

# Redes de comunicações militares: desafios tecnológicos e propostas para atendimento dos requisitos operacionais do Exército Brasileiro

Marcelo José Camilo\*<sup>a</sup>, David Fernandes Cruz Moura<sup>b</sup> e Ronaldo Moreira Salles<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME) – Praça Gen. Tibúrcio, 80 – Urca, Rio de Janeiro – RJ, 22290-270

<sup>b</sup>Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – Cidade Universitária Zeferino Vaz – Barão Geraldo, Campinas – SP, 13083-970

\* camilo.marcelo@eb.mil.br

**RESUMO:** *As operações militares possuem atividades ininterruptas e, na maioria das vezes, ocorrem em cenários desconhecidos e sempre hostis. Uma condição necessária para o sucesso de uma operação militar é que todos os elementos integrantes desta precisam, durante todo o desenrolar da operação, manter as comunicações com seus escalões superiores e subordinadas. Atualmente, estão disponíveis para emprego várias tecnologias de redes de comunicações. Entretanto, nenhuma infraestrutura de comunicações pronta para uso reúne condições de suportar os Princípios de Emprego das Comunicações do EB bem como os Requisitos Operacionais Básicos do Sistema de Comando e Controle desta instituição simultaneamente, deixando desafios, tais como a integração automática das camadas de enlace, segurança na camada física e desempenho em cenários de espectro rádio carregado, para o atendimento destes Princípios e Requisitos. Neste trabalho propomos as tecnologias de rádios cognitivos e de transmissão full-duplex em banda como candidatas para enfrentar estes desafios.*

**PALAVRAS-CHAVE:** *Comunicações Táticas. Rádios Cognitivos. Transmissão Full-Duplex em Banda.*

**ABSTRACT:** *Military operations have uninterrupted activities and mostly occur in unknown and always hostile scenarios. A necessary condition for a successful military operation is that its deployed elements communicate with its superior and subordinate levels. A lot of networking technologies are now available for employment. However, no ready-to-use communications infrastructure is able to simultaneously support envisioned Brazilian Army (in Portuguese, EB) Communications Operational Principles, as well as EB Command and Control System's Basic Operational Requirements. This scenario brings several challenges to fulfill the aforementioned principles and requirements, such as the automatic integration of link layers, security in the physical layer, and performance in overloaded radio spectrum scenarios. In this work, we propose cognitive radios and in-band full-duplex operation as candidate technologies to overcome these challenges.*

**KEYWORD:** *Tactical communications. Cognitive Radios. In-Band Full-Duplex operation.*

## 1. Introdução

O Exército Brasileiro deve ser capaz de atuar em operações de guerra e de não guerra, requerendo, normalmente, combinações simultâneas destas duas modalidades. Assim, estes dois tipos de operações podem coexistir em diferentes proporções, a depender da situação enfrentada e dos objetivos estratégicos.

As operações militares ocorrem de maneira

ininterrupta, ou seja, possuem atividades 24 horas por dia, 7 dias por semana. Outra característica das operações militares é que, na maioria das vezes, ocorrem em cenários desconhecidos e sempre hostis. Uma condição necessária para o sucesso de uma operação militar é que todos os elementos integrantes de uma operação militar precisam, durante todo o desenrolar da operação, manter as comunicações com seus escalões superiores e subordinadas.

Os manuais e portarias do EB listam os Princípios de Emprego das Comunicações do EB bem como os Requisitos Operacionais Básicos do Sistema de Comando e Controle desta instituição, um dos principais sistemas utilizados pelo EB tanto na execução das operações quanto no planejamento destas atividades. Os citados princípios e requisitos tem por objetivo estabelecer diretrizes para as ligações entre os diversos níveis hierárquicos, visando atender a condição necessária para o sucesso da operação citada no parágrafo anterior.

Atualmente, estão disponíveis para emprego várias tecnologias de redes de comunicações, tais como, rede rádio de combate com transmissão digital, rede pacote rádio, redes de arquitetura estação-base, redes *ad hoc*, redes de acesso múltiplo por divisão de tempo e redes rádio de banda ultra larga. Além dessas, há algumas tecnologias em desenvolvimento das quais podemos citar as de rádios cognitivos e a de transmissão *full-duplex* em banda.

Entretanto, conforme exposto em [1] estudo, nenhuma infraestrutura de comunicações pronta para uso reúne condições de suportar os Princípios de Emprego das Comunicações do EB bem como os Requisitos Operacionais Básicos do Sistema de Comando e Controle desta instituição simultaneamente. Outro aspecto abordado em um estudo [1] é que três requisitos são estritamente relacionados e constituem um forte compromisso no sistema de comunicações militar: alcance, capacidade e mobilidade. O forte relacionamento existente se dá, em geral, pelo fato que ao variar um dos fatores os outros dois também variam. Na verdade, ao se maximizar dois fatores o terceiro acaba sendo minimizado.

Sendo assim, um sistema de comunicações militar deve ser uma única estrutura lógica integrada por múltiplas tecnologias de enlace. A integração destas tecnologias devem ser feitas de maneira automática e sem a necessidade de intervenção humana visando a agilidade e a flexibilidade. As tecnologias prontas para uso não possibilitam esta integração automática deixando desafios para o atendimento aos Princípios de Emprego das Comunicações e aos Requisitos do Sistema de Comando e Controle do EB.

O principal desafio das redes atuais é prover a

possibilidade de realizar, em tempo de operação, sem perda de capacidade, alcance e/ou mobilidade, a troca de tecnologias utilizadas. Outro desafio das redes táticas atuais é aumentar a segurança na camada física das redes de comunicações táticas sem fio. Além destes, temos o desafio de aumentar o desempenho das redes rádios, especialmente em cenários de alto tráfego ou de interferência eletromagnética.

Duas tecnologias que figuram como candidatas promissoras para enfrentar os desafios citados acima são a tecnologia de rádios cognitivos e a de transmissão *full-duplex* em banda.

O objetivo deste trabalho é analisar as redes de comunicações à luz dos Princípios de Emprego das Comunicações do Exército Brasileiro e dos Requisitos Operacionais Básicos do Sistema de Comando e Controle desta instituição, levantando seus desafios e propondo tecnologias candidatas para enfrentar estes desafios.

A estrutura deste texto é a seguinte: na Seção 2, descrevemos as operações do Exército Brasileiro. Na Seção 3, apresentamos as Redes de Comunicações do Exército Brasileiro. Na Seção 4, analisamos as redes de comunicações do EB à luz dos Princípios de Emprego das Comunicações do EB e nos Requisitos Operacionais Básicos do Sistema de Comando e Controle desta instituição. Na Seção 5, estudamos as tecnologias existentes para o emprego nas redes de comunicações do Exército Brasileiro. Na Seção 6, levantamos os desafios tecnológicos para que as redes de comunicações militares atendam aos requisitos operacionais do Exército Brasileiro bem como propomos as tecnologias de rádios cognitivos e a de transmissão *full-duplex* em banda como candidatas promissoras para enfrentar os desafios levantados. Por fim, na Seção 7, fazemos nossas conclusões.

## 2. Operações do Exército Brasileiro

O Exército Brasileiro, junto com a Marinha do Brasil e a Força Aérea Brasileira, constituem as FFAA (Forças Armadas) brasileiras. Estas instituições

estão subordinadas ao MD (Ministério da Defesa) e destinam-se à defesa da pátria, à garantia dos poderes constitucionais e, por iniciativa de qualquer destes, da lei e da ordem [2].

O EB (Exército Brasileiro) executa suas missões através de operações militares que são ações coordenadas de militares, em respostas a uma situação específica. O conjunto de princípios que servem de base para que o EB desempenhe suas missões é descrito em manuais desta instituição.

O EB20-MC-10.202 - Manual de Campanha – FORÇA TERRESTRE COMPONENTE [3], cita que a integração e a sincronização das operações do EB com as outras forças armadas e outras organizações públicas, tais como Polícia Militar e Defesa Civil, ou privadas, tais como concessionárias de energia elétrica e de telefonia, participantes de uma operação é de responsabilidade da FTC (Força Terrestre Componente). A FTC, assim como a FNC (Força Naval Componente), a FAC (Força Aérea Componente), entre outros elementos operacionais, são subordinados ao Cmt Op (Comando Operacional) Conjunto.

O citado manual também enfatiza que a FTC não possui uma organização fixa, devendo ser estruturada para atender às demandas do planejamento operacional. Os meios que integram a FTC são adjudicados pelo Cmt Op Conjunto, em consonância com os objetivos do MD, levadas em consideração as necessidades levantadas no planejamento operacional e as disponibilidades do citado Ministério. Caso, no decorrer dos planejamentos ou da operação, o Comando da FTC identifique a necessidade de outros meios, estes poderão ser solicitados ao Cmt Op Conjunto.

