta de cenas, que podem ser atômicas (duas ou mais) ou complexas (ao menos uma), conforme mostra o axioma (3.17), respeitando os aspectos temporais descritos no axioma (3.18).

De maneira similar às definições de uma *situação atômica*, que tem como foco um único *Substantial*, o conceito de cena atômica (*Atomic Scene*) também toma como ponto focal um único *Substantial*. Uma *Atomic Scene* é composta de duas ou mais situações atômicas, considerando variações em sua constituição, partes, relações ou características.

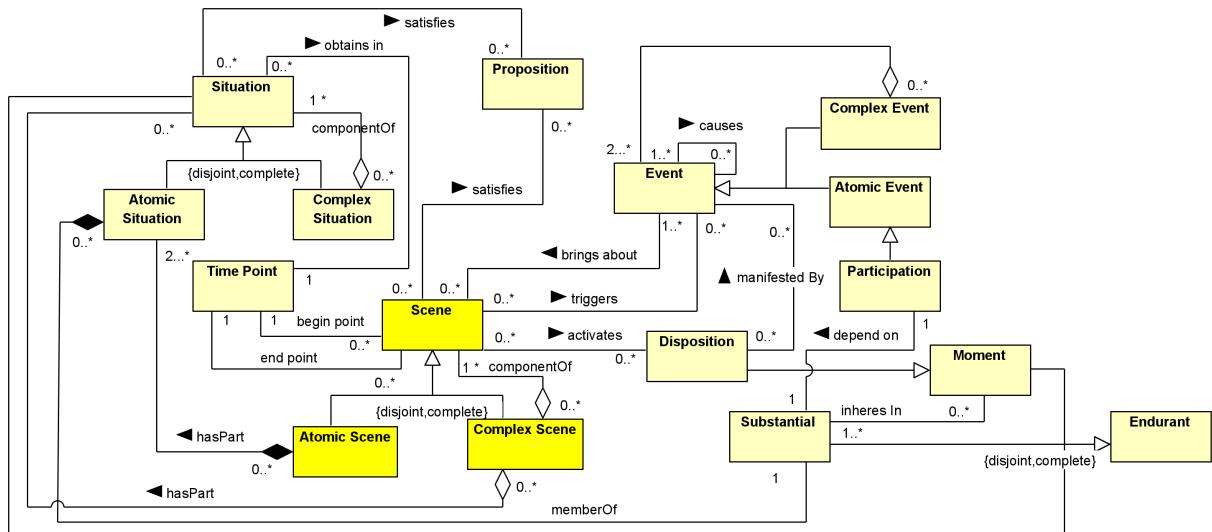


Figura 18 – Estrutura da cena aplicando o padrão composite

Da mesma forma que a abordagem das Situações, elaboramos uma axiomatização utilizando a lógica de primeira ordem para lidar com alguns dos aspectos mereológicos considerados por Guizzardi[91], e proporcionar maior precisão semântica nas definições de modelos em torno das Cenas.

Uma cena pode ser atômica ou complexa. Essa especialização é disjunta e completa, o que significa que não há possibilidade de uma *cena atômica* ser uma *cena complexa* ou vice-versa, conforme é apresentados no modelo, por meio do padrão *composite*, em sua notação (disjoint,complete), na Figura 18 e do axioma 3.15.

$$\forall x(\text{Scene}(x) \rightarrow (\text{ComplexScene}(x) \leftrightarrow \neg \text{AtomicScene}(x))) \quad (3.15)$$

Para qualquer Cena, há um único ponto no tempo *Time Point* que indica seu *ponto inicial* (*Begin Point*) e um único ponto que indica seu *ponto final* (*End Point*), observando que o ponto final deve ser maior que o ponto inicial (3.16). Além disso, cada cena só

pode ser componente de uma cena complexa (*Complex Scene*) (3.18) se e somente se seu ponto de início (*Begin point*) for igual ou maior que o ponto de início (*Begin point*) da cena complexa e se seu ponto de término (*End Point*) for igual ou menor que o ponto de término da cena complexa, conforme descrevem as possíveis relações de Allen[92], descritas no axioma (3.17). Em outras palavras, uma cena que faz parte de uma cena complexa (*Complex Scene*) deve ocorrer dentro do intervalo de tempo em que essa mesma cena complexa ocorre.

$$\forall x \exists! y \exists! z (Scene(x) \rightarrow ((TimePoint(y) \wedge TimePoint(z)) \wedge (beginPoint(y, x) \wedge endPoint(z, x) \wedge (z > y)))) \quad (3.16)$$

$$\forall x \forall y ((componentOf(x, y) \rightarrow (Scene(x) \wedge ComplexScene(y))) \leftrightarrow (Equals(x, y) \vee Contains(x, y) \vee Starts(x, y) \vee Ends(x, y))) \quad (3.17)$$

$$\forall x (Scene(x) \rightarrow (ComplexScene(x) \leftrightarrow \exists y (Scene(y) \wedge componentOf(y, x)))) \quad (3.18)$$

Uma cena atômica (*Atomic Scene*) não pode ter nenhuma cena como componente (3.19), no entanto, uma cena atômica deve ter pelo menos duas situações atômicas como parte (3.20). Além disso, cada Situação componente de uma cena qualquer, deve ter sido obtida em um ponto no tempo *Time Point* igual ou maior que o *Ponto de início* da cena atômica e igual ou menor que o *Ponto de Término* da cena atômica *Atomic Scene* (3.21). O modelo da Figura 18 também demonstra que uma cena complexa pode possuir como parte (*hasPart*) situações que não sejam parte de cenas que as compõem.

$$\forall x (Scene(x) \rightarrow (AtomicScene(x) \leftrightarrow \neg \exists y (Scene(y) \wedge componentOf(y, x)))) \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \forall x \forall y (hasPart(x, y) \rightarrow (AtomicScene(x) \wedge AtomicSituation(y))) \\ \forall x \forall y (hasPart(x, y) \leftrightarrow \forall y (y \in A^n | A^n = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \wedge n \geq 2) \rightarrow (hasPart(x, y))) \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \forall x \forall y ((hasPart(x, y) \rightarrow (Scene(x) \wedge Situation(y))) \leftrightarrow \\ \forall z \forall sx \forall ex (TimePoint(z) \wedge TimePoint(sx) \wedge TimePoint(ex)) \wedge \\ (ObtainsIn(y, z) \wedge beginPoint(sx, x) \wedge endPoint(ex, x) \wedge (sx \leq z \leq ex))) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Uma dada cena "x" não pode ser parte de si mesma (*propriedade de irreflexibilidade*). Além disso, se uma cena complexa *Complex Scene* "y" fizer parte de uma cena

complexa *Complex Scene* "x", essa mesma *Complex Scene* "x" não pode fazer parte daquela *Scene* "y" (3.23) (*propriedade de assimetria*).

Se uma *cena* "x" é *componente* de uma *cena* "y" e "y" é parte de outra *cena* "z", isso implica que "x" é *componente* de "z" (3.24) (*propriedade de transitividade*). Se duas *cenas complexas* (*Complex Scenes*) são compostas pela mesma *cena*, isso significa que essas cenas complexas são iguais (3.25).

$$\forall x(\text{Scene}(x)) \rightarrow \neg \exists x(\text{componentOf}(x, x)) \quad (3.22)$$

$$\forall x \forall y((\text{Scene}(x) \wedge \text{ComplexScene}(y) \wedge \text{componentOf}(x, y)) \rightarrow \neg(\text{componentOf}(y, x))) \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \forall x \forall y \forall z((\text{Scene}(x) \wedge \text{ComplexScene}(y) \wedge \text{ComplexScene}(z)) \rightarrow \\ (\text{componentOf}(x, y) \wedge (\text{componentOf}(y, z) \rightarrow \text{componentOf}(x, z))) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \forall x \forall y((\text{ComplexScene}(x) \wedge \text{ComplexScene}(y)) \rightarrow ((x = y) \leftrightarrow \\ \forall z(\text{Scene}(z) \rightarrow (\text{componentOf}(z, x) \leftrightarrow \text{componentOf}(z, y)))) \end{aligned} \quad (3.25)$$

O modelo da Figura 18 também integra os conceitos de *Cena* e de *Situação* com construtos da UFO-B, considerando suas relações diretas e indiretas. Essas classes e relações materializam a captura e formalização das classes que compõem o núcleo de modelagem da ontologia para cenários que se pretende desenvolver.

De forma parecida com as relações entre os conceitos de situação (*Situation*), evento (*Event*), e outros construtos da UFO-B, apresentados previamente na Figura 8, o conceito de cena também têm relações com estes construtos, como é mostrado na Figura 18. Assim, uma cena pode *satisfazer* uma proposição se existir uma situação (*Situation*) que seja parte daquela cena e satisfaça a dada proposição, ou o princípio de encarnação variável da mesma cena *satisfaca* a uma *proposição* específica (3.26).

Um evento complexo causa transformações em objetos materiais (*Substantials*) que são membros de situações que são partes de uma determinada cena. Nesse caso, ao provocar as situações componentes esse mesmo evento provoca essa cena (3.28).

Com relação às disposições, elas podem ser ativadas por situações que são partes de uma determinada Cena, assim podemos dizer que essa mesma cena também ativa essas disposições (3.27). Consequentemente, eventos poderão manifestá-las. Assim, mesmo indiretamente, uma cenas, além de ativar disposições, pode disparar eventos (3.29).

$$\begin{aligned} \forall x \exists y (((satisfies(x, y) \rightarrow (\text{AtomicScene}(x) \wedge \text{AtomicProposition}(y))) \rightarrow \\ \exists z ((\text{AtomicSituation}(z) \wedge \text{satisfies}(z, y) \wedge \text{hasPart}(x, z)) \vee \\ \exists p (\text{PrincipleOfScene}(p, x) \wedge \text{satisfies}(p, y)))) \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \forall x \exists y (((\text{activates}(x, y) \rightarrow (\text{AtomicScene}(x) \wedge \text{Disposition}(y))) \rightarrow \\ \exists z ((\text{AtomicSituation}(z) \wedge \text{activates}(z, y) \wedge \text{hasPart}(x, z)) \vee \\ \exists p (\text{PrincipleOfScene}(p, x) \wedge \text{activates}(p, y)))) \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \exists x \forall y ((\text{bringsAbout}(x, y) \rightarrow (\text{Event}(x) \wedge \text{Scene}(y))) \rightarrow \\ \forall z (\text{Situation}(z) \wedge \text{memberOf}(z, y) \wedge \text{bringsAbout}(x, z))) \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} \forall x \forall y ((\text{triggers}(x, y) \rightarrow (\text{Scene}(x) \wedge \text{Event}(y))) \rightarrow \\ \forall z (\text{Situation}(z) \wedge \text{memberOf}(z, x) \wedge \text{triggers}(z, y))) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Com base em todos esses modelos, descrições e axiomas é possível entender e responder mais essas questões de competência propostas na Tabela 12:

Quais são as relações de parte e todo que envolvem o conceito de *cena*? (QC C3)

De forma semelhante ao conceito de situação, uma cena pode ser *Atômica*, quando não tem uma cena como componente e é composta por pelo menos duas *situações atômicas*. Por outro lado, uma cena é uma *cena Complexa* quando possui, como componentes, cenas que ocorrem dentro do seu intervalo de tempo (BeginPoint e EndPoint).

Qual a relação entre uma cena e o conceito de *proposição*? (QC C4)

Quando uma situação (*Situation*), que faz parte de uma cena (*Scene*), satisfaz a uma proposição (*Proposition*), essa cena da qual a situação é parte também satisfaz aquela mesma proposição. Por exemplo, considerando a seguinte proposição: $p1 \rightarrow$ "o radio está localizado na posição "x", se uma dada situação "S1", composta por um rádio e sua localização, satisfizer "p1", a cena, da qual a situação "S1" é parte, também satisfaz "p1". Além disso, uma cena, empregando seu princípio da encarnação variável, pode satisfazer proposições diferentes. Por exemplo, considerando a seguinte proposição: $p2 \rightarrow$ "devem haver variações na localização do rádio", tal proposição poderia ser atendida por uma cena chamada de "*cena de movimento*", caracterizada pela variação na localização de um rádio (*Substantial*), que seria parte de situações que compõem a cena. Tal proposição não poderia ser satisfeita por uma única situação (*Situation*), pois, nesse caso, o princípio de encarnação variável está baseado na variação de localização e uma situação não permitiria uma variação ao longo de um intervalo de tempo. Isso indica que, cada situação componente

da cena precisaria ter localizações diferentes para o rádio (*Substantial*) para satisfazer $p2$ e caracterizar uma *cena de movimento*.

Qual a relação entre uma cena e o conceito de disposição (Disposition)? (QC C5)

Quando uma situação, que faz parte de uma cena, ativa uma determinada disposição, a cena da qual a situação faz parte também ativa essa mesma disposição. Uma outra maneira de uma cena ativar uma disposição é quando a própria cena emprega seu princípio de encarnação variável ativar essa disposição. Considerando o mesmo exemplo contextual, ao satisfazer uma proposição " $p1$ ", ou seja, um rádio assumindo uma determinada localização caracterizando uma certa situação (componente de uma Cena), essa Situação pode ativar uma disposição do rádio ex: detectar sinais de radiofrequência, que se manifestará por meio de um evento de detecção. Por outro lado, uma cena que satisfaz " $p2$ " (cena de movimento) pode ativar a disposição de um outro "*substantial*", por exemplo, um radar, que precisa do movimento para ativar sua disposição de detectar objetos.

Qual a relação entre uma cena e um evento? (QC C6)?

Eventos complexos causam transformações em *Substantials*, que são elementos constituintes de situações e podem fazer parte de uma cena específica. Consequentemente, esses eventos podem provocar situações que são parte da cena. Desta forma, pode-se dizer que esses eventos podem provocar uma cena. Por exemplo, os eventos que alteram a posição de um objeto (rádio) podem provocar uma "*Cena de Movimento*".

De maneira similar às situações, as cenas também podem disparar eventos (*Events*), uma vez que, os eventos podem manifestar disposições ativadas por essas mesmas cenas. Por exemplo, a "*Cena de Movimento*" mencionada anteriormente, caracterizada pela mudança da localização de um dado *substantial* (rádio), pode disparar os eventos de detecção de sinal, do qual o rádio participa e o evento de detecção de objeto, com a participação de outro *substantial* (Radar).

Por fim, ainda sobre o exemplo da "*cena de movimento*", este também é um exemplo de *cena atômica*, composta de *situações atômicas*, com um único *substantial* (rádio) atendendo a uma *proposição atômica* (a localização do objeto é x).

4 DESENVOLVIMENTO DA ONTOLOGIA CROMO

Este capítulo apresenta uma ontologia de referência capaz de representar o conhecimento relacionado ao processo decisório de rádios cognitivos em comunicações militares, intitulada CROMO - Ontologia de Rádios Cognitivos para Operações Militares (*do inglês: Cognitive Radio Ontology for Military Operations*). No entanto, o conhecimento a ser representado é amplo nos aspectos táticos e técnicos. Na parte tática e doutrinária, diversas operações com diferentes conjuntos de procedimentos doutrinários são aplicados aos dispositivos de comunicação, dada a identificação de cenas e situações de natureza tática. Da mesma forma, sob viés tecnológico, temos uma gama semelhante de possibilidades para detectar situações e cenas no universo de sensoriamento do rádio, que exigem a aplicação de algoritmos e técnicas para melhorar a qualidade do sinal e utilizar melhor o espectro eletromagnético, o consumo de energia, dentre outras possibilidades. Assim, o objetivo da CROMO não é abranger todo esse arcabouço de informações, mas cobrir um escopo reduzido, capaz de servir como base inicial de conhecimento. Além disso, a CROMO foi concebida para ser extensível de tal forma que possa ampliar sua cobertura no futuro, considerando outros tipos de operações militares, suas respectivas normas doutrinárias e outras abordagens técnicas no trato dos sinais coletados no espectro eletromagnético. Desta maneira, novos indicadores, planos e ações poderão ser descritos e representados, possibilitando diferentes oportunidades de emprego para a ontologia.

Toda operação militar só acontece após uma fase de planejamento minucioso, onde planos de várias naturezas são elaborados com base no plano da operação e em seus objetivos. Nesse contexto, são desenvolvidos planos envolvendo abastecimento, defesa antiaérea, manutenção e comunicações, entre outros. Cada plano, baseado em manuais de doutrina militar e documentos técnicos, influencia diretamente nas atividades e no emprego dos meios durante uma operação. Diante desse cenário, a CROMO possui três objetivos interligados, que compõem o universo de conhecimento (escopo) a ser representado:

1. A descrição do processo de planejamento de comunicações alinhado com o planejamento da operação, apresentando as entidades envolvidas, seus papéis, características, relacionamentos, e como elas podem influenciar o processo de decisão dos rádios cognitivos;
2. Descrever um cenário operacional composto por cenas e situações detectáveis por um rádio cognitivo, sob pelo menos um aspecto técnico, como a escolha de uma estratégia de modulação e aspectos táticos relacionados a pelo menos uma operação militar, como por exemplo uma operação offensiva; e

3. Descrever os elementos que compõem um *Cenário Operacional* e as ações envolvidas nesse cenário.

Para o desenvolvimento da CROMO adotamos a metodologia SABiO, que possibilita o desenvolvimento de ontologias de referência e operacionais. Vale ressaltar que uma ontologia de referência é um modelo conceitual particular capaz de descrever as entidades do domínio com precisão e melhorar a comunicação, a aprendizagem e a resolução de problemas. Além disso, uma ontologia de referência pode ser uma base para o desenvolvimento de modelos, aplicações ou mesmo ontologias operacionais (uma versão de implementação legível por máquina da ontologia de referência). A metodologia SABiO sugere alguns passos para a elaboração de uma ontologia de referência. O primeiro passo é identificar o propósito da ontologia, conforme acabamos de apresentar. Em seguida, deve-se identificar os requisitos não funcionais (*aspectos não relacionados ao conteúdo da ontologia*) e funcionais (*aspectos relacionados às Questões de Competência (QC) que devem ser respondidos pela ontologia*). O próximo passo é capturar e formalizar a ontologia identificando *conceitos e relações analisados à luz de uma ontologia de fundamentação*). As QCs são escritas em linguagem natural e descrevem e restringem o escopo do conhecimento representado em uma ontologia. Assim, uma QC retrata requisitos contextuais e delimita o domínio do sujeito descrito na ontologia [93]. Há muitas maneiras de classificar questões de competência, Wiśniewski et al.[93] destacam aspectos da construção semântica, identificando entidades e predicados utilizados em sua composição. Por outro lado, Bezerra, Santana e Freitas[94] organizaram as questões de acordo com foco de cada uma. Quando suas respostas são classes e relações, como "*o que constitui a pizza?*", a QC é classificada como *TBox*. Quando suas respostas são instâncias, como "*quem exigiu essa pizza?*", então as QCs são classificadas como *ABox*. Finalmente, quando as QCs são classificadas como um problema de decisão verdadeiro/falso quando a resposta é Sim/Não, como "*A pizza é um alimento?*". Neste trabalho, seguindo a proposta de Bezerra, Santana e Freitas[94], as QCs estão organizados em *TBox* (classes e relações).

Antes de dar continuidade na aplicação da metodologia SABiO, para entender melhor o processo de tomada de decisão em um rádio cognitivo militar, especificamos esse processo usando a representação *Business Process Modeling Notation* (BPMN) [95]. Esta especificação, detalhada na Seção 4.1, ajudou no refinamento da ontologia CROMO.

4.1 O Processo de Tomada de Decisão em um Rádio Cognitivo Militar

A Figura 19 mostra uma visão geral do processo de tomada de decisão no qual um determinado rádio cognitivo participa em um ambiente de comunicações militares. Com

base no *Plano de Operação (Operation Plan)*, o responsável pelas comunicações define a participação do rádio em ações operacionais (*passo 1*). Para isso, as características e capacidades do equipamento devem ter sido descritas (*passo 2*), incluindo características de hardware, como as plataformas de rádio adequadas, configurações de rede, faixas de frequência permitidas, estratégias de modulação, níveis de sinal e níveis de segurança (*passo 3*). Todas essas informações compõem as características das possíveis formas de onda usadas nas operações (*passo 4*). Além disso, o responsável pela comunicação também define regras operacionais e de funcionamento (*passo 5*) que devem ser aplicadas durante as ações. Todas essas definições compõem o *Plano de Comunicações da Operação*, que é armazenado como *Dados de Comunicação da Operação*. Em seguida, esses dados são enviados para o rádio cognitivo (*passo 6*).

Na próxima etapa, o rádio cognitivo recebe e atualiza esses dados antes do início da operação militar (*Military Operation*) (*passo 7*). Uma vez que esses dados são atualizados, o equipamento de rádio está pronto para participar da operação (*passo 8*). Quando a operação começa, o rádio começa a detectar o ambiente eletromagnético (*passo 9*), recebendo informações de seus elementos inferiores(subordinados) (*Lower Radios¹*), bem como dos sistemas de comando e controle (*C2 Systems*) com os quais interage. Essas informações alimentam o rádio cognitivo com dados.

No ambiente eletromagnético, o rádio coleta dados de *Relação Sinal-Ruído (SNR)* em intervalos de milissegundos, o que serve de base para identificar *Cenas (Scenes)* e *Situações (Situations)*. Por outro lado, do ponto de vista tático, as janelas de observação dos sistemas de comando e controle podem ser atualizadas a cada poucos segundos, ou seja, esse intervalo de tempo maior é adequado para observar o posicionamento de amigos e inimigos durante uma operação, bem como a hora exata de início ou mudança de fase em uma operação militar. Com base nesses conjuntos de dados combinados, o sistema de rádio cognitivo identifica *Scenes* e *Situations* de natureza tática e técnica (*passo 11*). Em seguida, o rádio cognitivo aplica as regras de comunicação previamente definidas (*passo 12*) e decide, consequentemente, alterar seu modo de operação quando for o caso (*passo 13*), repetindo este ciclo enquanto estiver participando da operação.

A descrição processual da Figura 19 demonstra o caminho que o conhecimento doutrinário padrão, [39] [5] [35] [44] e documentação técnica [96] seguiriam até chegar a um rádio cognitivo. Vale a pena notar que, neste processo, o rádio deve lidar não apenas com dados do ambiente eletromagnético, mas também com dados de sistemas de comando e controle. A ontologia CROMO foi construída para suportar esse processo e é apresentada nas próximas seções.

¹ Rádios usados por militares diretamente subordinados em sua rede de comunicações.

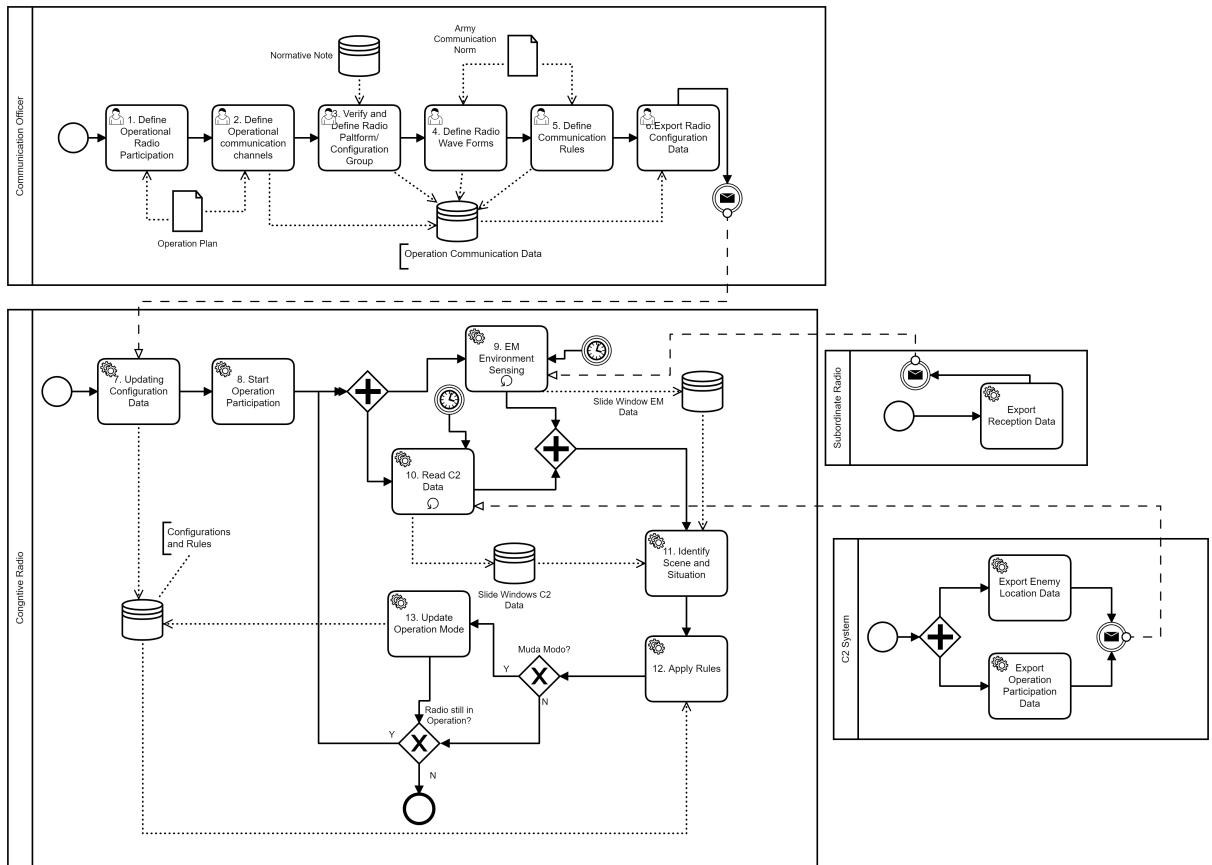


Figura 19 – Processo de tomada de decisão por rádio cognitivo em comunicações militares (expresso em BPMN)

4.2 Aplicação da Metodologia SABiO

O propósito geral da ontologia CROMO é, de acordo com o escopo definido, descrever o processo de planejamento de comunicações alinhado com o planejamento de uma operação militar. Além disso, representar entidades, situações e cenas do mundo real que possam ser detectáveis pelo rádio cognitivo em um cenário operacional de comunicações militares. Esse tipo de cenário representa cenas e situações sob pelo menos um aspecto técnico e considerando aspectos táticos de ao menos uma operação militar. A ontologia CROMO também tem como propósito descrever elementos essenciais como objetos, atributos, relações e participações em eventos ou ações, onde o rádio cognitivo deve atuar como agente de tomada de decisão. Esta ontologia apoia o rádio cognitivo como uma estrutura de conhecimento aplicada à tomada de decisão autônoma, baseada em regras. Adicionalmente, ela também pode ajudar os agentes que desenvolvem as atividades de planejamento das comunicações, fornecendo uma compreensão precisa dos elementos envolvidos em tal cenário, podendo ainda apoiar no desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para configurar rádios cognitivos. A CROMO adota como base para os aspectos táticos os manuais de doutrina do EB, como [39] [5] [35] [44]. Sob o viés técnico, existem diversas abordagens na literatura, porém a CROMO utiliza a abordagem técnica

proposta por Moura e Galdino[96], por se tratar de um trabalho desenvolvido no contexto do projeto RDS-DEFESA (projeto em que esta Tese se insere).

Como próximo passo, identificamos como *requisitos não funcionais*: a consensualidade e a interoperabilidade. Neste contexto, busca-se o consenso por meio do uso de documentos doutrinários em comunicações militares reconhecidos por todos os escalões e membros de uma Força Armada , além de conceitos presentes em pesquisa científica e nas normas técnicas atinentes a base de conhecimento do grupo de pesquisa da Força que participam do projeto RDS-DEFESA. A interoperabilidade pode ser evidenciada, uma vez que a CROMO utiliza descritores de entendimento compartilhado no âmbito dos sistemas de comunicações militares e de comando e controle, provenientes de normas militares, notas técnicas e pesquisas nas Forças Armadas. Além disso, a CROMO pode ser enriquecida com conceitos de Ontologias de Rádio Cognitivos como a (CRO) [97] [98] [99], padrões internacionais de cenários militares [100] e indicadores de gerenciamento de espectro eletromagnético [101]. Estes requisitos podem mitigar os problemas de interoperabilidade entre os sistemas de comunicações e os sistemas de comando e controle. Podem ainda favorecer a integração e o mapeamento de conceitos de doutrina que são complementares entre si (C2, Operações Militares e comunicações), mas que no entanto, sofrem atualizações em diferentes momentos e por diferentes atores.

De acordo com a metodologia SABiO, após definir o propósito da ontologia e os seus requisitos não funcionais também são executadas outras três etapas para construir a CROMO uma como ontologia de referência: (i) definir questões de competência(requisitos funcionais), (ii) modularizar a ontologia, e (iii) analisar conceitos e relações à luz de uma ontologia de fundamentação. Com relação a (ii), a CROMO foi organizada em três módulos separados, com uma certa independência entre eles, porém conectados por conceitos em comum. Nessa modularização buscou-se alinhar cada módulo aos 03 (três) objetivos definidos no início desse capítulo, além de atender a critérios de independência entre os módulos, coesão entre os conceitos e equilíbrio no tamanho de cada módulo, conforme preconiza a metodologia SABiO. O primeiro módulo aborda os objetos e relações do mundo real que fazem parte do desenvolvimento de planos de operação e comunicação e as regras aplicadas a esses planos (CROMO-OCP). No segundo módulo, dentro do escopo definido, a CROMO descreve possíveis situações e cenas técnicas e táticas do mundo real em um determinado *Cenário Operacional*, de acordo com os documentos de planejamento (CROMO-MOS). O terceiro e último módulo representa os objetos, ações, relações, modos e características que compõem aquele *Cenário Operacional* (CROMO-SCA).

Diante da diversidade de propósitos que a ontologia CROMO visa atender e, a fim de melhorar a compreensão e agrupar conceitos afins, os propósitos da ontologia foram segmentados em três partes. Com base nesses segmentos, foram elaboradas questões de competência, item (i), no sentido de eliciar conceitos relevantes ao domínio a serem

representados pela ontologia CROMO.

O primeiro segmento apresenta o propósito de descrever o processo de planejamento de comunicações, identificando seu alinhamento com o planejamento da operação, além de apresentar as entidades envolvidas, seus papéis, características, relacionamentos e como elas podem influenciar o processo de decisão dos rádios cognitivos. Os principais usuários desta parte da ontologia serão os oficiais responsáveis pela elaboração dos planos de operação e de comunicações, pois terão uma compreensão mais precisa dos elementos envolvidos, suas relações e sua influência na configuração de cada rádio.

Como mencionado anteriormente, todas as operações militares só acontecem após uma fase de planejamento completo. Da mesma forma, ocorre o planejamento do uso e do emprego dos meios de comunicações, certamente obedecendo regras e normas bem definidas e fundamentadas. Em torno desse contexto, foi elaborado o conjunto de questões de competência descritas na Tabela 13 definindo quais seriam os requisitos funcionais para a elaboração dessa parte da ontologia CROMO. Estas questões (QC OCP1 - OCP3, da Tabela 13) buscam eliciar o que vem a ser um plano de comunicações e suas relações com o planejamento de uma operação militar. Além disso, têm a intenção de identificar todas as entidades e objetos do mundo real envolvidos nos planejamentos de comunicações e de cada operação, bem como todos os documentos que embasam esses planejamentos. Esse conjunto de requisitos serviu de base para construção de um primeiro módulo da ontologia CROMO, chamado de CROMO-OCP (do inglês Operation and Communication Plan), com foco no planejamento das comunicações, que por sua vez é baseado no planejamento das operações militares.

