

# Engenharia Dirigida a Modelos Aplicada à Cognição de Rádios em Operações Militares

Marcus Albert Alves da Silva<sup>1\*</sup>, Gabriel Bozza<sup>1</sup>, Milena Mayara Ruy<sup>1</sup>, Cláudia Reis Cavalcanti<sup>1</sup>, David Fernandes Cruz Moura<sup>1</sup>, David Fernandes Cruz Moura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME)

<sup>2</sup>Universidade de Twente

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

\* m\_albert@ime.eb.br

**RESUMO:** O dinamismo do ambiente de comunicações militares faz dos rádios cognitivos uma alternativa promissora, em virtude de sua versatilidade para sensoriar o ambiente e mudar seu modo de operação de forma autônoma. Essas mudanças são baseadas em regras fundamentadas na doutrina militar e nas normas de telecomunicações, que podem mudar em função de alterações no cenário militar. A capacidade de reagir e se adaptar, com rapidez, às novas regras e condições é um diferencial que, em situações de guerra, pode evitar ou prevenir o fratricídio. Buscando atingir essa rapidez, esta pesquisa usou técnicas de engenharia dirigida a modelos, como Linguagens Específicas de Domínio (DSL) e transformações de modelos em código fonte aplicadas a rádios cognitivos, em operações militares. Estes conceitos foram aplicados em um estudo de caso, agilizando a atualização das regras e empregando uma estratégia de janelas deslizantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rádio Cognitivo. Operações militares. Engenharia Dirigida a Modelos. Linguagem Específica de Domínio.

## 1. Introdução

Entre os diversos meios de comunicação usados nos sistemas de comunicações militares, o espectro eletromagnético é compartilhado por rádios, radares, sistemas de armas e outros tipos de dispositivos. Durante as operações militares, esses sistemas garantem a comunicabilidade entre o comando e a tropa, dando suporte aos sistemas de Comando e Controle (C2). A diversidade de tipos de operações pode exigir mudanças no comportamento dos meios de comunicação, considerando requisitos técnicos (qualidade do sinal, alcance, susceptibilidade a ruídos etc.) e táticos de uma operação (quando o rádio deve operar em baixa potência para evitar detecção inimiga). A combinação das capacidades do rádio definido por software (RDS) e do rádio cognitivo (RC) [1, 2] despontam como uma alternativa para atender às variações desses requisitos, com a agilidade requerida por um ambiente de guerra.

**ABSTRACT:** The dynamic nature of the military communications environment makes cognitive radio a promising alternative due to its versatility in sensing the environment and changing its operation mode autonomously. These changes must be grounded in military doctrine and telecommunications standards, which may vary from different military scenarios. In war situations, quick reaction and adaptation to new rules and conditions are desirable to avoid or prevent fratricide. This research applies Model-Driven Engineering (MDE) techniques to achieve fast adaptation, by using Domain-Specific Languages (DSL) and source code model transformations applied to cognitive radios in military operations. In a study case, these concepts were applied, speeding up the update of rules and employing a sliding windows strategy.

**KEYWORDS:** Cognitive Radio. Military Operations. Model-Driven Engineering. Domain-Specific Language.

Até onde foi possível investigar, há estudos focados em agilizar a configuração do RDS em operações militares, porém, ainda sem contemplar a definição de regras para decisões autônomas do rádio cognitivo [3]. Por outro lado, outros trabalhos em áreas de gerenciamento de desastres [4], de urgências médicas envolvendo sensores de Internet das coisas [5] ou mesmo na área empresarial de negócios [6] indicam que o uso de Engenharia Dirigida a Modelos (MDE, do inglês *Model Driven Engineering*) poderia ser apropriado em ambientes que necessitam de agilidade na atualização de regras que definem ações a serem executadas.

Este trabalho propõe o uso de uma abordagem baseada em MDE como alternativa para agilizar a construção de regras que definirão o comportamento de rádios cognitivos em um sistema de comunicações militares. Neste contexto, foi desenvolvida uma linguagem específica de domínio (DSL, do inglês *Domain Specific Language*), que

facilita a descrição de regras, favorece a transformação de modelos e a geração automática de códigos. Neste ambiente experimental, as informações técnicas e táticas sensoriadas pelo equipamento foram submetidas às regras que definiram o modo de operação do rádio.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma revisão de literatura acerca de sistemas de comando e controle, comunicações nas operações militares, RDS, RC e MDE; a Seção 3 apresenta alguns trabalhos relacionados, indicando o potencial do emprego de MDE em sistemas de comunicações militares; a Seção 4 descreve um estudo de caso; em seguida, há as considerações finais e indicações de trabalhos futuros nas Seções 5 e 6, respectivamente.

## 2. Revisão de literatura

nesta seção, são tratados conceitos envolvendo as comunicações militares nas operações.

### 2.1 Operações militares

Operação militar é o nome dado ao conjunto de ações empregando forças e meios militares, coordenadas em tempo, espaço e finalidade, seguindo uma diretriz, plano ou ordem. Pode ocorrer em momentos de paz, guerra ou em situações de crise, sob a responsabilidade de uma autoridade militar [7]. Nas operações de guerra, há conflito armado e o poder militar se manifesta com uso de violência. Nas operações em momentos de paz, este poder é empregado em tarefas não relacionadas ao combate, exceto em circunstâncias especiais [8].

As operações militares podem ser classificadas quanto às forças empregadas e quanto à sua finalidade. Quanto ao emprego das forças, podem ser singulares (desenvolvidas por apenas uma força armada), conjuntas (empregam meios ponderáveis de mais de uma força singular) ou combinadas (composta de elementos ponderáveis de forças armadas multinacionais, sob um único comando).

Sob o viés finalístico, podem ser classificadas como básicas ou complementares [7]. As operações básicas, em situações de guerra, podem ser ofensivas, defensivas ou de cooperação e coordenação com

agências, estas últimas mais comuns em situações de paz. Já as complementares, possuem dezessete tipos diferentes de operações destinadas a ampliar, aperfeiçoar e/ou complementar as operações básicas. Não faz parte do escopo desse trabalho detalhar as diversas operações, porém cabe destacar que, para cada operação, há um conjunto de regras e restrições a serem adotadas pelos recursos de pessoal e de comunicações envolvidos, em consonância com o contexto e a doutrina militar em vigor. Em outras palavras, durante uma operação específica, um rádio pode ter que operar em determinada frequência, com baixa potência de sinal, por força contextual e da doutrina.

### 2.2 Sistemas de Comando e Controle (C2) e Sistemas de Comunicações

Os Sistemas de Comando e Controle (C2) formam um ambiente onde comandantes manifestam intenções de comando e executam ações para atingir objetivos, de forma controlada. Além disso, podem determinar funções e responsabilidades, bem como estabelecer regras e restrições ao contexto e aos elementos subordinados [9]. Essas ações caracterizam comportamentos definidos com base no entendimento ganho pelo monitoramento e pela 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.