Dependendo do vulto da operação, a FTC pode ser composta de uma ou mais brigadas. Uma brigada corresponde à grande unidade de menor escalão do EB capaz de atuar de maneira independente. A brigada é, geralmente, formada por 3 batalhões ou regimentos, que constituem seus elementos operacionais. Além disso, uma brigada possui elementos de apoio às operações tais como a Companhia de Engenharia de Combate, responsável pelas atividades de mobilidade, contra-mobilidade e proteção da operação, e, de especial

interesse para este artigo, a Cia Com (Companhia de Comunicações), responsável por instalar, explorar e manter os sistemas de comunicações da Brigada.

O EB20-MF-10.103 - Manual de Fundamentos - OPERAÇÕES [4], cita que, em função dos princípios e procedimentos utilizados, as operações do EB são classificadas em *Operações de Guerra* e *Operações de Não Guerra*. Nas subseções seguintes faremos uma breve descrição destas operações com foco nos aspectos que influenciam a instalação, a utilização e a manutenção das redes de comunicações utilizadas nestas ações. Nosso objetivo nesta descrição é entender os objetivos e necessidades que levam a utilização das redes de comunicações pelo EB.

## 2.1 Operações de guerra

As *Operações de Guerra* são as que utilizam o poder militar, explorando a plenitude de suas características de emprego da força, ou seja, a violência militar em sua maior expressão. Nelas empregam-se todas as capacidades das organizações operativas do EB, ou ameaça fazê-lo, aplicando os princípios e procedimentos de combate.

O emprego real da EB em uma *Operação de Guerra*, teria por cenário áreas geograficamente afastadas das instalações físicas das OMs (Organizações Militares). As operações simuladas para adestramento da tropa ocorrem no mesmo cenário.

Neste tipo de operação, o ambiente operacional é constituído de uma pequena estrutura centralizada de acompanhamento a ser utilizada pelo comando da FTC para acompanhar seus subordinados. Esta estrutura também é utilizada pelos órgãos de controle e de apoio à operação, tais como o COTer (Comando de Operações Terrestres), OM responsável por orientar e coordenar o preparo e o emprego do EB, em conformidade com as políticas e diretrizes estratégicas desta instituição e do MD. Os elementos subordinados à FTC, na maior parte do tempo, realizam suas missões em áreas afastadas desta estrutura. Estas áreas de atuação variam de acordo com as necessidades operacionais e são, geralmente, ambientes desconhecidos e hostis.

## 2.2 Redes de comunicações nas operações de guerra

Conforme já citado na Subseção anterior, o emprego real do EB em uma *Operação de Guerra*, teria por cenário áreas geograficamente afastadas das instalações físicas das OMs.

Neste tipo de operação, a rede de comunicações da citada infraestrutura é geralmente uma rede cabeada que é interligada à EBNet, rede de dados que interliga todas as OMs do EB. Os comandantes dos elementos, tais como brigadas e batalhões, da FTC desdobrados são conectados, através de enlaces de HCLOS (*High-Capacity Line-Of-Sight* ou Linha de Visada de Alta Capacidade) providos pelo MTO (Módulo de Telemática Operacional) do EB, com a rede do comando da operação, o que provê conectividade uns com os outros e com a estrutura de acompanhamento. O MTO possibilita dotar as comunicações militares via rádio de pleno acesso à rede pública de telefonia fixa ou celular e integrar-se a qualquer cenário remoto através de sistemas de comunicação via satélite. Este equipamento permite a comunicação de dados, voz e imagens no campo de batalha.

Os comandantes das brigadas ou dos batalhões quando se encontram embarcados no PCT (Posto de Comando Tático) e os demais elementos desdobrados se comunicam através de rede de dados hierárquica, que utilizam as faixas de frequência UHF (*Ultra High Frequency* ou Frequência Ultra Alta) e VHF (*Very High Frequency* ou Frequência Muito Alta). Todos os equipamentos utilizados nestas redes tem capacidade de comunicações utilizando protocolo IP (Internet Protocol ou Protocolo Internet). A **figura 1** ilustra este cenário.

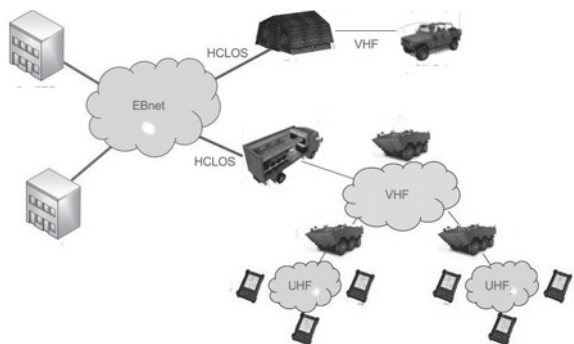


Fig. 1 – Redes de Comunicações nas Operações de Guerra.

## 2.3 Operações de não guerra

Nas *Operações de Não Guerra*, as FFAA, embora fazendo uso do poder militar, são empregadas em tarefas que não envolvam o combate propriamente dito, exceto em circunstâncias especiais, em que esse poder é usado de forma limitada. Podem ocorrer, inclusive, casos nos quais as ações militares não exerçam necessariamente o papel principal.

As *Operações de Não Guerra*, como as de GLO (Garantia da Lei e da Ordem), ocorridas durante os grandes eventos sediados pelo Brasil, como a Copa do Mundo FIFA, em 2014, os Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro, em 2016, entre outros, são comuns em áreas urbanas e, dada a grande presença do Exército no território brasileiro, geralmente ocorrem próximas às instalações de OMs do EB.

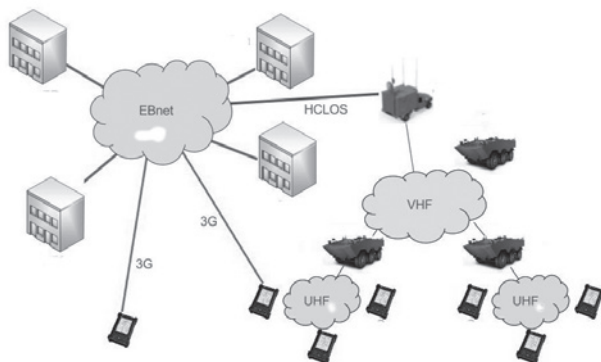
Nesse tipo de operação, há emprego maior de postos de comando fixos em OMs do EB. Entretanto, a maioria dos militares circulam por uma área urbana pré determinada. Eventualmente existe a necessidade de deslocar militares em posições afastadas para defender uma estrutura estratégica, como, por exemplo, uma subestação de energia elétrica.

## 2.4 Redes de comunicações nas operações de não guerra

Nas *Operações de Não Guerra*, descritas na Subseção anterior, há emprego maior de postos de comando fixos (aquartelados). Os militares que ficam em posições fixas utilizam amplamente redes infraestruturadas de alta capacidade, como a EBNet ou a ROD (Rede Operacional de Defesa), rede segregada, estabelecida pela MD, que proporciona grande segurança para o fluxo de informações necessário à condução de operações conjuntas e propicia interoperabilidade às FFAA brasileiras [5]. Estas redes são os pontos de conectividade com os militares que circulam por uma área urbana pré determinada os quais trafegam suas informações através de rede celular.

Os militares em posições afastadas, para defender uma estrutura estratégica, são conectados à estrutura principal do sistema através de enlace de HCLOS. Quando este deslocamento acontecer, esta parte da operação se assemelha, do ponto de vista das redes de

comunicações, à uma *Operação de Guerra*. A **figura 2** ilustra este cenário.



**Fig. 2** – Redes de Comunicações nas Operações de Não Guerra.

## 2.5 Abrangência das operações do Exército Brasileiro

As operações do EB se desenvolvem em todo espectro dos conflitos, que varia desde a prevenção de ameaças à solução dos conflitos armados, passando pelo gerenciamento de crises.

Em situações de paz (estável ou instável) ou de crises, empregam-se, entre outras medidas, as de caráter militar, mediante o uso de forças militares com a aplicação de parte de suas capacidades, para evitar a escalada da crise ou anular a possibilidade de realização de operações militares de guerra de vulto. Realizam-se também operações militares em apoio às autoridades governamentais nacionais ou internacionais.

O EB20-MF-10.103 - Manual de Fundamentos - OPERAÇÕES [4] define que o EB deve ser capaz de atuar nos dois tipos de operações citados no início desta Seção, requerendo, normalmente, combinações simultâneas destas duas modalidades. Assim, estes dois tipos de operações podem coexistir em diferentes proporções, a depender da situação enfrentada e dos objetivos estratégicos.

Uma importante característica das operações militares, que determinam a estrutura das redes de comunicações a serem utilizadas, é que estas ocorrem de maneira ininterrupta, ou seja, possuem atividades 24

horas por dia, 7 dias por semana. Outra característica das operações militares é que, na maioria das vezes, ocorrem em cenários desconhecidos e sempre hostis.