O próximo segmento apresenta o propósito de descrever um cenário operacional militar hipotético que possa ser percebido por um rádio cognitivo em uma operação militar real. Nesse contexto, foram definidas questões de competência capazes de eliciar possíveis cenas e situações que poderiam ser parte do cenário operacional e identificáveis pelo rádio cognitivo (QC MOS1 e MOS2, da Tabela 13). Os usuários principais desta parte da ontologia serão o rádio cognitivo, que deverá ser capaz de identificar as cenas e situações do cenário e o oficial responsável por definir regras baseadas nesses cenários.

Por uma questão de simplicidade, o escopo deste módulo cobre apenas um cenário operacional reduzido constituído de um cenário técnico e um cenário tático. O cenário técnico é baseado em um tipo de observação do espectro eletromagnético e o cenário tático com foco em uma única operação militar. Neste caso, a operação escolhida foi a operação ofensiva e, consequentemente mais algumas questões de competência foram definidas a fim de descrever e contextualizar a operação ofensiva, sua constituição e seus participantes (QC Op1 - Op3, da Tabela 13). Esse conjunto de requisitos descritos por essas questões de competência buscam complementar o entendimento acerca dos cenários táticos. Este conjunto de requisitos funcionais serviram de base para construção de um

Tabela 13 – Requisitos funcionais para representar os Planos de Operação e Comunicação.

Questões de Competência	
QC	Descrição
OCP1	O que é o plano de comunicações e qual sua relação com o plano de operações militares?
OCP2	Quem são as entidades e objetos envolvidos no planejamento de comunicações e de operações?
OCP3	Que documentos embasam o planejamento de comunicações e de operações?
MOS1	De que maneiras pode ser representado e constituído um cenário Operacional percebido pelo rádio?
MOS2	Que tipos de Cenas e situações técnicas e táticas poderiam ser percebidas nesses cenários?
Op1	No contexto tático, o que é uma operação ofensiva e como ela é constituída?
Op2	Que elementos operacionais executam ou participam da Operação Ofensiva?
Op3	Qual é a ordem temporal em que operações que fazem parte da Operação Ofensiva acontecem?
SCA1	Quais são os elementos operacionais (entidades e objetos) que fazem parte do cenário operacional?
SCA2	Quais são as características, papéis e relações dos elementos operacionais (entidades e objetos) que fazem parte do cenário operacional?
SCA3	Quais são as ações e atividades executadas pelos agentes no Cenário Operacional?

segundo módulo da ontologia CROMO, chamado de CROMO-MOS (do inglês Military Operational Scenario), com ênfase na definição de cenários militares compostos de cenas e situações perceptíveis por um rádio cognitivo.

Por fim, o último segmento apresenta o propósito de descrever os elementos (entidades e objetos) que fazem parte do cenário operacional militar, considerando suas características, papéis e relações. Além disso, identificar as ações e atividades executadas pelos agentes presentes no mesmo cenário. Os principais usuários desta parte da ontologia serão o rádio cognitivo, que deverá ser capaz de identificar as suas capacidades de executar ações de detecção cenas e situações do cenário militar, decisão e autoconfiguração e o oficial responsável em definir as regras que serão aplicadas pelos rádios cognitivos. Do mesmo modo que nos segmentos anteriores, nesse contexto, também foi elaborado o conjunto de questões de competência descritas na Tabela 13 definindo quais seriam os requisitos funcionais para a elaboração dessa parte da ontologia CROMO. Estas questões (QC SCA1 - SCA3, da Tabela 13) buscam eliciar os elementos (entidades e objetos) que fazem parte do cenário operacional militar e as ações e atividades executadas pelos agentes presentes no mesmo cenário. Este conjunto de requisitos funcionais serviram de base para construção de um terceiro e último módulo da ontologia CROMO, chamado de CROMO-SCA (do inglês Scenario Components and Actions).

As questões de competência (QC) elencadas na Tabela 13 descrevem os requisitos funcionais para a elaboração dos módulos da ontologia CROMO. Essas questões estão relacionadas às classes (conceitos de ontologia de domínio) e às relações entre elas e seus subtipos (TBox).

4.2.1 Modelagem dos Planos de Operações e Comunicações (CROMO-OCP)

O módulo CROMO-OCP descreve como ocorre o planejamento do emprego das comunicações durante as operações militares. Neste módulo, foi mapeada a relação do planejamento de comunicações com o planejamento da operação, bem como quais são os documentos doutrinários e técnicos que embasam esses planos. Tais documentos definem comportamentos, regras, entidades e objetos que participam das operações. No domínio das comunicações, a elaboração do plano de comunicações tem relação direta com os objetivos do plano da operação militar. Tudo isso envolve entidades, que assumem variados papéis tanto na elaboração dos planos quanto como parte integrante das ações planejadas contidas nos planos.

Com base nas questões de competência, os conceitos e relações foram identificados, formalizados e representados na ontologia CROMO à luz dos conceitos da UFO. Em outras palavras, foi realizada uma análise ontológica abrangendo os requisitos propostos e um modelo conceitual é mostrado nas Figuras 20 e 21. Essas figuras indicam as conexões ontológicas entre os conceitos da ontologia CROMO e suas relações e conexões com os conceitos da UFO (destacadas).

O planejamento de comunicações é um conjunto de procedimentos formalizados por meio de documentos, que definem os meios, equipamentos e forma de emprego dos meios de comunicações em cada operação militar. Para essas definições são considerados fatores como: a missão; as condições fisiográficas; os participantes das operações (amigos, inimigos, civis e militares); o tempo e as capacidades dos meios de comunicações envolvidos.

Todo esse planejamento é baseado em documentos de doutrina e em documentos técnicos da área de radiocomunicação. Cada um desses documentos participa da descrição de *Padrões Gerais de um Plano Militar (General Standard Military Plan)*. Esses documentos de *Doutrina do Plano Militar (Military Plan Doctrine Document)* são reconhecidos por Organizações Militares e, consequentemente, de uma maneira indireta os militares subordinados àquela organização militar também reconhecem esses documentos.

Seguindo a compreensão dos conceitos da UFO-C apresentada em Bringente, Falbo e Guizzardi[75], o conceito de *Action Universal (Plan)* refere-se a um plano genérico definido por uma organização, estabelecendo requisitos básicos para operações, planos, bem como processos e atividades realizadas nessa organização. De acordo com o modelo da Figura 20, um Padrão Geral de Plano Militar (*General Standard Military Plan*) é um

Complex Action Universal (tipo de *Action Universal (Plan)*), descrito pelo conceito *Plan Description*. Nesse caso, o Padrão Geral de Plano Militar (*General Standard Military Plan*) é descrito pelo documento de doutrina de um plano militar (*Military Plan Doctrine Document*). Um documento de doutrina de um plano militar (*Military Plan Doctrine Document*) descreve um ou mais Padrões Gerais de Plano Militar (*General Standard Military Plan*) e Regras Padrão de Comunicações (*Standard Communication Rule*). Este tipo de documento de doutrina se alinha com os conceitos da UFO-C de descrição de plano (*Plan Description*), que é um tipo particular de Descrição Normativa (*Normative Description*). Esse tipo de descrição elicitá uma ação planejada que ainda não foi executada, e que é representada pelo conceito *Action Universal(Plan)*.

Da mesma forma, um manual de Operações Militares (*Military Operation Manual*) descreve um Plano de Operações Padrão (*Standard Operation Plan*), onde são descritas normas e cada procedimento de uma operação militar. Seguindo a mesma característica, um Manual de Comunicações nas Operações (*Communication Operation Manual*) descreve um Plano de Comunicações Padrão (*Standard Communication Plan*), que lida com configurações de dispositivos de comunicação, recursos e o comportamento dos rádios durante as operações militares. Ainda na mesma linha, uma Nota Normativa de Comunicações (*Communication Normative Note*), que envolve aspectos técnicos, como plataformas, largura de banda, frequências em cada situação militar, também pode fazer parte da descrição de um Plano de Comunicações Padrão (*Standard Communication Plan*). Todos esses documentos descritores são tipos de documento de doutrina de um plano militar (*Military Plan Doctrine Document*). Dessa maneira, cada plano e documento descritivo, têm subtipos, e cada subtipo de documento descreve seu plano padrão correspondente.

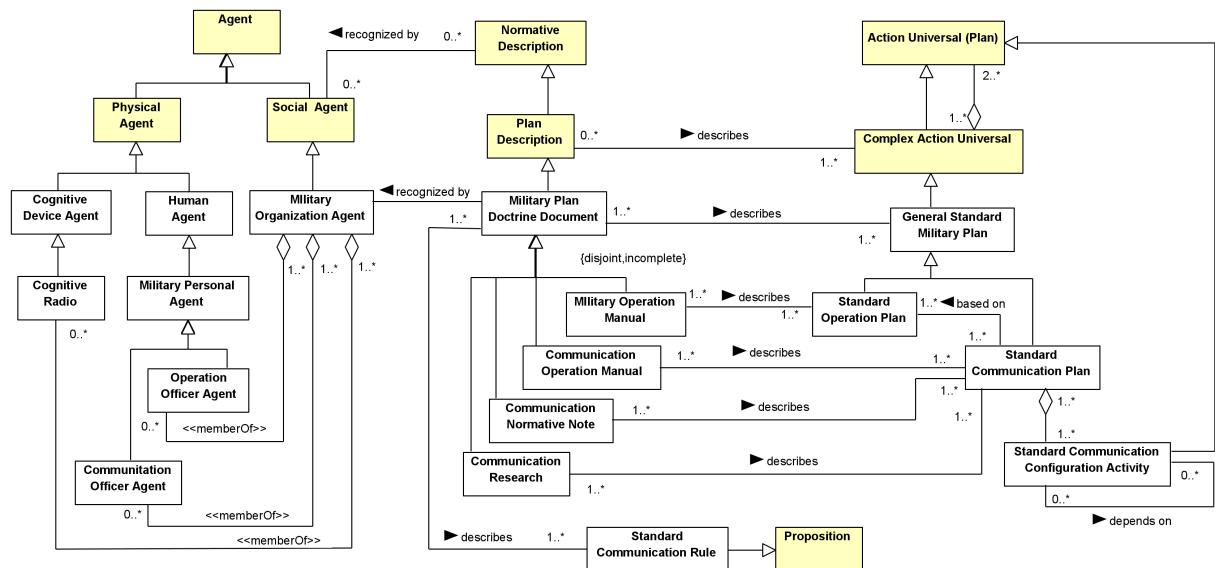


Figura 20 – Fragmento de ontologia CROMO-OCP - Plano de Operação e Comunicação baseado na UFO [66] [75] [85]

O Plano Padrão de Comunicações (*Standard Communication Plan*) é elaborado após a conclusão do Plano Padrão de Operações (*Standard Operation Plan*). Isso ocorre porque a preparação do primeiro é baseada no segundo. Por exemplo, para planejar as configurações do canal de comunicação, é necessário saber quais grupos militares participam de uma operação em um determinado cenário e precisam se comunicar. Além disso, o Plano Padrão de Comunicações é composto por Atividades Padrão de Configuração de Comunicações (*Standard Communication Configuration Activity*), que representam as ações de configuração de comunicação de um rádio em um ambiente que busca representar o mundo real.

Seguindo a classificação apresentada por Júnior, Almeida e Guizzardi[85], a UFO classifica os *Substantials* e *Individuals* diferenciando-os pelo critério de poderem ou não realizar ações, como agentes (*Agents*) e objetos (*Objects*), respectivamente. Os agentes (*Agents*) são capazes de ter aspectos intencionais (*Intentional Moments*). A intencionalidade é uma capacidade inerente somente a indivíduos específicos (humanos) de se referirem a possíveis situações da realidade, ou seja, agentes são humanos que possuem intenções e agem sobre os objetos. No entanto, é válido considerar que dispositivos com capacidades cognitivas e habilidades de tomada de decisão autônomas também são capazes de agir sobre objetos quando confrontados com situações do mundo real. Essa característica os aproxima das capacidades humanas e, embora não possuam a intencionalidade dos humanos, não podem ser considerados meros objetos. Neste trabalho, o dispositivo rádio cognitivo é classificado como um tipo de agente cognitivo.

A Figura 20 ilustra que o agente militar pessoal (*Military Personal Agent*) é um agente humano (*Human Agent*), enquanto o rádio cognitivo (*Cognitive radio*) é um agente do tipo dispositivo cognitivo (*Cognitive Device Agent*). Ambos são tipos específicos de agentes físicos (*Physical Agents*), capazes de executar ações (*Actions*), perceber situações (*Situations*) e cenas (*Scenes*), e ter compromissos (*Intentional Moments*). Por outro lado, o agente do tipo Organização Militar (*Military Organization Agent*) é um agente social (*Social Agent*) associado a organizações que reconhecem normas e regras descritas em objetos sociais (*Social Objects*), como as normas descritivas *Normative Descriptions* ou, mais especificamente, uma descrição de plano *Plan Description*, conforme descrito pelo modelo. Dessa forma, o agente do tipo Organização Militar (*Military Organization Agent*) reconhece um documento de doutrina de um plano militar (*Military Plan Doctrine Document*). Já o militar na função de Oficial de Operações (*Military Operation Officer*) e o militar no papel de Oficial de Comunicações (*Military Communication Officer*) são agentes militares pessoais (*Military Personal Agents*), membros de uma Organização Militar (*Military Organization Agent*), e comprometidos com os documentos reconhecidos por essa organização.

A Figura 21 mostra que o compromisso de fazer um Plano Geral (*General Plan*

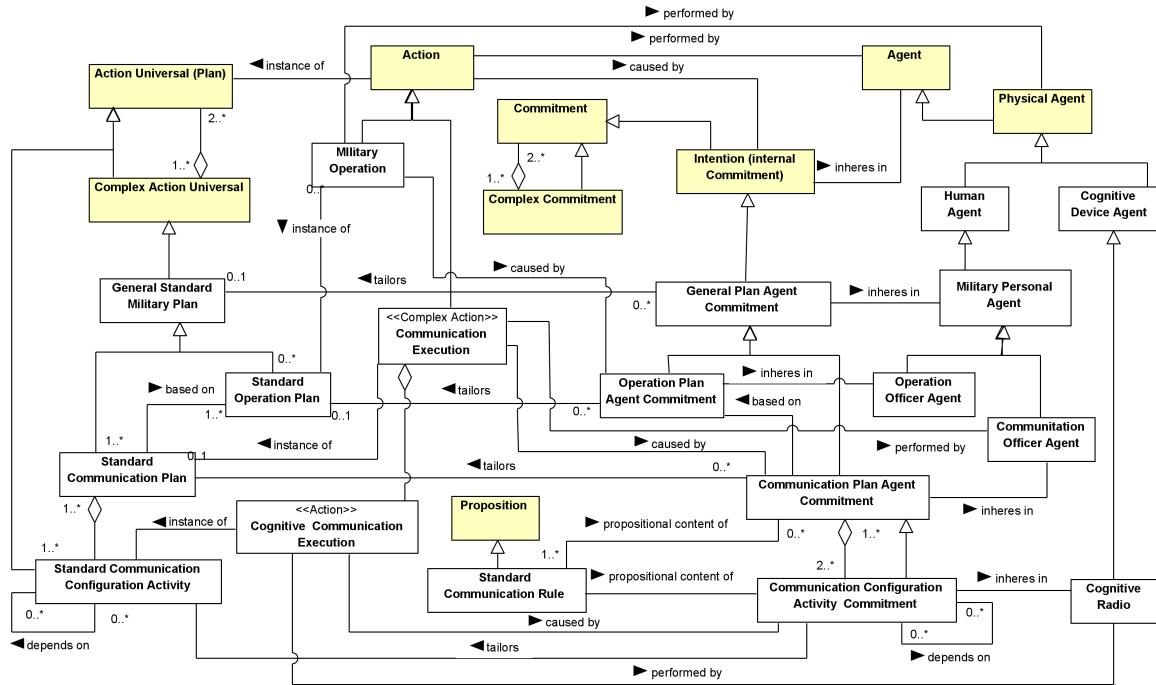


Figura 21 – Fragmento de ontologia CROMO-OCP - Planos e Compromissos, baseado na UFO [66] [75] [85]

Agent Commitment) é uma intenção (Internal Commitment) de um agente militar pessoal *Military Personal Agent*. Os compromissos de um agente fazer um Plano de Operações (*Operation Plan Agent Commitment*) ou um Plano de Comunicações (*Communication Plan Agent Commitment*) são exemplos de tipos de compromissos de agentes na elaboração de planos gerais (*General Plan Agent Commitment*). Esses exemplos representam compromissos dos agentes Oficial de Operações (*Operation Officer Agent*) e Oficial de Comunicações (*Communication Officer Agent*) e, são representados no modelo pelos compromissos (*Internal Commitments*) de elaborar os Planos de Operações (*Operation Plan Agent Commitment*) e o Plano de Comunicações (*Communication Plan Agent Commitment*), respectivamente. Da mesma forma, o agente rádio cognitivo (*Cognitive Device Agent*) tem o compromisso de executar as atividades de configuração de comunicações (*Communication Configuration Activity Commitment*).

O compromisso de elaborar o plano de operações (*Operation Plan Agent Commitment*) está alinhado com o plano de operações padrão (*Standard Operation Plan*), bem como o compromisso de elaborar o plano de comunicações (*Communication Plan Agent Commitment*) se alinha (*tailors*) ao plano de comunicações padrão (*Standard Communication Plan*), e o compromisso de realizar atividades de configuração de comunicações (*Communication Configuration Activity Commitment*) se alinha à atividade de configuração padrão de comunicações (*Standard Communication Configuration Activity*). Isso significa que a intenção de cada agente está alinhada com um plano padrão correspondente. Um plano de comunicações padrão (*Standard Communication Plan*) tem duas ou mais ativi-

dade de configuração padrão de comunicações (*Standard Communication Configuration Activities*) como componentes.

Na Ontologia de Processos de Software apresentada por Bringente, Falbo e Guizzardi[75], os autores consideram que um compromisso representa a materialização das atividades definidas no processo de projeto padrão. No entanto, na CROMO detalhamos também que uma intenção ou compromisso (*Internal Commitment*) causa ações (*Actions*) ou atividades definidas em um plano padrão que são executados por um agente físico (*Physical Agent*). Essas ações e atividades são instâncias de ações planejadas (conceito de *Action Universal (Plan)*). Como por exemplo, o compromisso de realizar uma atividade de configuração de comunicações (*Communication Configuration Activity*) causa a execução de uma comunicação cognitiva (*Cognitive Communication Execution*), um tipo de ação que instancia uma atividade de configuração padrão de comunicações (*Standard Communication Configuration Activity*).

Uma *Operação Militar (Military Operation)* também é uma ação causada por um compromisso (*Operation Plan Agent Commitment*), e pode instanciar um plano de operação padrão (*Standard Operation Plan*). Além disso, um agente militar pessoal (*Military Personal Agent*) ou um agente do tipo dispositivo cognitivo *Cognitive Device Agent*) também podem executar uma *Operação Militar*.

Uma regra de comunicação padrão (*Standard Communication Rule*) é uma proposição, esta regra de comunicação específica representa um conteúdo proposicional (*Propositional Content*) dos compromissos de elaboração do plano de comunicações e (*Communication Plan Agent Commitment*) das atividades de configuração de comunicação (*Communication Configuration Activity Commitment*). Em outras palavras, as intenções obedecem às regras.

Consolidando os conceitos apresentados nas Figuras 20 e 21, a Figura 22 retrata todo o fragmento da CROMO-OCP com todos os conceitos envolvidos na etapa de elaboração de planos e regras. A Figura 22 também mostra, no topo de cada Classe, como estereótipos, os conceitos da UFO associados aos conceitos de domínio da ontologia CROMO, esta associação atende aos requisitos funcionais da ontologia e alinha os conceitos de domínio a construtos de fundamentação que representam uma fatia do conhecimento do mundo real. Todos esses conceitos representados nesse módulo, e descritos nessa seção atendem aos requisitos funcionais descritos nas questões de competência (QC T1 - T3, da Tabela 13).

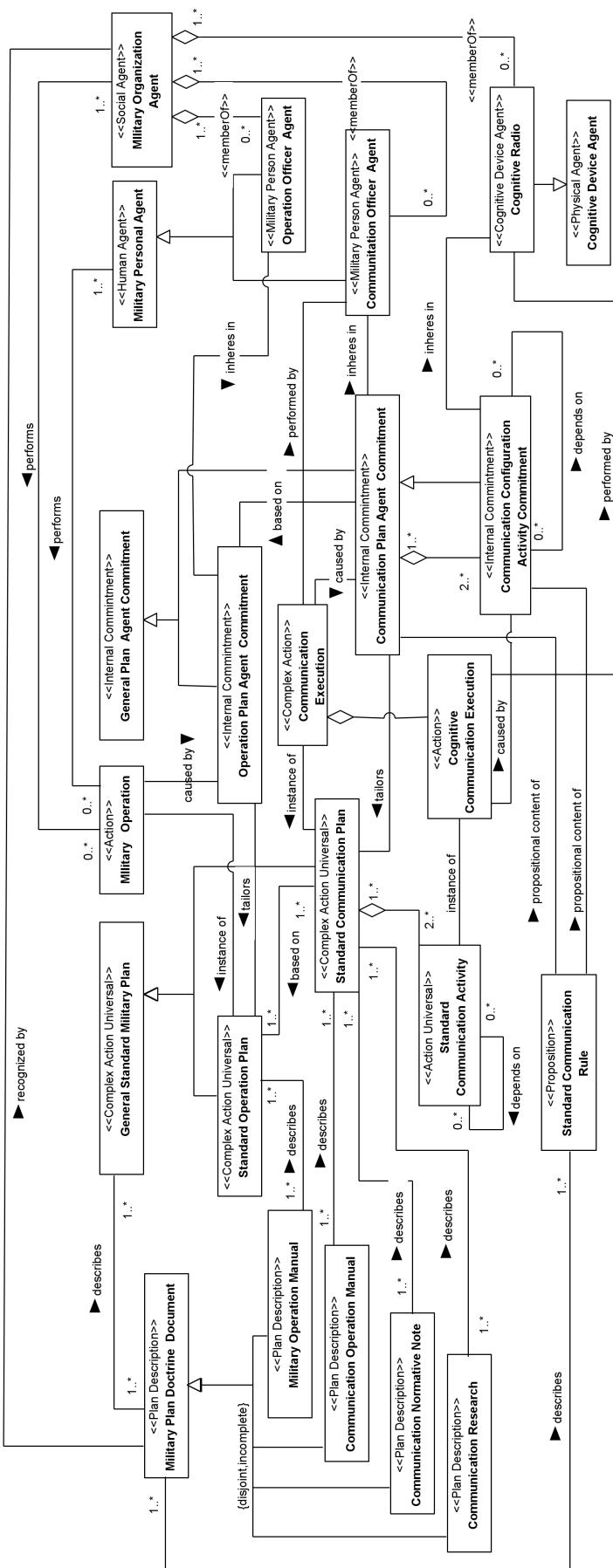


Figura 22 – Construtos de elaboração de Planos e Regras em CROMO-OCP

4.2.2 Modelagem do Cenário Operacional Militar (CROMO-MOS)

Existem muitos cenários operacionais possíveis associados a aspectos técnicos e táticos. Diferentes trabalhos técnicos sobre rádios cognitivos apresentam melhorias em cenários técnicos, como reconfiguração de parâmetros do sistema [102], detecção de espectro [11] e classificação de estratégias de modulação [96]. Por questão de simplicidade, foi escolhida a abordagem técnica proposta por Moura e Galdino[96] como base para a elaboração do cenário técnico presente na ontologia CROMO, abordando questões de classificação de estratégias de modulação.

Este conjunto de objetos do mundo real, suas relações, regras, ligadas a questões técnicas e táticas, baseadas nos documentos técnicos e doutrinários, compõem o universo contextual de uma determinada cena ou situação sob a qual cada dispositivo de rádio cognitivo tomará uma decisão. O trabalho de Moura e Galdino[96] se vale de um comportamento

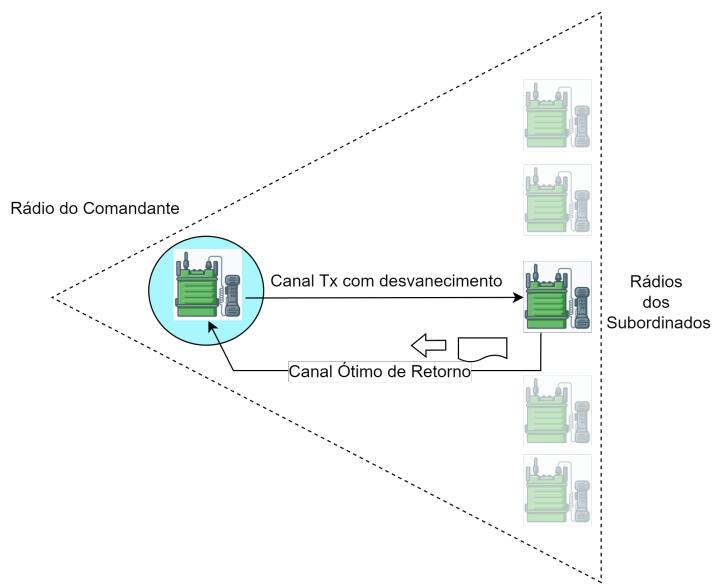


Figura 23 – Canal de Controle na Comunicação

adaptativo dos rádios, definindo uma estratégia de modulação apropriada de acordo com o *SNR* recebido no receptor, a frequência em uso e o tipo de dados transmitidos. Assim, a Figura 23, mostra um ambiente de comunicação militar hipotético, onde um comandante se comunica com seus subordinados por meio de uma conexão rádio. Em destaque, está representada uma dessas conexões, onde existem dois canais de comunicação. O primeiro deles é um canal de comunicação que parte do equipamento de rádio do Comandante, destacado com um círculo azul, para o equipamento de rádio de um dos subordinados (*Canal Tx com desvanecimento*), onde é transmitido um sinal de teste suscetível a efeitos de atenuação e desvanecimento. A partir da recepção desse sinal de teste, o receptor avalia a relação sinal/ruído (*SNR*) do sinal recebido e, em seguida, por meio de um *canal de retorno ótimo*, o equipamento rádio do subordinado transmite para o equipamento rádio do Comandante as informações de *SNR* detectadas. Este canal é um canal com

Tabela 14 – *Tipos de situações* com base nos limites de *SNR*

Tipos de Situações	Proposições(Proposition)
Extremely Hight Noise	$SNR \leq 7 \text{ dB}$
High Noise	$7 \text{ dB} > SNR \leq 9 \text{ dB}$
Normal Noise	$9 \text{ dB} > SNR \leq 12 \text{ dB}$
Moderately Noise	$12 \text{ dB} > SNR \leq 15 \text{ dB}$
Low Noise	$15 \text{ dB} > SNR \leq 21 \text{ dB}$
White Noise	$SNR > 21 \text{ dB}$

características ideais, ou seja, um canal sem qualquer atenuação ou perdas. Neste cenário, o rádio do Comandante identifica *Situações Técnicas* após receber o valor de SNR enviado pelo rádio do subordinado e aplica o método proposto por Moura e Galdino[96] para definir a estratégia de modulação mais adequada para a comunicação com todas as estações subordinadas.

O rádio do Comandante considera apenas uma amostra do valor da relação sinal/ruído (*SNR*) em um determinado momento para identificar uma determinada situação (*Situation*). Na relação *SNR*, quanto maior o nível de ruído menor o valor em decibéis (dB) de SNR, classificando situações de ruído que vão desde um nível de ruído extremamente alto (*Extremely High Noise*), passando por situações com um nível de ruído normal (*Normal Noise*) e de níveis de ruído extremamente baixos, como o caso do ruído branco (*White Noise*). Assim, considerando as regras de limiar propostas por Moura e Galdino[96], foram definidas seis Situações Eletromagnéticas Ruidosas (*Noisy Electromagnetic Situations*). A Tabela 14 apresenta essas situações que satisfazem os limiares proposicionais (Propositions) que atendem às condições que representam os limites dos valores de *SNR*.

Da mesma forma, voltando um pouco mais a atenção para os manuais de doutrina tática militar [39] [5] [35] [44], as operações militares podem ser classificadas quanto às forças empregadas e quanto à sua finalidade. Em relação às forças empregadas, elas podem ser operações singulares, conjuntas ou combinadas. Por outro lado, quando observadas sob sua finalidade, podem ser classificadas em básicas ou complementares. Esta pequena descrição da realidade representa dezenas de operações que podem ser combinadas, oferecendo uma ampla variedade de possibilidades em um determinado cenário militar. Assim, por uma questão de simplicidade e com base no escopo definido, foi estabelecido como cenário tático a ser representado por CROMO uma operação básica denominada Operação Ofensiva [39] [35]. Neste contexto, para representar o aspecto tático de um dado *Cenário Operacional*, consideramos os *Elementos Operacionais Amigos e Inimigos*, o *Rádio Cognitivo*, suas localizações e participações na *Operação Ofensiva*. Para representar uma *Operação Ofensiva* é preciso conhecer, com base nos manuais de doutrina [35] [39], o que é uma operação ofensiva e sua composição, os elementos operacionais que executam ou participam dela e a relação temporal em que ela se desdobra durante sua execução. Estes são alguns

requisitos funcionais a serem atendidos pela ontologia CROMO, descritos pelas questões de competência (QC Op1 - Op3, da Tabela 13).