No Exército Brasileiro (EB), por meio do sistema C2 apoiado em sistemas de comunicações e informações, alinhados com a doutrina de emprego das comunicações [10], o comandante planeja, dirige e controla forças e operações [11].

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 por satélite, micro-ondas em visada direta ou tropodifusão, utilizando diferentes formas de onda.

A doutrina militar [10] define os meios, as formas de operação e o emprego dos recursos de comunicações. Tais condições e circunstâncias podem envolver questões táticas, doutrinárias e fisiográficas, além de limitações técnicas e o papel de cada equipamento nas operações.

Em sistemas de comunicações militares, o alcance, a capacidade e a mobilidade são fatores relevantes [12], que compõem o chamado Triângulo de Compensação, que é uma forma simples de avaliar a pertinência do emprego de um meio de comunicação.

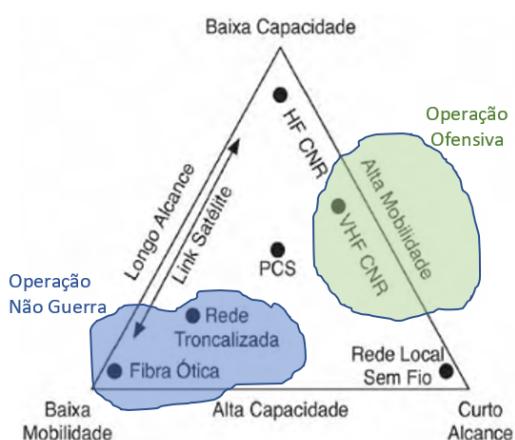
Na Tabela 1, em cada operação de exemplo (ofensiva e não guerra), a tecnologia a ser empregada varia em função dos requisitos definidos, doutrinariamente, para cada um dos fatores associados aos equipamentos de comunicações utilizados.

**Tabela 1** - Fatores do Triângulo da Compensação aplicados a Subsistemas.

Subsistema	Rádio 1	Rádio 2
<b>Operação</b>	Ofensiva	Não Guerra
<b>Alcance</b>	Médio	Alto
<b>Mobilidade</b>	Alta	Baixa
<b>Capacidade</b>	Média	Alta
<b>Tecnologia</b>	VHF	Rede Troncalizada

Considerando os requisitos de cada operação, descritos na Tabela 1, elas são representadas no triângulo de compensação, conforme mostra a Figura 1.

**Figura 1** - Triângulo de Compensação, Adaptado de [12]



Tecnologias como a dos rádios definidos por softwares e dos rádios cognitivos são apropriadas a essas variações de requisitos.

## 2.3 Rádio Definido por Software (RDS)

Um RDS é um tipo de rádio cuja maior parte dos componentes físicos são construídos por meio de software [1, 2], podendo usar máquinas virtuais e agentes inteligentes [13]. Ele é considerado uma evolução dos rádios tradicionais, em que funções como modulação, demodulação e filtragens podem ser implementadas por software e não por hardware. Reconfigurabilidade, flexibilidade e modularidade são características marcantes do RDS, que pode ser reconfigurado sem alterações no hardware [14].

Essas possibilidades tornam os sistemas de comunicação capazes de operar em mais de um modo, com diferentes formas de onda, com o mesmo hardware [15]. 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, entre outras funcionalidades [16].

## 2.4 Rádio Cognitivo (RC)

Um rádio cognitivo (RC) é um RDS capaz de sensoriar o ambiente, mudar suas características e seu funcionamento, podendo adaptar sua operação para atingir objetivos como melhoria de desempenho, economia de energia e adequação às condições operacionais no local em que está inserido [2, 15]. O RC também é capaz de aprender com o comportamento passado, empregando técnicas de aprendizado de máquina, buscando melhorar seu funcionamento ao longo do tempo de operação, análogo ao que um humano faria [17].

Segundo Doyle [18], o RC é um dispositivo que percebe entradas ou visões do mundo real e, a partir do entendimento delas, 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, bem como pelo conhecimento da operação em que se está inserido e o seu papel nela.

Os requisitos de comunicações estão ligados a quais capacidades o equipamento deve ter para atender às demandas dos sistemas de comunicações (qualidade de serviço, nível de ruído tolerado etc.)

As políticas e as regras envolvem tanto normas para exploração e uso do espectro eletromagnético, como manuais de doutrina militar de comunicações [12].

Conhecer as próprias capacidades significa saber os limites de percepção e de operação do equipamento, tais como potência máxima ou formas de onda sensoriadas ou transmitidas.

Diferentes tipos de métodos cognitivos podem ser aplicados aos rádios cognitivos, alguns baseados em modelos matemáticos ou em algoritmos de aprendizado de máquina apresentados por Xu et al [19] poderiam ser adequados a definições de comportamentos do rádio ligadas a questões técnicas, como economia de energia, redução de níveis de ruído, entre outras. Por outro lado, quando a decisão se baseia em regras doutrinárias rígidas, seriam apropriados modelos baseados em regras [19], cujas estruturas de conhecimento, tais como tabelas e árvores de decisão, são desejáveis.

## 2.5 Engenharia Dirigida a Modelos

No contexto da engenharia de software, um modelo é uma forma de representação gráfica ou textual de um sistema, em que as abstrações e os relacionamentos empregados são descritos por um metamodelo [20].

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 [21].

A engenharia dirigida a modelos (MDE) emprega metodologias que os concebem como artefatos elementares no processo de desenvolvimento de software e

não apenas como documentação de um projeto [21]. Em outras palavras, o modelo é parte constituinte do sistema e, mesmo passando por transformações, estará sempre alinhado com a implementação física dele.

Comparando MDE com abordagens como a programação estruturada e a programação orientada a objetos, observa-se 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) [21].

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. Já as transformações *Modelo-para-Texto* geram, a partir dos modelos, artefatos de software, por meio de uma técnica chamada geração de código. A definição de uma linguagem específica de domínio (DSL) possibilita o uso de transformações M2T.

Uma DSL é criada especificamente para um determinado domínio de aplicação, como linguagens usadas para fazer projeções em bancos de dados (CSQC) ou linguagens que marcam textos para apresentação na Web (HTML). Este tipo de linguagem é próximo ao universo de entendimento dos usuários do domínio, contribuindo com a agilidade no processo de construção deste nível de abstração.

## 3. TRABALHOS RELACIONADOS

Aproveitando as características dos rádios definidos por software, em [3] os autores propõem uma ferramenta que facilita a configuração dos equipamentos de rádio que irão participar de uma operação militar. Nesse caso, diferentes configurações elaboradas por software podem ser distribuídas a cada equipamento, usando um arquivo padrão de configuração, entretanto, sem explorar o uso de um método de cognição no rádio, possibilitando mudanças no funcionamento, a partir do entendimento do ambiente e definições prévias de planejamento.

Por outro lado, trabalhos com foco em contextos de apoio à decisão aplicaram MDE em ambientes de complexidade similar ao cenário de comunicações nas operações militares, como na detecção de fraudes bancárias, segurança e saúde pública, gestão de catástrofes, entre outras. Nestes ambientes, o tempo de entendimento das informações observadas também é um fator importante. Além disso, o modelo cognitivo é baseado em regras que podem classificar e identificar as situações percebidas, podendo gerar entendimento sobre o ambiente e apoiar a tomada de decisões.