Uma condição necessária para o sucesso de uma operação militar é que, todos os elementos integrantes desta precisam, durante todo o desenrolar da operação, manter as comunicações com seus superiores e subordinadas com os seguintes objetivos:

### Objetivo 1

Fornecer informações que auxiliem a tomada de decisão pelos comandantes militares;

### Objetivo 2

Possibilitar ao escalão superior a emissão de ordens aos elementos subordinados bem como o acompanhamento da execução destas; e

### Objetivo 3

Permitir ao escalão subordinado enviar aos superiores informações sobre os acontecimentos ocorridos durante o desempenho de suas missões.

As características e objetivos das operações militares descritos nesta seção norteiam a instalação, a operação e a manutenção das redes de comunicações do EB. Estas redes serão descritas na próxima Seção.

## 3. Redes de comunicações do Exército Brasileiro

O trabalho de [6] cita que redes de comunicações táticas sem fios têm diferentes requisitos, expectativas, necessidades, restrições de garantia de informações etc. Esta característica se estende a todas as redes de comunicações militares.

Um primeiro aspecto importante que molda as redes de comunicações militares é a organização hierárquica de toda força militar. Salles [1] toma como exemplo um exército padrão, composto por divisões, cada uma sendo formada por brigadas, que por sua vez são formadas por batalhões e suas companhias, as quais possuem pelotões e seus grupos de combate. Em uma situação de emprego de força militar, o exército padrão é fracionado em suas unidades e subunidades de modo a garantir mobilidade e agilidade.

Os objetivos 2 e 3, citados na seção anterior, enfatizam



a organização hierárquica do EB. Essa característica faz com que os sistemas, computacionais, de transmissão de voz etc., que utilizam as redes de comunicações militares, também possuam organização hierárquica. Assim, as redes de comunicação militares devem ser modulares, permitindo interoperabilidade entre as frações em qualquer situação e independência quando separadas, sem interromper as comunicações em nenhum momento.

O exposto nos dois parágrafos anteriores mostra que as redes de comunicação militares possuem requisitos específicos, tais como alta mobilidade, grande agilidade, modularidade, interoperabilidade e independência. Este requisitos distinguem as rede de comunicações militares das demais redes.

Nesta seção, iniciamos nosso estudo das redes de comunicações do EB com a descrição dos sistemas de comunicações desta instituição. Em seguida, abordaremos os Princípios de Emprego das Comunicações do EB. Por fim, mostramos os Requisitos Operacionais do Sistema de Comando e Controle do EB.

### 3.1 Sistema de Comunicações do Exército Brasileiro

OC11-61-ManualdeCampanha-COMUNICAÇÕES NA DIVISÃO DE EXÉRCITO [7] estrutura o SICOMEx (Sistema de Comunicações do Exército) em SEC (Sistema Estratégico de Comunicações) e SISTAC (Sistema Tático de Comunicações).

### 3.2 Sistema Estratégico de Comunicações

OSEC tem por objetivo o estabelecimento das ligações de longa distância, dentro do território nacional, para o atendimento das necessidades correntes e estratégicas do Exército, podendo, excepcionalmente, prestar apoio de comunicações a qualquer escalão do EB no exterior.

Para tanto, este sistema dispõe de meios de comunicações de grande versatilidade para o estabelecimento das ligações, como a EBNet (Rede Corporativa Privativa do Exército), as RRSEC (Redes Rádio do Sistema Estratégico de Comunicações) e a RITEx (Rede Integrada de Telecomunicações do

Exército). A **figura 3** mostra o SEC e seus componentes.

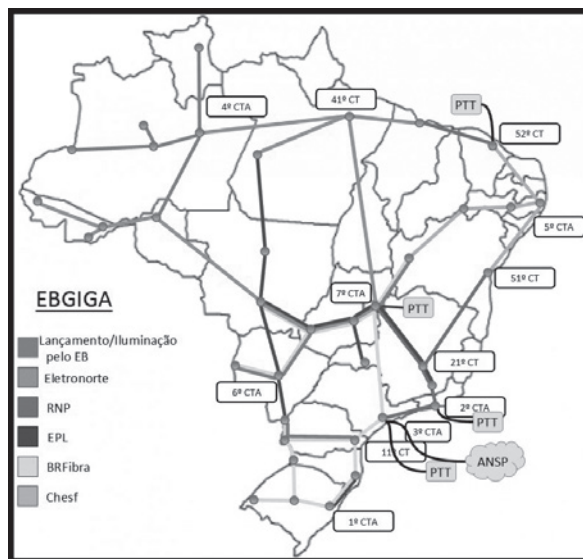


**Fig. 3** – Sistema Estratégico de Comunicações.

A página do CITEEx (Centro Integrado de Telemática do Exército), órgão de apoio setorial diretamente subordinado ao DCT (Departamento de Ciência e Tecnologia), descreve missão deste Centro como “estabelecer, manter e operar os sistemas de informática e comunicações de interesse do SC2Ex (Sistema de Comando e Controle do Exército) no seu nível mais elevado” [8]. No contexto desta missão, o CITEEx e sua OMs subordinadas são os responsáveis pela instalação, manutenção e gerenciamento do SEC e de seus componentes.

Os subsistemas do SISTAC são descritos a seguir.

- **EBNet**

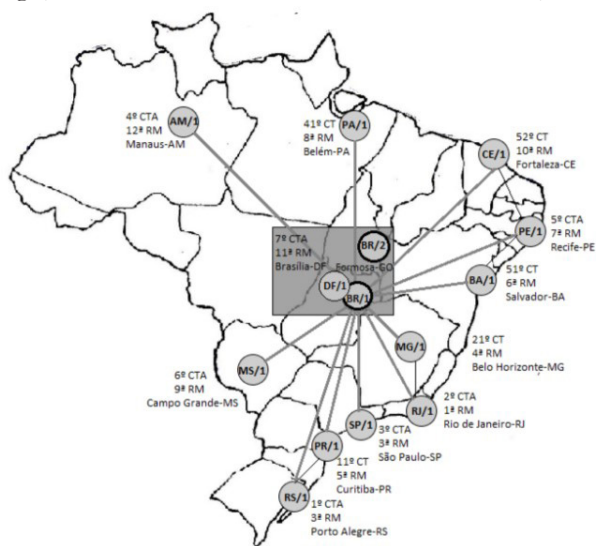


**Fig. 4** – Backbone Principal da EBNet.

A EBNet é uma rede de dados que interliga todas as OMs do EB. Esta tem por finalidade o tráfego de dados

dos sistemas administrativos, tais como os sistemas de pessoal, de material, logístico etc., desta instituição. Esta rede possui tanto enlaces instalados e gerenciados por profissionais do EB quanto por enlaces contratados. A **figura 4** mostra o *backbone* principal da EBNet.

A **figura 4** cita os CTAs (Centros de Telemática de Área) e os CTs (Centros de Telemática). Os CTs e CTAs são OMs subordinadas ao CITEEx, e, portanto, responsáveis pela instalação, manutenção e gerenciamento da infraestrutura de comunicações do EB. Nesta mesma figura, os termos PTT (Ponto de Troca de Tráfego) e ANSP (*Academic Network at São Paulo* ou Rede Acadêmica em São Paulo) representam pontos de ligação da EBNet com outras redes de comunicações.



**Fig. 5** – Backbone Principal da RRSEC.

A RRSEC é um conjunto de rádios fixos cuja finalidade é transmissão de dados em caso de indisponibilidade da EBNet. Toda a infraestrutura da RRSEC é instalada, mantida e gerenciada por profissionais do EB. A **figura 5** mostra o *backbone* principal da RRSEC.

A **figura 5** cita, além dos CTAs e CTs, as RMs (Regiões Militares). As RMs são as OMs do EB responsáveis, entre outras atribuições, pelos aspectos administrativos em sua área de atuação. Estas OMs são grandes utilizadores tanto da EBNet quanto da RRSEC.

- **RITEx**

A RITEx é rede que possibilita a comunicação telefônica entre as OMs do EB. Também é instalada, mantida e gerenciada por profissionais do EB e utiliza como infraestrutura o mesmo *backbone* da EBNet.

O SEC permite a integração com sistemas de comunicações do MD e de outros ministérios, como o SISCOMIS (Sistema de Comunicações Militares por Satélite) e o SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia). Este sistema é utilizado em tempo de paz. Ele provê todas as funcionalidades necessárias para o correto funcionamento de uma força armada em seu cotidiano. De modo geral, possui enlaces com maior capacidade e menor mobilidade [1]. O SEC é interligado à Internet.

### 3.3 Sistema Tático de Comunicações

O SISTAC é o conjunto de meios de comunicações e informática pertencentes às unidades operacionais do EB, destinado ao preparo e emprego de tropas. Sua utilização, portanto, se dá em missões de adiestramento ou em operações. Pode-se dizer que possui enlaces com maior capacidade e maior mobilidade [1]. A **figura 6** mostra o SISTAC e seus subsistemas.



**Fig. 6** – Sistema Tático de Comunicações.

Os subsistemas do SISTAC são descritos a seguir.