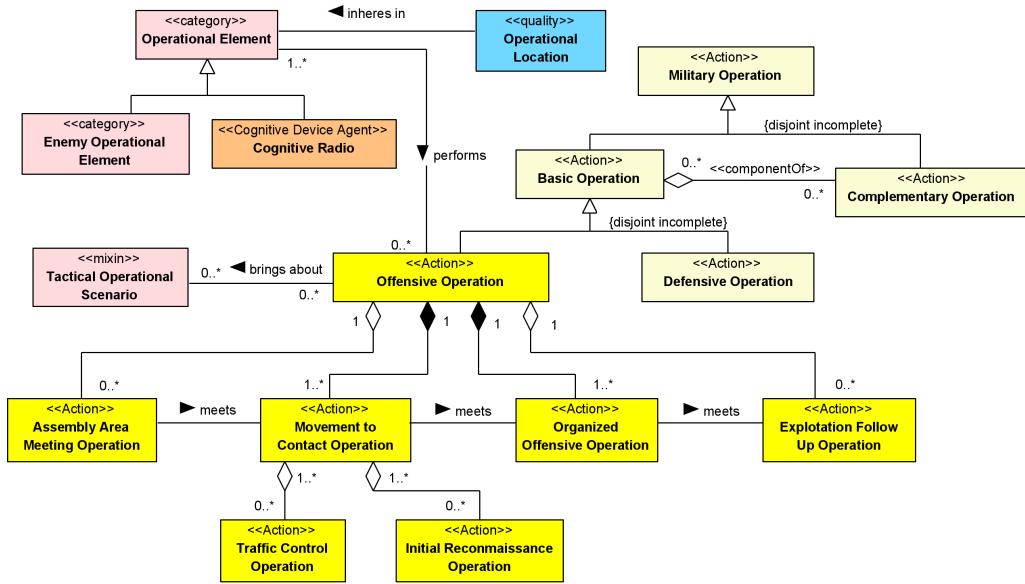


Figura 24 – Fragmento de CROMO-MOS representando uma Operação Militar Ofensiva

O fragmento de CROMO-MOS, mostrado na Figura 24, ilustra que uma Operação Militar (*Military OPeration*) possui diferentes subtipos, como Operações Básicas e Complementares (*Basic and Complementary Operations*). As Operações básicas são operações que, por si só, podem atingir os objetivos determinados por uma autoridade em uma situação de guerra ou não-guerra. As operações complementares, por outro lado, destinam-se a ampliar, melhorar e/ou complementar as operações básicas [35]. Uma Operação Ofensiva (*Offensive Operation*) é uma das Operações Básicas que se inicia e se desdobra em quatro operações distintas: (i) Reunião de Preparação (*Assembly Area*), quando o comandante se reúne com seus subordinados para trocar informações e transmitir ordens; (ii) Marcha para o Combate (*Movement to Contact*), quando as forças participantes marcham em direção às forças inimigas; (iii) Ataque Coordenado (*Organized Offensive*), momento em que ocorre a ação de atacar as forças inimigas; e (iv) Aproveitamento do êxito e Perseguição (*Exploitation and Follow Up*), uma vez que o ataque foi bem sucedido, ações para consolidar a vitória e perseguir o inimigo poderão ser realizadas. Alguns participantes podem executar uma operação de Controle de Tráfego (*Traffic Control*) ou de Reconhecimento (*Initial Reconnaissance*) durante uma operação de Marcha para o Combate. O rádio cognitivo pode perceber essas informações táticas via canal de comunicação com os sistemas C2, o que será descrito com mais detalhes na próxima Seção.

Com relação ao compromisso ontológico com a UFO, a Figura 24 mostra a Operação Ofensiva e suas operações componentes representadas pelo conceito de ações (*Actions*). Conforme foi apresentado na Seção 3, ações (*Actions*) podem provocar uma nova *Cena* ou

Situação, porém nesse contexto, essas cenas e situações provocadas pela operação ofensiva e suas operações componentes são parte de um *Cenário Operacional Tático (Tactical Operational Cenário)*. Como foi mostrado anteriormente na Figura 21, uma operação militar (*Military Operation*) instancia um Plano de Operações Padrão (*Standard Operation Plan*). Essa operação é uma ação causada por uma intenção (*Internal Commitment*) de um agente físico (*Physical Agent*), mais especificamente o Oficial de Operações, que é responsável por sua execução.

No modelo da Figura 24, todos os agentes envolvidos na execução da operação são categorizados como elementos operacionais (*Operational Elements*). Neste contexto, estão representados os elementos operacionais inimigos (*Enemy Operational Elements*), que podem ser agentes físicos (*Physical Agents*) ou objetos (*Objects*) pertencentes a uma força inimiga; e o rádio cognitivo (*Cognitive Radio*) da força amiga, que é um agente do tipo dispositivo cognitivo (*Cognitive Device Agent*). Além disso, o modelo mostra que a Operação Ofensiva (*Offensive Operation*) é uma das Operações Básicas (*Basic Operation*), além de representar todas as operações componentes da Operação Ofensiva e de operações que são parte dela. O modelo também inclui as relações temporais entre as operações componentes, indicando a ordem temporal em que cada operação ocorre. Para representar essas relações, foi utilizada a representação de Allen [92]. Os conceitos representados no modelo da Figura 24, bem como as descrições até aqui apresentadas atendem aos requisitos funcionais descritos nas questões de competências QC Op1 - Op3, da Tabela 13.

Depois de definir algumas situações técnicas e o modelo ontológico de uma Operação Ofensiva, o próximo passo foi estabelecer as cenas e situações táticas que compõem o Cenário Tático Operacional em que o rádio cognitivo está inserido. Essa atividade complementa o módulo CROMO-MOS, com o propósito de descrever um cenário operacional composto por cenas e situações que podem ser detectadas pelo rádio cognitivo. Essa descrição considera aspectos técnicos da abordagem aplicada à classificação de estratégias de modulação [96], bem como aspectos táticos relacionados a uma Operação Militar Ofensiva [35].

No contexto de operações militares ofensivas, as cenas e situações também podem influenciar a decisão do rádio cognitivo quanto ao seu modo de operação. Para ajudar na identificação dessas situações, resumimos em duas tabelas - Tabela 15 e Tabela 16 - um conjunto de possíveis situações e cenas nesse tipo de cenário, com base na doutrina militar. Por exemplo, quando o comandante, por meio do Sistema C2, determina que um *Rádio Cognitivo* participe de uma operação de marcha para o combate (*Movement to Contact*), essa participação caracteriza uma *Situação* chamada de *situação de marcha para o combate (Movement to Contact)* (linha 2 da Tabela 15). No mesmo contexto, é possível distinguir dois tipos diferentes de cena baseados na variação da distância entre o rádio cognitivo (*Cognitive Radio*) e o elemento operacional inimigo (*Enemy Operational Element*) durante uma janela de tempo específica de observação. A Tabela 16 compara os valores de distância

Tabela 15 – Situações Táticas, com base na participação do rádio cognitivo nas Operações

Tipos de Situação	Proposições (Propositions)
Reunião de Preparação (<i>Assembly Area</i>)	<i>participaDe(Rádio Cognitivo, Reunião de Preparação)</i>
Marcha para o Combate (<i>Movement to contact</i>)	<i>participaDe(Rádio Cognitivo, Marcha para o Combate)</i>
Controle de Tráfego (<i>Traffic Control</i>)	<i>participaDe(Rádio Cognitivo, Controle de Tráfego)</i>
Reconhecimento Inicial (<i>Initial Reconnaissance</i>)	<i>participaDe(Rádio Cognitivo, Reconhecimento Inicial)</i>
Ataque Coordenado (<i>Organized offensive</i>)	<i>participaDe(Rádio Cognitivo, Ataque Coordenado)</i>
Aproveitamento do êxito e Persseguiação (<i>Exploitation and Follow up</i>)	<i>participaDe(Rádio Cognitivo, Aproveitamento do êxito e Persseguiação)</i>

Tabela 16 – Cenas táticas baseadas nas variações de distância.

Tipos de Cena	Proposições (Propositions)
Afastamento (<i>Fall Back</i>)	$(distance_{t2} > distance_{t1})$
Aproximação (<i>Approach</i>)	$(distance_{t2} < distance_{t1})$

entre o rádio cognitivo e o elemento operacional inimigo em dois momentos distintos: $distance_{t1}$ no primeiro momento e $distance_{t2}$ no segundo momento. A variação desses valores indica se houve um movimento de aproximação (*Approach*) ou afastamento (*Fall Back*), quando a distância entre eles diminui ou aumenta, respectivamente. Essas variações refletem conteúdos proposicionais diferentes (*Propositional Content*) para cada tipo de cena. A ontologia CROMO descreve cenas e situações que podem ser detectadas por meio do uso do rádio cognitivo durante uma operação ofensiva. O rádio processa informações provenientes do ambiente eletromagnético e dos sistemas de comando e controle para identificar os cenários operacionais que podem levar à tomada de decisão. O fragmento CROMO da Figura 25 descreve um cenário operacional e seus subtipos.

Um cenário operacional pode ser uma combinação de cenas e/ou situações operacionais, semelhante ao que foi apresentado na Figura 18, Seção 3. Essas cenas ou situações podem ser atômicas ou complexas. Em outras palavras, de acordo com o modelo apresentado na Figura 25, um cenário operacional representa uma grande combinação de diferentes cenas e situações operacionais em sua composição. Além disso, um cenário operacional pode ser tático (*tactical scenario*), lidando com aspectos de operação militar, ou técnico (*technical scenario*), levando em conta os dados do espectro eletromagnético.

O cenário técnico está relacionado às características técnicas percebidas pelo rádio cognitivo, incluindo níveis de ruído, intensidade dos sinais transmitidos ou recebidos,

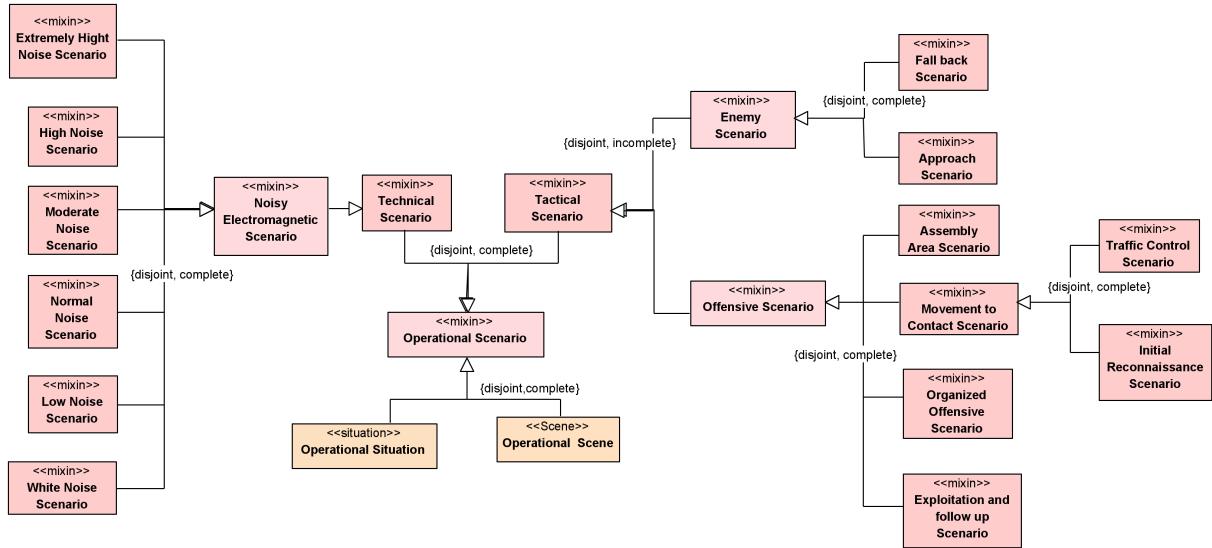


Figura 25 – Fragmento CROMO-MOS, que representa cenários técnicos e táticos em operações militares ofensivas.

faixas de frequência, entre outras propriedades. Entretanto, considerando o escopo de representação definido, somente foram representadas situações baseadas no nível da relação sinal/ruído do sinal recebido, previstos no trabalho de Moura e Galdino[96]. Desta maneira, temos apenas o cenário eletromagnético ruidoso (*Noisy Electromagnetic Scenario*), baseado no contexto descrito na Figura 23 e nas situações da Tabela 14. Diferentes cenários eletromagnéticos ruidosos podem ser identificados com base nos valores percebidos, como o cenário de ruído branco (*White Noise Scenario*) e o cenário de baixo ruído (*Low Noise Scenario*).

Por outro lado, o *cenário tático* pode ser um *cenário inimigo* (*Enemy Scenario*), ou um *cenário ofensivo* (*Offensive Scenario*), relacionados a *Operação Ofensiva* (Offensive Operation). Esses tipos de cenários táticos são disjuntos, pois representam diferentes critérios de observação. Os Cenários Inimigos estão associados à distância entre o Elemento Operacional Inimigo e o Rádio Cognitivo. Há dois tipos de cenários inimigos: o cenários de aproximação e o de afastamento (*Approach and Fall Back*), conforme as variações de distância descritas na Tabela 16. Esse tipo de característica indica que uma *cena* é o conceito adequado para representar esse tipo de cenário, pois observa variações em uma janela de tempo.

O Cenário Ofensivo está associado à participação do Rádio Cognitivo na Operação Ofensiva e às operações que a compõem. Assim, existem diferentes tipos de *Cenários Ofensivos*; levando em conta as operações, podemos ter os cenários *Assembly Area*, *Movement To Contact*, *Organized Offensive* e *Exploitation and Follow-up*, conforme as situações descritas na Tabela 15. Além disso, durante a situação de marcha para o combate (*Movement To Contact*), ainda poderíamos ter dois cenários: o cenário de controle de tráfego (*Traffic*

Control Scenario) e o cenário de reconhecimento inicial (*Initial Reconnaissance Scenario*). Os conceitos representados no modelo da Figura 25, bem como as descrições até aqui apresentadas atendem aos requisitos funcionais descritos nas questões de competências QC MOS1 e MOS2, da Tabela 13.

4.2.3 Modelagem dos Componentes e Ações do Cenário Operacional (CROMO-SCA)

As comunicações militares conectam as forças armadas em todos os níveis. Apesar da complexidade envolvida, há uma convenção de comunicação entre todos os escalões durante situações de guerra. De acordo com os manuais de doutrina [39] [5], cada escalão se comunica diretamente apenas com seus subordinados e superiores imediatos, utilizando canais específicos para esse fim. Em outras palavras, não é possível falar diretamente com um nível acima ou abaixo na cadeia de comando de um determinado escalão. Esse padrão de comunicação está presente em todos os níveis de comando e subordinação. Dessa forma, se representarmos um segmento da realidade de um determinado escalão que demonstre esse padrão de comunicação, essa representação pode servir como referência para a aplicação em outros níveis hierárquicos.

Para demonstrar esse padrão de comunicação, apresentamos três escalões em um escopo hipotético e reduzido: *Sub-Unidade*, *Pelotão* e *Grupos de Combate*, com relações de subordinação entre eles. De acordo com o documento normativo do Exército Brasileiro [35], cada operação militar é planejada previamente, e seus combatentes são organizados em grupos (Organizações Militares (OM)), respeitando as regras hierárquicas dos escalões. Como mostrado na Figura 26, uma *SubUnidade* tem *Pelotões* como escalões subordinados, enquanto cada *Pelotão* tem *Grupos de Combate* como escalões subordinados. Há comunicações verticais entre cada *Comandante de Escalão*.

O esquema de comunicação apresentado na Figura 26 nos permite examinar como as conexões podem ocorrer entre rádios cognitivos em seus respectivos escalões. Por exemplo, o Comandante de Pelotão transmite para o Comandante de Subunidade por meio do canal de comunicação *C1*, enquanto o Comandante de Subunidade transmite para o Comandante de Pelotão pelo canal *C2*. Do mesmo modo, as comunicações ocorrem entre o Comandante de Pelotão e o Comandante de Grupo de Combate, por meio dos canais *C3* e *C4*.

Diferentes tipos de dados, como voz, texto, imagens ou streaming de vídeo, podem ser transmitidos e recebidos pelos canais de comunicação *C1*, *C2*, *C3* e *C4*. Para cada escalão de comando apresentado como um triângulo, o modo de comunicação é idêntico, ou seja, os modos de comunicação no canal *C1* entre o *Comandante de Pelotão* e o *Comandante de SubUnidade* é o mesmo para todos os outros *Comandantes de Pelotão*.

Até agora, a ontologia CROMO representou atividades de planejamento, possíveis

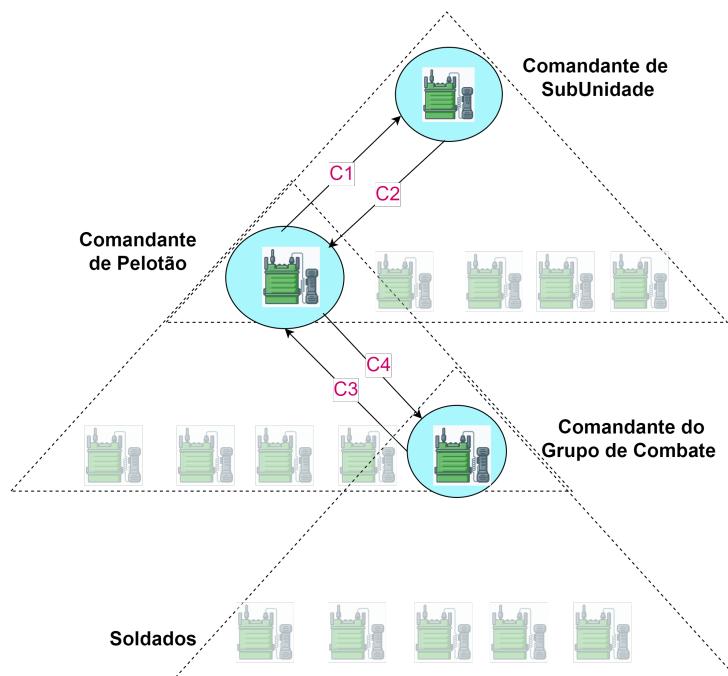


Figura 26 – Escopo da Comunicação.

cenários operacionais representados por cenas e situações percebidas pelos rádios. Nesta etapa, as conexões e canais de comunicação utilizados em situações de guerra também serão incluídos no contexto da CROMO. O propósito deste terceiro módulo de CROMO (CROMO-SCA) é descrever os elementos (entidades e objetos) que fazem parte do cenário operacional militar, considerando suas características, papéis e relações. Em outras palavras, representar os *Substantials*, suas características e relações, que compõem cenas e situações desse cenário. Além disso, identificar as ações e atividades e os agentes que as executam. Como ponto central nesse contexto, temos os rádios cognitivos e seus usuários, conectando-se com seus superiores (*Higher*) ou subordinados (*Lower*), recebendo informações sobre a relação sinal-ruído da conexão, constituindo elementos do cenário técnico. Temos ainda o rádio se comunicando com os sistemas C2, que descrevem informações sobre operações militares em andamento (operações ofensivas) e os elementos participantes, compondo o cenário operacional. É em torno dessas questões que emergiram as questões de competência apresentadas na Tabela 13, que visam descrever e organizar os conceitos e relações que são os requisitos funcionais do módulo CROMO-SCA.

O modelo descrito na Figura 27 tem como objetivo atender aos requisitos funcionais, alinhando conceitos de domínio com conceitos da UFO. O rádio cognitivo é um agente do tipo dispositivo cognitivo (*Cognitive Device Agent*) e possui um atributo (*Quality*) referente ao valor da relação sinal/ruído (*SNR*) de seu rádio subordinado e um modo de operação (*Operation Mode*) (*Mode*), indicando como o rádio funcionará durante a transmissão (por exemplo, modo UHF com potência de 0,5W ou modo silencioso). Além disso, a estratégia de modulação (*Modulation Strategy (Mode)*) representa a estratégia

selecionada para modular o sinal enviado (ex: *QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)* e *BPSK (Binary Phase Shift Keying)*).

O compromisso do rádio cognitivo (*Internal Commitment*) está associado à atividade de configuração de comunicações padrão, que faz parte do plano de comunicações padrão (*Standard Communication Plan*), conforme mostrado na Figura 22. O modelo da Figura 27

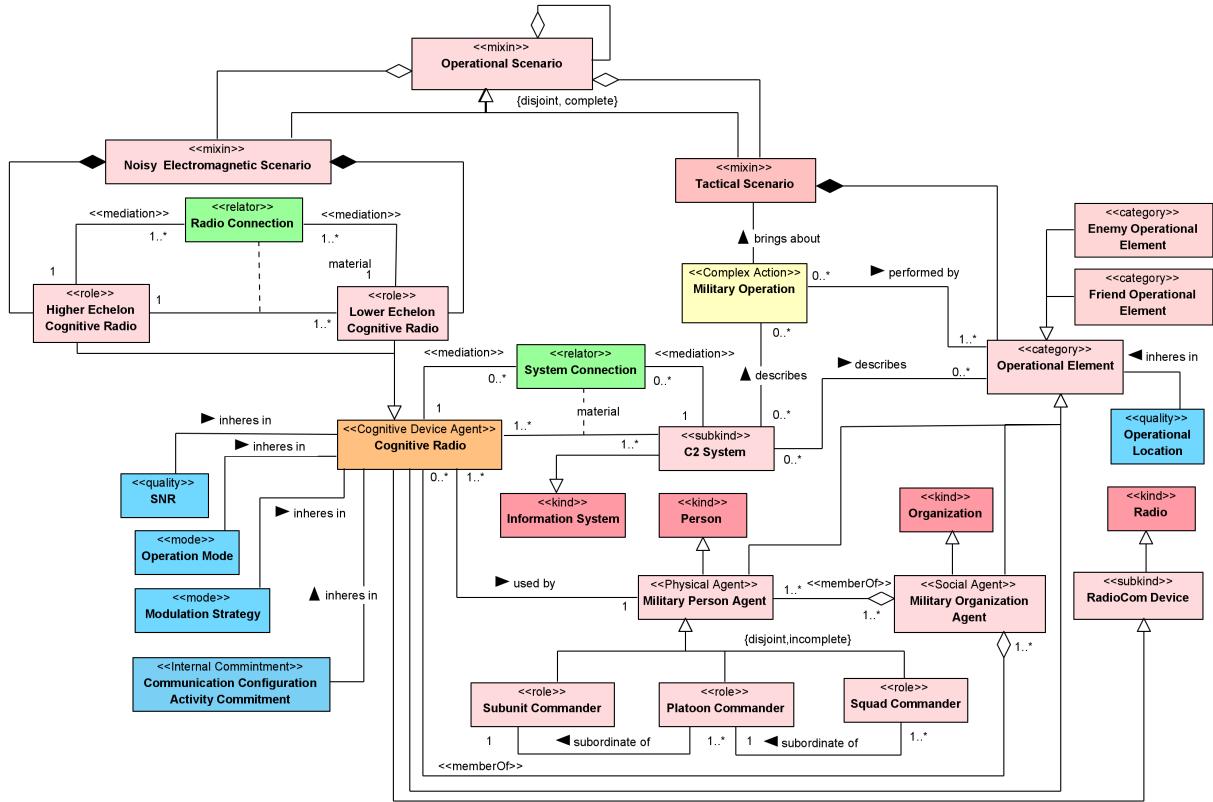


Figura 27 – Fragmento CROMO-SCA representando componentes e ações do cenário de operação militar ofensiva

também apresenta a conexão de rádio (*Radio Connection*), que representa a comunicação entre rádios que assumem o papel de equipamento do comandante (*Higher Echelon Cognitive Radio*), quando o rádio é usado por um Comandante de escalão superior e o papel de equipamento do subordinado (*Lower Echelon Cognitive Radio*) quando o rádio for usado por um Comandante subordinado. Um agente militar pessoal (*Military Person Agent*), que também é um agente físico (*Physical Agent*), é um possível usuário de um rádio e pode assumir as funções hierárquicas de *Comandante de SubUnidade*, *Comandante de Pelotão* ou *Comandante de Grupo de Combate*. O papel (*Role*) de *Comandante do Grupo de Combate* é subordinado ao papel de *Comandante de Pelotão*, que é subordinado a um papel de *Comandante de SubUnidade*.

A conexão com o sistema (*System Connection*), também representada por um (*Relator*), ilustra a conexão entre o rádio cognitivo (*Cognitive Radio*) e o sistema de C2 (*C2 System*). O sistema C2 descreve as operações militares (*Military Operations*) e os

elementos operacionais (*Operational Elements*), como por exemplo, os agentes do tipo Organização Militar (*Military Organization Agents*), e os próprios rádios cognitivos. A característica comum dos Elementos Operacionais é o Local Operacional, e esses elementos são caracterizados como elemento amigo *Friend* ou inimigo *Foe*. O conceito de sistema C2 é um *SubKind* do *Kind Information System*. O agente militar pessoal é um membro de uma Organização Militar. Os conceitos de Cenário Tático (*tactical Scenario*) e o Cenário Técnico (*Technical Scenario*) são subtipos do *Cenário Operacional* (*Operational Scenario*). Os componentes do Cenário Tático são a operação militar e os elementos operacionais (*Military Operation and the Operational Elements*). Os componentes do cenário eletromagnético ruidoso (*Noisy Electromagnetic Scenario*) incluem os rádios cognitivos que participam da conexão de rádio (*Radio Connection (Relator)*), bem como os elementos operacionais, as organizações militares, os rádios cognitivos e os agentes militares pessoais *Military Person Agent*, que executam a Operação Militar. A execução dessa operação provoca um novo cenário tático.

Reafirma-se que um cenário operacional pode ser composto por uma cena ou situação operacional, que pode ser simples ou complexa. Portanto, um cenário operacional pode variar desde uma única situação até uma combinação de várias cenas e situações técnicas ou táticas.

A Figura 28 mostra as ações realizadas pelo rádio cognitivo durante sua operação. Essas ações resultam dos compromissos (*Communication Configuration Activity Commitment*) inseridos no rádio, alinhados com os conteúdos proposicionais (*Propositional Contents*) e as regras de comunicações padrão (*Standard Communication Rules*) das atividades de configuração de comunicações padrão (*Standard Communication Configuration Activity*). Estes compromissos do rádio cognitivo fazem com que uma ação complexa de comunicação cognitiva seja executada (*Cognitive-Communication Execution*). Esta ação é composta pela atividade de sensoriamento do ambiente eletromagnético (*Environment Sensing Activity*) e pela atividade de configuração (*Cognitive Radio Configuration Activity*), que executa ações que definem o modo de operação e a estratégia de modulação para cada cenário operacional.

Em relação à ordem temporal, durante a execução cognitiva de comunicações, o processo começa com o Rádio Cognitivo executando a atividade de Detecção de Ambiente (*Environment Sensing Activity*), a qual é responsável por detectar o ambiente e coletar informações técnicas e táticas do cenário operacional. Em seguida, o Rádio Cognitivo executa a atividade de Configuração (*Cognitive Radio Configuration Activity*), que é especializada em duas outras atividades: a definição do modo de operação (*Set Operation Mode Activity*) e a definição da estratégia de modulação (*Set Modulation Strategy Activity*). Vale ressaltar que a atividade de definição da Estratégia de Modulação depende da atividade de definição do Modo de Operação, uma vez que para um determinado modo de

operação, a atividade de configuração da estratégia de modulação poderá estar desabilitada. Consolidando os conceitos apresentados nas Figuras 27 e 28, a Figura 29 retrata um

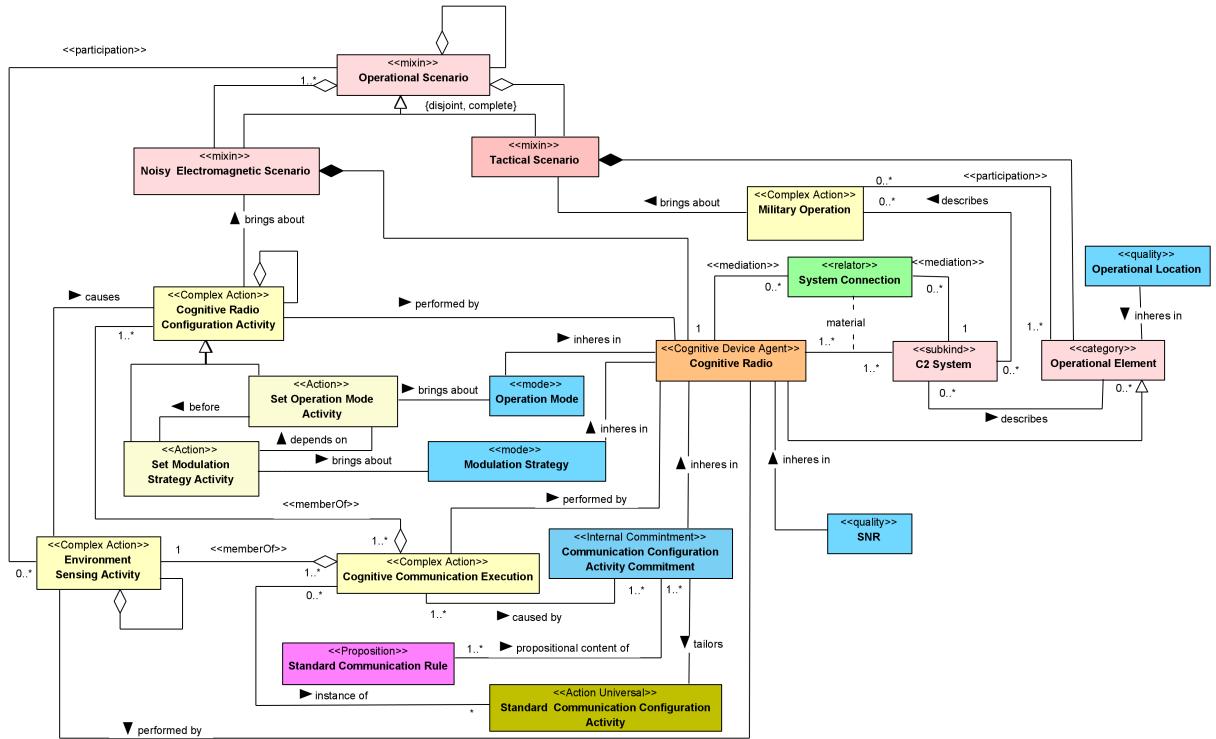


Figura 28 – Fragmento CROMO-SCA representando ações realizadas por um Rádio Cognitivo em Ambiente de Comunicação Militar.

fragmento de CROMO com todos os construtos do rádio cognitivo, envolvidos em um ambiente de comunicações militares.

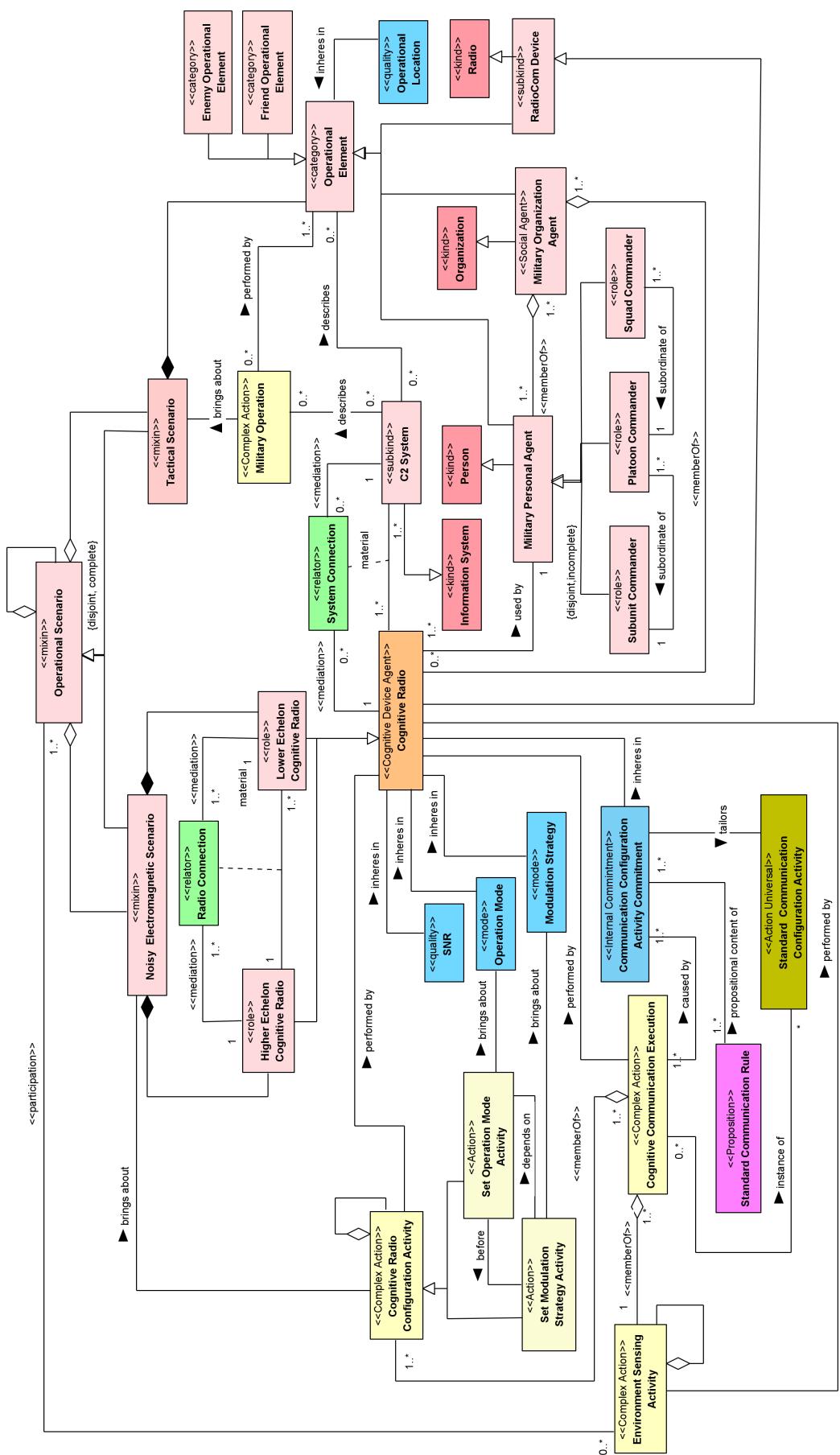


Figura 29 – Cenário Operacional, Rádio Cognitivo e suas ações em uma Comunicação Militar.