O trabalho de Costa et al. [22] apresenta um cenário onde o sistema é capaz de identificar situações e reagir ao ambiente que está inserido. Neste contexto, uma DSL aplicada à descrição de situações do mundo real (SML, do inglês *Situation Modeling Language*) serve de base para a construção de um conjunto de regras que são executadas em uma plataforma de software centralizada, baseada em regras (DROOLS). Esta plataforma permite a análise dos dados coletados no ambiente em uma janela temporal de observação. A fim de validar a proposta, foi realizado um estudo de caso com foco na detecção de possíveis fraudes bancárias em um sistema de banco móvel. A pesquisa de Moreira et al. [4], direcionada à gestão de desastres e de emergências, usa MDE na conversão de textos expressos em SML (mesma utilizada por Costa et al. [22]), em regras processáveis em código executável. Além disso, também aborda a questão da interoperabilidade de dados, justificada pela interação entre os agentes envolvidos. O uso de ontologias é apontado como uma alternativa favorável na modelagem conceitual, em aplicações baseadas em consciência situacional.

No livro de Brambilla [23], é apresentada uma DSL usada especificamente para favorecer a interação com usuários no desenvolvimento de aplicações de software.

Soleymanzadeh et al.[24] criaram um ambiente gráfico para facilitar o entendimento dos usuários do domínio na construção de regras de negócio a serem atendidas por uma aplicação. O trabalho aplica técnicas de MDE na tradução das regras criadas para a estrutura mais próxima ao domínio de aplicação. Além disso, foi realizado um estudo de caso na área de cobranças de honorários advocatícios.

Neste contexto, a abordagem MDE tem demonstrado boas possibilidades de utilização na conversão de modelos e no uso e desenvolvimento de linguagens específicas de domínio que podem auxiliar o entendimento do usuário que irá inserir as regras de negócio. Essas iniciativas demonstram que o uso de uma DSL pode favorecer a agilidade na elaboração de regras. Contudo, ainda não foram observados trabalhos aplicados a rádios cognitivos, em proveito da agilidade na construção e configuração de regras aplicáveis aos dados sensoriados. Além disso, as abordagens até então avaliadas também não tratam regras concorrentes ou estabelecem prioridades para elas.

## 4. Modelando regras em sistemas de rádios cognitivos

este trabalho apresenta uma abordagem baseada em MDE para agilizar a construção de regras de comportamento de rádios cognitivos em um sistema de comunicações militares. Estas regras serão transformadas em código inteligível pelo equipamento e, a partir delas, o rádio poderá mudar o seu próprio comportamento (modo de operação) caso haja variações significativas do ambiente que possam ser percebidas e entendidas por ele.

Inicialmente, será descrito um pequeno cenário hipotético, demonstrando rádios cognitivos atuando em operações militares, empregando modos de operação variados.

No cenário descrito pelo diagrama de sequência da Figura 2, temos três rádios envolvidos em duas operações (A e B). Na operação A temos os rádios do comandante da operação e de um operador, enquanto na operação B temos apenas o rádio do comandante da operação.

Neste ambiente, três modos de operação são usados: 1- o modo Silêncio (*SilentMode*), em que o equipamento está ligado, porém não emite nenhum sinal; 2 - o modo VHF de baixa potência (modo normal); e 3 - o modo VHF de baixa potência FD. Neste último, a sigla FD significa que o equipamento pode operar no modo In-band Full Duplex, no qual o rádio transmite e recebe na mesma frequência de forma simultânea, produzindo uma interferência sobre seu próprio sinal e aumentando a segurança na camada física [8].

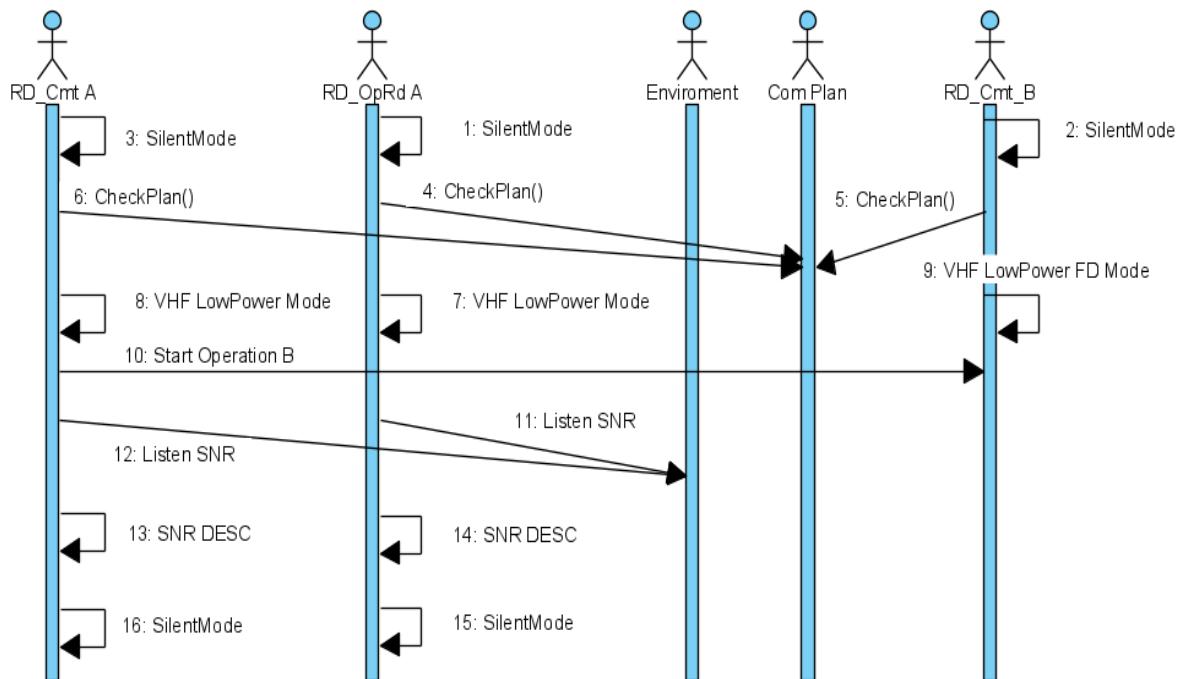
O plano de comunicações (*Com Plan*), acessado pelos rádios, contém detalhes sobre as operações nas quais os equipamentos participam. Ele descreve o tipo da operação, o papel do rádio e suas possibilidades.

A partir das leituras do nível de sinal e do nível de ruído presentes no ambiente, pode ser estabelecida a relação sinal ruído (SNR, do inglês “*Signal-to-Noise Ratio*”), ou seja, a relação entre o nível de sinal recebido e o nível de ruído percebido no ambiente eletromagnético. Uma queda em SNR pode ser ocasionada

por uma baixa no nível de sinal recebido ou pelo aumento do nível de ruído percebido.