- **Subsistema de Rádio de Combate**

É utilizado para a transmissão de voz em operações de guerra, ou seja, em áreas geograficamente afastadas das instalações físicas das OMs que conseqüentemente, devido ao ambiente ser desconhecido e hostil, não permite a instalação de infraestrutura como antenas de

retransmissão. Possui baixo alcance, alta mobilidade e grande facilidade de instalação. Devido ao ambiente hostil, é utilizado com restrição e, portanto, possui baixo tráfego de dados.

- **Subsistema de Rádio Troncalizado**

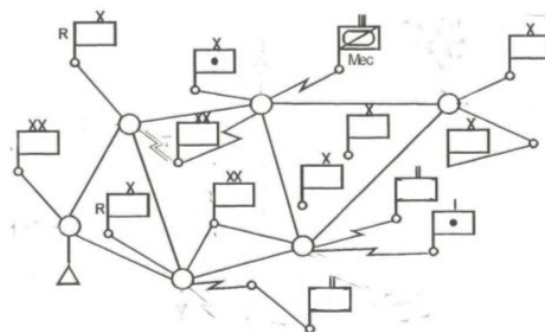
É utilizado para a transmissão de voz em operações de não guerra, ou seja, em áreas urbanas e, geralmente, próximas às instalações de OMs do EB. Necessita da utilização de infraestrutura, como antenas de retransmissão, do próprio EB ou de outros órgãos governamentais ou privados que apoiam a operação. Possui grande alcance, alta mobilidade e grande volume de tráfego.

- **Subsistema de Dados**

O Subsistema de Dados não é um subsistema físico e sim um subsistema lógico e utiliza a infraestrutura física do Subsistema Rádio de Combate ou do Subsistema Rádio Troncalizado, dependendo do tipo da operação. É utilizado para a transmissão de dados em operações tanto de guerra quanto de não guerra. Este subsistema visa dar suporte ao acompanhamento das operações em tempo real, preconizado pelas atividades de comando e controle. A maioria dos seus requisitos variam em funções do tipo de operação no qual está sendo utilizado.

Em operações de guerra, possui alcance, mobilidade e facilidade de instalação semelhantes ao Subsistema Rádio de Combate. Em operações de não guerra, estes requisitos são semelhantes ao Sistema de Rádio Troncalizado. Entretanto, em virtude deste subsistema dar suporte as atividade de comando e controle, possui nos dois tipos de operações grande volume de dados.

A infraestrutura do SISTAC também varia em função da operação, principalmente da área geográfica desta. Os três subsistemas do SISTAC geralmente, possuem a mesma arquitetura. A **figura 7** mostra o *backbone* principal do SISTAC em uma operação. Nesta figura, os retângulos representam as unidades militares, as linhas retas, os *links* de comunicações e os círculos, os elementos de comutação da rede.



**Fig. 7 – Backbone** Principal do SISTAC em uma Operação.

### 3.4 Sistema de comunicações do Exército Brasileiro em operações

Numa operação de guerra, os componentes do SEC são expandidos para alcançar a estrutura centralizada de acompanhamento, citada na Subseção 2.1. Os elementos que realizam suas missões em áreas afastadas desta estrutura utilizam o SISTAC para manter as comunicações com a citada estrutura.

Numa operação de não guerra, como por exemplo os Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro, realizados em 2016, o SEC funciona como o *backbone* central da estrutura de comunicações e os diversos Sistema Táticos são interligados ao primeiro. O Sistema Estratégico também é interligado à outras redes de comunicações que possuam informações de interesse para os decisores militares que comandam a operação, por exemplo, redes dos órgãos de segurança pública, redes que possuem acesso às câmeras de vídeo dos órgãos responsáveis pelo gerenciamento do trânsito na cidade etc. Os militares em posições afastadas utilizam o SISTAC para manter as comunicações como o citado *backbone*.

A **tabela 1** faz um resumo da utilização do SEC e do SISTAC nas Operações de Guerra e de Não Guerra.

**Tab. 1 –** Resumo da utilização do SEC e do SISTAC nas operações do EB.

Sistema	Operação de Guerra	Operação de Não Guerra
SEC	Expandido para alcançar a estrutura centralizada de acompanhamento	Sistema principal
SISTAC	Sistema principal	Utilizado pelos militares em posições afastadas



Dois conjuntos de requisitos a serem considerados na construção das redes de comunicações militares, tanto como infraestrutura do SEC quanto do SISTAC, são os Princípios de Emprego das Comunicações no Exército Brasileiro e os Requisitos Operacionais do Sistema de Comando e Controle desta instituição. Estes requisitos serão explicados nas duas próximas subseções.

### 3.5 Princípios de emprego das comunicações no Exército Brasileiro

As operações militares, tanto de guerra como de não guerra, se valem dos sistemas de comunicações estratégico e tático listados na seção anterior. Independentemente do tipo de operação ou da modalidade do sistema empregado, é natural que tais soluções devam atender a requisitos de comunicações diversos e desafiadores a um só tempo. O EB apresenta uma coletânea com estes requisitos no O C11-1 - Manual de Campanha - EMPREGO DAS COMUNICAÇÕES [9], documento que define os “Princípios de Emprego das Comunicações Militares”, listados na **tabela 2**.

**Tab. 2** – Princípios de Emprego das Comunicações Militares [9].

Princípio	Descrição
Tempo integral	Operar 24 horas por dia, todos os dias da operação.
Rapidez	Colocar a rede em operação em um curto período de tempo com o objetivo de proporcionar, o mais breve possível, o estabelecimento de contato entre os integrantes da operação.
Amplitude de deslocamento	Estar operacional em toda a área da operação.
Integração	Operar junto com os sistemas dos escalões superior e subordinado.
Flexibilidade	Adequar-se rapidamente às mudanças, principalmente ao deslocamento geográfico das organizações militares durante a operação.
Apoio em profundidade	O escalão superior, mais recuado, deve apoiar os escalões subordinados, mais avançados.
Continuidade	Manter as comunicações, a qualquer custo, durante todo o transcurso da operação.
Confiabilidade	Estar sempre disponível, estabelecendo caminhos alternativos para a transmissão das mensagens.
Emprego centralizado	Concentrar meios em centros e eixos de comunicações, permitindo melhor aproveitamento dos mesmos.

Princípio	Descrição
Apoio cerrado	Encurtar as distâncias sempre que possível para facilitar as comunicações.
Segurança	Impedir, ou pelo menos dificultar, a obtenção da informação pelo inimigo.
Prioridade	Estabelecer comunicações e transmitir mensagens de acordo com a prioridade preestabelecida.

Os Princípios de Emprego das Comunicações Militares são um conjunto de diretrizes para que as redes de comunicações militares possam estabelecer as ligações entre os diversos níveis hierárquicos, visando que todos os elementos integrantes de uma operação militar possam, durante todo o desenrolar da operação, manter as comunicações com seus superiores e subordinadas de maneira eficiente, eficaz e segura, condição determinante para o sucesso de uma operação.

### 3.6 Requisitos operacionais do sistema de comando e controle do Exército Brasileiro

Um dos principais sistemas utilizado pelo EB, tanto na execução das operações quanto no planejamento destas atividades, é o **SC2Ex**. Portanto, as redes de comunicações militares devem atender aos requisitos deste sistema que visa automatizar as tarefas necessárias para atingir os Objetivos 1, 2 e 3, citados na Seção 2.

O **SC2Ex** é uma ferramenta de integração de informações entre os componentes da operação. Este sistema visa incrementar a capacidade de compartilhamento de informações e, também, permitir o adequado fluxo de ordens.

O EB definiu os ROB (Requisitos Operacionais Básicos) do SC2Ex para os níveis Brigada e Divisão na PORTARIA Nº 032 - EME, DE 19 DE MAIO DE 2003 [10]. Estes requisitos são divididos em três categorias: 1) Absolutos, devem, obrigatoriamente, ser atendidos; 2) Desejáveis, podem ser atendidos mas não obrigatoriamente; e 3) Complementares, podem não ser atendidos. Ao todo são 21 requisitos Absolutos, 29 requisitos Desejáveis e 3 requisitos Complementares.

Devido a sua extensão, a lista completa dos ROB foi

omitida deste documento, mas encontrada na Portaria Nº 032 - EME, de 2003.

Agora que já conhecemos as redes de comunicações, os Princípios de Emprego das Comunicações e os Requisitos Operacionais do Sistema de Comando e Controle do Exército Brasileiro, faremos uma análise da utilização destas redes nas operações do EB visando atender os Princípios de Emprego das Comunicações e os Requisitos Operacionais do Sistema de Comando e Controle desta instituição.