Este modelo descreve todo o ciclo cognitivo do rádio, que começa com a detecção e identificação de cenas e situações que fazem parte dos cenários técnicos e táticos representados no modelo. Além disso, as conexões entre os rádios e entre o rádio e o sistema de comando e controle são apresentadas, permitindo compreender o papel que cada rádio, usuário, ou sistema podem assumir em uma conexão de rádio. O modelo também representa os elementos operacionais, que podem ser organizações militares, militares ou dispositivos de comunicação por rádio, e que participam, intencionalmente ou não, das operações militares, todos eles são descritos pelo sistema C2.

As ações realizadas pelo Rádio Cognitivo resultam do *Compromisso de Atividade de Configuração de Comunicação*, que se alinha com a Atividade de Configuração de Comunicação Padrão planejada e seu conteúdo proposicional, aliado às regras de configuração padrão. Desse modo, as ações do Rádio Cognitivo realizam atividades de configuração, definindo o modo de operação e a estratégia de modulação para cada cenário operacional. Os conceitos representados no modelo da Figura 29, bem como as descrições até aqui apresentadas atendem aos requisitos funcionais descritos nas questões de competências (QC SCA1, SCA2 e SCA3, da Tabela 13).

5 ESTUDO DE CASO E PROVA DE CONCEITO

Nesta seção, apresentamos um estudo de caso que mostra um exemplo de uso da CROMO no contexto da modelagem conceitual, e uma prova de conceito empregando a CROMO no apoio ao desenvolvimento de um sistema para rádios cognitivos. No estudo de caso, a CROMO foi utilizada para modelar um processo de tomada de decisão em um cenário hipotético de comunicações militares. Na seção seguinte, a CROMO é utilizada em um experimento que simulou uma situação próxima da realidade de uma operação ofensiva, com alguns rádios participantes, incluindo um equipamento inimigo. Nesse caso, a CROMO serviu como ferramenta para a elaboração do modelo conceitual das aplicações, bem como foi a base para a construção de uma linguagem específica de domínio (*CROMO-RSL*).

5.1 Exemplo de uso da CROMO

Nesta seção, os construtos da CROMO são utilizados na modelagem conceitual de cenários táticos e técnicos e seus componentes, considerando cenas e situações para retratar fatias do mundo real em uma operação ofensiva. O fragmento CROMO na Figura 30 ilustra o contexto de planejamento de uma operação militar, onde um plano de operações e o plano de comunicações com alguns de seus objetos e relações do mundo real são representados. O modelo apresenta os elementos do mundo real envolvidos na preparação da operação e do plano de comunicações (*Communications Plan*) para uma operação militar chamada de operação Alfa (*Operation Alpha*). Nesse contexto, o Oficial de Comunicações (*Communications Officer*) John e o Oficial de Operações (*Operations Officer*) Robert, que participarão da Operação Alpha, expressam suas intenções de criar os respectivos planos de operações e comunicações (*Alpha Operation Plan Creation and Alpha Operation Communication Plan*), respectivamente. O Plano de Operação Alfa (*Alpha Operation Plan*) é elaborado com base no manual doutrinário EB70-MC-10.223, enquanto o Plano de Comunicação da Operação Alpha (*Communication Plan Alpha Operation*) é descrito com base no Manual EB70-MS-10.2.46, na Nota Doutrinária 04/2021 e no trabalho de Moura et al. (2011). Esses três documentos também descrevem as regras operacionais (*Alpha Operation Communication Rules C1_1*).

Durante a Operação Alpha, os rádios do Comandante de Pelotão e do Comandante de Subunidade (*Platoon Commander CR e SubUnit Commander CR*) participam da operação Alfa executando ações. Em particular, o rádio do comandante de Pelotão executa a atividade de configuração de modo de operação na operação ofensiva (Offensive Operation Mode Set Activity).

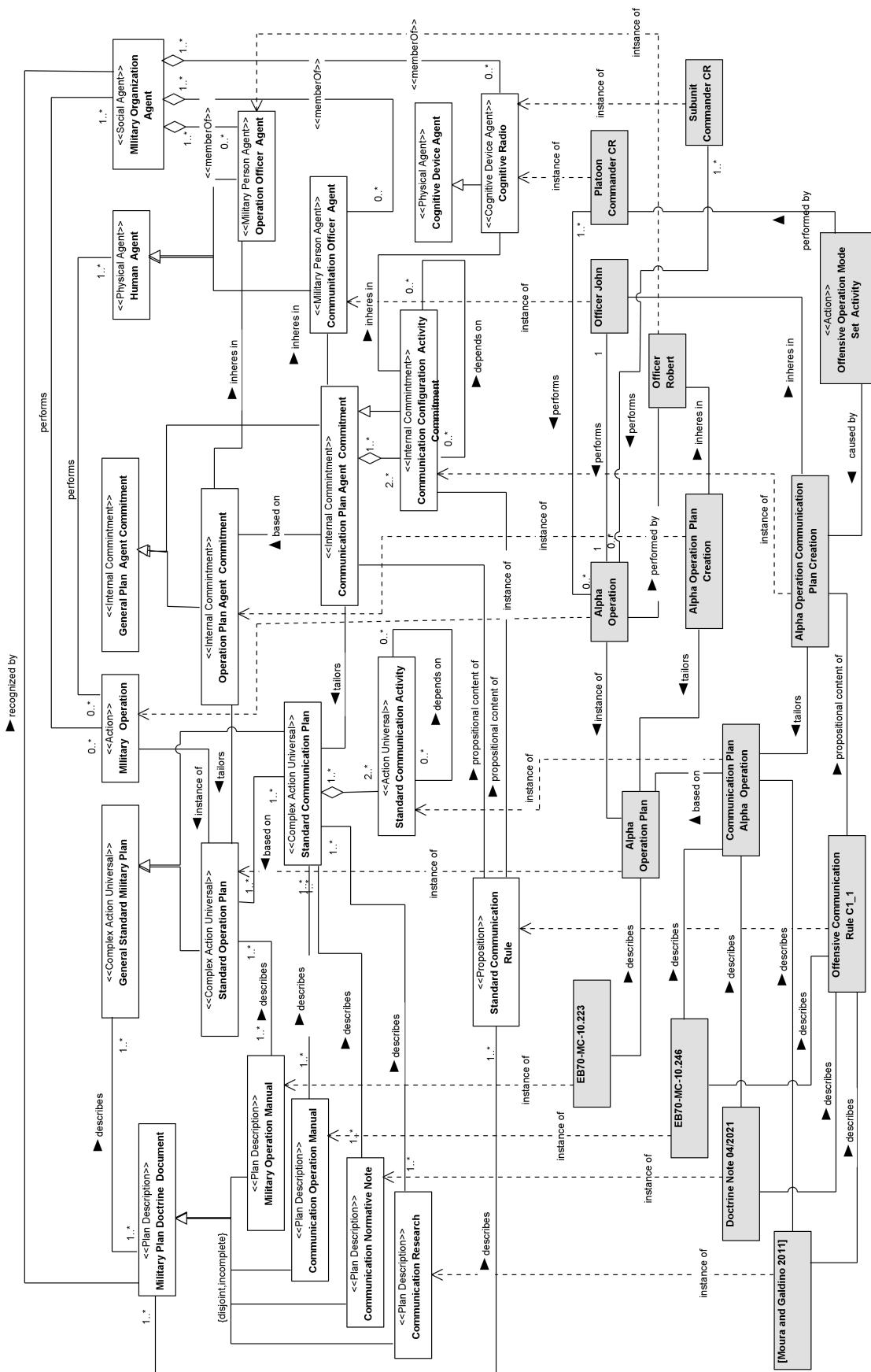


Figura 30 – Fragmento CROMO em um Planejamento de Operacional de Comunicações Militares

Tabela 17 – Estratégias de modulação aplicadas à Situações Ruidosas detectadas

Tipos de Situação	Proposições (Proposition)	Estratégias de Modulação
<i>Extremely High Noise</i>	$SNR \leq 7 dB$	não transmitir (<i>Do not Tx</i>)
<i>High Noise</i>	$7 dB > SNR \leq 9dB$	<i>BPSK</i>
<i>Normal Noise</i>	$9dB > SNR \leq 12 dB$	<i>QPSK</i>
<i>Moderate Noise</i>	$12 dB > SNR \leq 15 dB$	<i>8-QAM</i>
<i>Low Noise</i>	$15 dB > SNR \leq 21 dB$	<i>16-QAM</i>
<i>White Noise</i>	$SNR > 21dB$	<i>32-QAM</i>

No que se refere às regras operacionais de comunicações (*Alpha Operation Communication Rules C1_1*), uma parcela delas é baseada no trabalho de Moura e Galdino[96], que propõem um comportamento adaptativo definindo uma estratégia de modulação adequada de acordo com a *SNR* recebida do receptor. A Tabela 17 mostra as possíveis estratégias de modulação para cada tipo de situação eletromagnética ruidosa (*Noisy Electromagnetic Situation Type*).

Os rádios instanciados durante o planejamento da operação são os mesmos representados no modelo apresentado na Figura 31. Este modelo representa uma simples identificação de algumas situações eletromagnéticas ruidosas (*Noisy Electromagnetic Situations*) do mundo real com base nos dados detectados por duas instâncias de *rádio cognitivo* (CR), considerando valores de *SNR*. O rádio cognitivo do comandante de Subunidade (*Subunit Commander CR*) e o rádio cognitivo do comandante de Pelotão (*Platoon Commander CR*) detectaram situações distintas. De acordo com a Tabela 17, a situação de ruído branco *White Noise Situation* ocorre quando o valor *SNR* é maior que 21dB (*Proposição P_White_Noise*), e uma situação de alto ruído *High Noise Situation* ocorre quando o valor *SNR* é maior que 7 dB e menor ou igual a 9 dB (*Proposição P_Hight_Noise*). Em ambos os casos, os valores no modelo (25dB e 8 dB) satisfazem as respectivas proposições. Com base nessas situações, o rádio cognitivo definirá suas *Estratégias de Modulação*.

A Figura 32 apresenta duas tabelas de decisão (A e B) que representam um conjunto de regras de comunicação aplicáveis ao contexto operacional representado pela ontologia CROMO. Cada regra indica como cada rádio deve operar durante a transmissão do sinal. Neste contexto, considerando uma combinação possível de cenários e o papel do rádio no momento da transmissão, um modo de operação é definido. Neste estudo de caso, os modos de operação possíveis são 1 - *Modo Silêncio (Silent Mode)*; 2- *UHF 0.5W*; 3- *UHF 3W*; 4- *FD VHF 10W*; e 5- *FD UHF 3W*. Esses modos determinam a faixa de frequência na qual o rádio deve operar e o nível de potência do sinal a ser transmitido deve ter. Além disso, os modos 3 e 4 possuem a sigla *FD*, que indica que o sinal é transmitido utilizando *iband full duplex technology*, uma tecnologia onde os sinais são transmitidos e recebidos na mesma frequência, inserindo um nível de segurança adicional na camada física de comunicações.

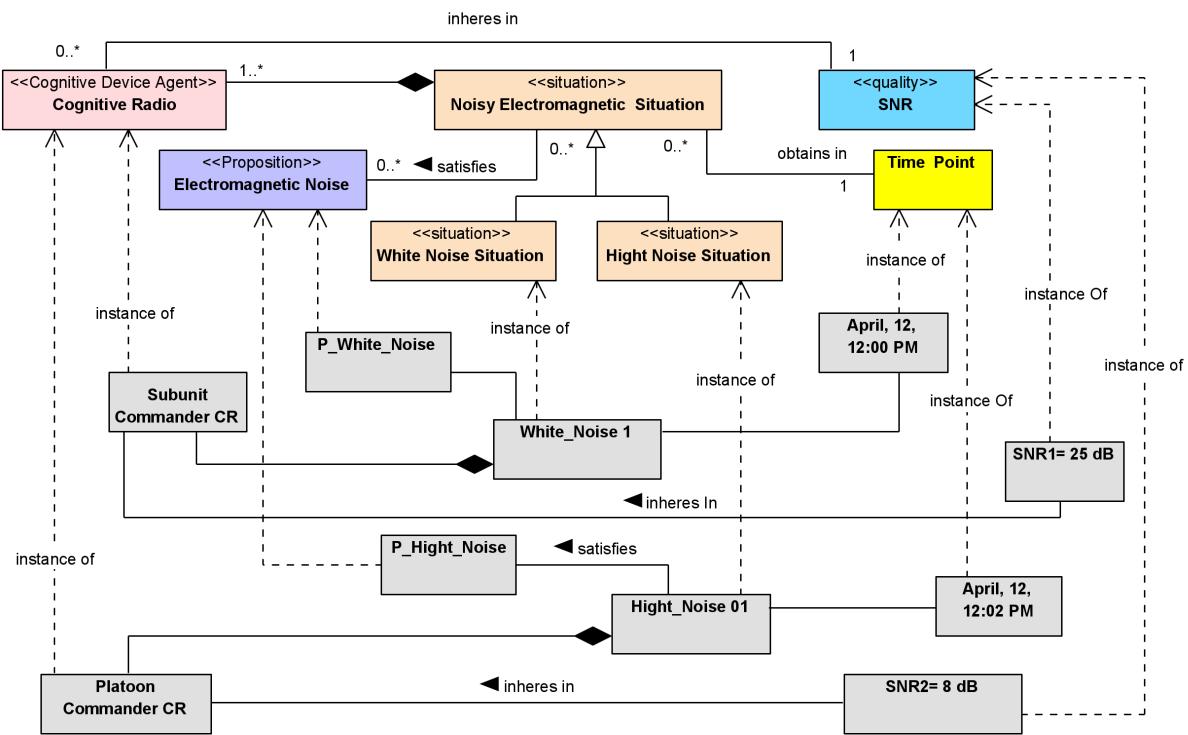


Figura 31 – Situação Eletromagnética Ruidosa (*Noisy Electromagnetic Situation*) do mundo real.

em redes de Rádio. No *modo silêncio* (*Silent Mode*), o rádio não deve transmitir nenhum sinal.

Por exemplo, na Figura 30, a *Regra de Comunicação Ofensiva C1_1* define como o rádio cognitivo do Comandante de Pelotão (*Platoon Commander CR*) deve operar (modo de operação) no canal C1, com base nas Cenas e Situações apresentadas na Figura 32/ (Tabelas A e B). Considerando que o indicativo dessa regra (*C1_1*) se refere ao modo de operação e a estratégia de modulação a ser aplicada ao canal C1, seguindo as condições da primeira linha da Tabela A, da Figura 32. Nesta linha da Tabela, observa-se que a situação ofensiva detectada pode ser uma reunião de preparação ou uma marcha para o combate e as cenas inimigas não são consideradas. Assim, com base nessas condições iniciais, o modo de operação para o canal C1, bem como para os demais canais, é o modo 1 (Modo Silêncio). Ainda na mesma linha, considerando que no modo silêncio não há nenhum tipo de transmissão de sinal, a estratégia de modulação para o canal C1 está desabilitada e a indicação é não transmitir.

A Regra de Comunicação Ofensiva *C1_1* é aplicada durante a atividade de configuração de modo de operação na operação ofensiva, executada pelo rádio cognitivo do Comandante de Pelotão (*Platoon Commander CR*). De fato, cada linha na *TABELA A* representa uma regra particular para definir modos de operação em cada canal de comunicação (C1-C4) no instante da transmissão, levando em conta uma possível *Situação*

Ofensiva, Cenas Inimigas (em algumas regras), o papel que um rádio pode assumir e, consequentemente, o canal a ser usado. A configuração da estratégia de modulação depende da atividade de configuração do modo de operação. Assim, as regras vinculadas à estratégia de modulação (Tabela B) só se aplicarão a alguns dos modos de operação previamente definidos nas regras apresentadas na Tabela A.

Situações Ofensivas		Cenas Inimigas		Modos de Operação				Estratégias de Modulação					
				Papel do Radio na Tx		Papel do Radio na Rx		Higher Radio		Lower Radio			
				Afastamento	Aproximação	C2	C4	C1	C3	C2	C4		
Reunião de Preparação ou Marcha para o Combate	-	1				Não Tx							
Controle de Tráfego ou Reconhecimento Inicial	X			1		2		Não Tx		Estratégia segundo Tabela B			
		X				1				Não Tx			
Ataque Coordenado				4	3	4	3	Estratégia segundo Tabela B					
Aproveitamento do êxito e Perseguição	-			4	5	4	5						

Modos de Operação: 1- Modo Silêncio (Silent Mode) ; 2- UHF 0,5 w; 3- UHF 3W; 4- FD VHF 10 w; 5- FD UHF 3W.

Tabela A		
Proposições	Tipos de Situação	Estratégias de Modulação
SNR <= 7 dB	Extremely High Noise	Não transmitir
7 dB > SNR <= 9dB	High Noise	BPSK
9dB > SNR <= 12 dB	Normal Noise	QPSK
12 dB > SNR <= 15 dB	Moderate Noise	8-QAM
15 dB > SNR <= 21 dB	Low Noise	16-QAM
SNR > 21dB	White Noise	32-QAM

Ao assumir um papel e antes de realizar uma transmissão, o **Rádio Cognitivo** identifica o canal a ser utilizado (C1-C4), considerando qual é o **papel do destinatário**.

Figura 32 – Regras de configuração em um Cenário Operacional hipotético.

A Figura 33 apresenta um diagrama de objetos onde um conjunto de instâncias são representadas estereotipadas com os conceitos da CROMO a que elas estão associadas. Neste modelo é possível notar que o Rádio Cognitivo assume o papel do rádio *A1* do Comandante de Pelotão (*Platoon Commander Radio A1*) para se comunicar com o rádio *D1* do Comandante de Subunidade (*SubUnit Commander Radio D1*). Ambos os rádios participam, juntamente com um rádio inimigo (*Enemy Radio 2*) da *Operação Militar de controle de tráfego Alfa* (*Traffic Control Alpha*).

Neste exemplo, os rádios dos comandantes fazem parte da situação de controle de tráfego Alfa (*Traffic Control Situation Alpha*), enquanto o rádio inimigo faz parte de uma cena de aproximação (*Approach Enemy Scene*). A cena e a situação descritas são parte cenário tático Alfa (*Tactical Scenario Alpha*). Já o rádio do Comandante de Pelotão (*Platoon Commander Radio A1*) e o rádio *D1* do Comandante de Subunidade, com suas propriedades de sensoreamento do espectro eletromagnético (SNR) compõe o cenário ruidoso Alfa, um cenário técnico.

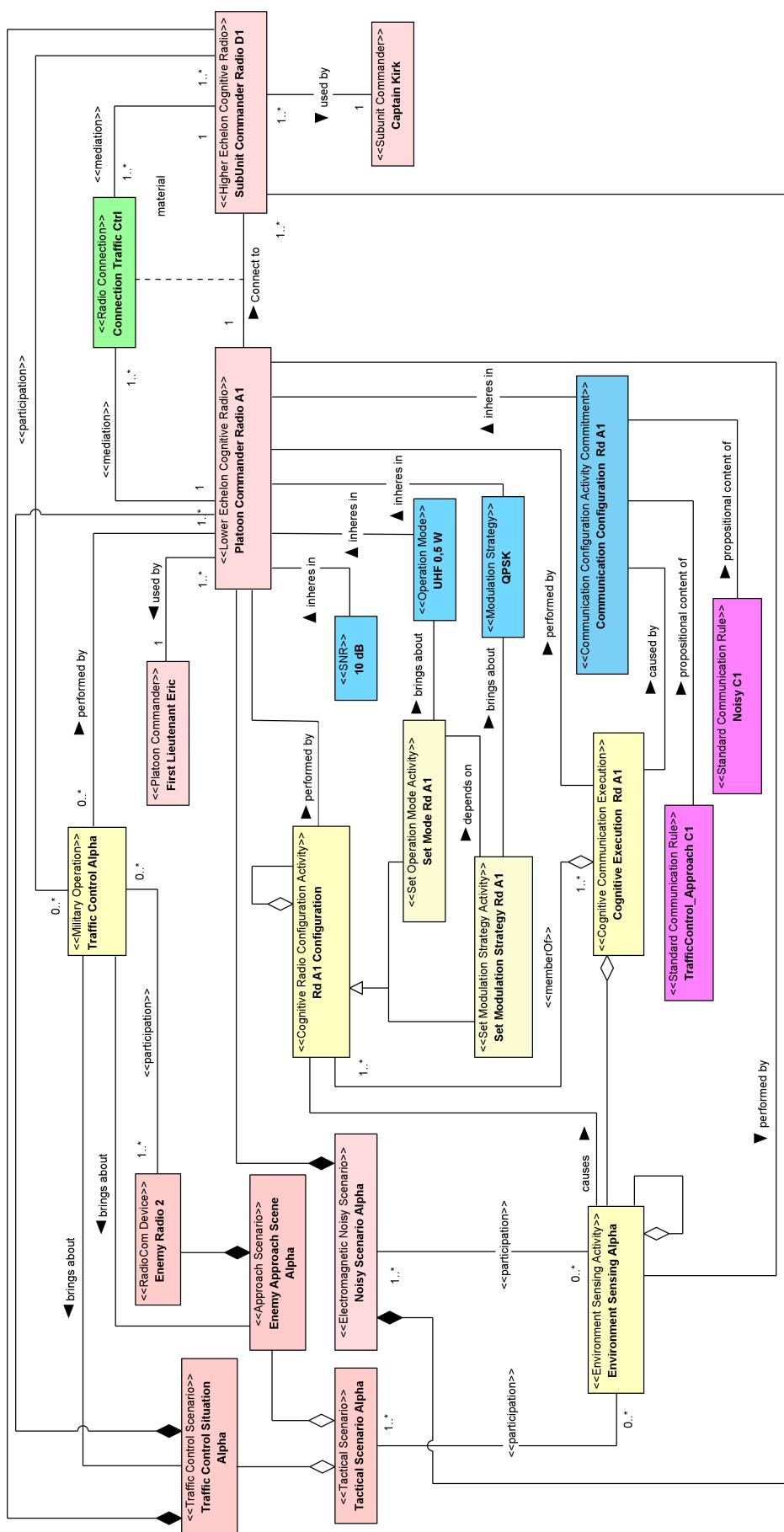


Figura 33 – Exemplo de uso da CROMO na modelagem conceitual de um Cenário Operacional

A Figura 33 também instancia as atividades de sensoreamento e configuração. A atividade de sensoreamento Alfa detecta os cenários técnico e táticos, enquanto a atividade de configuração do rádio A1 (*Rd A1 Configuration*), por meio das atividades de configuração do modo de operação do radio A1 (*Set Mode Rd A1*) e da atividade de configuração da estratégia de modulação (*Set Modulation Strategy A1*), executa a configuração final do rádio *A1*. Conforme a Tabela A, o modo de operação definido para a cena e situação apresentadas nesse cenário seria o modo silêncio (*Silent Mode*), condição onde o rádio não deve transmitir (*Do not Tx*) e a configuração da estratégia de modulação não é necessária. Desta forma, neste exemplo, as regras de configuração da estratégia de modulação (Tabela B) não seriam aplicadas.

5.2 Aplicação da CROMO em um Sistema Simulado de Comunicação Cognitiva

Este experimento tem por finalidade empregar a ontologia CROMO como modelo conceitual em uma ambiente de simulação, no contexto de uma operação ofensiva. Os constructos doutrinários da ontologia CROMO serviram de base para o desenvolvimento de uma aplicação que emula o ciclo de cognição do rádio e permite que regras sejam inseridas no rádio alterando e determinando seu comportamento. Foram aplicadas técnicas de engenharia dirigida a modelos para desenvolver uma linguagem específica de domínio chamada CROMO-RSL (*CROMO Rule Specification Language*). Essa linguagem tem a finalidade de simplificar a inserção de regras no rádio, considerando que o usuário que realiza essa atividade no mundo real (Oficial de Comunicações) não possui conhecimentos de linguagens de programação e não dispõe de muito tempo para esta atividade, em virtude da agilidade que a operação militar requer. Essas regras, alinhadas com a doutrina militar e definições técnicas, passaram a determinar o funcionamento do rádio.

Este experimento complementa nosso trabalho prévio [103] onde foi elaborado um modelo simplificado de um rádio cognitivo hipotético, incluindo algumas características do equipamento ou detectáveis pelo mesmo, e um modelo que estrutura a construção de regras que agem sobre o comportamento do rádio. No mesmo trabalho, por meio de um processo de transformação do modelo de regras em texto, empregando técnicas de MDE (*M2T*), foi desenvolvida uma linguagem específica de domínio (*DSL*) aplicada à construção das regras do rádio. Contudo, naquela oportunidade não foram empregadas ontologias na modelagem conceitual, pois não fazia parte do escopo daquele trabalho, um contexto com questões doutrinárias e técnicas mais próximas da realidade de uma operação militar real, considerando outros rádios e forças inimigas. Desta maneira, espera-se com este experimento harmonizar os conceitos da CROMO com o desenvolvimento de uma aplicação apoiada por um linguagem específica de domínio, cujo vocabulário seja compatível com os

conceitos preconizados naquela ontologia.

Esta seção está organizada da seguinte maneira: inicialmente será apresentada uma visão contextual do que se pretende representar; em seguida, será apresentado um modelo em *BPMN* que descreve a aplicação de simulação dos ambientes sensoreados, do comportamento do rádio e da geração de regras; na etapa seguinte, a CROMO será aplicada na elaboração da modelagem conceitual do cenário; e por fim, será apresentada a *DSL* desenvolvida e como o código gerado a partir dela é empregado na aplicação que simula o comportamento do rádio.

5.2.1 Visão Geral do Contexto

Este estudo de caso representa uma ambiente simulado no escopo de um *Sistema de Comunicações de Comando*, em uma *Operação Ofensiva* e suas operações componentes. Como integrantes deste cenário e participantes da Operação, temos os *Rádios* de um *Comandante de Subunidade* (*B1 - Bravo 1*), de um *Comandante de Pelotão* (*D1-Delta 1*), de um *Comandante de Grupo de Combate* (*C1- Charlie 1*) e um equipamento rádio inimigo. Esses elementos estão distribuídos em um espaço de coordenadas geográficas reais de um Centro de Instrução militar. Trata-se de um recorte reduzido da realidade, compatível com o escopo da CROMO. Cabe salientar que em um cenário de guerra real o número de participantes e elementos a serem observados seria maior.

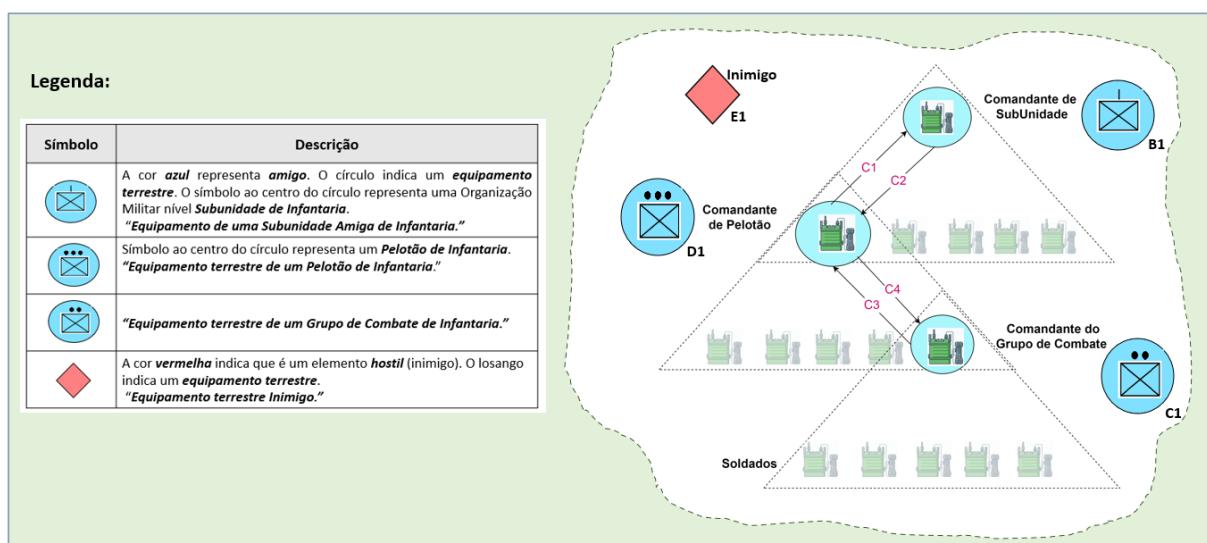


Figura 34 – Elementos integrantes de um cenário operacional hipotético.

A Figura 34 se utiliza da simbologia preconizada na doutrina militar [104], representada em forma de legenda, para a descrição inicial do cenário em questão. O ponto central do experimento é modelar o processo de tomada de decisão do rádio cognitivo do *Comandante de Pelotão*, que antes de realizar uma transmissão, precisa definir qual *Modo de Operação* ele deve empregar e qual a *Estratégia de Modulação* a ser aplicada. Essa decisão

deve ser tomada para os canais de comunicação que ele utiliza na transmissão, ou seja, os canais $C1$ e $C4$, por meio dos quais ele se comunica com seu superior (*Comandante de Subunidade*) e com seu *Comandante de Grupo de Combate* subordinado, respectivamente.