O ambiente eletromagnético (*Environment*) ilustra a ação de sensoriamento do ambiente executada pelos rádios. Inicialmente, todos funcionam em modo silêncio. Em seguida, uma aplicação de checagem de plano de comunicações é executada e informações como nível de segurança (*Security Level*), que depende da criticidade da operação [25], papel do equipamento na operação (*Operational Role*), frequência do canal utilizado (*Carrier Frequency*), entre outras podem ser coletadas.

**Figura 2** - As comunicações nas operações



A partir destas informações, o rádio poderá definir seu modo de operação, em conjunto com regras pré-definidas. Nesse exemplo, o modo definido foi o VHF baixa potência. Na sequência, mensagens são trocadas entre os equipamentos rádio das Cmt das operações (RD\_Cmt\_A e RD\_Cmt\_B). Além disso, os equipamentos da operação A verificam o ambiente e percebem que a relação SNR apresenta um decréscimo (SNR DESC), ou seja, houve uma perda

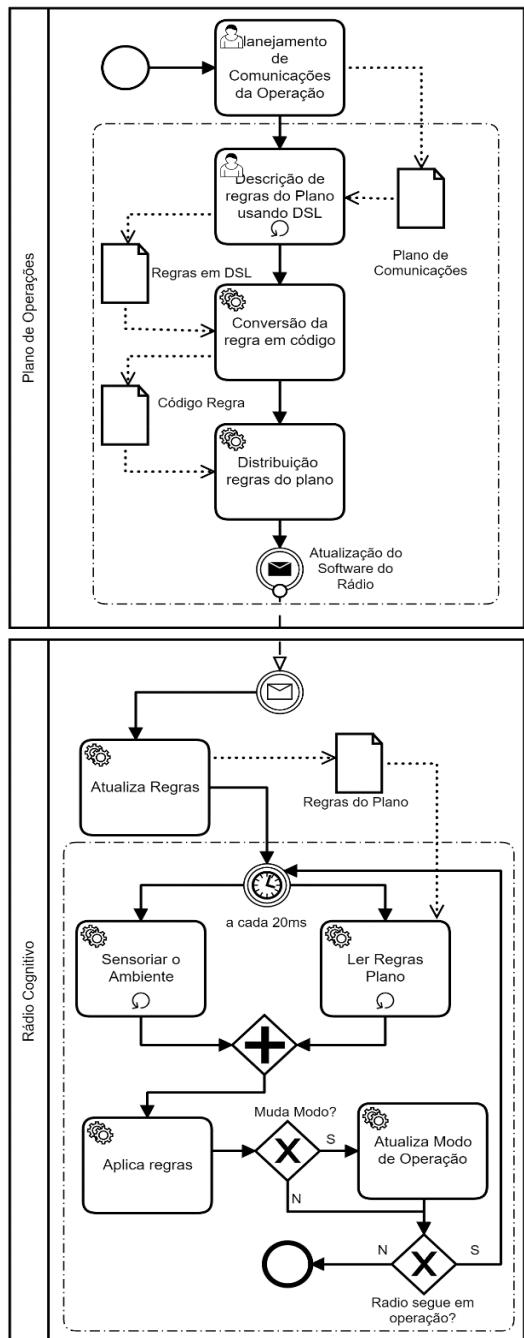
na qualidade do sinal recebido. Nesse caso, a regra define que há mudança no modo de operação, e passa-se a operar no modo VHF baixa potência FD.

Podemos classificar esse tipo de mudança como técnica, pois tiveram o objetivo de melhorar a qualidade das comunicações. Por outro lado, poderiam ter sido motivadas por questões táticas, como a preparação para um ataque, em que poderia ser estabelecido o modo silêncio, caracterizando uma mudança tática.

## 4.1 Visão Geral e Escopo da Pesquisa

Por meio da notação BPMN<sup>1</sup>, a Figura 3 apresenta uma visão geral da abordagem que estamos propondo neste trabalho, destacando tarefas e alguns resultados produzidos em cada uma das etapas.

**Figura 3 - Visão Geral da Abordagem**



1 BPMN- do ingles Business Process Model and Notation [26]

Duas *swimlanes* da notação BPMN estão representadas, de forma que uma delas represente um sistema dedicado ao planejamento de comunicações, no qual o oficial de comunicações elabora o plano de comunicações que irá determinar o comportamento do rádio cognitivo.

Uma vez definidas as configurações e regras no Plano de Comunicações, as regras serão descritas por meio de uma linguagem DSL especialmente concebida para esse contexto. As regras expressas são convertidas em código de uma linguagem de programação compatível com o software e a plataforma de hardware do rádio cognitivo. Nesse momento, os rádios precisam ser “atualizados” com o novo código, para que as regras passem a valer e determinar o seu comportamento durante a operação. Ao entrar em operação, o rádio cognitivo, de maneira cíclica, sensoria o ambiente e lê o plano de comunicações, além de aplicar as regras e, conforme o caso, mudar o seu modo de operação.

As partes tracejadas da Figura 3 indicam o escopo do que foi implementado neste trabalho. No sistema de planejamento foram aplicadas técnicas baseadas em MDE, e no rádio cognitivo foi feita uma simulação do sensoriamento do ambiente, da leitura do plano e da aplicação das regras e da definição do modo de operação, de forma autônoma.

Vale notar que o conjunto de regras pode ser alterado, e o esquema proposto pode facilitar a realização de alterações de modo ágil.

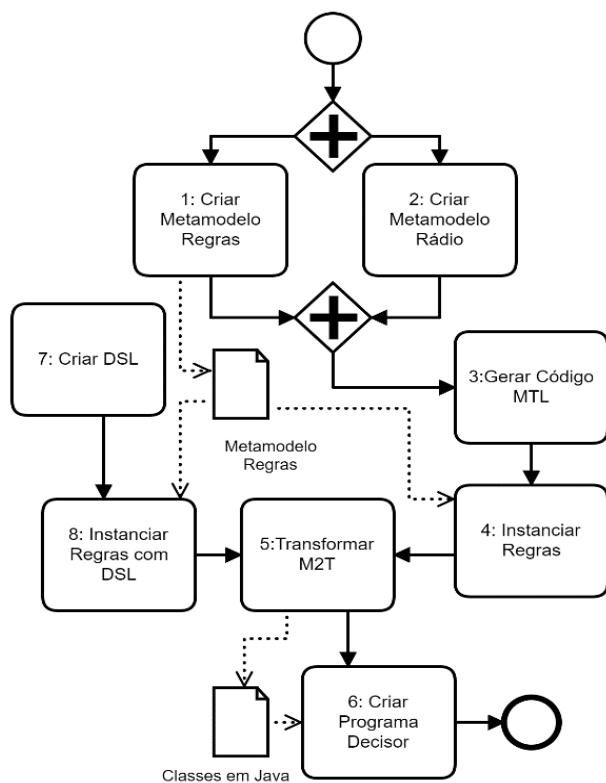
Neste trabalho, como alternativa de validação, um estudo de caso simulou o sensoriamento do ambiente e a aplicação das regras, definindo o modo de operação do rádio.