## 4. Análise das redes de comunicações atuais do Exército Brasileiro

Alguns trabalhos na literatura tratam do assunto de redes de comunicações táticas. O livro de G. F. Elmasry, intitulado *Tactical wireless communications and networks: design concepts and challenges* [6], é uma obra de referência no tema. Neste texto, o autor fornece uma descrição completa das comunicações militares táticas e tecnologia de redes modernas. Este livro sistematicamente compara as técnicas de comunicações militares táticas com suas equivalentes comerciais, apontando semelhanças e diferenças. Em particular, ele examina cada camada da pilha de protocolos e mostra como requisitos táticos e de segurança específicos resultam em alterações da abordagem comercial. O autor sistematicamente conduz os leitores por esse tópico complexo, primeiramente fornecendo informações sobre a abordagem arquitetônica na qual a análise será baseada, e depois entrando em detalhes sobre as tecnologias e técnicas de comunicação sem fio e de redes táticas.

Outra referência neste assunto é o livro de M. J. Ryan e M. R. Frater, intitulado *Tactical communications for the digitized battlefield* [11]. Neste trabalho é explicado que os sistemas tradicionais de comunicações táticas consistem em vários subsistemas separados, com pouca integração entre eles e com os sensores externos e sistemas de armas. Os autores citam que a rede rádio de combate fornece as comunicações de alta mobilidade exigidas pelas tropas no ambiente operacional, enquanto os sistemas de comunicações troncalizados forneceram comunicações de alta capacidade, entre

as tropas em ambientes com infraestrutura instalada, em detrimento da mobilidade. O foco deste livro está nas tecnologias da era da informação que prometem oferecer integração contínua de dados em tempo real, criando uma arquitetura de rede lógica única para facilitar a movimentação de dados por todo o espaço de batalha. Como a estrutura dessa rede é limitada pelo compromisso fundamental entre alcance, mobilidade e capacidade que se aplica a todos os sistemas de comunicações, é improvável que essa rede seja baseada em uma única tecnologia de rede. Este livro apresenta uma arquitetura para essa rede e mostra como seus subsistemas podem ser integrados para formar uma única rede lógica.

O artigo de K. Wongthavarawat e A. Ganz, intitulado *IEEE 802.16 based last mile broadband wireless military networks with quality of service support* [12] cita que os futuros conceitos de guerra do DoD (*Department of Defense* ou Departamento de Defesa) dos Estados Unidos alavancam a superioridade das informações e exigirão grandes melhorias na transferência de informações em termos de maior largura de banda, suporte a QoS (*Quality of Service* ou Qualidade de Serviço) e conexão a um *backbone* de alta velocidade.

Outro artigo que merece ser citado é o de J. C. Juarez, A. Dwivedi, A. R. Hammons, S. D. Jones, V. Weerackody e R. A. Nichols, intitulado *Free-space optical communications for next-generation military networks* [13]. Neste texto, o autor cita a necessidade contínua de maior capacidade para aplicações militares, especialmente em conceitos operacionais centrados em rede que promovem o uso de informações como fundamental para obter superioridade no campo de batalha. Como exemplo, é citado que o acesso e a distribuição de dados de sensores é um princípio importante da guerra centrada na rede e, no entanto, os links de radiofrequência terão dificuldades para fornecer a capacidade necessária. Neste artigo, ainda é enfatizado que, apesar das comunicações ópticas de espaço livre terem o potencial de atender a essas necessidades militares emergentes, oferecendo

aumentos drásticos de capacidade, existem muitos desafios técnicos em várias camadas da pilha de protocolos de comunicação para a exploração deste potencial.

Um artigo que trata especificamente das redes de comunicações do EB é de R. M. Salles, D. F. C. Moura, J. M. A. Carvalho e M. R. Silva, intitulado *Novas perspectivas tecnológicas para o emprego das comunicações no exército brasileiro* [1]. Este texto mostra uma visão geral sobre a estrutura das comunicações militares no EB e como técnicas atuais de redes de dados podem contribuir em sua evolução. Devido ao seu foco deste trabalho nas redes de comunicações do EB, abordando os Princípios de Emprego das Comunicações e os Requisitos do Sistema de Comando e Controle desta instituição, o utilizamos como referência para nossa análise.

Esta análise é explicada nesta seção.

## 4.1 Análise dos princípios gerais das redes de comunicações do Exército Brasileiro

Os autores de [1] primeiro definem cinco outros termos utilizados comumente na concepção de redes de comunicações, os Princípios Gerais, conforme mostrado na **tabela 3**, para fazer um estudo dos Princípios de Emprego das Comunicações e os Requisitos do Sistema de Comando e Controle do EB. Esses Princípios Gerais dão uma visão dos requisitos técnicos de uma rede de comunicações.

**Tab. 3 –** DESCRIÇÃO DOS PRINCÍPIOS GERAIS [1].

Princípio Geral	Descrição
Escalabilidade	Capacidade de um sistema expandir-se sem degradar-se.
Desempenho	Existem várias aspectos associados ao desempenho. Na Tabela 4 são tratados os de maior relevância para a maioria das aplicações.
Segurança	Capacidade de proteger os dados da rede de usuários não autorizados.
Gerenciabilidade	Capacidade de levantar-se os parâmetros da rede para suas utilização como base para ações preventivas.
Usabilidade	Facilidade de utilização e configuração dos elementos da rede.

**Tab. 4 –** Principiais Aspectos Associados ao Desempenho [1].

Aspecto	Descrição
Capacidade	Tráfego, em bps, que a rede é capaz de disponibilizar.
Utilização	Percentual médio da capacidade usada.
Utilização Máxima	Percentual da utilização em que a rede é considerada saturada.
Vazão	Quantidade de dados úteis transferidos sem erro por segundo.
Acurácia	Quantidade de tráfego útil corretamente transmitido, relativo ao tráfego total.
Eficiência	Quantidade de dados úteis transmitidos, descontados os dados utilizados para controle das diversas funções da rede.
Atraso ou Latência	Tempo médio entre o momento em que uma mensagem está pronta para ser transmitida e sua recepção no destino.
Variação de Atraso	Percentual de variação no atraso médio.
Tempo de Resposta	Tempo entre um pedido de serviço e a recepção de uma resposta.
Disponibilidade	Razão entre o tempo disponível e o tempo de funcionamento.
Redundância	Capacidade da rede de funcionar plenamente mesmo que alguns de seus recursos estejam indisponíveis.
Prioridade	Capacidade da rede de atender mensagens prioritárias.

Em seguida, o trabalho de [1] mapeia os princípios citados na **tabela 2** nos Princípios Gerais. Esse mapeamento é mostrado na **tabela 5**. O mapeamento dos Princípios de Emprego das Comunicações nos Princípios Gerais simplifica a análise e permite uma avaliação mais direta das tecnologias disponíveis quanto às suas aplicações nos subsistemas de comunicação do Exército.

**Tab. 5 –** mapeamento dos Princípios de Emprego das Comunicações em Princípios Gerais [1].

Princípio Geral	Princípio(s) de Emprego das Comunicações
Escalabilidade	Amplitude de desdobramento e Integração.
Desempenho	Tempo integral, Rapidez, Confiabilidade, Continuidade e Prioridade.
Segurança	Segurança..
Gerenciabilidade	Apoio em profundidade, Emprego centralizado e Apoio cerrado..
Usabilidade	Flexibilidade.

Observa-se, pela **tabela 5**, que todos os Princípios de Emprego das Comunicações do EB podem ser mapeados para um Princípio Geral. Nota-se também que Desempenho e Escalabilidade são os Princípios Gerais que tem mais Princípios de Emprego mapeados e que todos os Princípios Gerais possuem, pelo menos, um Princípio de Emprego das Comunicações mapeado.

## 4.2 Análise dos requisitos do Sistema de Comando e Controle do Exército Brasileiro

Numa continuação da análise, o texto de [1] faz uma associação dos ROBs do Sistema de Comando e Controle do EB, com os Princípios Gerais vistos anteriormente na **tabela 3**. É importante ressaltar que os ROBs mais intimamente ligados a requisitos de software foram associados ao desempenho (já que a rede deve dar suporte à funcionalidade) e/ou à usabilidade.

Foram dados pesos para cada atributo em virtude de sua categoria: atributos da categoria Absolutos têm peso 10, desejáveis, peso 6 e Complementares, 3.

Dos 21 requisitos Absolutos (peso 10) definidos pelo EB, o citado trabalho classificou 12 quanto ao princípio da Usabilidade, 9 quanto ao Desempenho, 3 quanto à Escalabilidade, 2 quanto à Segurança e 1 quanto à Gerenciabilidade. Observou-se que um único requisito pode atender a mais de um princípio. Dos 29 requisitos Desejáveis (peso 6), classificou 14 quanto ao Desempenho, 11 quanto à Usabilidade, 7 quanto à Escalabilidade, 4 quanto à Gerenciabilidade e 1 quanto à Segurança. Dos três requisitos Complementares (peso 3), classificou um quanto ao Desempenho, um quanto à Usabilidade, um quanto à Escalabilidade e um quanto à Segurança.