A Figura 35 apresenta uma visão do contexto em um instante no tempo, em outras palavras, uma situação complexa com os elementos participantes dispostos em um espaço geográfico, durante uma operação de controle de tráfego (*Traffic Control*). Observa-se que os elementos amigos se encontram em uma região demarcada com pontilhado, representando uma área amiga, bem como o inimigo está posicionado em uma região sinalizada, que representa área sob domínio inimigo. A mesma Figura 35 indica ainda as conexões entre os elementos amigos, sinalizando a relação sinal *SNR* ruído presente nessas conexões, e aponta a distância entre o inimigo e o rádio do *Comandante de Pelotão*, fator que influencia na detecção de cenas de aproximação ou afastamento do inimigo. Também é representada a linha de contato (Lc), que representa o limite entre as áreas amigas e inimigas. Os limites da Lc acabam sendo ultrapassados durante a operação de Ataque Coordenado (*Organized Offensive*) que é parte da Operação Ofensiva.

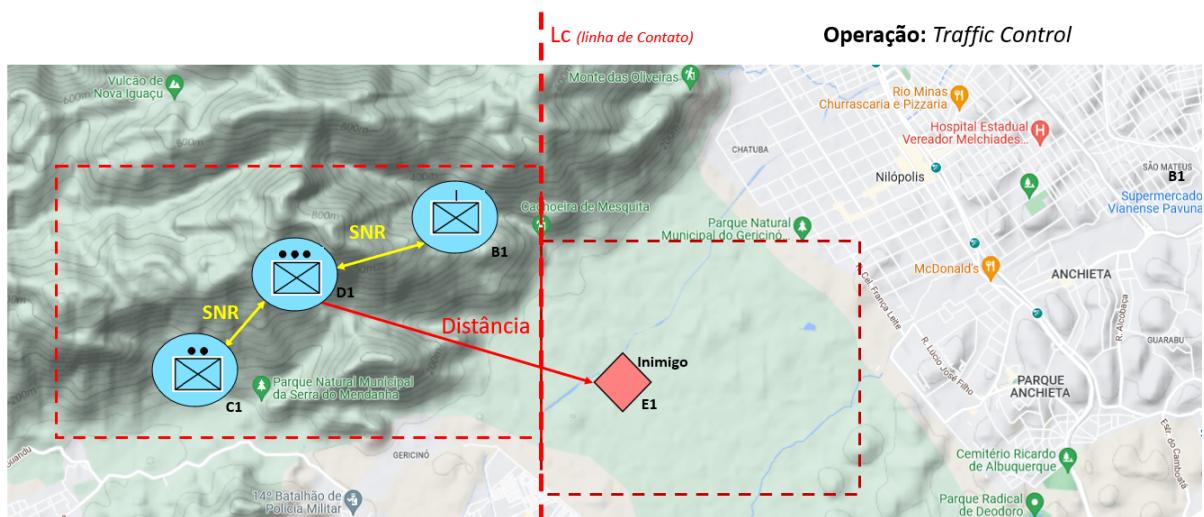


Figura 35 – Contexto Geral do Cenário Operacional hipotético.

Já a Figura 36 apresenta o mesmo cenário em um momento diferente, constituindo uma outra *Situação Complexa*, onde os participantes assumem um outro posicionamento provocando mudanças nos valores de *SNR* e de distância. Neste novo momento, participam da *Operação de Marcha para o Combate* (*Movement to Contact*). Situações como estas ou a combinação delas compõe cenas são os elementos fundamentais para a tomada de decisão no rádio, definido seu funcionamento em cada um desses instantes. Em um ambiente real, essas informações seriam obtidas pelo rádio cognitivo de duas maneiras, os dados de *SNR* seriam recebidos via canal de controle dos rádios a ele conectados, e as informações referentes a todos os elementos participantes e à operação que se encontra em andamento seriam obtidas por meio de uma conexão com o sistema de comando e

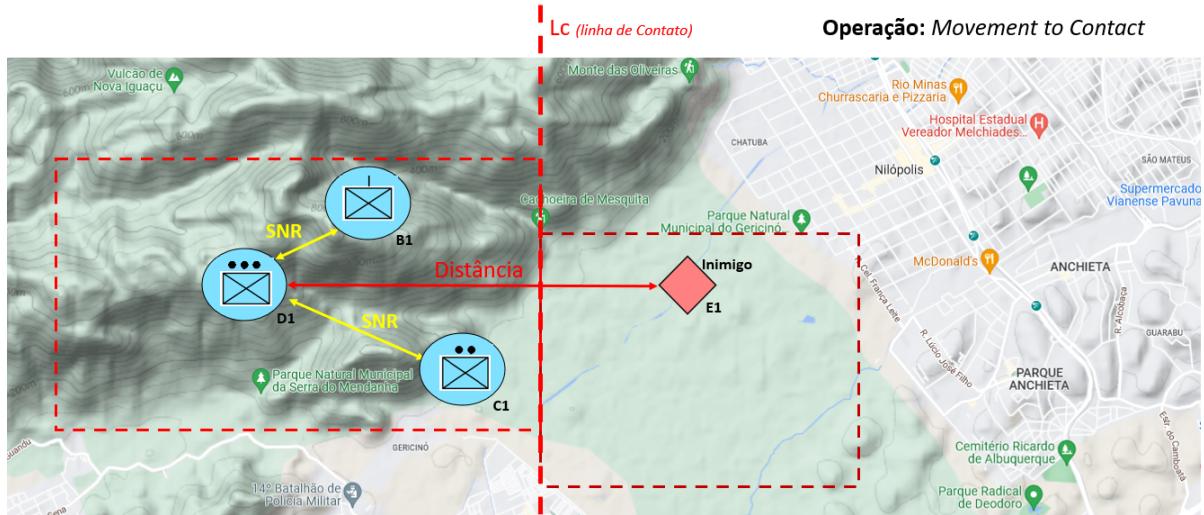


Figura 36 – Variações no Contexto Geral do Cenário Operacional hipotético.

controle. As informações acerca das operações previstas e seus horários também poderiam estar registradas em uma base de dados interna do equipamento como parte dos planos de operações e comunicações que o equipamento estaria inserido. Mas, nesse caso, essas informações poderiam estar sujeitas a mudanças.

5.2.2 Descrição da Aplicação

Neste cenário, foram desenvolvidos três conjuntos de aplicações para simular o ambiente operacional. A primeira delas trata da parte do planejamento operacional do rádio e a construção de regras que determinarão o comportamento do rádio. A segunda simula a leitura dos dados do ambiente eletromagnético e dos sistemas C², a identificação de cenas e situações e a aplicação das regras definidas na aplicação de planejamento. Já a terceira aplicação gera dados simulando informações provenientes dos rádios e dos sistemas de C² produzindo arquivos de *log* com essas informações. A Figura 37 apresenta, por meio de um diagrama BPMN, uma visão geral dessas atividades e a relação entre elas de maneira processual.

A partir da elaboração do plano de comunicações (*passo 1*), um conjunto de regras é definido, para cada rádio, em forma de uma tabela de decisão indicando os modos de operação e as estratégias de modulação que deverão ser aplicadas a partir da identificação de cenas e situações. Estas tabelas estão alinhadas com as definições técnicas e doutrinárias previstas para o tipo de operação, já abordadas na Figura 32 em suas tabelas de decisão (A e B). A partir dessas tabelas, o Oficial de Comunicações utilizando uma linguagem específica de domínio CROMO-RSL codifica essas regras (*passo 2*). As regras escritas são convertidas em código na linguagem Java (*passo 3*) e são transferidas para a aplicação (*passo 4*) que realiza a identificação das cenas e situações, que serão atualizadas no repositório de regras (*passo 5*) para serem aplicadas. Uma vez atualizadas as regras o rádio já pode iniciar a

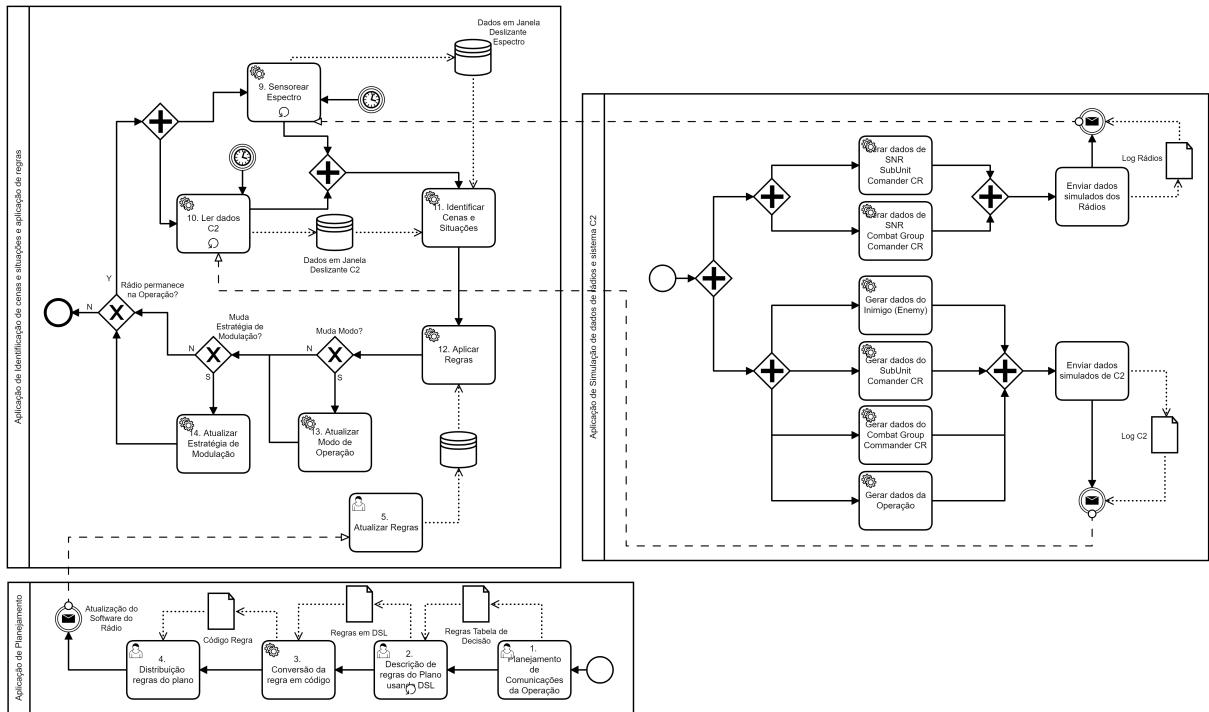


Figura 37 – Visão Geral do Processo de Simulação.

leituras dos dados do ambiente, que foram simulados pela aplicação de dados do rádio e do sistema C². Este módulo de simulação é composto por um conjunto de seis atividades. Duas dessas atividades geram dados que, em uma situação real, seriam obtidos via canal de controle dos rádios envolvidos, usando como meio de entrada o espectro eletromagnético. A Figura 38 mostra um recorte desses dados simulados, onde é possível observar a data e a hora em que foram gerados, o indicativo do rádio que está no papel de decisor, indicado por *Delta 1* e sua função, indicada por *PlatCmt*. Em seguida, o indicativo do rádio do *Comandante de Subunidade*, indicado por *Bravo 1*, sua função, indicada por *SubCmt*, seguido do valor de *SNR* percebido por este ao receber o sinal de Delta 1. Por fim, o indicativo do rádio do *Comandante do Grupo de Combate* (C1), indicado por *Charlie 1*, sua função indicada por *GCCmt*, seguido também do valor de *SNR* percebido por este ao receber o sinal de Delta 1. Os valores de *SNR* oscilam em uma faixa entre 0dB e aproximadamente 30 dB, simulando valores aproximados compatíveis com o ambiente.

Ainda neste bloco de aplicação, um conjunto de quatro outras atividades geram os dados que seriam produzidos pelo sistema de comando e controle. A Figura 39 descreve um recorte destes dados, onde são apresentados indicadores de identificação como no *log* dos rádios, seguidos pela localização geográfica, por meio de valores de longitude e latitude para cada um dos elementos classificados como força amiga, bem como a identificação do inimigo com *Echo 1* e a indicação de que se trata de uma equipamento de guerra eletrônica (*WarefareDevice*), seguido de sua localização geográfica. Por fim, é apresentado o registro da operação em andamento. A cada linha há uma variação aleatória de cada um

Data Hora	D1	B1	SNR em dB	C1	SNR em dB
2022-11-02T09:51:13.161	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	0.9174963	Charlie_1 CGCmd	28.0825043
2022-11-02T09:51:13.179	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	1.1227388	Charlie_1 CGCmd	27.8772621
2022-11-02T09:51:13.197	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	1.3528094	Charlie_1 CGCmd	27.6471901
2022-11-02T09:51:13.216	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	1.9120055	Charlie_1 CGCmd	27.0879936
2022-11-02T09:51:13.235	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	2.0530000	Charlie_1 CGCmd	26.9470005
2022-11-02T09:51:13.253	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	2.4684200	Charlie_1 CGCmd	26.5315800
2022-11-02T09:51:13.271	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	3.2533419	Charlie_1 CGCmd	25.7466583
2022-11-02T09:51:13.289	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	3.6161859	Charlie_1 CGCmd	25.3838139
2022-11-02T09:51:13.307	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	4.3186541	Charlie_1 CGCmd	24.6813469
2022-11-02T09:51:13.325	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	4.3921137	Charlie_1 CGCmd	24.6078873
2022-11-02T09:51:13.344	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	5.0263705	Charlie_1 CGCmd	23.9736290
2022-11-02T09:51:13.362	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	5.1989269	Charlie_1 CGCmd	23.8010731
2022-11-02T09:51:13.380	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	5.7943392	Charlie_1 CGCmd	23.2056618
2022-11-02T09:51:13.398	Delta_1 PlatCmd	Bravo_1 SubCmd	6.6552019	Charlie_1 CGCmd	22.3447990

Figura 38 – Fragmento do Log de Dados simulados oriundos do Espectro Eletromagnético.

D1	B1	Operação
Delta_1 PlatCmd -22.829216 -43.427529	Echo1 WarfareDevice -22.822940 -43.503383	Bravo_1 SubCmd -22.829749 -43.452421 Charlie_1 CGCmd -22.811345 -43.427324 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.822133 -43.426266	Echo1 WarfareDevice -22.816493 -43.485640	Bravo_1 SubCmd -22.826746 -43.452599 Charlie_1 CGCmd -22.828186 -43.435748 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.814227 -43.423908	Echo1 WarfareDevice -22.794632 -43.534887	Bravo_1 SubCmd -22.819100 -43.442155 Charlie_1 CGCmd -22.834265 -43.438232 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.821176 -43.455256	Echo1 WarfareDevice -22.808032 -43.489032	Bravo_1 SubCmd -22.831094 -43.433956 Charlie_1 CGCmd -22.836050 -43.452797 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.831024 -43.429932	Echo1 WarfareDevice -22.797910 -43.539251	Bravo_1 SubCmd -22.836406 -43.446314 Charlie_1 CGCmd -22.811059 -43.449477 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.811134 -43.454625	Echo1 WarfareDevice -22.786142 -43.499729	Bravo_1 SubCmd -22.832734 -43.449884 Charlie_1 CGCmd -22.821424 -43.445198 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.832560 -43.426433	Echo1 WarfareDevice -22.787988 -43.522282	Bravo_1 SubCmd -22.828184 -43.436182 Charlie_1 CGCmd -22.811395 -43.455457 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.827931 -43.423418	Echo1 WarfareDevice -22.809761 -43.500227	Bravo_1 SubCmd -22.824988 -43.432823 Charlie_1 CGCmd -22.814407 -43.423965 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.813109 -43.430537	Echo1 WarfareDevice -22.789537 -43.468190	Bravo_1 SubCmd -22.816723 -43.422008 Charlie_1 CGCmd -22.827529 -43.448479 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.810958 -43.448980	Echo1 WarfareDevice -22.798219 -43.474948	Bravo_1 SubCmd -22.835859 -43.447543 Charlie_1 CGCmd -22.816236 -43.442541 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.834392 -43.434771	Echo1 WarfareDevice -22.825340 -43.512947	Bravo_1 SubCmd -22.807737 -43.427299 Charlie_1 CGCmd -22.830896 -43.455330 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.828119 -43.448783	Echo1 WarfareDevice -22.795168 -43.525320	Bravo_1 SubCmd -22.820680 -43.428288 Charlie_1 CGCmd -22.825431 -43.456880 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.836373 -43.449267	Echo1 WarfareDevice -22.796653 -43.519628	Bravo_1 SubCmd -22.828061 -43.430119 Charlie_1 CGCmd -22.812378 -43.418219 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.833408 -43.452411	Echo1 WarfareDevice -22.799410 -43.491648	Bravo_1 SubCmd -22.807139 -43.452158 Charlie_1 CGCmd -22.817668 -43.471511 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.832376 -43.448383	Echo1 WarfareDevice -22.792593 -43.503454	Bravo_1 SubCmd -22.819511 -43.442204 Charlie_1 CGCmd -22.818997 -43.452598 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.821093 -43.452255	Echo1 WarfareDevice -22.786242 -43.520064	Bravo_1 SubCmd -22.807824 -43.446082 Charlie_1 CGCmd -22.822676 -43.420979 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.828482 -43.423143	Echo1 WarfareDevice -22.810583 -43.478657	Bravo_1 SubCmd -22.809935 -43.456832 Charlie_1 CGCmd -22.808197 -43.428288 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.814757 -43.436908	Echo1 WarfareDevice -22.829183 -43.524180	Bravo_1 SubCmd -22.835160 -43.429879 Charlie_1 CGCmd -22.815083 -43.430542 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.814550 -43.446079	Echo1 WarfareDevice -22.809150 -43.538473	Bravo_1 SubCmd -22.814796 -43.445416 Charlie_1 CGCmd -22.828354 -43.424400 assemblyArea
Delta_1 PlatCmd -22.835585 -43.435593	Echo1 WarfareDevice -22.807589 -43.512960	Bravo_1 SubCmd -22.818806 -43.430629 Charlie_1 CGCmd -22.812168 -43.426073 assemblyArea

Figura 39 – Fragmento do Log de Dados simulados oriundos do Sistema c².

dos elementos participantes da operação em andamento. Os elementos amigos variam suas posições dentro da faixa de latitude e longitude delimitada pela área amiga no mapa. Já o inimigo varia seu posicionamento de forma aleatória na área classificada como inimiga. Essas variações ocorrem durante todas as operações que compõem uma operação offensiva. As operações variam na sequência em que elas ocorreriam numa operação offensiva real, ou seja, iniciam com a reunião preparatória (*Assembly Area*), seguindo para a marcha para o Combate (*Movement to Contact*) e daí por diante. Entretanto, a partir da operação de Ataque coordenado (*Organized Offensive*) as variações de posições dos elementos amigos passam a ocorrer também na área inimiga e vice versa.

Ambos os conjuntos de dados são gravados em arquivos de *log*, conforme os fragmentos apresentados nas Figuras 38 e 39, que serão lidos pela aplicação que simula o rádio.

5.2.3 Modelando o Cenário com a CROMO

Conforme mostra a Figura 40, foi construído um modelo fundamentado nos conceitos da ontologia CROMO, cobrindo todo o contexto do experimento. Conforme foi afirmado anteriormente, o rádio cognitivo do Comandante de Pelotão (*Platoon Cmt CR D1*), um *Cognitive Device Agent*, é o ponto central do modelo, uma vez que este equipamento irá decidir o *modo de operação* e a *estratégia de modulação* a ser aplicada ao realizar uma transmissão nos canais C1 e C4. Desta forma, estas propriedades que sofrem atualizações ao longo da operação são representadas no modelo como *Modes* do equipamento. Além disso, a propriedade que representa o valor de *SNR* detectado nos rádios que participam de cada uma das conexões também está representada no modelo como *Quality*. As conexões estão representadas por meio dos *Relators Radio Connection*, onde a (*Connection D1-B1*) representa a conexão entre o equipamento *Platoon Cmt CR D1* com o equipamento *SubUnit Cmt CR B1*. Do mesmo modo, a (*Connection D1-C1*) representa a conexão entre o equipamento *Platoon Cmt CR D1* com o equipamento *Combat Group Cmt CR C1*. Estas conexões são parte das situações complexas *Noisy Electromagnetic Situation C4* e *C1*, que representam situações referentes aos níveis de *SNR* nas conexões dos canais *C1* e *C4*, respectivamente. Este conjunto de situações especializam um cenário do tipo técnico. O rádio estar setado no canal C1 ou no canal C4, representa situações atômicas que são consideradas na composição do cenário operacional. O elemento operacional inimigo, *Cognitive Device Agent*, representado no modelo por um dispositivo de guerra eletrônica (*Warfare Enemy E1*), participa juntamente com o rádio do comandante de Pelotão (*Platoon Cmt CR D1*) de uma situação de distância de inimigo (*EnemyDistance*) que retrata a distância entre os equipamentos em um momento específico no tempo. As duas situações compõem a cena inimiga (*Enemy Scene E1*), que pode ser especializada em uma cena de aproximação (*Approach*) ou em uma cena de afastamento (*Fall Back*) em função das variações de distância das situações que as compõem. Este tipo de cena especializa um tipo de cenário tático. As situações técnicas juntamente com a cena tática aqui apresentada são partes integrantes do Cenário operacional desse experimento.

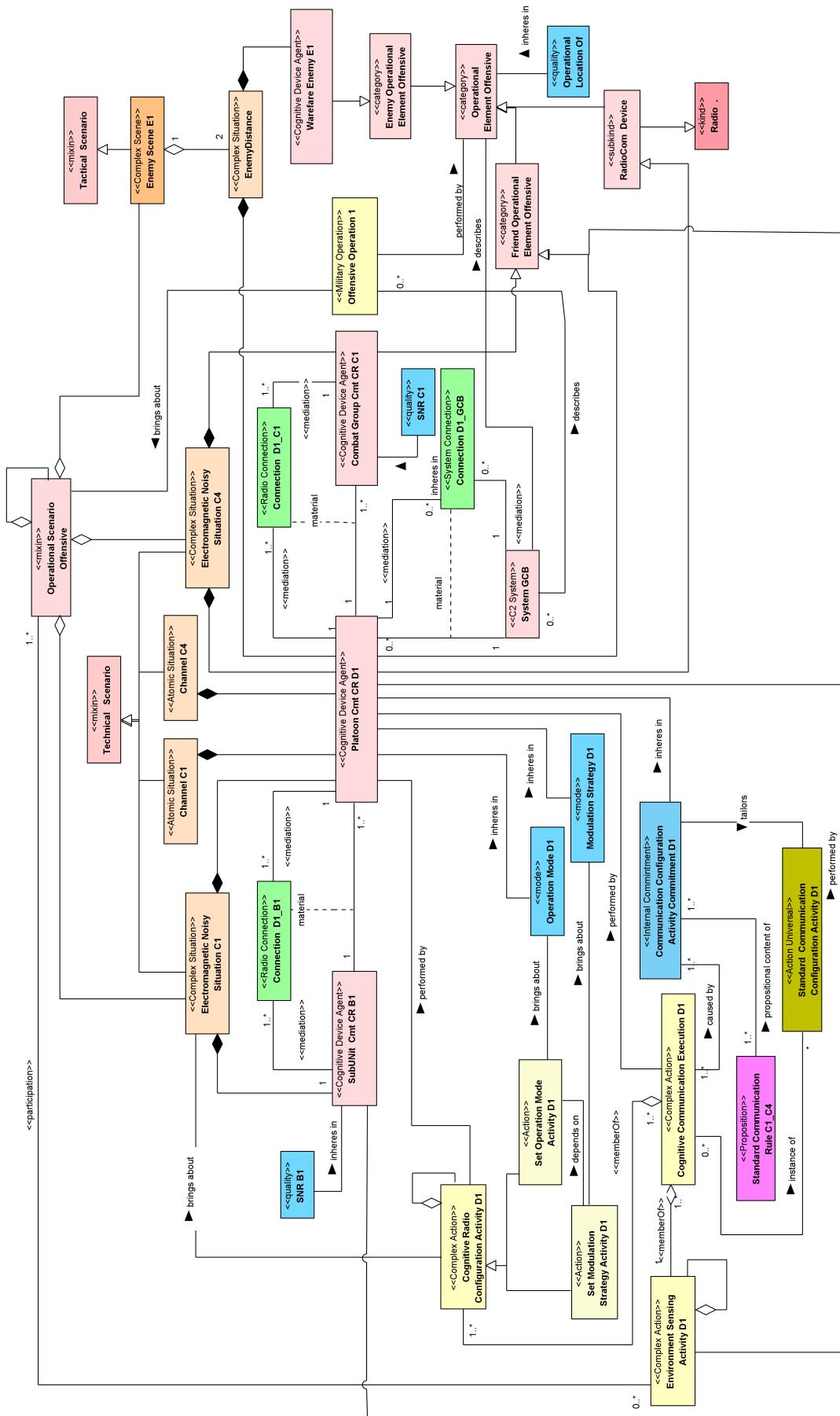


Figura 40 – Modelagem do Cenário Aplicando os Constructos da CROMO.

A representação da conexão entre o *Platoon Cmt CR D1* e o sistema *C² System GCB* é representada pelo *Relator System Connection, Connection D1-GCB*. Neste contexto, o modelo mostra que o sistema *System GCB* descreve a operação ofensiva que está em andamento (*Offensive Operation 1*) bem como todos os elementos operacionais que a executam (*Operational Element Offensive*) sejam eles amigos (*Friend Operational Element Offensive*) ou inimigos (*Enemy Operational Element Offensive*), com suas respectivas localizações (*Operational Location Of*). Ainda no modelo são representadas as ações realizadas pelo *Platoon Cmt CR D1*, que são causadas por seu *Internal Commitment*, o *Communication Configuration Activity Commitment D1*, que tem suas intensões guiadas pelas proposições contidas em *Standard Communication Rules C1-C4*. Estas ações são parte do conjunto de ações de cognição do rádio *D1* (*Cognitive Communication Execution D1*). São ações que vão desde o sensoreamento do ambiente (*Environment Sensing Activity*) onde o *Platoon Cmt CR D1* identifica as cenas e situações que compõem o cenário operacional, até as ações de configuração propriamente ditas, que definem o *Modo de Operação* e a *Estratégia de Modulação*.

5.2.4 Metamodelagem de Regras e Transformações Aplicando MDE

Nesta etapa foi desenvolvido um metamodelo para a estruturação de regras focadas em aspectos técnicos e táticos abordados no contexto das comunicações militares. Essa iniciativa foi motivada pelos modelos baseados em regras de Xu et al.[11] e inspirado nas iniciativas de Costa et al.[23], no trabalho de Horrocks et al.[105], e mais especificamente no trabalho de Teixeira et al.[21] que propôs numa alternativa de transformar regras de negócio modeladas em BPMN em código na linguagem Java, usando técnicas de MDE para criar uma alternativa para os especialistas da área de negócios criarem suas aplicações de forma mais simples e ágil. O objetivo deste metamodelo é servir de base para a elaboração de uma linguagem específica de domínio, chamada *CROMO-RSL*, a fim de oferecer uma alternativa simplificada para a inserção de regras nos rádios cognitivos, no contexto de operações militares, sem a necessidade de ter conhecimentos de programação. Conforme mostra a Figura 41, um conjunto de regras (*ruleSet*) foi elaborado, e pode ser composto por uma única ou muitas regras. Cada regra (*rule*) possui um identificador (*IDENTIFIER*) e uma prioridade. Além disso, cada regra é composta por um único antecedente (*LeftSide*) e um único consequente (*RightSide*). O lado esquerdo da regra é composto por expressões, que podem ser simples (*SimpleExp*) ou compostas (*CompoundExp*). Cada tipo de expressão possui seu(s) operando(s) e operador(es), que podem ser matemáticos, lógicos ou de comparação. Os operandos podem ser atributos ou valores.

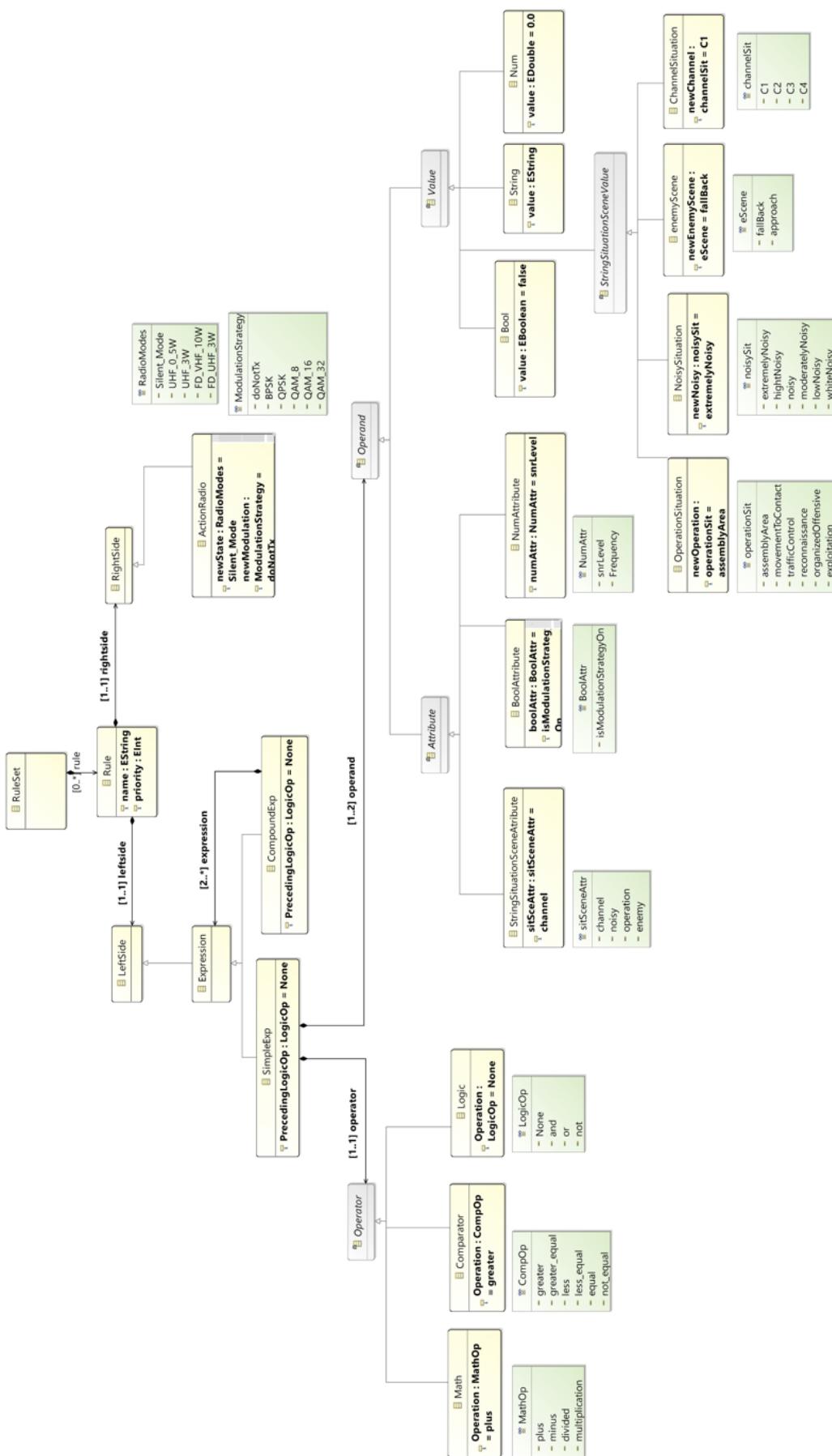


Figura 41 – Metamodelo para Construção de Regras

O metamodelo descrito na Figura 41 representa a maneira como as regras são estruturadas. Com base nesse modelo, foi desenvolvida uma pequena gramática, representada na Figura 42, empregando o formalismo da representação Backus-Naur Form (BNF). A

```

<rule> ::= {"<priority> <leftSide> "→" <rightSide>"}"
<priority> ::= ( [0..1..0]+ )
<rightSide> ::= "Silent_Mode" | "UHF_0_5W" | "UHF_3W" | "FD_VHF_10W" | "FD_UHF_3W"
<leftSide> ::= <expression>
<expression> ::= <simpleExp> | <compoundExp>
<compoundExp> ::= (<expression>, <expression>+)
<simpleExp> ::= <Boolean> <expr>
<Boolean> ::= True | False | ε
<expr> ::= <operand> | "(" <operand> <operator> <operand> ")"
<operand> ::= <value> | <attribute>
<operator> ::= <math> | <logic> | <comparator>
<Math> ::= "+" | "-" | "*" | "/"
<logic> ::= "AND" | "OR" | "NOT" | "NAND" | "NOR" | "NXOR" | "XOR"
<comparator> ::= "=" | "<" | ">" | "!="
<value> ::= <number> | <string> | <boolean> | <stringSituationSceneValue>
<numbers> ::= (^d*[0..9](.\d*[0..9])?S)
<string> ::= ([A-Za-z][A-Za-z0-9]*)
<stringSituationSceneValue> ::= <OperationSituation> | <NoisySituation> | <EnemyScene> | <ChannelSituation>
<OperationSituation> ::= <assemblyArea> | <movementToContact> | <trafficControl> | <reconnaissance> | <organizedOffensive> | <exploitation>
<NoisySituation> ::= <extremelyNoisy> | <highNoisy> | <noisy> | <moderatelyNoisy> | <lowNoisy> | <whiteNoisy>
<EnemyScene> ::= <fallBack> | <approach>
<ChannelSituation> ::= <C1> | <C2> | <C3> | <C4>
<attribute> ::= <numAttribute> | <stringSituationSceneAttribute> | <boolAttribute>
<numAttribute> ::= "SNRLevel" | "Frequency"
<stringSituationSceneAttribute> ::= "channel" | "noisy" | "operation" | "enemy"

```

Figura 42 – Gramática, baseada no Metamodelo

Figura 43 mostra uma tabela de decisão, que representa a estrutura de conhecimento que descreve as regras relacionadas ao canal *C1* que foram simuladas no experimento. A primeira coluna da tabela faz referência às atividades do ciclo cognitivo do rádio onde nas etapas de *observar* e *compreender* estão as cenas e situações identificáveis no modelo, e na etapa *decidir* estão as possibilidades de configuração que o rádio pode assumir. A segunda coluna faz referência à origem dos dados e ao destino das ações, ou seja, onde as cenas e situações são observadas e onde ocorrem as decisões. Em seguida temos os tipos de cenas, situações e o canal e os valores de domínio que eles podem assumir. Além disso, temos os possíveis modos de operação e estratégias de modulação. Nas próximas colunas temos as proposições que representam as regras para cada conjunto de situações e cenas que podem fazer parte do cenário e são consideradas nas decisões. Conforme está assinalado na Figura 43, a proposição P-C1.1 indica que para uma situação em que o rádio esteja participando de uma operação *Assembly Area* ou *Movement To Contact* e o canal de comunicação é o canal C1, as cenas inimigas *Enemy Scene* não são consideradas e o Modo de Operação deve ser o *Silent Mode*. E ainda, neste caso a estratégia de modulação fica desabilitada, uma vez que no modo *Silent Mode* não há transmissão.