## 4.2 Metodologia aplicada

A Figura 4 descreve os procedimentos metodológicos deste trabalho, em que foram desenvolvidos um metamodelo descrevendo um rádio cognitivo em um ambiente operacional (passo 1) e um metamodelo descrevendo a estrutura de formação e construção de regras que determinam o modo de operação do rádio (passo 2).

Em seguida, foi desenvolvido um modelo (*template*) de código em linguagem de transformação MTL, baseado no metamodelo de formação das regras (passo 3).

**Figura 4 - Metodologia aplicada**



Após esta etapa, foram instanciadas regras, com base no metamodelo do *template* (passo 4).

A partir do modelo de código e das instâncias de regras criadas, foi usada a ferramenta de transformação M2T para a geração automática de uma classe em linguagem Java para cada uma das regras (passo 5), com base no template desenvolvido. Na última etapa, as classes de todas as regras geradas são inseridas em um programa decisor em linguagem Java. Nesse momento, está pronto o artefato final do trabalho, ou seja, o programa decisor executável (passo 6).

A fim de tornar o processo de elaboração das regras mais simples e ágil para o usuário, diferente do uso do template gerado no passo 3, foi desenvolvida uma DSL, ou seja, foi criada uma linguagem específica de domínio (passo 7), que pode ser utilizada para uma representação mais compacta das regras (passo 8).

#### 4.3 Metamodelagens

O metamodelo da Figura 5 representa, de forma simples, alguns conceitos de um rádio cognitivo e de

um plano de comunicações. Além disso, representa os elementos envolvidos na operação do rádio cognitivo. A classe *Transceiver* corresponde ao equipamento rádio. Já a classe *Environment* exprime o ambiente que o rádio consegue sensoriar, isto é, sinais e ruídos, além de derivar a relação sinal/ruído (SNR). A classe *Communication Plan* representa o plano de comunicações de uma dada operação em que o rádio está inserido. O plano informa a frequência da portadora do sinal (*Carrier Frequency*), o papel do operador do rádio (*Operational role*), que pode ser “comandante” ou “soldado”, e o nível de segurança da operação em andamento (*Security Level*).

Além disso, o plano inclui um conjunto de regras que determinam a operação do rádio. Por exemplo, pode conter uma regra que diz que se a SNR é decrescente, então o modo de operação deve ser alterado. Por simplificação, as regras não foram representadas nesse metamodelo, mas em um outro, apresentado na Figura 6.

A classe *LogEntry* representa a coleta das informações do ambiente e do plano de comunicações a cada instante no tempo. Cada instância da *LogEntry* contém a SNR, o *Security Level*, a *CarrierFrequency* e o *OperationalRole*. Por fim, a classe Log funciona como uma janela deslizante, que coleciona as leituras mais recentes (por exemplo, as três últimas) de *LogEntry*. Com base nessas leituras, o rádio cognitivo (*Transceiver*) deve consultar as regras do Plano de comunicações para verificar se deve mudar o seu modo de operação.

Nesta regra composta, operadores e operandos se conectam, definindo um modo de operação para o rádio.

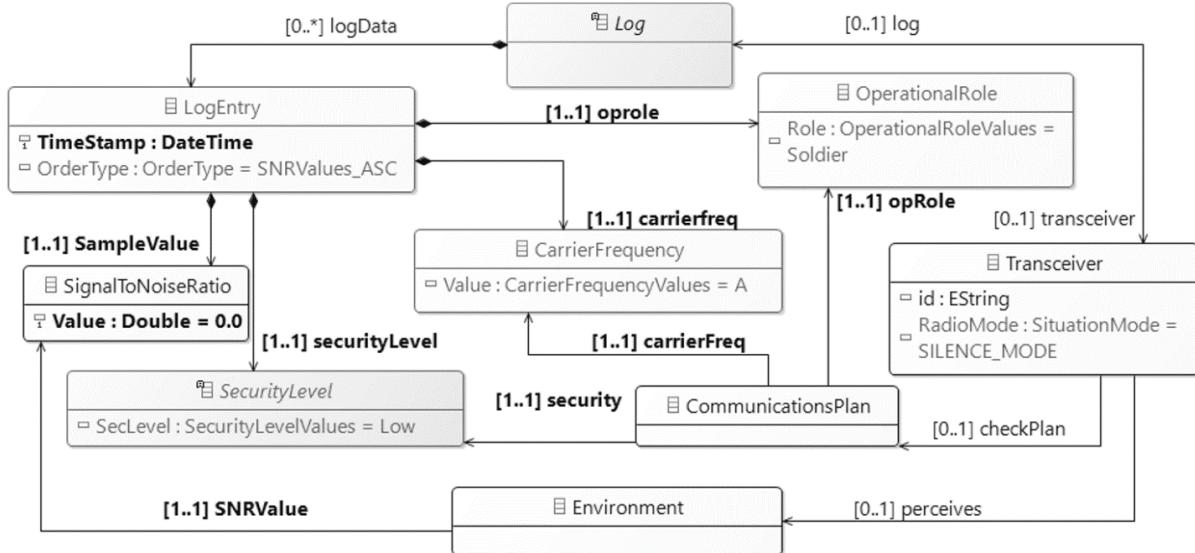
O valor de SNR e os últimos valores observados dos demais conceitos presentes no Log. (os dados mais recentes percebidos) são a base para a descrição das regras e decisão do rádio.

Motivado pelos modelos baseados em regras de Xu et al [19] e inspirado na iniciativa de Costa et. al. [22] e pelo trabalho de Horrocks et.al.[27], um conjunto de regras (*ruleSet*) foi elaborado, e pode ser composto por uma única ou muitas regras. Cada uma delas (*rule*) possui um identificador (IDENTIFIER) e uma prioridade. Além disso é composta por um único antecedente (*LeftSide*) e um único consequente