Diante da classificação, o trabalho [1] que avaliou o grau de importância de cada Princípio Geral, bastando para isso somar os pesos obtidos nos três tipos de requisitos. Os pesos e percentual dos pesos para os princípios utilizados comumente na concepção de redes de comunicações estão listados na **tabela 6**.

**Tab 6** – Peso e Peso Percentual dos Princípios Gerais nas Redes de Comunicações do EB [1].

Princípio Geral	Peso	Peso Percentual
Escalabilidade	189	37,4%
Desempenho	177	35,1%
Segurança	75	14,9 %
Gerenciabilidade	34	6,7 %
Usabilidade	29	5,8 %

Estes pesos dão uma visão da importância de cada Princípio Geral para as redes de comunicações militares. Pelo resultado da **tabela 6**, podemos notar que escalabilidade e desempenho são os Princípios Gerais com maiores pesos. Entretanto, os cinco Princípios Gerais tem peso considerável (maior que 5%) nas redes de comunicações militares.

De posse dos resultados da importância de cada Princípio Geral para as redes de comunicações militares, faremos um estudo do SISTAC com o objetivo de levantar os desafios tecnológicos para que as redes de comunicações militares atendam aos requisitos operacionais do EB.

Esta opção pelo SISTAC, em detrimento do SEC, foi motivada pelos desafios inerentes às redes táticas. Dentre estes, destacamos 1) interconexão de tecnologias de enlace, 2) aumento da segurança na camada física e 3) aumento do desempenho em cenários de alto tráfego ou de interferência eletromagnética. Explicamos estes desafios na Seção 6 na qual também fazemos propostas para enfrentá-los.

Na próxima Seção, faremos um estudo de algumas tecnologias quanto ao possível emprego no SISTAC.

## 5. Tecnologias existentes para o emprego nas redes de comunicações do Exército Brasileiro

Para efeito deste trabalho, dividimos as tecnologias de comunicações em dois grupos: 1) Tecnologias prontas

para uso e 2) Tecnologias em Desenvolvimento. As tecnologias destes grupos serão descritas resumidamente nas próximas duas subseções.

## 5.1 Tecnologias prontas para uso

Segundo Salles [1], algumas tecnologias candidatas a um possível emprego no SISTAC são as seguintes:

- **Rede Rádio de Combate com Transmissão Digital**

É um sistema de radiodifusão, que se distingue pela emissão de um sinal digital. Utiliza a rede rádio legada para transmissão de dados. Pode trabalhar em HF (*High Frequency* ou Frequência Alta), com taxas aproximadamente 2,4 Kbps, ou em UHF/VHF, com taxas de 16 Kbps, utilizando-se de modems específicos. A principal vantagem do rádio digital está na melhoria da qualidade da transmissão. A digitalização do rádio e a integração com outras tecnologias de transmissão de dados oferecem também uso mais eficiente do espectro. Fabricantes como a *Harris Corporation*® e a *Thales Communications*® possuem produtos disponíveis no mercado que utilizam esta tecnologia.

- **Rede Pacote Rádio**

É uma tecnologia que aumenta as taxas de transferência de dados nas redes rádios existentes. Esta permite o transporte de dados por pacotes utilizando comutação por pacotes. Sendo assim, este sistema oferece uma taxa de transferência de dados muito mais elevada que as taxas de transferência que a tecnologia de Rede Rádio de Combate com Transmissão Digital. Este sistema, em situações ideais, pode ultrapassar a marca dos 170 kbps. No entanto na prática, esta taxa está em torno dos 40 kbps.

Esta tecnologia utiliza a mesma estrutura convencional das Redes Rádio de Combate, interligando diversas subredes através de máquinas *bridges*, proporcionando *re-broadcast*. Produtos dos fabricantes que utilizam a tecnologia de rede rádio de combate com transmissão digital também disponibilizam esta

tecnologia de rede pacote rádio.

- **Redes de Arquitetura Estação-Base**

Fazem uso de uma estação base para intermediar a comunicação entre quaisquer duas estações. Estas estações-base permitem um maior alcance destas redes. Entretanto, a instalação destas estações é uma atividade que requer tempo e recursos. Portanto, são de difícil utilização em locais desconhecidos e/ou hostis. Entre as redes mais comuns que se utilizam desta arquitetura estão: telefones celulares e rádios *half-duplex* de dupla frequência. Fabricantes como a *Ericson GE*® e a *Motorola*® possuem produtos disponíveis no mercado que utilizam esta tecnologia.

- **Redes Ad Hoc**

Redes *ad hoc* são um tipo de rede que não possuem um nó ou terminal especial, geralmente designado como ponto de acesso, para o qual todas as comunicações convergem e que as encaminha para os respectivos destinos. Assim, uma rede de computadores *ad hoc* é aquela na qual todos os terminais funcionam como roteadores, encaminhando de forma comunitária as comunicações advindas dos terminais vizinhos. A maleabilidade de sua topologia e a ausência de necessidade de infraestrutura prévia permitem um rápido desenvolvimento de uma rede *ad hoc*. Nenhuma preparação da área de cobertura é precisa porque itens como torres ou linhas de transmissão não são necessários. Estes atributos das redes *ad hoc* as diferenciam das redes do tipo estação-base, nas quais a conectividade é conhecida *a priori*.

Por estes motivos, elas são adequadas às comunicações próprias dos campos de batalha, onde, na maioria das vezes, nenhuma infraestrutura prévia está disponível. Os pontos-chave dessas redes são o controle de acesso ao meio, utilizado para compartilhar os recursos de canal entre os nós, e o roteamento, que consiste em encontrar uma rota entre emissor e receptor através de um número desconhecido de nós intermediários. As taxas variam com a tecnologia sem fio empregada. As empresas *rede-livre Freifunk*®, da Alemanha, e a *openwireless*®, da Suíça, desenvolveram o protocolo B.A.T.M.A.N. (Better Approach To Mobile



Ad-hoc Networking ou Melhor Abordagem para Redes Ad-hoc Móveis) de roteamento para redes WLAN de computadores abertas redes sem fios do tipo Ad-hoc.

- **TDMA Repetido**

O TDMA (*Time Division Multiple Access* ou Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo) é um sistema rádio digital que funciona dividindo um canal de frequência em até oito intervalos de tempo distintos. Cada usuário ocupa um *slot* de tempo específico na transmissão, o que impede problemas de interferência. A temporização é determinada por uma estação de controle. Alcançam taxas de aproximadamente 500 Kbps. Os sistemas celulares de segunda geração, como o GSM (*Global System for Mobile Communications* ou Sistema Global para Comunicações Móveis), utilizam o TDMA na sua interface com a estação móvel.

- **Redes Rádio UWB**

O UWB (Ultrawideband ou Banda Ultra Larga) opera de forma diferente das demais tecnologias rádio. Além de ter um espectro de atuação amplo, o UWB transmite por rajadas de sinais (centenas por segundo). A combinação do “gatilho rápido” com a ampla cobertura de banda permite que o UWB consuma menos energia e consiga taxas de transmissão mais altas.

Opera na faixa de 3,1 GHz a 10,6 GHz. O padrão de transmissão sem fio UWB utiliza sinais de rádio de baixa energia na forma de pulsos curtos (0,1 a 1,5 ns). Com a geração de milhões de pulsos por segundo, o UWB pode atingir taxas de transmissão de até 100 Mbps, entretanto seu alcance é, no máximo, 10 m. Aparelhos sem fios próximo ao usuário, como por exemplo, impressora, mouse, teclado ou MP3 Player utilizam esta tecnologia de comunicações.

Uma descrição mais detalhada das tecnologias acima citadas pode ser encontrada no livros de A. S. Tanenbaum, intitulado *Redes de Computadores* [14] e de A. F. Molisch, intitulado *Wireless Communications* [15].

Duas tecnologias promissoras para sua utilização em redes táticas e, conseqüentemente, para utilização

no SISTAC, são as de rádios cognitivos e a de transmissão *full-duplex* em Banda. Essas tecnologias são descritas na duas próximas subseções.

## 5.2 Tecnologias em desenvolvimento

- **Rádios Cognitivos**

Um RC (Rádio Cognitivo), termo cunhado pelo Prof. Dr. Joseph Mitola em 1999 [16], de maneira simples, é um rádio inteligente [17]. Conforme definição de Haykin [18], é um sistema de comunicações sem fio inteligente, capaz de utilizar metodologias de inteligência artificial, tais como *reinforcement learning* [19], algoritmos genéticos [20], entre outras, para adaptar seus parâmetros operacionais à dinâmica do ambiente ao seu redor. Por conseqüência, é um tipo de rádio que aprende com experiências anteriores e lida com situações que não foram planejadas em sua concepção.

Assim, um RC [21] é um rádio que percebe e está ciente de seu ambiente operacional e pode, dinâmica e automaticamente, ajustar seus parâmetros operacionais de acordo com esse ambiente.