Da mesma forma, a Figura 44 mostra uma tabela de decisão, que representa a

Ciclo	Origem	Situação/Cena	Domínio	Proposições C1				
				P_C1.1	P_C1.2	P_C1.3	P_C1.4	P_C1.5
Observar E compreender	C2 System	Enemy Scene	Fall Back	--			--	--
			Approach	--			--	--
		Offensive Situation	Assembly Area or Movement to contact					
			Traffic Control or Initial reconnaissance					
			Organized offensive					
			Exploitation and Follow Up					
		Rádio Cognitivo	Radio Channel	C1				
		1 - Silent Mode						
Decidir	Rádio Cognitivo	Operation Mode	2 - UHF 0,5 w					
			3- UHF 3W					
			4- FD VHF 10 w					
			5- FD UHF 3W.					
			ON					
		Modulation Strategy	OFF					

Figura 43 – Proposições para o modo de operação do canal C1

Ciclo	Origem	Situação/Cena	Domínio	Proposições C4				
				P_C4.1	P_C4.2	P_C4.3	P_C4.4	P_C4.5
Observar E compreender	C2 System	Enemy Scene	Fall Back	--			--	--
			Approach	--			--	--
		Offensive Situation	Assembly Area or Movement to contact					
			Traffic Control or Initial reconnaissance					
			Organized offensive					
			Exploitation and Follow Up					
		Rádio Cognitivo	Radio Channel	C4				
		1 - Silent Mode						
Decidir	Rádio Cognitivo	Operation Mode	2 - UHF 0,5 w					
			3- UHF 3W					
			4- FD VHF 10 w					
			5- FD UHF 3W.					
			ON					
		Modulation Strategy	OFF					

Figura 44 – Proposições para o modo de operação do canal C4

estrutura de conhecimento que descreve as regras relacionadas ao canal *C4*. Neste caso, a proposição P-C4.4 indica que para uma situação em que o rádio esteja participando de uma operação ofensiva (*Organized Offensive*) e o canal de comunicação é o canal C4, as cenas inimigas *Enemy Scene* também não são consideradas e o Modo de Operação deve ser o *UHF 3W*. E ainda, neste caso a estratégia de modulação fica Habilitada, uma vez que no modo *UHF 3W* há transmissão de sinal.

Diante disso, a Figura 45 mostra uma tabela de decisão, que representa a estrutura de conhecimento que descreve as regras relacionadas a todos os canais no que tange à identificação de situações eletromagnéticas ruidosas (Noisy Electromagnetic Situation). Para cada situação identificada a tabela indica a estratégia adequada. No caso da Proposição P3, caso a (Electromagnetic Noisy Situation) seja *Noisy*, a estratégia de modulação a ser

Ciclo	Origem	Situação/Cena	Domínio	Proposições C1 -C4					
				P1	P2	P3	P4	P5	P6
Observar E compreender	Espectro Eletromagnético	Noisy Situation	Extremely Noisy						
			High Noisy						
			Noisy						
			Moderately Noisy						
			Low Noisy						
			White Noisy						
Decidir	Rádio Cognitivo	Modulation Strategy	ON						
			Do not Tx						
			BPSK						
			QPSK						
			8-QAM						
			16-QAM						
			32-QAM						

Figura 45 – Proposições para as estratégias de modulação dos canais C1-C4

aplicada será a *QPSK*.

```
RuleSet{
    Rule 'rule_test1' {
        priority = 1
        rule = [(channel= C1 ) or (channel = C4) and [(operation = assemblyArea) or (operation = movementToContact)]]--> Silent_Mode
    },
    Rule 'rule_test2'{
        priority = 2
        rule = [(channel = C4)and [(operation = trafficControl) or
    ],
    Rule 'rule_test3'{
        priority = 3
        rule = [(channel = C1) and (enemy = fallBack) and [(operation = exploitation) or (operation = organizedOffensive) or (operation = reconnaissance) or (operation = trafficControl)]]-->UHF_0_5W
    },
    Rule 'rule_test4'{
        priority = 4
        rule = [(channel=C1) and (enemy = approach) and [(operation = assemblyArea) or (operation = movementToContact)]] -->Silent_Mode
    },
    Rule 'rule_test5'{
```

Figura 46 – Recorte de CROMO-RSL

A *CROMO-RSL* possibilita que o usuário instancie as regras dos rádios sem precisar conhecer nenhuma linguagem de programação, escrevendo as regras de uma maneira simples. A Figura 46 mostra um fragmento de código demonstrando a descrição de regras utilizando a CROMO-RSL. Cabe salientar, que além da linguagem possuir uma vocabulário próximo ao domínio da ontologia CROMO, o ambiente ainda possibilita a checagem sintática e um *checkbox* de apoio ao usuário no momento de edição das regras. Tal facilidade pode ser vista ainda na Figura 46, onde ao digitar a palavra "*operation*" (que se refere aos tipos *Operation Situation*), o *checkbox* apresenta ao usuário as opções possíveis para esse tipo de situação, servindo como uma ferramenta de recomendação, a cada passo da construção das regras.

Após passar pelo processo de transformação essas regras passam a ser representadas em um código Java, conforme mostra a Figura 47, estando em condições de ser executadas pela aplicação que simula o rádio. Por fim, conforme a Figura 48 executar a simulação a aplicação apresenta um relatório dinâmico indicando as situações detectadas e as decisões

```

public class Rule_test1 {
    static Integer RulePriority = 1;
    public static String checkMode(String CurrentMode, String channel, String operation, String noisy, String enemy){
        final String NewMode;
        if(
            (channel.equalsIgnoreCase("C1"))
            ||(channel.equalsIgnoreCase("C4"))
            &&
            (operation.equalsIgnoreCase("assemblyArea"))
            ||(operation.equalsIgnoreCase("movementToContact"))
        )
        ) {
            NewMode = "Silent_Mode";
            return NewMode;
        }
        else{
            return CurrentMode;
        }
    }
}

```

Figura 47 – Recorte de CROMO-RSL convertida em código Java

```

=====
Operation: movementToContact
Enemy_SCene: Approach

Channel: C1
Noisy_Situation: Hight Noisy
Modulation_Strategy: BPSK
Operation Mode --> Silent_Mode---- Modulation Strategy --> OFF

Channel: C4
Noisy_Situation: Low Noisy
Modulation_Strategy: 16-QAM

Operation Mode --> Silent_Mode---- Modulation Strategy --> OFF

```

Figura 48 – Recorte do Relatório de Saída da Simulação

do rádio para cada canal, no que se refere a *Modo de Operação* e *Estratégia de Modulação*. Quanto a esse último indicador, também é apresentado no relatório se o uso da estratégia está habilitado (ON) ou não (OFF). Contudo mesmo a estratégia estando desabilitada a atividade de sensoreamento e identificação da *Noisy Situation* e a definição do modo também é verificada, aguardando somente uma possível habilitação.

Durante o experimento, foi utilizada a IDE Eclipse, empregando o *Eclipse Modeling Framework* (EMF). No desenvolvimento da metamodelagem de regras, foi utilizada a extensão *Sirius* do Eclipse. A ferramenta *Xtext*[106] foi utilizada para a geração e edição de uma *CROMO-RSL*. Na etapa de transformação (*CROMO-RSL*) de modelo para um programa em Java, foi usada a ferramenta *Acceleo*.

A diversidade de tipos de operações militares exige dinamismo nas mudanças de comportamento dos meios de comunicação. Os rádios cognitivos são uma alternativa promissora, podendo adequar seu funcionamento às necessidades técnicas e táticas das

operações. Este experimento apresentou uma alternativa capaz de apoiar a modelagem conceitual, buscando representar de forma bem fundamentada os elementos do mundo real que fazem parte do universo de discurso do processo decisório dos rádios cognitivos, em uma operação militar. Nessa atividade, foi possível explorar grande parte dos conceitos presentes na CROMO envolvendo cenas e situações, como formas de representar cenários que analisam o ambiente sob diferentes formas de observação na tomada de decisão. Além disso, foi apresentada uma alternativa que trás alguma simplicidade na resposta às variações de requisitos de comunicações durante as operações, oferecendo uma resposta mais ágil.

6 TRABALHOS RELACIONADOS

Partindo da ineficiência da alocação estática de bandas de frequência em aplicações *wireless*, apontadas pela Comissão Federal de Comunicações americana (FCC-*Federal Communication Commission*) em 2002, o rádio cognitivo surge como uma alternativa para mitigar o problema de escassez do espectro eletromagnético [25].

Neste contexto, surgem iniciativas como a de Rieser[107], que atacou o problema com o uso de algoritmos genéticos. O trabalho de Haykin[4], que abordou o problema de gerenciamento dinâmico do espectro e discutiu diferentes modelos possíveis para projetar futuras redes de rádios cognitivos, com base na análise da cena, conforme mostrou o ciclo cognitivo da Figura 17, apresentada na Seção 3. Observando aquele ciclo, verifica-se que o universo de discurso, sob o qual o rádio decide, está restrito ao espectro eletromagnético.

Este tipo de restrição no escopo de observação também foi observado em um levantamento realizado após dez anos de pesquisas na área de rádios cognitivos, em 2012, por Jouini, Moy e Palicot[27]. Segundo os autores, a totalidade do universo pesquisado, até aquele momento, tinham como base para a decisão fatores ligados exclusivamente ao espectro eletromagnético. Esse interesse se distribuiu em áreas, como geolocalização, identificação de lacunas no uso do espectro usado por faixas de TV digital [108]; ocupação e gestão do espectro [109]; incerteza em níveis de ruído [110] [102] e as regras regulatórias do espectro [111].

Este tipo de tendência se manteve, conforme mostra o trabalho de Qin et al.[29], que descreve um histórico mais amplo, cobrindo 20 anos de pesquisas envolvendo os rádios cognitivos apontando para o novo conceito de rádios inteligentes, onde os equipamentos passam a utilizar uma variada gama de algoritmos de aprendizado de máquina e agentes de inteligência artificial. Neste trabalho, o autor aponta um conjunto de tipos de *cenários* do universo de discurso que foram foco dessas pesquisas, ao longo do período investigado. A Tabela 18 mostra uma visão resumida dos principais tipos de cenário, que foram foco de pesquisas na área de rádios cognitivos ao longo desses vinte anos, considerando diversos trabalhos. Estes cenários contextualizam as decisões do rádio, que por sua vez se concentram em questões técnicas envolvendo, em sua maioria, o espectro eletromagnético. Observa-se também que o contexto de regras de negócio, no qual os rádios podem estar inseridos, como por exemplo, o cenário de comunicações militares, até onde foi possível investigar, não obteve destaque.

Ainda no contexto dos rádios cognitivos, como foi possível verificar nos trabalhos até aqui apresentados, diferentes tipos de métodos cognitivos podem ser aplicados aos rádios, alguns baseados em modelos matemáticos, em algoritmos de aprendizado de máquina [11]

Tabela 18 – Os principais cenários envolvendo rádios cognitivos nas pesquisas dos últimos 20 anos, baseados em [27] [108] [109] [110] [102] [111] [29]

Tipos de Cenários
Geolocalização
Lacunas no espectro na faixa de TV digital
Detecção, ocupação, compartilhamento e gestão do espectro
Detecção de Amplo Espectro
Incerteza em níveis de ruído
Regras Regulatórias do espectro
Classificação de Modulação
Estimação de Canal e Detecção de Sinal
Reconfiguração de Forma de Onda
Detecção de Símbolo
Agrupamento de nós de comunicação
Reconfiguração de Parâmetro do Sistema
Agendamento de Usuário
Economia de energia

ou de inteligência artificial [29]. Por outro lado, quando a decisão se baseia em regras doutrinárias rígidas, Xu et al.[11] recomenda que seriam apropriados modelos baseados em regras, onde estruturas de conhecimento, tais como tabelas e árvores de decisão são desejáveis. Corroborando com este entendimento, Mitola[12] aponta que um rádio cognitivo com um alto grau de autonomia, utilizando-se de técnicas como aprendizado de máquina e inteligência artificial, pode involuntariamente se reprogramar e acabar violando restrições de agências regulatórias. Diante dessa afirmações, buscar a combinação do uso de técnicas que favoreçam a autonomia do rádio, como a inteligência artificial, com estratégias baseadas em regras parece ser apropriado, principalmente em ambientes de comunicações militares, onde violar regras doutrinárias pode custar a perda de vidas humanas durante uma operação militar. Isso nos remete ao conceito de Rádio Baseado em Políticas (RBP) e de Rádio Cognitivo Baseado em Políticas (RCBP), descritos por Moskal et al.[112].

Entendendo políticas como um "*conjunto de regras, expressas em um formato legível por máquina e independentes da implementação do rádio, seja o mesmo implementado por meio de hardware ou software*" Moskal et al.[112]. Deste modo, um RBP é um tipo de rádio cujo comportamento é governado por um mecanismo de controle baseado em políticas, embora os RBP sejam geralmente rádios definidos por software isso não é pré requisito para ser baseado em políticas. Já os RCBP são rádios que são cognitivos, ou seja, tem consciência de seu ambiente e estado interno e podem tomar decisões autônomas sobre seu comportamento operacional, baseado nas informações sensoreadas e em objetivos predefinidos, porém utilizam mecanismos de controle baseado em políticas. Nestes tipos de equipamento, as políticas prevalecem na definição do comportamento que é interpretado e executado pelo rádio. Observando essas características, verifica-se que os

RCBP são apropriados ao contexto das comunicações militares, uma vez que não abrem mão dos recursos de cognição e aprendizado que oferecem características autônomas, porém necessitam estar limitados por políticas associadas à doutrina militar, órgãos reguladores e algoritmos, técnicas e procedimentos descritos em trabalhos científicos da área em questão.

Fechando o escopo de nossa pesquisa nesse universo um pouco mais restrito de rádios cognitivos, pode-se observar que o ciclo cognitivo proposto inicialmente por Mitola e Maguire[3], descrito na Figura 6 da Seção 2, sofreu adaptações em alguns tipos de aplicações, mas se mantém como uma referência viva e atual na área de rádios cognitivos. O trabalho de Moskal et al.[112], reafirma essa ideia e, quase vinte anos depois, resgata o ciclo cognitivo proposto por Mitola e Maguire[3] e posiciona as políticas de forma alinhada com as etapas do ciclo cognitivo, conforme pode ser visto na Figura 49. Na

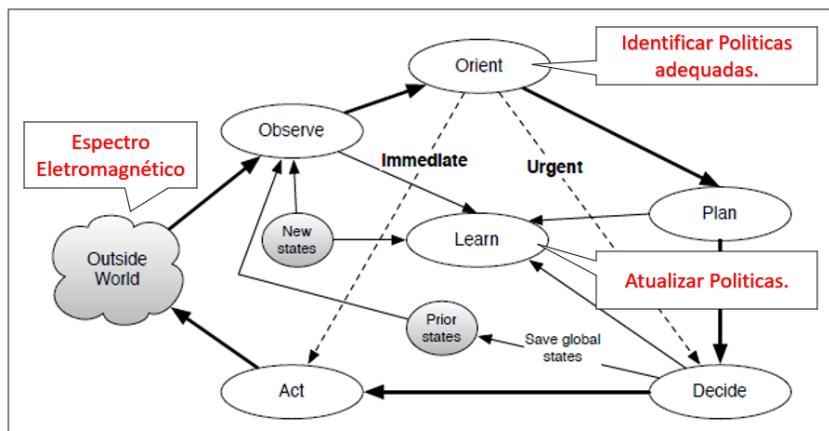


Figura 49 – A inserção de políticas no Ciclo Cognitivo, adaptado de [112]

etapa "Orientar" do ciclo, após serem identificadas na etapa "Observar" situações ou cenas específicas, são identificadas políticas adequadas para cada uma delas. Por outro lado, com base na observação de novas situações (*New States*), o rádio pode se valer de suas capacidades cognitivas (i.e, algoritmos de aprendizado de máquina) para atualizar políticas, porém respeitando limites estabelecidos para isso.

Considerando o dinamismo do ambiente de operações militares, é notório que a necessidade de atualização das políticas de funcionamento dos rádios é um fator relevante. Desta forma, é preciso investigar como e quais são os requisitos para que estas políticas sejam inseridas de maneira adequada nos rádios, com a urgência que o contexto requer.

No que tange à implantação de regras e políticas em sistemas de decisão aplicados a rádios cognitivos, foi observado na literatura duas alternativas relevantes (itens 1 e 2) e uma terceira alternativa, que vem sendo empregada em sistemas inteligentes de decisão envolvendo diferentes tipos de sensores, como dispositivos de RFID e Internet das coisas, aplicando regras de negócio em várias áreas, onde as decisões necessitam agilidade e flexibilidade (ex: Urgências médicas) (item 3), a saber:

1. A codificação de cada política em uma linguagem de programação tradicional, como por exemplo, C++, Java, etc;
2. A implantação de políticas utilizando uma linguagem declarativa formal com sintaxe formal e semântica, como OWL (*Web Ontology Language*¹), SWRL (*Semantic Web Rule Language*²), RIF (*Rule Interchange Format*³), dentre outras. Estas políticas incidem sobre ontologias que modelam situações que caracterizam o universo de decisão. [112] [113] [114];
3. A modelagem dirigida a modelos, aplicada a detecção de situações baseada em regras [23], onde situações são descritas com base em modelos conceituais, baseados em ontologias bem fundamentadas. Nessa abordagem, técnicas de engenharia dirigida a modelos são aplicadas transformando as regras no formato de modelo em código executável [20] [21] [24]

6.1 Abordagens baseadas em Linguagem ou Codificação

Considerando o item (1.), a codificação da política em uma linguagem imperativa é a prática mais comum. Após a construção do código em uma linguagem de alto nível, ocorre a implementação de uma rotina de controle que busca, em uma cena ou em uma situação observada, uma correspondência com uma política existente e a execute. Este tipo de estratégia é, em boa parte dos casos, computacionalmente mais eficaz. Por outro lado, a parte desvantajosa desse tipo de abordagem fica a cargo da dificuldade de atualizar o código da política, pois o mesmo deve ser alterado na linguagem em que foi programado e, na maioria dos casos, quem define a política não tem a habilitação técnica para reprogramar [112].

Um exemplo desse tipo de abordagem é o trabalho de Lee, Park e Yoo[115], que possibilita a criação de políticas de operação de rede para um ambiente de comunicação sem fio em redes ad-hoc. Essa abordagem, realiza alterações em suas políticas de maneira autônoma e manual, contudo as políticas são editadas em MATLAB ou em C++. Este tipo de abordagem não apresenta simplicidade e nem flexibilidade por prender-se a uma ou duas linguagens que exigem conhecimento técnico específico e especializado, comprometendo a agilidade pois para os decisores realizarem as atualizações nas regras, dependerão da disponibilidade de um universo restrito de técnicos, que possuem outras atividades. Estas características não se alinham com os conceitos flexibilidade, simplicidade e agilidade, considerados no escopo dos objetivos desta tese.

¹ <https://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-overview-20121211/>

² <https://www.w3.org/Submission/2004/SUBM-SWRL-20040521/>

³ <https://www.w3.org/TR/2013/NOTE-rif-owl-rl-20130205/>

No que se refere ao item (2), a implantação de políticas utilizando uma linguagem declarativa formal com sintaxe formal e semântica depende do uso de um interpretador ou software raciocinador, que possa interpretar as políticas enquanto elas forem expressas nessas linguagens [112]. Espera-se que com essa abordagem o software do rádio cognitivo seja capaz de interpretar e executar dinamicamente as políticas adicionadas, sem qualquer modificação do código. Contudo, esta tarefa não é trivial, pois no contexto dos rádios cognitivos há um problema ligado ao fator tempo, chamado por Mitola[12] de raciocínio limitado no tempo, onde os sistemas de rádio necessitam observar, decidir e agir dentro de um período limitado de tempo para que sua decisão seja eficaz ao fim a que se propõe. Além disso, o mesmo autor indica o uso de temporizadores monitorando os processos em execução e determinando um limite temporal para, se for o caso, encerrá-los evitando o paradoxo de *Gödel-turing*, em outras palavras, o equipamento entrar em um *loop* do qual não poderá se recuperar. Um outro ponto a destacar é que existem linguagens declarativas com uma riqueza de expressividade que demandam um alto custo computacional dos raciocinadores, podendo levar a um tempo ineficaz de resposta para os ambientes de rádios cognitivos. Isso pode ser constatado nos testes realizados por Ulversøy e Halvorsen[116], onde os resultados não satisfatórios obtidos demonstraram que o tempo de raciocínio pode ser um fator negativo determinante, particularmente quando comparado com os tempos de reação necessários em equipamentos que usam espectro militar. Desta forma, limitar a complexidade das políticas e escolher linguagens de representação de conhecimento adequadas com baixa complexidade é uma maneira de manter o tempo de raciocínio em níveis práticos. Outra alternativa, seria usar raciocinadores com otimizações específicas de domínio que tenham um bom desempenho prático para ontologias específicas e conjuntos de políticas para espectro dinâmico. Isso acaba demandando o uso de soluções proprietárias de raciocinadores, como o *BaseVisor* [117] e versões de linguagens declarativas adaptadas para uso nessas soluções, como é o caso da OWL 2 RL do W3C.

Observando o item (3.), o trabalho de Costa et al.[23], deu origem a uma abordagem para detecção de situações baseada na transformação de um modelo expresso em uma linguagem específica de domínio, chamada *Situation Modeling Language* (SML), em um conjunto de regras a serem executadas em uma plataforma baseada em regras. Tomando como base abordagens ontológicas para a representação de *Situações*, empregando ontologias de fundamentação, como GFO e UFO os trabalhos de Moreira et al.[20], Teixeira et al.[21] e Moreira et al.[22] aplicam essa abordagem. Os autores lidam com contextos de decisão em áreas distintas, como gerenciamento de desastres, gerenciamento de negócios e emergências ligadas a pacientes cardíacos, respectivamente. Além disso, empregam uma estratégia de modelagem combinada, aplicando UFO para representar no modelo conceitual, representando os objetos em um determinado contexto, bem como suas relações. Para representar situações, eles usam a linguagem SML mencionada acima, que modela as regras que classificam e permitem a detecção de situações. A SML, proposta por Costa et al.[23],

foi aperfeiçoada por Moreira, Pires e Costa[24] para modelar epidemias de doenças. No entanto, nenhum desses modelos conceituais representam Cenas e relações de causalidade. Para este propósito, eles usam as plataformas computacionais (ex: *SCENE* e *Drools*), que são baseadas em regras que implementam raciocínio temporal, regras existenciais e funções descritivas e de agrupamento multivariado. Em meio a vários trabalhos nessa área cabe destacar a arquitetura apresentada por onde duas atividades de transformação são realizadas. Uma dela é a migração de SML para a linguagem da plataforma de regras e a outra é a transformação das regras de negócio escrita em BPMN, pelos especialistas de domínio em código Java executável. A Figura 50 mostra um fragmento da linguagem SML e sua equivalência na linguagem de regras na qual é transformada.

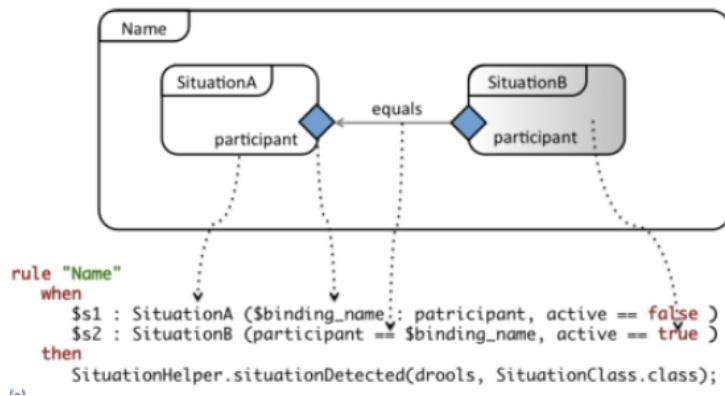


Figura 50 – Conversão de Regra em SML para plataforma baseada em regras [20]

6.2 Abordagens baseadas em Ontologias

As alternativas (2) e (3) têm como base o uso de ontologias como modelo conceitual, que serve de base tanto para as consultas, quanto para os modelos que serão convertidos em código. Considerando que o rádio decide ou aplica regras com base na observação de uma situação ou uma cena, modelar situações e cenas do mundo real de forma precisa e concisa é essencial. Desta maneira, pesquisadores envolvidos com as abordagens 2, 3 e áreas afins, vêm investigando ontologias de núcleo capazes de representar cenas e situações do mundo real aplicadas ao processo de compreensão e decisão. Estes trabalhos tomam as ontologias como ponto de partida e elemento essencial em suas soluções.

Desta forma, foi realizada uma revisão de literatura acerca desses trabalhos. A observação e compreensão dos fatos do mundo real como base para a tomada de decisão vem sendo estudada de diferentes maneiras. Dentre elas, pode-se destacar o estudo à luz da Teoria das Cenas e outras Situações apresentado por Barwise[118] e o estudo baseado em consciência situacional, com seus níveis de compreensão propostos por Endsley[10].

Com base nessa teoria, uma mesma situação pode acolher diferentes entendimentos em função do contexto ao qual está inserida [119]. Contudo é a capacidade de discernir acerca destes contextos e atingir este entendimento que pode conduzir o observador a um estado de consciência situacional. Este tipo de consciência está ligado à *percepção* de elementos em um ambiente, com volume, tempo e espaço, à *compreensão* de seus significados e à *projeção* de seus status em um futuro próximo [10]. Estes níveis se assemelham com as fases do ciclo cognitivo proposto Mitola e Maguire[3], que também envolve percepção (observação), compreensão (orientar, aprender) e projeção (planejar, decidir).

A Figura 51, idealizada por Kokar e Lechowicz[31] para explicar os conceitos de Endsley[10], ilustra os níveis de consciência que um observador pode atingir a partir da observação de objetos no mundo real. No nível de percepção, os objetos, sob a ótica do observador, são somente pontos que possuem volume e ocupam um espaço em um determinado momento no tempo. O nível de compreensão, inicialmente, está condicionado

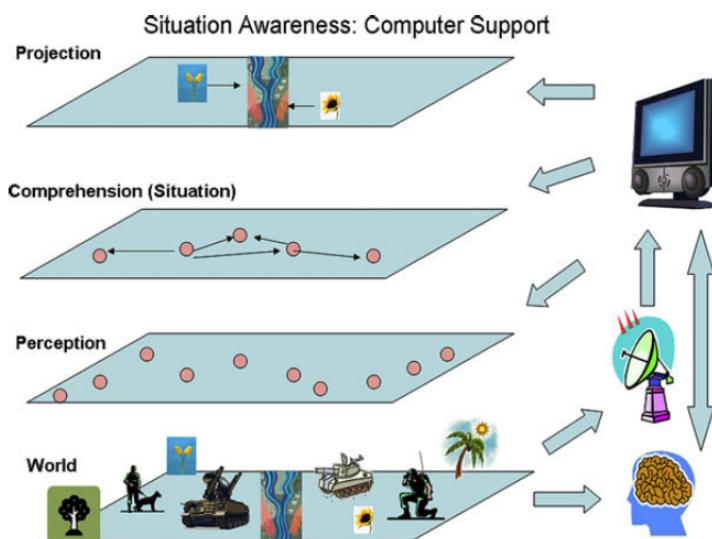


Figura 51 – Níveis de consciência situacional [13]

à bagagem de conhecimento e visão de mundo do observador, ou a uma descrição precisa e concisa do contexto, com informações em um formato semanticamente e sintaticamente capaz de fornecer uma compreensão livre de ambiguidades ao observador. Desta forma, os objetos percebidos na Figura 51, como por exemplo, um homem e um cão, podem passar a ser compreendidos como um homem militar e um cão de guerra, desde que informações contextuais adequadas sejam inseridas em sua representação. A partir do enriquecimento dessas informações, adicionando outros elementos e relações, como as ações que o homem exerce sobre o cão, por meio de comandos de voz, e os tipos de comandos usados, o observador pode atingir a fase de projeção. Nessa fase, a partir da percepção e compreensão de um comando de voz, o observador pode prever a realização de um ataque pelo cão. Tudo isso reforça a importância de uma descrição precisa e concisa

do contexto. Contudo, essa compreensão pode ter diferentes níveis de complexidade, em função da porção do mundo real observada. Por esse motivo, a compreensão é o ponto de partida para que se possa discernir (*Orientar*) ou *decidir* acerca de situações. Diante desses conceitos, pode-se afirmar que a consciência situacional e estruturas de representação do conhecimento que representam objetos do mundo real de forma precisa e concisa, como as ontologias, ocupam papel destacado em processos decisórios e cognitivos.