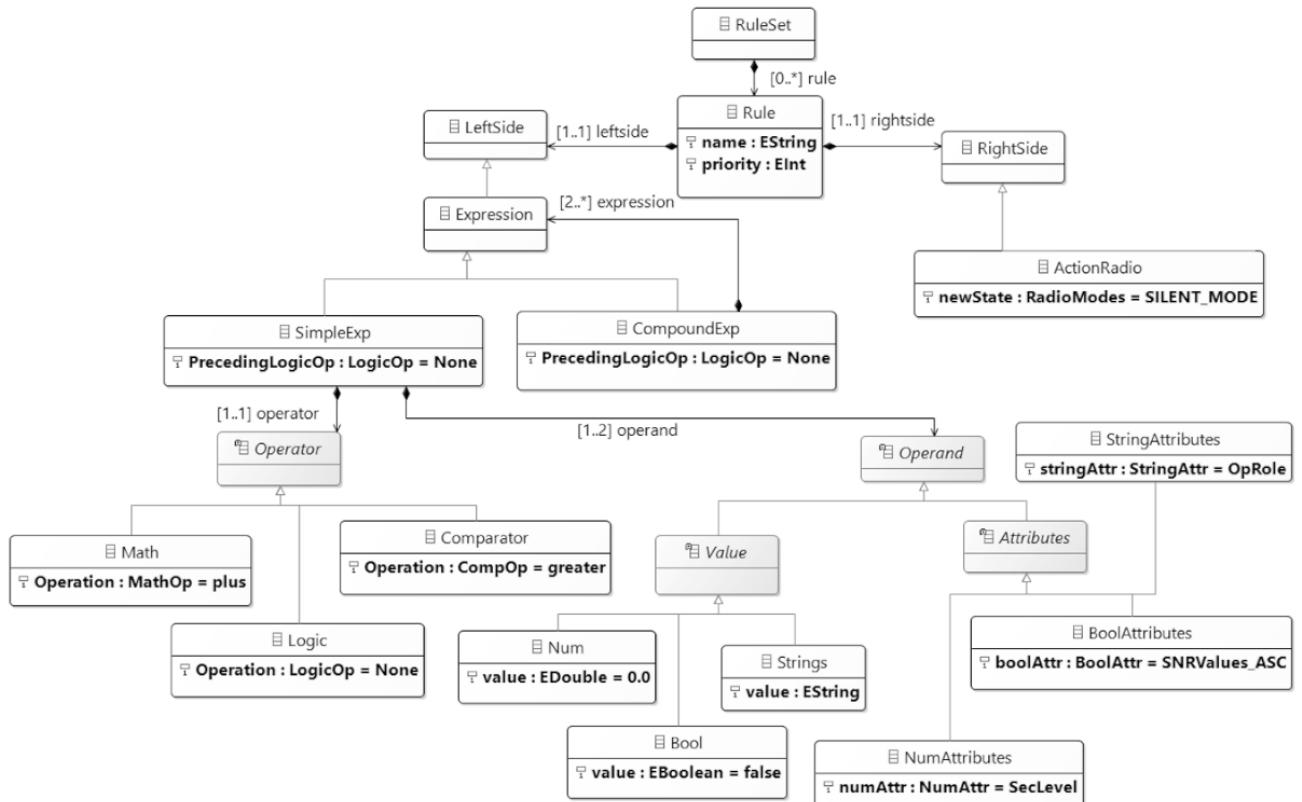
(*RightSide*). O lado esquerdo da regra é composto por expressões, que podem ser simples (*SimpleExp*) ou compostas (*CompoundExp*). Cada tipo de expressão

possui seu(s) operando(s) (*operand*) e operadores, que podem ser matemáticos, lógicos ou de comparação. Os operandos podem ser atributos ou valores.

**Figura 5** - Metamodelo do rádio cognitivo



**Figura 6** - Metamodelo de construção de regras



O metamodelo descrito na Figura 6 representa a maneira como as regras são estruturadas. Com base nesse modelo, foi desenvolvida uma pequena gramática, representada na Figura 7, empregando o formalismo da representação Backus-Naur Form (BNF).

**Figura 7** - Recorte de gramática em BNF

```

<rule> ::= {"priority, <leftSide> "→"
<rightSide> "}"
priority ::= ([0.0-1.0]+)
<rightSide> ::= "normal" | "padrão FD" |
"silêncio" | "alerta"
<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>
<number> ::= (^ d*[0-9](.\d*[0-9])?|)
<string> ::= ([A-Za-z][A-Za-z0-9]*)
<attribute> ::= <numAttribute>
| <stringAttribute> | <boolAttribute>
<numAttribute> ::= "securityLevel" |
"carrierFrequency"
<stringAttribute> ::= "sampleValue" | "operationalRole"

```

Em nosso exemplo, representamos o universo de atributos que pertencem ao modelo do rádio cognitivo apresentado na Figura 5, que participam de nosso caso de uso.

A regra (1) demonstra um possível emprego dessa gramática na construção de regras no domínio de rádios cognitivos.

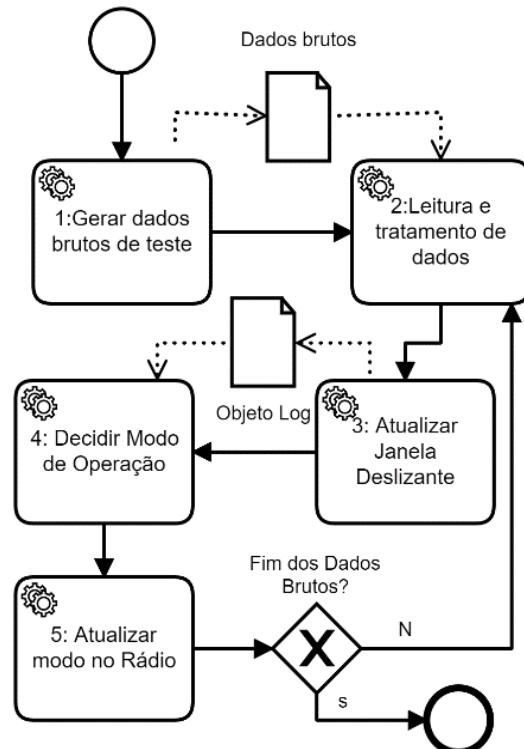
$$\{0.2 \text{ True} (\text{True}(\text{sampleValue} = "DESC") \\ \text{AND} \text{ True} (\text{securityLevel} < 0.5) \text{ AND} \\ \text{False}(\text{carrierFrequency} = 100.0) \text{ AND} \\ (\text{operationalRole} = "soldier")) \rightarrow \text{normal}\} \quad (1)$$

Quando uma regra é criada, ela recebe um valor único de prioridade entre 0 e 1, sendo 1 (um) a prioridade mais alta. Neste caso, a prioridade é apenas uma estratégia simplificada de lidar com possíveis regras concorrentes, em que duas ou mais regras poderiam estar sendo atendidas simultaneamente.

## 5. Estudo de Caso

Este estudo de caso verifica a viabilidade da abordagem descrita na Seção 4. Conforme a Figura 8, um arquivo de dados bruto é gerado a partir de um programa gerador de arquivos de teste, que simula leituras de informações do ambiente eletromagnético e do plano de comunicações, com intervalos de 20 milissegundos, simulando um ciclo de sensoriamento do ambiente em um rádio real (passo 1) [28].

**Figura 8** - Etapas do Processo de simulação/testes



A partir desses dados, um outro programa lê, valida (passo 2) e instancia-os numa classe chamada Log, que representa um conjunto de amostragens do ambiente sensoriado ou percebido pelo dispositivo em cada leitura simulada (passo 3). Na etapa seguinte

(passo 4), o programa decisor aplica as regras que foram construídas por meio uma DSL, resultando numa decisão que pode determinar um novo modo de operação para o rádio (passo 5).