Um RC [22] é definido formalmente como um rádio que pode mudar seus parâmetros de transmissão com base na interação com o ambiente no qual opera. Estes parâmetros podem ser das camadas física (frequência, potência do sinal e estratégias de modulação e de codificação utilizadas), de enlace (técnicas de acesso ao meio e de retransmissão), de rede (algoritmos de roteamento), ou das camadas superiores (estratégia de autenticação e algoritmo de criptografia).

Para que um RC [17] opere de maneira adequada, mais do que simplesmente informações do espectro eletromagnético, ele deve utilizar quatro tipos de informações, todas fornecidas pelo ambiente de operação no qual está imerso: 1) do ambiente rádio; 2) dos requisitos de QoS da aplicação; 3) dos recursos disponíveis para o dispositivo; e 4) da política regulatória do uso do espectro.

O mesmo autor [17] menciona que aplicações militares, tais como sistemas logísticos, acionamento de armas, navegação, geolocalização, radares e redes de sensores são grandes utilizadoras do espectro e de

diferentes tipos de sistemas sem fio. Estas aplicações necessitam de acesso eficiente e seguro ao espectro. Em um cenário militar [17], tipicamente, há um grande número de dispositivos e sistemas de comunicações heterogêneos que precisam ser interconectados. Por exemplo: diferentes sistemas táticos (manobra, guerra eletrônica, defesa antiaérea etc.) de uma mesma força militar, diferentes forças armadas de um país ou mesmo de diferentes países em uma aliança internacional. Pode haver operações em terra, mar e ar.

Ainda pode ocorrer uma mistura de redes centralizadas e descentralizadas. Muitos destes sistemas precisam ser instalados rapidamente em locais desconhecidos e muitas vezes hostis. Pode haver conexões cujo emprego seja de duração curta, por exemplo, conexões entre aeronaves, ou de longa, como sistemas de comunicações entre os presidentes dos países de uma aliança multinacional e o general comandante da operação militar.

A coexistência e a interoperabilidade de redes também é de vital importância no caso de alianças militares e operações conjuntas. Como um RC pode receber um sinal (forma de onda) no padrão de uma rede *A* e transformá-lo no padrão de uma rede *B* para reencaminhamento, tem-se que, neste cenário, um RC pode funcionar como *bridge*, permitindo uma rápida integração entre forças distintas em coalizão. Em casos onde sistemas legados não cognitivos existam, as RC podem evitar problemas, tais como os de interferência, escolhendo faixas de frequência que não estão sendo utilizadas pelos sistemas legados.

#### • Transmissão Full-Duplex em Banda

Transmissão sem fio FD (Full-Duplex) em banda [23] significa que um dispositivo rádio tem a capacidade de receber e transmitir informações ao mesmo tempo na mesma faixa de frequência. Esta capacidade é habilitada pelas técnicas de SIC (*Self-Interference Cancellation* ou Cancelamento de Auto-Interferência). Nenhuma das tecnologias de redes atuais possuem esta característica. Deve-se notar que nem a TDD (*Time-Division Duplexing* ou Duplexação por Divisão do Tempo) nem a FDD (*Frequency-Division Duplexing* ou

Duplexação por Divisão de Frequência) é considerado operação FD real nos termos modernos, apesar de elas permitirem conversas bidirecionais simultâneas, porque a perspectiva da comunicação FD é deslocada para o uso do espectro na camada física [24].

Agora que temos a importância de cada Princípio Geral para as redes de comunicações militares e do estudo de algumas tecnologias de comunicações, verificaremos as lacunas e desafios tecnológicos para que as redes de comunicações militares atendam aos Princípios de Emprego das Comunicações e aos Requisitos do Sistema de Comando e Controle do EB.

## 6. Desafios tecnológicos para que as redes de comunicações militares atendam aos requisitos operacionais do Exército Brasileiro

Autores [1] fazem uma avaliação do atendimento aos Princípios Gerais pelas tecnologias prontas para uso descritas na Seção 5. Esta avaliação é mostrada na **tabela 7**.

**Tab. 7** – Atendimento dos Princípios Gerais pelas Tecnologias Prontas para Uso Descritas.

Tecnologia	Requisitos Atendidos	Requisitos Não Atendidos
Rede Rádio de Combate com Transmissão Digital	1, 4 e 5	2 e 3
Rede Pacote Rádio	1, 3, 4 e 5	2
Redes de Arquitetura Estação-Base	3, 4 e 5	1 e 2
Redes Ad Hoc	3, 4 e 5	1 e 2
TDMA Repetido	3, 4 e 5	1 e 2
Redes Rádio UWB	2, 3, 4 e 5	1

1-Escalabilidade, 2-Desempenho, 3-Segurança, 4-Gerenciabilidade e 5-Usabilidade.

Os mesmos autores [1] concluem que nenhuma infraestrutura de comunicação reúne condições de suportar os Princípios de Emprego das Comunicações e os Requisitos do Sistema de Comando e Controle do EB simultaneamente. Sendo assim, um sistema de comunicações militar deve ser uma única estrutura

lógica integrada por múltiplas tecnologias de enlace. A integração destas tecnologias devem ser feitas de maneira automática e sem a necessidade de intervenção humana visando a agilidade e a flexibilidade.

Outro aspecto abordado pelos mesmos autores [1] é que três requisitos são estritamente relacionados e constituem um forte compromisso no sistema de comunicações militar: alcance, capacidade e mobilidade. Por exemplo: um sistema que possibilita altas mobilidade e alcance não será dotado de alta taxa de transmissão. O forte relacionamento existente se dá, em geral, pelo fato que ao variar um dos fatores os outros dois também variam. Na verdade, ao se maximizar dois fatores o terceiro acaba sendo minimizado. A **figura 8** exemplifica tal situação.

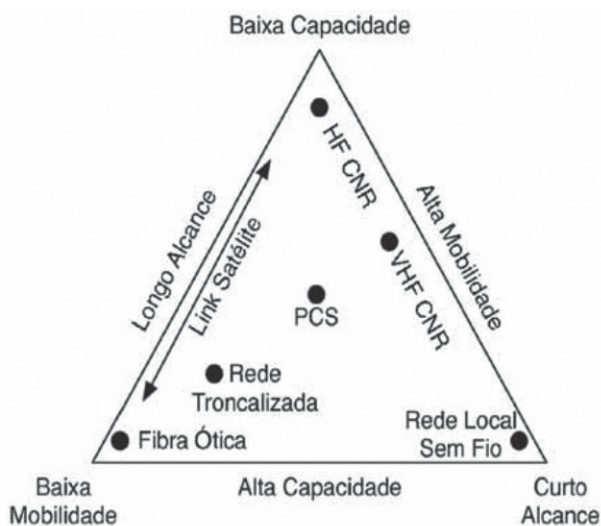


Fig. 8 – Triângulo de Compensação [11].

O Triângulo de Compensação se constitui em uma forma rápida e simples de avaliação da pertinência de uma determinada tecnologia de comunicação quanto ao emprego em uma operação.

Pelo exposto nesta seção, percebemos que as tecnologias de redes de comunicações prontas para uso deixam desafios para o atendimento aos Princípios de Emprego das Comunicações do EB bem como para os Requisitos Operacionais Básicos do Sistema de Comando

e Controle desta instituição. Destacaremos neste artigo, três desafios para que as redes de comunicações militares atendam ao requisitos operacionais do EB. Estes desafios são descritos a seguir.

- **Desafio 1 – Interconexão de tecnologias de enlace**

O principal desafio das redes atuais é prover a possibilidade de realizar, em tempo de operação, sem perda de capacidade, alcance e/ou mobilidade, a interconexão de tecnologias de enlaces utilizadas.

O desafio citado no parágrafo anterior surge pois nenhuma infraestrutura de comunicação reúne condições de suportar os Princípios de Emprego das Comunicações e os Requisitos do Sistema de Comando e Controle do EB simultaneamente. Consequentemente, um sistema de comunicações militar deve ser uma única estrutura lógica integrada por múltiplas tecnologias de enlace. Entretanto, as redes de comunicações que utilizam as tecnologias prontas para uso não tem a possibilidade de integração automática, sem intervenção humana, destas tecnologias.

Como exemplo da impossibilidade citada no parágrafo anterior, imagine a situação em que se dispõe das tecnologias de Redes Rádio UWB e de Rede Rádio de Combate com Transmissão Digital. A primeira tecnologia possui maior taxa de transmissão e menor consumo de energia que a segunda. Entretanto, as Redes Rádios UWB possuem menor alcance. Uma rede lógica ideal seria aquela que, sempre que a distância entre o transmissor e o receptor fosse menor que o alcance das Redes Rádios UWB, utilizaria esta tecnologia e, quando a distância fosse maior que o citado alcance, utilizaria a Rede Rádio de Combate com Transmissão Digital. Esta mudança de tecnologia precisaria ser feita dinâmica e automaticamente.