Com base nos trabalhos de Barwise[118] e Endsley[10], Kokar, Matheus e Baclawski[13] propõem uma representação formal empregando ontologias como alternativa para facilitar a tomada de decisões. Assim, esses autores apresentam a ontologia STO, que descreve vários conceitos do mundo real, como objetos, relações e regras. Além disso, também apresentam mecanismos para indicar que uma determinada relação satisfaz uma determinada regra. No entanto, eles não visam representar cenas, eventos e suas relações causais.

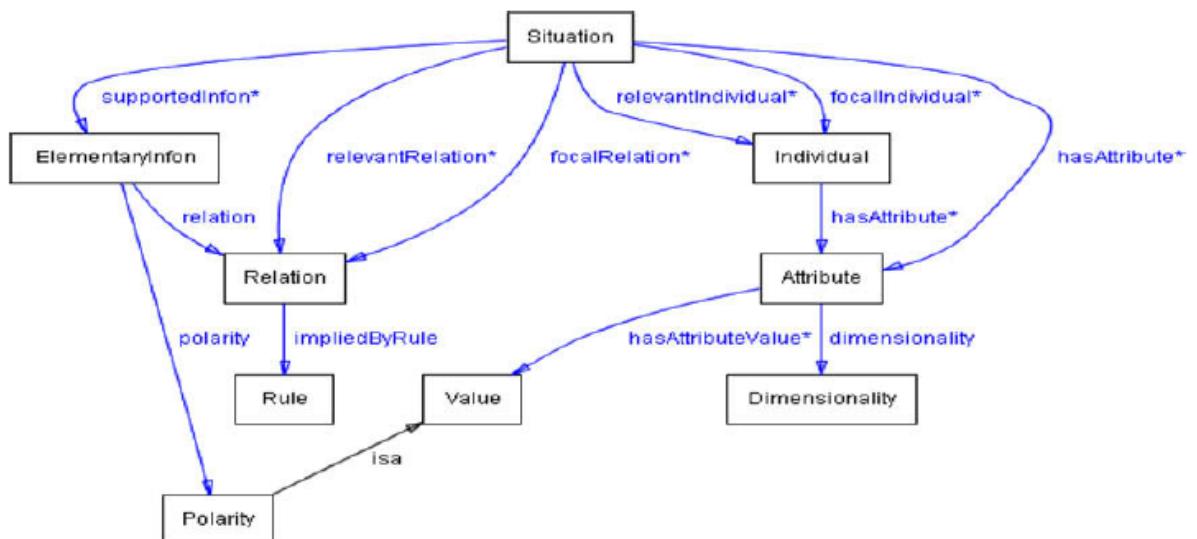


Figura 52 – Principais Classes da Ontologia STO [13]

A Figura 52 mostra um recorte das principais classes da ontologia STO. Como pode ser visto, a ontologia representa situações e os elementos que a compõem (*Individuais*). Além disso, são representadas as características desses indivíduos (*atributos*), suas dimensões (*i.e., metro, polegada*), seja o domínio de cada atributo, e seus respectivos valores. Também são representadas relações entre os objetos e as regras que envolvem essa relação, como por exemplo, uma característica de transitividade entre classes. A classe polaridade pode ser considerada uma forma de implementar uma proposição, pois a polaridade que assume valores "0" (zero) ou "1" (um) é utilizada para indicar se uma condição, ou uma proposição é verdadeira, por exemplo: "*o cão é bravo*". (polaridade: verdadeiro ou falso?). A Classe *Elementary-Infon* representa consultas ou objetivos que tenham foco na identificação de uma da situação, como a do exemplo do "*cão é bravo?*". Isso, provavelmente pode ser usado

como uma alternativa para identificar e classificar situações. Essa ontologia é uma ontologia operacional, implementada em OWL e não é baseada em ontologias de fundamentação.

Uma nova ontologia, a STO-L, foi desenvolvida e é aplicada à segurança cibernética, representando a participação e as relações entre situações, objetos e eventos [62]. A ontologia foi aplicada para reduzir o universo de dados a serem analisados para identificar situações ligadas a ataques cibernéticos, modeladas com a ontologia. No entanto, não há representação de cenas, relações entre eventos ou questões de causalidade.

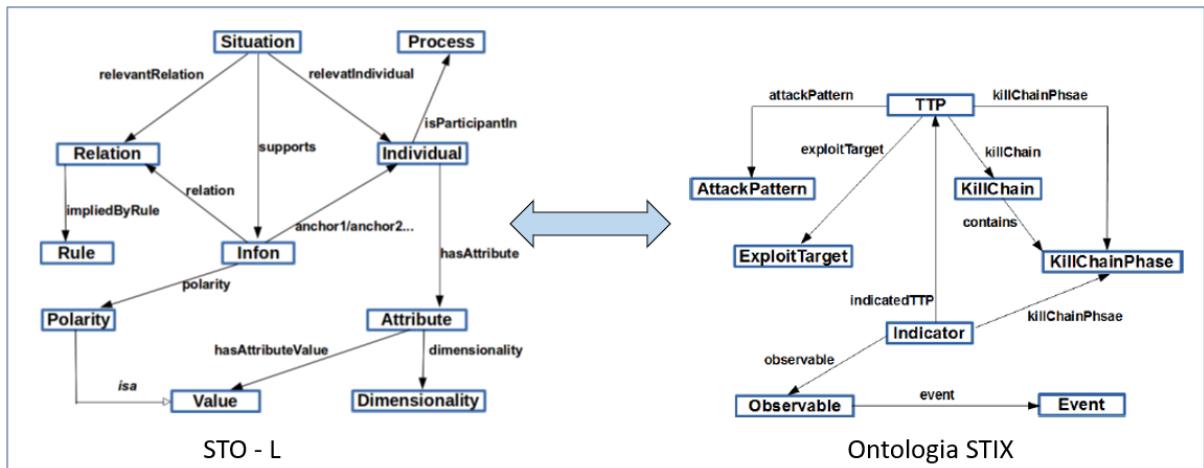


Figura 53 – Principais Classes da Ontologia STO-L e fragmento da Ontologia STIX [62]

Nessa nova versão, mostrada na Figura 53, a ontologia STO-L acrescenta a entidade processo (*Process*) do qual os indivíduos (*individuals*) participam. A entidade *Infon* tem a mesma finalidade do conceito *Elementary Infon*. As relações relevantes apontam para os elementos individuais que realmente são parte da situação. O trabalho utiliza a STO-L como uma ontologia de topo que mapeia os conceitos da ontologia STIX, da área de segurança cibernética. Ambas são ontologias operacionais em OWL e, sobre essa estrutura combinada são elaboradas consultas em linguagem SPARQL selecionando situações de interesse.

Também merece destaque o uso da STO-L na ontologia para rádio cognitivo (CRO¹), (do inglês: Cognitive Radio Ontology), que foi desenvolvida com o objetivo de estabelecer um padrão para uma abordagem baseada em ontologia aplicada a rádio cognitivo. A CRO foi homologada e recomendada pelo Wireless Innovation Forum em 2010 e é constituída por uma Core Ontology e conceitos relacionados às camadas PHY e MAC [97]. Em 2015, a CRO foi atualizada para a versão CRO2 [98], que incorpora uma nova ontologia de fundamentação desenvolvida chamada Nuvio, desenvolvida pela Universidade de Northeastern em conjunto com a empresa VIStology e implementada usando uma linguagem OWL adaptada. A CRO2 foi criada com base na ontologia CRO

¹ <http://cogradio.org/index.html>

original; na ontologia QUDT, que representa quantidade, unidades, dimensões e tipos; na ontologia DOLCE Ultra-Light (DUL) e na *ontologia da Teoria da Situação STO-L*.

Sob um viés diferente, o trabalho de Costa et al.[15] introduz o conceito ontológico de *Situação* como uma composição de elementos ou entidades, considerando contextos intrínsecos e relacionais na construção de modelos conceituais específicos. Em seguida, Dockhorn Costa[16] apresenta um conjunto de modelagens de contexto em sua tese, incluindo situações complexas para apoiar a criação de uma plataforma para o desenvolvimento de aplicações. Esse trabalho aborda a modelagem de contextos e situações. Apresenta os conceitos de contexto intrínseco e contexto relacional alinhados a conceitos de fundamentação da UFO. Conforme ilustra a Figura 54 (a), um contexto intrínseco é caracterizado pelo(s) atributo(s) (*Moments*) intrínsecos de *Substantials*. Por outro lado, o contexto relacional, conforme pode ser observado na Figura 54 (b), é também caracterizado por (*Moments*) relacionais (*Relator*) envolvendo dois ou mais *Substantials*. Essas relações podem ser do tipo material ou formal. Por meio de uma representação gráfica simplificada,

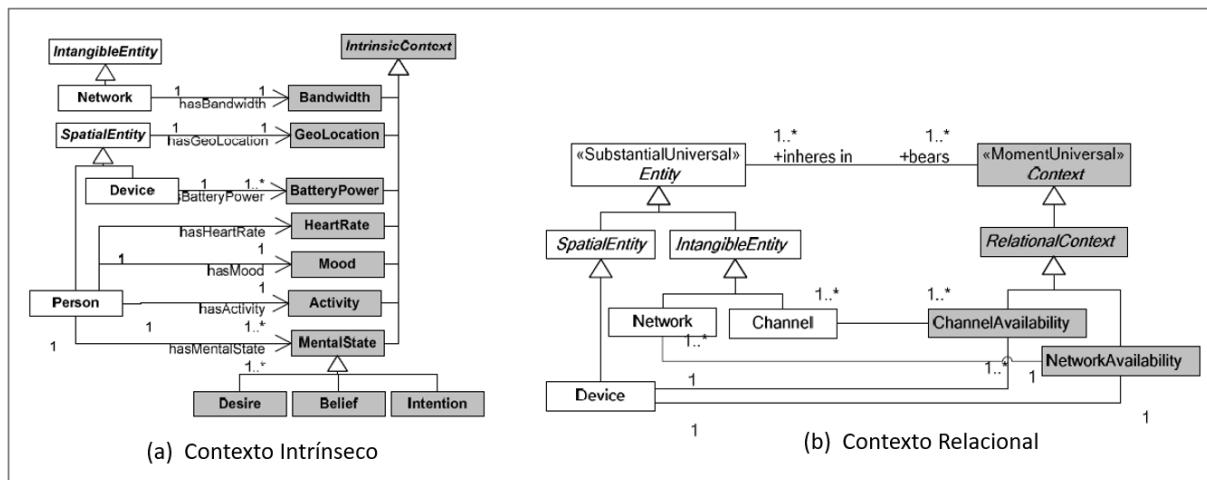


Figura 54 – Contexto intrínseco e contexto relacional (estrutural), alinhados a UFO [15]

porém, alinhada aos conceitos da UFO, o conceito de situação e situação composição de situações é exemplificado de diversas maneira. Contudo, a relação entre situação e tempo não é formalizada explicitamente e, em alguns casos, pode apresentar ambiguidades pela necessidade de uma maior expressividade. Para demonstrar esse problema, verifica-se que o conceito de situação (*Situation*), conforme mostra a Figura 55, é classificado, à luz dos conceitos da UFO, como um *Individual*, ou seja, um *Endurant*. Entretanto, em função da necessidade de modelar o estado dos objetos ao longo de um período de tempo, uma característica dos *Perdurants* as situações, em alguns casos, modelos de *Situation* foram representadas com "duração", como podemos verificar nas Situações compostas por situações mostradas da Figura 55. Esta seria uma oportunidade em que o conceito de "*Cena*", tratado nesta tese, poderia ter sido empregado para explicitar esses contextos de uma forma mais precisa.

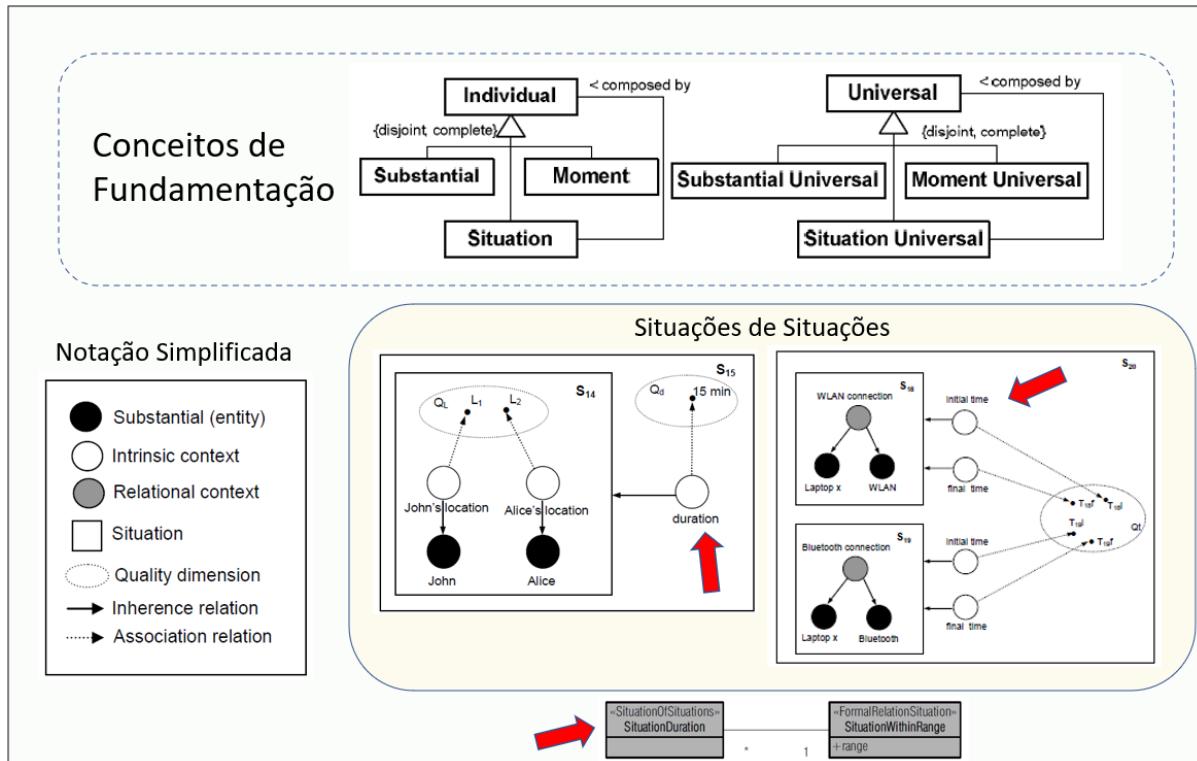


Figura 55 – Contexto intrínseco e contexto relacional (temporal), alinhados a UFO [15]

Pai, Yang e Chung[18] propõem uma ontologia de consciência situacional (SAO) integrando duas outras ontologias usadas em um ambiente militar complexo para identificar situações. Uma dessas ontologias representa estruturas militares em um campo de batalha (MSO - Military Cenário Ontology), descrevendo organizações e seus recursos humanos, materiais e de guerra. A outra ontologia representa ordens estruturadas na forma de mensagens (BMO - Battle Message Ontology). Dado o enorme volume de pedidos em formato de mensagens, esse conjunto de ontologias é uma alternativa para identificar situações que podem apoiar os decisores nas operações. A ontologia apresenta dois modelos principais, uma estrutura central (*core*), Figura 56 (a), e um modelo apresentando as relações entre as classes, Figura 56 (b). Na Parte *core*, está o conceito de *Situação* composto por contextos que são compostos pelo ambiente (*Environment*), que representa o espaço geográfico onde a situação ocorre, e por um objeto que indica a data e hora (*Date Time*) em que a *Situação* ocorreu. Porém, não fica clara a relação temporal da *Situação*, pois não está explicitada a sua cardinalidade em relação a data e a hora. SAO também representa os objetos que compõem a *Situation* e suas relações. Do mesmo modo que as ontologias STO, a entidade *Rule* define as relações entre os objetos que compõem a *Situation*. Ainda na ontologia SAO, também são representados *Eventos* (*Events*) e *Ações* (*Actions*). As *Actions* são compostas por um conjunto *Ordens*. Nessa ontologia, *objetos*, do tipo relatórios, podem disparar eventos. Também é mostrado que os *Events* agem e afetam as relações e os objetos. A SAO representa ainda os objetos que participam de eventos, além de descrever

algumas relações de causalidades entre ações (*Actions*) e eventos (*Events*). A SAO não representa construtos como cenas e disposições. Porém, as proposições mesmo não tendo uma representação explícita, poderiam ser representadas por regras (*Rules*). A ontologia

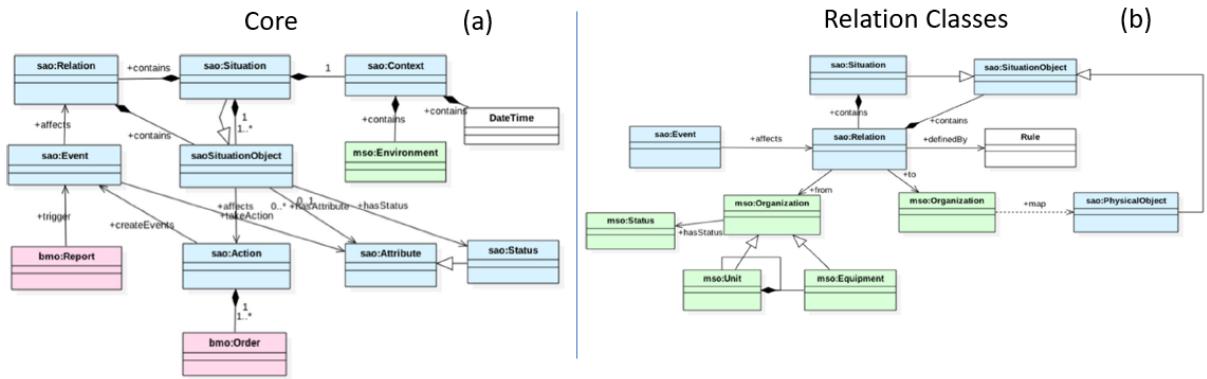


Figura 56 – Visão Geral da Ontologia SAO [18]

SAO é uma ontologia Operacional em OWL e não está vinculada a nenhuma ontologia de fundamentação. Mesmo assim possui uma capacidade de representação bem ampla, entretanto não pode representar cenas e suas relações com situações e demais entidades.

A ontologia SAW proposta por [19], é uma ontologia de núcleo (*Core*) utilizada para representar situações envolvendo uma área de controle de trânsito. De acordo com a Figura

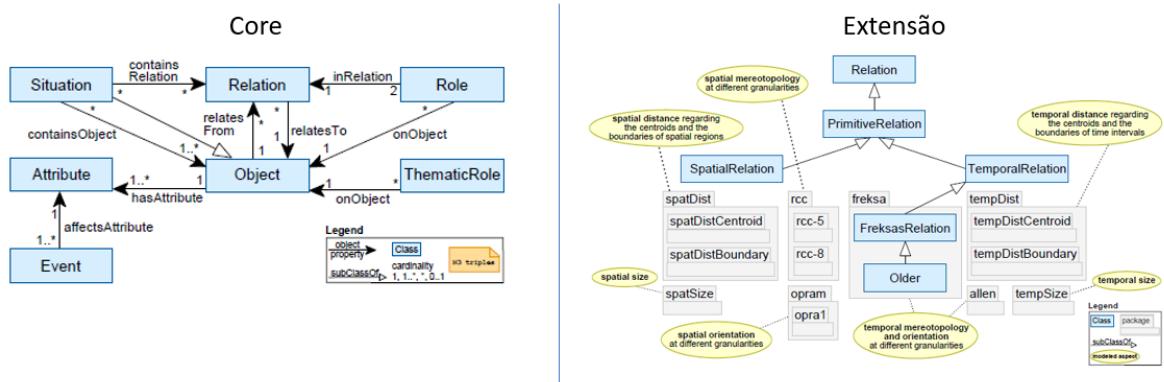


Figura 57 – Visão Geral da Ontologia SAW [19]

57, em sua estrutura principal (Core), SAW representa os objetos que compõem a situação, além dos atributos desses objetos e a relação entre eles. Também são representados o papel que objetos e as relações podem assumir, além dos efeitos que os eventos podem exercer sobre os atributos dos objetos. Seu ponto forte é a extensão que a ontologia possui. Essa parte tem a capacidade de descrever inúmeros tipos de relações espaço temporais. Neste contexto, as situações são usadas para representar intervalos de tempo, como por exemplo, uma situação de nevoeiro que ocorre em um período de tempo. A ontologia SAW não representa cenas, entretanto, neste tipo de contexto, o uso do conceito de *Cena* poderia

Tabela 19 – Referências com Cenas e/ou Situações apoiando decisões

Referências	Entidades do Modelo Conceitual					Ontologias	
	<i>causalidade</i>	<i>evento</i>	<i>Situação</i>	Cena	<i>Proposição</i>	Op	Fund
Kokar e Lechowicz[31]	Não	Não	Sim	Não	Regras	STO	-
Lu e Kokar[62]	Não	Sim	Sim	Não	Regras	STO-L	-
Costa et al.[15] [16]	Não	Não	Sim	*impl	SML	-	UFO
Pai, Yang e Chung[18]	Sim	Sim	Sim	Não	Regras	SAO	
Baumgartner et al.[19]	Não	Sim	Sim	Não	Não	SAW	-
CROMO	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	UFO

* implementado por meio de aplicação, não faz parte do modelo conceitual / Op - Ontologias Operacionais

enriquecer a capacidade de representar estes cenários, como por exemplo, uma cena de densidade de nevoeiro baixando ou uma cena de nível de rio subindo, nas proximidades de uma rodovia. A SAW é uma ontologia operacional implementada em OWL e não está alinhada à nenhuma ontologia de fundamentação.

6.3 Considerações Finais

Como mostra a Tabela 19, nenhum dos trabalhos apresentados se concentrou na construção de um modelo ontológico bem fundamentado, projetado para modelar cenas e situações de forma combinada em um modelo conceitual associado à tomada de decisão. A CROMO, além de modelar situações e cenas descreve suas relações e aborda questões de mereologia. Por outro lado, a CROMO não é uma ontologia operacional⁴ escrita em linguagem declarativa, mas trata-se de uma ontologia de referência, fundamentada nos constructos da UFO que serve de modelo conceitual tanto para o desenvolvimento de aplicações como para uma futura conversão em ontologia de referência.

Além disso, a CROMO consegue representar os conceitos de cenas a partir da noção de cenas apresentada no trabalho de Almeida, Costa e Guizzardi[76], que fornece um pano de fundo pertinente a esse tema e apresenta a Ontologia de Cenas e Situações baseada nos construtos da UFO. Os autores empregam a teoria da encarnação rígida e variável proposta por Fine[77] para mostrar alguns aspectos de situações e cenas. No entanto, o artigo de Almeida, Costa e Guizzardi[76] retrata uma visão geral de cenas e situações sem visar a análise detalhada e a descrição formal desses conceitos, considerando questões

⁴ para operacional, veja em https://ceur-ws.org/Vol-1301/ontocomodise2014_2.pdf

mereológicas e sua aplicação prática. Do ponto de vista deste trabalho, os conceitos de cena e situação são essenciais para o processo de tomada de decisão.

Justificando essa afirmativa e pontuando a relevância dos trabalhos analisados, a ontologia STO-L é hoje uma das ontologias que compõem a ontologia CRO2 [98] [99], que foi homologada como ontologia efetiva do padrão pelo IEEE 19000.5.2. Além disso, os trabalhos de [16] [15] envolvendo contextos intrínsecos e relacionais, são a base dos trabalhos que empregam a modelagem dirigida a modelos aplicada a detecção de situações baseada em regras [20] [21] [24].

No escopo das arquiteturas que aplicam modelagem dirigida a modelos aplicada a detecção de situações baseada em regras, verifica-se que normalmente têm sido aplicadas em ambientes centralizados onde um centro de processamento recebe, processa os sinais coletados emitindo respostas [20] [21] [24]. Provavelmente esse tipo de estrutura demanda um arcabouço de recursos computacionais de grande porte, para suportar todas as ferramentas de apoio que compõem a arquitetura, fato que configura uma realidade diferente da capacidade computacional dos rádios cognitivos.

Assim, a proposta de realizar um experimento utilizando técnicas de MDE, construindo CROMO-RSL por meio de uma linguagem específica de domínio simples e textual, com um vocabulário que se aproxima dos construtos da ontologia CROMO e que se aplica ao contexto desta pesquisa, teve como objetivo avaliar a hipótese de aplicar técnicas de MDE respeitando as capacidades do rádio cognitivo.

7 CONCLUSÃO

Ao observar o passado recente das comunicações empregando rádios cognitivos, onde o foco dos problemas se concentrava na observação de questões envolvendo exclusivamente o espectro eletromagnético, verifica-se que, no ambiente militar, este universo é diferente. Fatores específicos desse domínio de aplicação, como as normas doutrinárias das operações, e o dinamismo das informações operacionais que fluem pelos sistemas de comando e controle nos quais os rádios se encontram inseridos, assumem protagonismo nesse processo.

Nas etapas iniciais dessa pesquisa, foi observado que os rádios cognitivos, no contexto militar, além de suas capacidades cognitivas, necessitam ser baseados em regras definidas por normas e doutrinas operacionais da Força Armada em que é empregado. Estas regras incidem sobre um universo de discurso de decisão associado à percepção de cenas e situações do contexto operacional em que os equipamentos estão inseridos. Além disso, foi observado que havia uma lacuna na literatura na descrição formal dos conceitos de cenas e situações. Isso também pode ser confirmado nas pesquisas preliminares de nossa primeira publicação [68], onde buscávamos alternativas para representar elementos reais de um ambiente de comunicações militares. Um outro ponto a ser abordado é a necessidade de uma arquitetura capaz de viabilizar a configuração e a alteração dos modos de operação dos equipamentos de rádio, de forma rápida, simples e flexível. Isso se justifica pelo dinamismo com que as mudanças acontecem no contexto de comunicações militares e impacta na execução dos processos de implementação, implantação e atualização de regras de negócio nos equipamentos de rádio cognitivos.

Inicialmente, com foco em resolver o problema da descrição formal dos conceitos de cenas e situações, essa pesquisa empregou elementos da lógica de 1^a ordem associados às definições conceituais das ontologias de fundamentação UFO e GFO, para realizar a formalização dos conceitos de *CENA* e *SITUAÇÃO*. Neste sentido, foram estabelecidas as definições formais dos conceitos de *situação* e *cena*, bem como suas relações mereológicas envolvendo relações de parte e todo. Além disso, foi realizada a harmonização do conceito de cena no contexto da UFO, apontando as relações existentes entre o conceito de *Cena* e conceitos já existentes na UFO, como *Eventos*, *Disposições* e *Proposições*, além de sua influência nas relações de causalidade entre *Eventos* e *Ações*.

Por meio da formulação de exemplos, com elementos do mundo real e, empregando os conceitos de *Cena* e *Situação*, foi possível verificar que esta etapa da pesquisa contribuiu para atingir parcialmente o *Objetivo Específico 01* desse trabalho. Considerando que até aquele momento da pesquisa, ainda não havíamos desenvolvido a ontologia, porém já tínhamos os elementos necessários para isso.

A seguir, obedecendo o escopo definido ao longo dessa pesquisa e, aproveitando nossa experiência na construção de ontologias de referência, adquirida em nossa segunda publicação [69], foi aplicada a metodologia *SABiO* no desenvolvimento da ontologia *CROMO*, cobrindo o universo de discurso associado ao processo decisório em três porções de conhecimentos, a saber:

1. A descrição do processo de planejamento de comunicações alinhado com o planejamento das operações, apresentando as entidades envolvidas, seus papéis, características, relacionamentos, e como elas podem influenciar o processo de decisão dos rádios cognitivos;
2. A descrição de um cenário operacional composto por cenas e situações detectáveis por um rádio cognitivo sob pelo menos um aspecto técnico e aspectos táticos relacionados a pelo menos uma operação militar; e
3. A descrição dos elementos que compõem o Cenário Operacional e as ações envolvidas.

A ontologia *CROMO* com os três segmentos desenvolvidos e conectados, possibilitou modelar e representar todos os principais elementos que influenciam no comportamento do rádio, incluindo as fontes de conhecimento da fase de planejamento operacional. Além disso, possibilitou representar cenas e situações do cenário operacional, seus respectivos elementos constituintes e o conjunto de ações que compõem o cenário operacional, incluindo os aspectos técnicos e táticos da doutrina militar. Na etapa seguinte desta pesquisa, a ontologia *CROMO* foi aplicada em dois estudos de caso como instrumento de experimentação e validação de modelagem conceitual. Nessa atividade, processos de tomada de decisão foram modelados, em um cenário hipotético de elementos reais de comunicações militares. Estes modelos serviram de apoio ao desenvolvimento de aplicações voltadas aos rádios cognitivos. Ao final dessa etapa, foram atingidos os *Objetivos Específicos 01 e 02*.

Em nosso segundo estudo de caso, foi possível aplicar a experiência adquirida em nossa terceira publicação [103], onde aplicamos as técnicas de MDE, na construção de uma DSL aplicada a rádios cognitivos. Neste estudo de caso, a ontologia CROMO foi aplicada na modelagem conceitual de um contexto simulado próximo da realidade de uma operação militar real. Isso possibilitou aplicar quase que na totalidade os conceitos formalizados de cenas e situações sob seus diferentes níveis de complexidade. Adicionalmente, a CROMO serviu de base conceitual para o desenvolvimento de uma aplicação e de uma linguagem específica de domínio (CROMO-RSL), corroborando com o *Objetivo Específico 02*.

Além disso, a aplicação das técnicas de MDE empregando a CROMO-RSL, apresenta uma linguagem textual, com vocabulário alinhado ao utilizado no contexto de cenas e situações presentes no universo de decisão dos rádios cognitivos, durante as operações militares, além de viabilizar a geração de um código que poderá ser executado diretamente

pelo rádio cognitivo, sem a necessidade de plataformas computacionais adicionais. Esta alternativa pode representar uma solução que não depende de arquiteturas de software baseadas em regras como DROOLs e SCENE, empregadas em ambientes com dispositivos com capacidade computacional superior a dos rádios cognitivos. É possível afirmar que, ao final dessa etapa, o *Objetivo Específico 03* foi atingido *parcialmente*, uma vez que foi desenvolvida uma arquitetura de implementação, alinhada ao modelo conceitual que possivelmente pode favorecer a rapidez, a simplicidade e a flexibilidade na atualização de regras de negócio no processo de tomada de decisão de rádios cognitivos em operações militares. Essa afirmação se justifica pelo fato de que, considerando que ainda não foi possível realizar testes reais de validação junto aos usuários finais, não chegamos a provar que essa hipótese é verdadeira. No entanto, a simulação realizada serve como prova de conceito, demonstrando a viabilidade e a flexibilidade de tal arquitetura. É viável pois chegamos a um código em linguagem processável pelo rádio. É flexível pois tal solução permite a geração de código em várias linguagens, podendo se adequar a RC de diversos fabricantes.