**Tabela 2** - Simulando Regras da doutrina militar.

Tipo	Objeto	Atributo	Domínio	ST_1	ST_2	ST_3	ST_4	ST_5	ST_6	ST_7
Entrada	Sample Value Signal	Sample	ASC	true		true		true		false
		Value	DESC		true		true		true	false
		Security level	>=0,5	true			true			
			< 0,5		true	true				
	Carrier Frequency	50MHz	true			true				
		100MHz			true	true				
		Operational Role	Cmt	true		true				
		Soldado			true		true			
	transceiver	normal								
		padrão FD								
		Silêncio								
		Alerta								
		Sit_Ant								
Saída										

Tomando como exemplo a regra determinada pelo contexto ST\_1 da Tabela 2 (coluna ST\_1), caso a tendência dos últimos três valores do SNR recebido seja ascendente (ou seja, o valor SNR dos últimos três instantes percebidos esteja aumentando), o nível de segurança do canal seja maior ou igual a um limiar (0,5 nesse caso), a frequência de transmissão seja de 50 MHz e o “papel operacional” do rádio em questão seja o de comandante (“Cmt”), o modo de operação a ser utilizado no equipamento será o modo silêncio.

Durante o experimento, foi utilizada a IDE Eclipse, empregando o Eclipse Modeling Framework (EMF). No desenvolvimento das metamodelagens, foi utilizada a extensão Sirius do Eclipse. Na etapa de transformação M2T de modelo para um programa em Java, foi usada a ferramenta Acceleo.

A interface de construção de regras não é trivial para um usuário sem experiência em programação. Para simplificar o processo de instanciação do metamodelo das regras, a ferramenta Xtext [29] foi utilizada para a geração e edição de uma DSL. Esta DSL possibilita que usuário instancie as regras dos rádios sem precisar conhecer nenhuma linguagem de

A Tabela 2 é uma tabela de decisão, que representa a estrutura de conhecimento que descreve as regras que foram simuladas no experimento, representando àquelas ligadas à doutrina de comunicações militares.

programação, escrevendo as regras de uma maneira simples. A Figura 9 mostra um fragmento de código, demonstrando a descrição de duas regras na DSL. A Rule\_ST1 tem prioridade 1 e descreve as condicionantes para o modo silêncio (*Silent Mode*).

**Figura 9** - Fragmento de uso da DSL

```
RuleSet{
    Rule 'Rule_ST1' {
        priority = 1
        rule = [_(_SNRValues_ASC=true) and [_(_SecurityLevel)>=0.5)
                and(CarrierFrequency=50.0)and(OperationalRole="Cmt")]
        --> SILENT_MODE
    },
    Rule 'Rule_ST2' {
        priority = 2
        rule = [_(_SNRValues_DESC=true) and [_(_SecurityLevel)<0.5) and
                (CarrierFrequency=100.0)and(OperationalRole="Soldier")]
        --> NORMAL_MODE
    },
}
```

## 5.1 Resultados obtidos

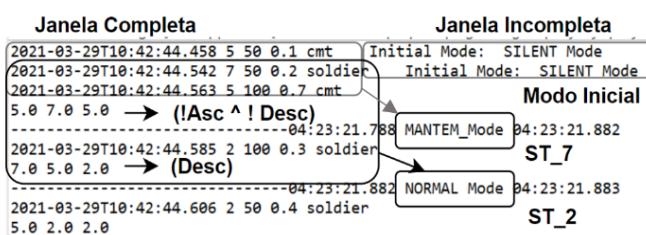
A Figura 10 mostra um pequeno fragmento do log de entrada, onde são simulados os dados que seriam sensoriados. Cada linha representa valores do ambiente num instante no tempo.

**Figura 10 - Log de entrada**

Data hora	SampleValue	CarrierFrequency	SecurityLevel	OperationalRole
2021-03-29T10:42:44.458	5 50	0.1	cmt	
2021-03-29T10:42:44.542	7 50	0.2	soldier	
2021-03-29T10:42:44.563	5 100	0.7	cmt	
2021-03-29T10:42:44.585	2 100	0.3	soldier	
2021-03-29T10:42:44.606	2 50	0.4	soldier	
2021-03-29T10:42:44.629	4 50	0.5	cmt	

Após a execução das regras, um arquivo de log de saída é gerado, registrando todos os dados sensoriados e cada decisão tomada com base na aplicação das regras sobre os dados contidos na janela deslizante das três últimas observações do ambiente. Conforme mostra a Figura 11, no início da execução, enquanto a janela ainda não estiver preenchida, o modo de operação do equipamento será sempre o modo silêncio.

**Figura 11 - Log de saída**



Quando a janela é preenchida, as regras passam a ser aplicadas, ou seja, são verificados os três últimos valores de *sampleValue* para identificar se são ascendentes (ASC) ou descendentes (DESC), juntamente com os demais valores da leitura mais recente. Também é possível observar as mudanças no modo de operação, nos momentos em que são atendidas as regras ST\_7, que mantém o modo atual (Silent Mode), e ST\_2, que muda para o modo Normal mode.

## 6. Considerações finais

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 trabalho apresentou uma alternativa capaz de apoiar as variações de requisitos de comunicações durante as operações de maneira ágil. Neste experimento, foi simulado apenas um equipamento operando em uma única operação, porém foi possível verificar suas variações de comportamento, com base em regras técnicas e táticas. A partir deste experimento inicial, a modelagem poderá ser estendida a um universo compatível com uma operação real. A descrição de regras empregando DSL, bem como as transformações de modelos e geração automática de códigos podem contribuir com a agilidade nas atualizações, além de manter o alinhamento entre a implementação física e o modelo conceitual.

Como contribuições, pode-se destacar a metodologia proposta que viabiliza a replicação deste experimento. O uso de uma janela de observação deslizante pode reduzir a quantidade de dados a ser processada, consumindo menos recursos computacionais, visto que o rádio apresenta poder computacional limitado. Indiretamente, a economia de recursos na tarefa de decisão disponibilizará mais recursos para tarefas que podem ser executadas por algoritmos de aprendizado de máquina.

Até onde foi possível observar, muitos trabalhos já fizeram uso de DSL e transformações automatizadas de código em ambientes que demandam urgência, contudo, não eram consideradas as particularidades do ambiente de comunicações militares e do domínio de rádios cognitivos.

Os rádios cognitivos podem ser parte de sistemas de comando e controle, que operam de maneira integrada. Neste contexto, a interoperabilidade entre sistemas é uma necessidade e ambiguidades no entendimento dos conceitos devem ser evitadas. Uma falha no entendimento de um conceito pode representar erro na construção de regras que envolvem os sistemas de comunicações, provocando funcionamento indesejado dos equipamentos durante uma operação e ocasionando, em alguns casos, o fraticídio.

Alguns trabalhos [4, 22] indicam que o uso de ontologias pode favorecer a interoperabilidade sintática e semântica entre os diversos sistemas. Neste sentido,

a interoperabilidade baseada em ontologias será explorada nas próximas etapas desta pesquisa, além de uma possível integração com o planejador de missões proposto por Souza et al. [3]

O foco deste trabalho é o benefício do uso da linguagem pelo usuário final, agilizando o processo decisório e reduzindo as necessidades de conhecimentos em linguagens de programação. Recomenda-se como trabalhos futuros o emprego dessa metodologia em

sistemas para avaliação de desempenho e de mecanismos de tratamento de erros.

## Agradecimentos

Agradecimentos à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) pelo apoio ao Projeto S2C2, convênio Nr 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.

## Referências

- [1] MITOLA, J. The software radio architecture. *IEEE Communications Magazine*, v. 33, n. 5, p. 26-38, 1995. doi: 10.1109/35.393001.
- [2] MITOLA, J.; MAGUIRE, G. Q. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, v. 6, n. 4, p. 13-18, 1999. doi: 10.1109/98.788210.
- [3] OUZA, V.; NAPOLITANO, F.; DIAS, M. Planejador de Missões do Rádio Definido por Software do Ministério da Defesa. In: Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, 21., São José dos Campos: Sige, 2019.
- [4] MOREIRA, J. L. R.; PIRES, L. F.; VAN SINDEREN, M.; COSTA, P. D. Towards ontology-driven situation-aware disaster management. *Applied Ontology*, v. 10, n. 3-4, p. 339-353, 2015. doi: 10.3233/AO-150155.
- [5] MOREIRA, J. L. R.; PIRES, L. F.; VAN SINDEREN, M.; DANIELE, L., SAREF4health: IoT Standard-Based Ontology-Driven Healthcare Systems. In: Formal Ontology in Information Systems – Proceedings of the International Conference, 10. Cape Town: FOIS, 2018. p. 239-252. doi: 10.3233/978-1-61499-910-2-239.
- [6] TEIXEIRA, S.; AGRIZZI, B. A.; PEREIRA FILHO, J. G.; ROSSETTO, S.; PEREIRA, I. S. A.; COSTA, P. D. et al., LAURA architecture: Towards a simpler way of building situation-aware and business-aware IoT applications, *Journal of Systems and Software*, v. 161, 2020. doi: 10.1016/j.jss.2019.110494.
- [7] BRASIL. Operações: Manual de campanha. 5. Ed. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2017. Disponível em: <http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/1/848>. Acesso: 8 jun. 2017.
- [8] CAMILO, M. J.; MOURA, D. F.; SALLES, R. M. Redes de comunicações militares: desafios tecnológicos e propostas para atendimento dos requisitos operacionais do Exército Brasileiro. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v. 37, n. 3, p. 5-25, 2020. doi: 10.2307/2215650.
- [9] ALBERTS, D.; HAYES, R. Understanding Command and Control. CCRP, 2006.
- [10] BRASIL. Manual de Campanha: As comunicações nas operações. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2020. Disponível em: <http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/7073>. Acesso: 28 out. 2020.
- [11] BRASIL. Manual de Campanha: Comando e Controle. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2015.
- [12] RYAN, M. J.; FRATER, M. R.. *Tactical Communications for the Digitized Battlefield*. Boston: Artech House, 2002.
- [13] KRISHNAN, R.; BABU, R. G.; KAVIYA, S.; KUMAR, N. P.; RAHUL, C.; RAMAN, S. S. Software defined radio (SDR) foundations, technology tradeoffs: A survey. In: IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), Chennai, 2017. p. 2677-2682. doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392204.
- [14] BARROS, L. G. O Rádio Definido por Software. Trabalho de Graduação (Faculdade de Tecnologia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.
- [15] MITOLA, J. An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. Dissertation (Ph.D.) – Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.
- [16] GALDINO, J.; MOURA, D.; MORAES, R.; SILVA, F.; MARQUES, E., PAIVA JUNIOR, N. Introdução ao desenvolvimento de rádios definidos por software para aplicações de defesa. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 30., Brasília, DF, 2012. doi: 10.14209/sbrt.2012.211.
- [17] SILVA, W.; CORDEIRO, J. R. S.; MACEDO, D. F.; VIEIRA, M. A. M.; VIEIRA, L. F. Introdução a rádios definidos por software com aplicações em GNU Radio. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 35., Vitória: UFES, 2015. p. 315.

- [18] DOYLE, L. E. *Essentials of Cognitive Radio*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. doi: 10.1017/CBO9780511576577.
- [19] XU, W.; XU, Y.; LEE, C.; FENG, Z.; ZHANG, P.; LIN, J. Data-Cognition-Empowered Intelligent Wireless Networks: Data, Utilities, Cognition Brain, and Architecture. *IEEE Wireless Communications*, v. 25, n. 1, p. 56-63, 2018. doi: 10.1109/MWC.2018.1700200.
- [20] ALVES VIEIRA, M.; CARVALHO, S. Model-driven Engineering in the Development of Ubiquitous Applications: Technologies, Tools and Languages. In: Proceedings of the Brazilian Symposium on Multimedia and the Web, 23., 2017, p. 29–32. doi: 10.1145/3126858.3131633.
- [21] SILVA, A. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model. *Computer Languages, Systems & Structures*, v. 43, p. 139-155, 2015. doi: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
- [22] COSTA, P. D.; MIELKE, I. T.; PEREIRA, I.; ALMEIDA, J. P. A. A Model-Driven Approach to Situations: Situation Modeling and Rule-Based Situation Detection. *IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference*, 16., Beijing, 2012. p. 154-163.
- [23] BRAMBILLA, M.; FRATERNALI, P. *Interaction Flow Modeling Language: Model-Driven UI Engineering of Web and Mobile Apps with IFML*. Burlington: Morgan Kaufmann, 2014.
- [24] SOLEYMANZADEH, K.; BUL, Y.; BAĞCI, S.; KARDAS, G. A Tool for Modeling JsonLogic based Business Process Rules. In: International Informatics and Software Engineering Conference, 1., Ankara, 2019. p. 1–5. doi: 10.1109/UBMYK48245.2019.8965462.
- [25] CAMILO, M. J.; MOURA, D. F. C.; SALLES, R. M. Combined Interference and Communications Strategy as a Defense Mechanism in Cognitive Radio Military Networks. *IEEE Military Communications Conference*, Norfolk, 2019. p. 113-118. doi: 10.1109/MILCOM47813.2019.9020787.
- [26] CHINOSI, M.; TROMBETTA, A. BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*, v. 34, n. 1, p. 124-134, 2012. doi: 10.1016/j.csi.2011.06.002.
- [27] HORROCKS, I.; PATEL-SCHNEIDER, P. F.; BOLEY, H.; TABET, S.; GROSOF, B.; DEAN, M. SWRL: A Semantic Web rule language combining OWL and RuleML, W3C Member Submission, v. 21, 2004.
- [28] FONTÁN, F. P.; ESPÍNEIRA, P. M. Modelling the wireless propagation channel: a simulation approach with Matlab. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [29] JONATHAN, B.; AVETYAN, R.; ABELN, S. Create Domain-Specific Language and Syntax Checker Using Xtext. *International Journal of Industrial Research and Applied Engineering*, v. 4, n. 1, 2020. doi: 10.9744/jirae.4.1.26-32.