7.1 Contribuições

Considerando a importância de se representar cenas e situações do mundo real em processos de decisão em diferentes áreas do conhecimento, justificada pelas inúmeras iniciativas presentes na literatura, a ontologia CROMO contribui para melhoria da expressividade semântica na descrição de cenas e situações, em especial, no contexto dos rádio cognitivos em operações militares. Suas contribuições se iniciam na formalização de conceitos de fundamentação da ontologia UFO, que ainda não haviam sido tratados nos níveis de detalhe que o contexto de comunicações militares necessita. A partir dessa conceitualização, foi possível representar os elementos do domínio, além de estabelecer novas relações, incluindo os conceitos de cena e situação. Esses conceitos passaram a apoiar não somente a representação dos objetos e entidades do mundo real, mas também serviram de referência para a construção de uma linguagem específica de domínio, alinhada a conceitos bem fundamentados, representando uma alternativa para tornar a configuração e atualização das regras de negócio nos rádios cognitivos mais rápida, simples e flexível.

Como contribuições deste trabalho, também pode-se pontuar:

1. As definições formais dos conceitos de *situação* e *cena*, bem como suas relações mereológicas envolvendo relações de parte e todo. Além da harmonização desses conceitos no contexto da UFO, apontando as relações existentes entre cenas e eventos, disposições e proposições, além de sua influência nas relações de causalidade entre eventos e ações;

2. O desenvolvimento da ontologia *CROMO*, cobrindo o universo de discurso associado ao processo decisório em três porções de conhecimentos, a saber:
 - A descrição do processo de planejamento de comunicações alinhado com o planejamento das operações, apresentando as entidades envolvidas, seus papéis, características, relacionamentos, e como elas podem influenciar o processo de decisão dos rádios cognitivos;
 - A descrição de um cenário operacional composto por cenas e situações detectáveis por um rádio cognitivo sob pelo menos um aspecto técnico e aspectos táticos relacionados a pelo menos uma operação militar; e
 - A descrição dos elementos que compõem o Cenário Operacional e as ações envolvidas.
3. O desenvolvimento de uma linguagem específica de domínio (CROMO-RSL), com vocabulário alinhado ao utilizado no contexto de cenas e situações presentes no universo de decisão dos rádios cognitivos, durante as operações militares;
4. O desenvolvimento de um aplicação que permite a geração automática de código a partir da linguagem CROMO-RSL;
5. Contribuições presentes em nossas publicações nas áreas de:
 - modelagem de sistemas de comunicações críticos [68], onde foi apresentada uma proposta inicial de construção de modelos buscando representar de forma precisa cenários de comunicações militares. Este trabalho contribuiu para o entendimento e identificação de necessidades de representação particulares desse domínio;
 - desenvolvimento de ontologias de referência como ferramenta de apoio a decisão em atividades de pré-processamento de dados [69]. Durante este trabalho foi criada uma ontologia de referência, mapeando atividades de pré-processamento de dados. Essa ontologia serviu de base e modelo conceitual para a elaboração de um sistema de apoio a decisão voltados a usuários de ferramentas de pré-processamento de dados. O desenvolvimento dessa ontologia contribuiu, dentre outras coisas, no sentido de demonstrar como uma ontologia de referência pode ser aplicada como base conceitual no desenvolvimento de uma sistema de apoio a decisão, inspirando, no contexto dessa tese, a aplicação de ontologia deste tipo no apoio a decisão dos rádios cognitivos; e
 - desenvolvimento de linguagem específica de domínio, aplicando técnicas de MDE, para a área de rádios cognitivos [103]. Neste trabalho foi possível demonstrar como a aplicação das técnicas de MDE na construção de uma linguagem específica de domínio, baseada em modelos, pode simplificar a construção de

regras inteligíveis pelos operadores dos rádios e, após convertidas em código, processáveis pelos rádios.

7.2 Trabalhos Futuros

Como indicação de trabalhos futuros podemos sugerir a realização de novos estudos identificando novas possibilidades de uso da ontologia CROMO, além de ampliações em seu escopo e capacidade de representação. Dentre as oportunidades de pesquisa que podem ser desenvolvidas a partir desta Tese pode-se pontuar:

- verificar a viabilidade de enriquecer os conceitos da CROMO por meio do alinhamento dos mesmos com os conceitos da ontologia CRO (do inglês Cognitive Radio Ontology). Essa ontologia apresenta uma grande quantidade de conceitos inerentes aos rádios cognitivos, sua versão mais recente é considerada uma ontologia padrão do IEEE e seus conceitos de domínio são alinhados com a ontologia de fundamentação DOLCE. Desta forma, levando em conta a proximidade dos conceitos da UFO com os construtos da ontologia DOLCE, um alinhamento entre as ontologias de fundamentação e da CROMO com a CRO podem ser favorecidos. Adicionalmente, sob o viés tático, a CROMO poderia enriquecer sua capacidade de descrição de cenários operacionais incorporando conceitos presentes em padrões internacionais para a descrição de cenários militares, como o padrão MSDL;
- Observando as operações militares existentes, verifica-se um elevado número de combinações e alternativas de cenários de comunicações militares que podem ser representados. Neste contexto, uma oportunidade de pesquisa seria o aumento gradativo da capacidade de representação da ontologia CROMO, inserindo novas operações militares e outras pesquisas envolvendo questões técnicas aplicáveis aos interesses do projeto RDS-DEFESA a fim de verificar os limites de representação e processamento de cenas e situações detectáveis, desse universo de possibilidades.
- A partir da ampliação do escopo de representação da CROMO surge a possibilidade de ampliar a quantidade de conceitos presentes na gramática da linguagem CROMO-RSL. Além disso, a medida em que houver a disponibilidade física do equipamento rádio cognitivo (atualmente em desenvolvimento), será possível empregar a linguagem CROMO-RSL na configuração desses equipamentos, mensurando e avaliando o quanto essa linguagem pode simplificar, agilizar e flexibilizar o processo de configuração junto aos usuários finais.
- Uma outra oportunidade de pesquisa seria a implementação de módulos da ontologia CROMO na forma de uma ontologia operacional, onde poderiam ser instanciadas mudanças em entidades do contexto tático e aplicadas consultas sobre essa estrutura.

Neste caso, possíveis limitações na capacidade de processamento de consultas e na velocidade das respostas a essas consultas não seriam impactantes, uma vez que a velocidade das mudanças nesse tipo de contexto é da ordem de segundos, diferente das mudanças no espectro eletromagnético que precisam ser percebidas e processadas na ordem de milissegundos. Diante disso, o uso de linguagens de representação e consultas sobre ontologias operacionais, como OWL e SPARQL, empregando raciocinadores poderia ser apropriado.

- Por fim, ainda outra oportunidade de trabalho futuro consiste na utilização da ontologia CROMO como base para o desenvolvimento de sistemas componentes em um sistema de sistemas de Comando e Controle. Essa oportunidade pode acontecer no âmbito do Projeto S2C2, mencionado anteriormente.

Desta maneira, acredita-se que a ontologia CROMO e todas as contribuições dessa pesquisa podem servir de base e motivação para outros trabalhos na área de rádios cognitivos empregando ontologias. Este pode ser considerado mais uma passo no desenvolvimento tecnológico na área de defesa, no contexto acadêmico e dos projetos RDS-DEFESA e S2C2, no âmbito do Exército Brasileiro.

REFERÊNCIAS

- 1 PETERSON, M. *An Introduction to Decision Theory*. 2. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017. (Cambridge Introductions to Philosophy).
- 2 DOYLE, L. E. *Essentials of Cognitive Radio*. Leiden: Cambridge University Press, 2009. OCLC: 609834542. ISBN 978-0-511-53367-9. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/CBO9780511576577>>.
- 3 MITOLA, J.; MAGUIRE, G. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, v. 6, n. 4, p. 13–18, 1999.
- 4 HAYKIN, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 23, n. 2, p. 201–220, 2005.
- 5 BRASIL, E. C. d. O. T. B. As comunicações na Força Terrestre. *COTer- Centro de Operações Terrestres*, v. 1, 2018. Accepted: 2018-12-14T12:01:14Z Publisher: Comando de Operações Terrestres. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/2651>>.
- 6 BRUNET, J.; CLAUDON, N. Chapter 7 - Military and Big Data Revolution. In: AKHGAN, B. et al. (Ed.). *Application of Big Data for National Security*. Butterworth-Heinemann, 2015. p. 81 – 107. ISBN 978-0-12-801967-2. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128019672000070>>.
- 7 KRISHNAN, R. et al. Software defined radio (SDR) foundations, technology tradeoffs: A survey. In: *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*. Chennai: IEEE, 2017. p. 2677–2682. ISBN 978-1-5386-0813-5 978-1-5386-0814-2. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8392204>>.
- 8 MASONTA, M. et al. Spectrum Decision in Cognitive Radio Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 15, p. 1088–1107, jan. 2013.
- 9 BARWISE, J. Scenes and other situations. *The journal of Philosophy*, v. 78, n. 7, p. 369–397, 1981.
- 10 ENDSLEY, M. R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, v. 37, n. 1, p. 32–64, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1518/001872095779049543>>.
- 11 XU, W. et al. Data-Cognition-Empowered Intelligent Wireless Networks: Data, Utilities, Cognition Brain, and Architecture. *IEEE Wireless Communications*, v. 25, n. 1, p. 56–63, fev. 2018. ISSN 1536-1284.
- 12 MITOLA, J. *Cognitive Radio Architecture*. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2006. 467 p.
- 13 KOKAR, M. M. et al. Ontology-based situation awareness. *Inf. Fusion*, v. 10, n. 1, p. 83–98, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.inffus.2007.01.004>>.

- 14 MATHEUS, C. J. et al. SAWA: an assistant for higher-level fusion and situation awareness. In: DASARATHY, B. V. (Ed.). *Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications 2005*. SPIE, 2005. v. 5813, p. 75 – 85. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.604120>>.
- 15 COSTA, P. D. et al. Situations in conceptual modeling of context. In: *2006 10th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops (EDOCW'06)*. [S.l.]: IEEE, 2006. p. 6–6.
- 16 Dockhorn Costa, P. *Architectural support for context-aware applications: from context models to services platforms*. Tese (Doutorado) — University of Twente, 12 2007.
- 17 KOKAR, M. M.; ENDSLEY, M. R. Situation Awareness and Cognitive Modeling. *IEEE Intelligent Systems*, v. 27, n. 3, p. 91–96, maio 2012. ISSN 1941-1294.
- 18 PAI, F.-P. et al. Multi-layer ontology based information fusion for situation awareness. *Applied Intelligence*, v. 46, n. 2, p. 285–307, mar. 2017. ISSN 1573-7497. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10489-016-0834-7>>.
- 19 BAUMGARTNER, N. et al. BeAware!—Situation awareness, the ontology-driven way. *Data & Knowledge Engineering*, v. 69, n. 11, p. 1181 – 1193, 2010. ISSN 0169-023X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169023X1000090X>>.
- 20 MOREIRA, J. L. R. et al. Towards ontology-driven situation-aware disaster management. *Applied Ontology*, v. 10, n. 3-4, p. 339–353, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.3233/AO-150155>>.
- 21 TEIXEIRA, S. et al. LAURA architecture: Towards a simpler way of building situation-aware and business-aware IoT applications. *J. Syst. Softw.*, v. 161, 2020. March, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.110494>>.
- 22 MOREIRA, J. L. R. et al. Saref4health: Iot standard-based ontology-driven healthcare systems. In: *Formal Ontology in Information Systems - Proceedings of the 10th International Conference, FOIS 2018, Cape Town, South Africa, 19-21 September 2018*. [s.n.], 2018. p. 239–252. Disponível em: <<https://doi.org/10.3233/978-1-61499-910-2-239>>.
- 23 COSTA, P. D. et al. A model-driven approach to situations: Situation modeling and rule-based situation detection. In: *2012 IEEE 16th International Enterprise Distributed Object Computing Conference*. [S.l.]: IEEE, 2012. p. 154–163.
- 24 MOREIRA, J. et al. Ontology-Driven Conceptual Modeling for Early Warning Systems: Redesigning the Situation Modeling Language. In: . [S.l.: s.n.], 2017.
- 25 MARCUS, M. et al. Federal communications commission spectrum policy task force. *Report of the unlicensed devices and experimental licenses working group*, n. 02-135, 2002.
- 26 LI, R. et al. Intelligent 5G: When Cellular Networks Meet Artificial Intelligence. *IEEE Wireless Communications*, PP, p. 2–10, 2017.
- 27 JOUINI, W. et al. Decision making for cognitive radio equipment: analysis of the first 10 years of exploration. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2012, n. 1, p. 26, jan. 2012. ISSN 1687-1499. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-26>>.

- 28 BKASSINY, M. et al. A Survey on Machine-Learning Techniques in Cognitive Radios. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 15, n. 3, p. 1136–1159, 2013. ISSN 1553-877X.
- 29 QIN, Z. et al. 20 Years of Evolution From Cognitive to Intelligent Communications. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, v. 6, n. 1, p. 6–20, 2020.
- 30 BAHRAK, B. et al. Ontology-based spectrum access policies for policy-based cognitive radios. In: *2012 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 489–500.
- 31 KOKAR, M. M.; LECHOWICZ, L. Language Issues for Cognitive Radio. *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 4, p. 689–707, abr. 2009. ISSN 0018-9219.
- 32 LECHOWICZ, L.; KOKAR, M. Waveform reconstruction from ontological description. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, v. 78, 2014.
- 33 LAKATOS, E. M. *Fundamentos de metodologia científica* (8a. ed.). São Paulo: Grupo Gen - Atlas, 2017. OCLC: 1001376439. ISBN 978-85-970107-6-3. Disponível em: <<http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4979381>>.
- 34 FILHO, H. V. P. et al. Pesquisa e desenvolvimento de produtos de defesa: reflexões e fatos sobre o projeto rádio definido por software do ministério da defesa à luz do modelo de inovação em tríplice hélice. *Rio de Janeiro: RMCT*, v. 34, n. 1, p. 6–19, 2017.
- 35 COTER, B. E. C. de O. T. Operações. *Estado Maior do Exército*, v. 1, 2017. Accepted: 2016-10-14T12:50:33Z Publisher: Estado-Maior do Exército. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/1/848>>.
- 36 CAMILO, M. J. et al. Redes de comunicações militares: desafios tecnológicos e propostas para atendimento dos requisitos operacionais do exército brasileiro. *RMCT*, v. 37, n. 3, p. 5–25, 2020.
- 37 ALBERTS, D.; HAYES, R. Understanding command and control. p. 240, jan 2006.
- 38 EME, B. E.-M. E. Comando e controle. *Estado Maior do Exército*, v. 1, 2015. Accepted: 2016-10-13T18:47:54Z Publisher: Estado-Maior do Exército. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/374>>.
- 39 COTER, B. E. C. d. O. T. As comunicações nas operações. *Estado Maior do Exército*, v. 1, 2020. Accepted: 2016-10-14T12:50:33Z Publisher: Estado-Maior do Exército. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/7073>>.
- 40 NÓBREGA, T. C. G. P. d. *Sistemas Militares de Comando e Controle do Exército Brasileiro nas Operações*. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, 2019.
- 41 BRASIL, M. d. D. Cria a família de aplicativos de comando e controle da força terrestre e dá outras providências. *Portaria Nr 203/2015, Boletim do Exército No.12, de 20 de março de 2015*, Brasília/DF, 2015.
- 42 CARVALHO, M. Q. D. M. d. *Perspectivas da Família de Aplicativos de Comando e Controle da Força Terrestre*. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, 2016.

- 43 SALLES, R. M. et al. Novas perspectivas tecnológicas para o emprego das comunicações no exército brasileiro. *RMCT*, v. 37, n. 3, p. 68–80, 2009.
- 44 BRASIL COTER, C. d. O. T. Nota doutrinária nr 04/2021 - sistema de comando e controle da força terrestre. *Portaria - COTER/C Ex N° 143, de 9 de dezembro de 2021*, Brasília/DF, 2021.
- 45 RYAN, M.; FRATER, M. *Tactical Communications for the Digitized Battlefield*. Artech House, 2002. (Artech House information warfare library). ISBN 9781580533232. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=8K8pOgaQZ1MC>>.
- 46 COOK, P. G.; BONSER, W. Architectural overview of the speakeasy system. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, IEEE, v. 17, n. 4, p. 650–661, 1999.
- 47 MITOLA, J. The software radio architecture. *IEEE Communications Magazine*, v. 33, n. 5, p. 26–38, 1995.
- 48 GIBSON, J. D. *The communications handbook*. [S.l.]: CRC press, 2018.
- 49 MACHADO-FERNÁNDEZ, J. R. Software defined radio: Basic principles and applications. *Revista Facultad de Ingeniería*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, v. 24, n. 38, p. 79–96, 2015.
- 50 WYGLINSKI, A. M. et al. When radio meets software. *Cognitive Radio Communications and Networks. Principles and Practice*, AM Wyglinski, M. Nekovee, YT Hou, Ed. Elsevier: USA, p. 1–13, 2010.
- 51 III, J. An integrated agent architecture for software defined radio. *Ph.D. Dissertation, KTH*, 07 2000.
- 52 GALDINO, J. et al. Introdução ao Desenvolvimento de Rádios Definidos por Software para Aplicações de Defesa. In: . [S.l.: s.n.], 2012.
- 53 BARROS, L. G. d. *O RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE*. Tese (Graduação) — UNiversidade de Brasília, Brasilia-DF, 2007. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/958/1/2007_Let%C3%ADciaGarciaBarros.pdf>.
- 54 SILVA, W. et al. Introdução a rádios definidos por software com aplicações em gnu radio. Minicurso. In: *XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos—SBRC*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 315.
- 55 GRUBER, T. R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, v. 5, n. 2, p. 199 – 220, 1993. ISSN 1042-8143. Jan, 2020. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1042814383710083>>.
- 56 BORST, W. N.; BORST, W. N. *Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse*. Tese (PhD Thesis) — University of Twente, Netherlands, 1997.
- 57 STUDER, R. et al. Knowledge engineering: Principles and methods. *Data & Knowledge Engineering*, v. 25, n. 1-2, p. 161–197, mar. 1998. ISSN 0169023X. Jan, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169023X97000566>>.
- 58 GUARINO, N. et al. What is an ontology? In: _____. *Handbook on Ontologies*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–17.

- 59 GUARINO, N. Formal ontology in information systems. In: *Proceedings of the First International Conference (FOIS 98)*. Padoval: IOS Press, 1998. (Workshop on Enterprise Architecture, 4), p. 3–15.
- 60 FALBO, R. d. A. Sabio: Systematic approach for building ontologies. In: GUIZZARDI, G. et al. (Ed.). *Proceedings of the 1st Joint Workshop ONTO.COM / ODISE on Ontologies in Conceptual Modeling and Information Systems Engineering 2014*. CEUR-WS.org, 2014. (CEUR, 1). March, 2019. Disponível em: <<http://ceur-ws.org/Vol-1301/ontocomodise2014\2.pdf>>.
- 61 HERRE, H. General Formal Ontology (GFO): A foundational ontology for conceptual modelling. In: *Theory and applications of ontology: computer applications*. [S.l.]: Springer, 2010. p. 297–345.
- 62 LU, S.; KOKAR, M. M. A Method to Identify Relevant Information Sufficient to Answer Situation Dependent Queries. In: *2018 IEEE (CogSIMA)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 22–28.
- 63 GANGEMI, A. et al. Sweetening ontologies with DOLCE. In: *International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management*. [S.l.]: Springer, 2002. p. 166–181.
- 64 GUIZZARDI, G. et al. Towards ontological foundations for conceptual modeling: The unified foundational ontology (UFO) story. *Applied ontology*, v. 10, n. 3-4, p. 259–271, 2015. Publisher: IOS Press.
- 65 GUIZZARDI, R. et al. A core ontology on decision making. In: *Proceedings of the XIII Seminar on Ontology Research in Brazil and IV Doctoral and Masters Consortium on Ontologies (ONTOBRAS 2020)*. [S.l.]: CEUR-WS, 2020. (CEUR Workshop Proceedings, v. 2728), p. 13. ISSN: 1613-0073.
- 66 GUIZZARDI, G. et al. UFO: Unified Foundational Ontology. *Applied Ontology*, dez. 2021.
- 67 GHOSH, M. E. et al. Using the Unified Foundational Ontology (UFO) for Grounding Legal Domain Ontologies. In: *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management - Volume 2: KEOD, (IC3K 2017)*. [S.l.]: SciTePress, 2017. p. 219–225. ISBN 978-989-758-305-6. Backup Publisher: INSTICC.
- 68 TESOLIN, J. et al. Critical Communications Scenarios Description Based on Ontological Analysis. In: *ONTOBRAS*. [S.l.: s.n.], 2020.
- 69 MOURA, L. d. A. L. et al. A Well-founded Ontology to Support the Preparation of Training and Test Datasets. In: FILIPE, J. et al. (Ed.). *Proceedings of the 23rd International Conference on Enterprise Information Systems, ICEIS 2021, Online Streaming, April 26-28, 2021, Volume 2*. SCITEPRESS, 2021. p. 99–110. Disponível em: <<https://doi.org/10.5220/0010460000990110>>.
- 70 GUIZZARDI, G. *Ontological foundations for structural conceptual models*. Tese (PhD Thesis) — University of Twente, The Netherlands, out. 2005. ISBN: 90-75176-81-3 Issue: 05-74 Series: CTIT PhD Thesis Series.

- 71 GUIZZARDI, G. et al. Grounding Software Domain Ontologies in the Unified Foundational Ontology (UFO): The case of the ODE Software Process Ontology. In: . [S.l.: s.n.], 2008. p. 127–140.
- 72 GUIZZARDI, G. et al. Towards ontological foundations for the conceptual modeling of events. In: *International Conference on Conceptual Modeling*. [S.l.]: Springer, 2013. p. 327–341.
- 73 ALMEIDA, J. P. A. et al. Events as Entities in Ontology-Driven Conceptual Modeling. In: LAENDER, A. H. F. et al. (Ed.). *Conceptual Modeling - 38th International Conference, ER 2019, Salvador, Brazil, November 4-7, 2019, Proceedings*. Springer, 2019. (Lecture Notes in Computer Science, v. 11788), p. 469–483. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-030-33223-5\39>>.
- 74 GUIZZARDI, G. et al. Ontological considerations about the representation of events and endurants in business models. In: *International Conference on Business Process Management*. [S.l.]: Springer, 2016. p. 20–36.
- 75 BRINGUENTE, A. et al. Using a Foundational Ontology for Reengineering a Software Process Ontology. *JIDM*, v. 2, p. 511–526, jan. 2011.
- 76 ALMEIDA, J. P. A. et al. Towards an Ontology of Scenes and Situations. In: *2018 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 29–35.
- 77 FINE, K. Things and Their Parts. *Midwest Studies In Philosophy*, v. 23, n. 1, p. 61–74, 1999. April, 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1475-4975.00004>>.
- 78 FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M. et al. Methontology: from ontological art towards ontological engineering. *AAAI-97 Spring Symposium Series*, 1997. Publisher: American Association for Artificial Intelligence.
- 79 SUÁREZ-FIGUEROA, M. C. et al. The NeOn Methodology framework: A scenario-based methodology for ontology development. *Applied Ontology*, v. 10, p. 107–145, set. 2015.
- 80 FALBO, R. d. A. SABiO: Systematic Approach for Building Ontologies. In: *ONTO.COM/ODISE@ FOIS*. [S.l.: s.n.], 2014.
- 81 BRAMBILLA, M. et al. Model-driven software engineering in practice: Second edition. *Synthesis Lectures on Software Engineering*, v. 3, p. 1–207, 03 2017.
- 82 VIEIRA, M. A.; CARVALHO, S. Model-driven Engineering in the Development of Ubiquitous Applications: Technologies, Tools and Languages. In: . [S.l.: s.n.], 2017. p. 29–32.
- 83 WIRTH, N. *Algorithms & data structures*. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc., 1985.
- 84 BENEVIDES, A. et al. Towards a unified theory of endurants and perdurants: Ufo-ab. In: . [S.l.: s.n.], 2019.
- 85 JÚNIOR, P. S. et al. An ontology-based analysis and semantics for organizational structure modeling in the aris method. *Information Systems*, v. 38, p. 690–708, 07 2013.

- 86 GUZZARDI, G.; WAGNER, G. What's in a relationship: an ontological analysis. In: *International Conference on Conceptual Modeling*. [S.l.]: Springer, 2008. p. 83–97.
- 87 LANDO, G. *Mereology: A philosophical introduction*. [S.l.]: Bloomsbury Publishing, 2017.
- 88 GAMMA, E. et al. *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. [S.l.]: Pearson Deutschland GmbH, 1995.
- 89 HERRE, H. et al. General Formal Ontology (GFO) - A Foundational Ontology Integrating Objects and Processes [Version 1.0]. jul. 2006.
- 90 LOEBE, F. et al. GFO: The General Formal Ontology. *Applied Ontology*, v. 17, n. 1, p. 71–106, 2022. ISSN 1875-8533. Publisher: IOS Press.
- 91 GUZZARDI, G. *Ontological Foundations for Structural Conceptual Models*. Tese (Doutorado) — Centre for Telematics and Information Technology, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2005. Disponível em: <<http://www.loa.istc.cnr.it/Guizzardi/SELMAS-CR.pdf>>. Acesso em: 3 jul. 2011.
- 92 ALLEN, J. F. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, v. 26, n. 11, p. 832–843, 1983. Publisher: ACM New York, NY, USA.
- 93 WIŚNIEWSKI, D. et al. Analysis of Ontology Competency Questions and their formalisations in SPARQL-OWL. *Journal of Web Semantics*, v. 59, nov. 2019.
- 94 BEZERRA, C. et al. CQChecker: A Tool to Check Ontologies in OWL-DL using Competency Questions written in Controlled Natural Language. *Learning and Nonlinear Models*, v. 12, p. 115–129, 2014.
- 95 CHINOSI, M.; TROMBETTA, A. BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*, v. 34, n. 1, p. 124–134, 2012. ISSN 0920-5489. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920548911000766>>.
- 96 MOURA, D. F.; GALDINO, J. *Cooperação entre Camadas para Adaptação de modulação em redes Militares sem Fio*. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.
- 97 LI, S.; KOKAR, M. Cognitive radio ontology. In: _____. *Flexible Adaptation in Cognitive Radios*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 67–78.
- 98 SURESH, D. et al. Updating cro to cro2. In: *Wireless Innovation Forum 2015*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 8.
- 99 CHEN, Y. et al. Mapping spectrum consumption models to cognitive radio ontology for automatic inference. In: *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 13.
- 100 XINYE, Z. et al. Structure and content enhancement to military scenario definition language. In: IEEE. *2012 IEEE Symposium on Robotics and Applications (ISRA)*. [S.l.], 2012. p. 379–382.
- 101 STINE, J. A.; BASTIDAS, C. E. C. Enabling Spectrum Sharing via Spectrum Consumption Models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 33, n. 4, p. 725–735, abr. 2015. ISSN 1558-0008.

- 102 GOHAIN, P. B. et al. Cooperative energy detection with heterogeneous sensors under noise uncertainty: Snr wall and use of evidence theory. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, IEEE, v. 4, n. 3, p. 473–485, 2018.
- 103 SILVA, M. A. A. d. et al. Engenharia dirigida a modelos aplicada à cognição de rádios em operações militares. *RMCT*, -Artigo Aceito, n. -, p. -, 2022.
- 104 BRASIL, M. d. D. Manual de abreviaturas, siglas, símbolos e convenções cartográficas das forças armadas. *Ministério da Defesa*, v. 1, 2021. Accepted: 2021-10-01 Publisher: Ministério da Defesa. Disponível em: <<https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/File/legislacao/emcfa/publicacoes/manual-md33-m-02-manual-de-abreviaturas-siglas-simbolos-e-convencoes-cartograficas.pdf>>.
- 105 HORROCKS et al. SWRL: A Semantic Web rule language combining OWL and RuleML. *W3C Subm*, v. 21, jan. 2004.
- 106 JONATHAN, B. et al. Create Domain-Specific Language and Syntax Checker Using Xtext. *International Journal of Industrial Research and Applied Engineering*, v. 4, ago. 2020.
- 107 RIESER, C. J. *Biologically inspired cognitive radio engine model utilizing distributed genetic algorithms for secure and robust wireless communications and networking*. Tese (Doutorado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- 108 YING, X. et al. Exploring indoor white spaces in metropolises. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, ACM New York, NY, USA, v. 9, n. 1, p. 1–25, 2017.
- 109 LÓPEZ-BENÍTEZ, M. et al. Spectral occupation measurements and blind standard recognition sensor for cognitive radio networks. In: IEEE. *2009 4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*. [S.l.], 2009. p. 1–9.
- 110 JOUINI, W. Energy detection limits under log-normal approximated noise uncertainty. *IEEE Signal Processing Letters*, IEEE, v. 18, n. 7, p. 423–426, 2011.
- 111 YUCEK, T.; ARSLAN, H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 116–130, 2009.
- 112 MOSKAL, J. et al. Towards collaborative and dynamic spectrum sharing via interpretation of spectrum access policies. *Applied Sciences*, MDPI, v. 11, n. 15, p. 7056, 2021.
- 113 SANTOS, H. et al. A semantic framework for enabling radio spectrum policy management and evaluation. In: SPRINGER. *International Semantic Web Conference*. [S.l.], 2020. p. 482–498.
- 114 LECHOWICZ, L.; KOKAR, M. M. *Cognitive radio: interoperability through waveform reconfiguration*. Boston London: Artech House, 2016. (Artech house mobile communications series). OCLC: ocn922455168. ISBN 978-1-60807-753-3.
- 115 LEE, K.-E. et al. Intelligent cognitive radio ad-hoc network: planning, learning and dynamic configuration. *Electronics*, MDPI, v. 10, n. 3, p. 254, 2021.

- 116 ULVERSØY, T.; HALVORSEN, J. An overview of policy-based spectrum management for em systems. Nato STO, 2016.
- 117 MATHEUS, C. J. et al. Basevisor: A triples-based inference engine outfitted to process ruleml and r-entailment rules. In: IEEE. *2006 Second International Conference on Rules and Rule Markup Languages for the Semantic Web (RuleML'06)*. [S.l.], 2006. p. 67–74.
- 118 BARWISE, J. Scenes and other situations. *Journal of Philosophy*, v. 78, n. 7, p. 369–397, 1981. Disponível em: <www.scopus.com>.
- 119 BARWISE, J.; PERRY, J. Situations and attitudes. *Noûs*, v. 25, n. 5, p. 743–770, 1981.