O mesmo raciocínio do parágrafo anterior aplica-se quanto possuímos as tecnologias de Rede de Arquitetura Estação-Base e, novamente, a Rede Rádio de Combate com Transmissão Digital. A primeira tecnologia possui maior segurança pois a transmissão é feita por linha de visada do rádio com sua estação-base porém requer a instalação das estações-base. Numa operação

em ambiente urbano, a Rede de Arquitetura Estação-Base é a mais utilizada pois o cenário é conhecido e, na maioria das cidades, a infraestrutura necessária já se encontra instalada. Entretanto, esta torna-se inadequada para as operações onde a atuação se dá em ambientes desconhecidos e, muitas vezes, hostis, ou mesmo quando a atuação precisa ser tempestiva com pouquíssimo tempo para a preparação. Nestas operações a Rede Rádio de Combate com Transmissão Digital é a mais adequada.

No exemplo do parágrafo anterior, o problema das redes atuais surge quando, por exemplo, tropas do EB estão em uma operação em ambiente urbano e, de maneira imediata, parte desta tropa precisa ser deslocar para um local desconhecido. Geralmente este problema é resolvido utilizando dois equipamentos rádios. Numa rede lógica ideal teríamos um único equipamento capaz de, quando detectasse a estação-base, faria a transmissão por linha de visada, e quando isto não acontecesse, utilizaria a tecnologia de Rede Rádio de Combate Digital.

- **Desafio 2 – Aumentar a segurança na camada física**

Outro desafio das redes táticas atuais é aumentar a segurança na camada física das redes de comunicações táticas sem fio.

O desafio citado no parágrafo anterior surge pois nas tecnologias prontas para uso, descritas na Seção 5, tradicionalmente, a segurança é abordada nas camadas superiores da pilha de protocolos usando criptografia. Estas abordagens que utiliza criptografia com base em chaves secretas, tem sua garantia de sigilo fundamentada na suposição que os interceptadores tem recursos computacionais limitados. Entretanto os usuários e, conseqüentemente os interceptadores, possuem grande poder computacional hoje em dia e este poder aumenta de forma contínua. Outro desafio desta abordagem é garantir que as chaves não sejam interceptadas por nós não autorizados durante a distribuição destas pela rede.

- **Desafio 3 - Aumentar o desempenho em cenários de alto tráfego ou de interferência eletromagnética.**

Outro desafio das redes atuais é aumentar seu desempenho, especialmente em cenários de alto tráfego ou de interferência eletromagnética.

O desafio citado no parágrafo anterior surge pois, com exceção das redes de rádio UWB, as tecnologias prontas para uso não possuem desempenhos satisfatórios. Esta falta de desempenho, em parte, é causada pelo estratégia de uso do espectro das redes rádio atuais.

As redes rádios atuais utilizam o espectro de maneira fixa, ou seja, utilizam uma ou mais faixa de frequência de maneira pré determinada ou configurada por software. Esta característica obriga que um rádio utilize um ou mais canais ainda que estes estejam sobrecarregados e existam outras canais livres. Outro problema desta abordagem é a facilidade de um ataque de interferência, especialmente quando o atacante possui a tecnologia de rádios cognitivos [25].

## 6.1 Sugestões de soluções para os desafios tecnológicos das redes de comunicações militares

Duas tecnologias que figuram como candidatas promissoras para enfrentar os desafios citados acima são a tecnologia de rádios cognitivos e a de transmissão *full-duplex* em banda.

Conforme citado [17], um RC pode receber um sinal no padrão de uma *rede A* e transformá-lo no padrão de uma *rede B* para reencaminhamento. Tem-se que, neste cenário, uma RC pode funcionar como *bridge*, permitindo uma rápida integração entre múltiplas tecnologias de enlace. Outro autor [18] cita que, com a utilização de técnicas de *reinforcement learning* [19], algoritmos genéticos [20], um RC pode aprender, de forma automática e sem intervenção humana, a melhor forma de fazer a integração das tecnologias de enlace, dados os requisitos das camadas superiores da rede. Esta capacidade candidata a tecnologia de RC a enfrentar o Desafio 1.

Com o desenvolvimento da tecnologia de transmissão FD em banda [24], surge a capacidade de transmissão e recepção simultâneas. Autores [24] citam que rádios militares com a tecnologia FD poderão:

- a) produzir guerra eletrônica, via ataque de

interferência, contra as comunicações inimigas, ao mesmo tempo que recebem dados, b) produzir guerra eletrônica, via ataque de interferência, contra a interceptação de dados pelo inimigo, ao mesmo tempo que recebem dados, c) interceptar as comunicações inimigas ao mesmo tempo que transmitem dados e d) interceptar as comunicações inimigas e interferir nas comunicações simultaneamente. A capacidade b) descrita acima permite a aumentar a segurança na camada física.

Um RC pode mitigar os efeitos de um ataque de interferência. Dois exemplos de trabalhos, [25] e [26], propõem esta aplicação.

Com a utilização conjunta das tecnologias de RC e FD, este aumento de segurança pode ser feito sem desconsiderar outros requisitos das redes táticas tais como: 1) restrição de uso de energia; 2) desconhecimento tanto do canal entre o rádio espião inimigo e o transmissor quanto do canal entre o espião e o receptor; e 3) necessidade do aumento da dificuldade de detecção da posição dos rádios aliados pelo inimigo. A junção das duas tecnologias citadas possibilita o aumento da segurança nas transmissões em redes rádios em cenários militares. Estas características colocam as tecnologias de RC e FD como candidatas a enfrentar o Desafio 2.

A tecnologia de rádios cognitivos permite, entre outras funcionalidades, que um rádio: 1) determine quais partes do espectro estão disponíveis (detecção espectral), 2) selecione o melhor canal disponível (decisão espectral), 3) coordene o acesso a este canal com outros usuários (compartilhamento espectral) e 4) desocupe o canal quando perceberem que este se tornou sobrecarregado (mobilidade espectral) [22]. Assim esta tecnologia possibilita a agilidade espectral em cenários de alto tráfego ou de interferência eletromagnética, aumentando o desempenho da rede rádio.

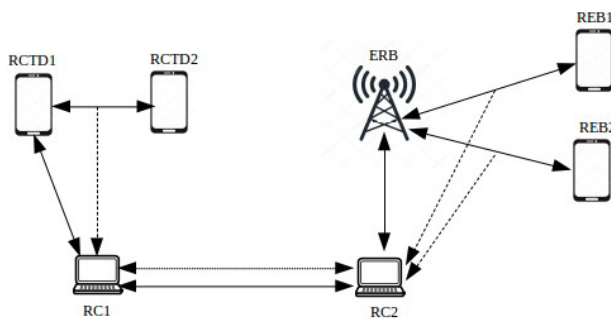
RC pode prover agilidade espectral em cenários de alto tráfego ou interferência eletromagnética devido a sua capacidade de escolher, entre outros parâmetros de transmissão, a melhor faixa de frequência para transmitir. Em utilização junto com a tecnologia de FD, RC pode aumentar significativamente a capacidade de transmissão. Assim, RC é um candidato a enfrentar

o Desafio 3.

Um aspecto que deve ser considerado ao enfrentar estes desafios é necessidade de existência de uma arquitetura peculiar às redes de comunicações militares de modo a solucionar os desafios citados acima e prover os fundamentos para o correto e claro fluxo de informações e a interoperabilidade entre os diversos sistemas.

Conseqüentemente, a definição de uma arquitetura de redes cognitivas para redes de comunicações militares é um passo importante na utilização tanto da tecnologia de RC quanto de FD para estas redes. Devido a complexidade desta arquitetura, uma estratégia mais segura é propor arquiteturas parciais para as camadas física, de enlace de dados, de redes, de transporte e superiores. Outra abordagem é dividir a arquitetura por requisito ou conjunto de requisitos, por exemplo: desempenho, segurança etc.

Fizemos uma proposta de arquitetura enfatizando o requisito segurança e utilizando a divisão por camadas. Esta proposta é mostrada na **figura 9** - Arquitetura de Rede Cognitiva pra Redes Táticas sem Fios.



**Fig. 9** – Arquitetura de Rede Cognitiva pra Redes Táticas sem Fios.

Nesta proposta, temos duas infraestruturas de redes prontas para uso: uma rede rádio de combate com transmissão digital, à esquerda, formada pelos nós RCTD1 e RCTD2, e uma rede de arquitetura estação-base, à direita, formada pelos nós REB1, REB2 e ERB. Além destas, temos dois nós cognitivos: RC1 e RC2, na parte inferior da figura, formando uma rede cognitiva. Estas redes formam uma única estrutura lógica integrada por múltiplas tecnologias de enlace.



As possíveis transmissões de mensagens entre os nós, na camada de enlace, das redes estão representadas por linha contínuas. Os sensoriamentos do espectro executados pelos nós cognitivos estão indicados pelas linhas tracejadas e as trocas de informações gerenciais entre os nós cognitivos estão representadas pelas linhas pontilhadas.

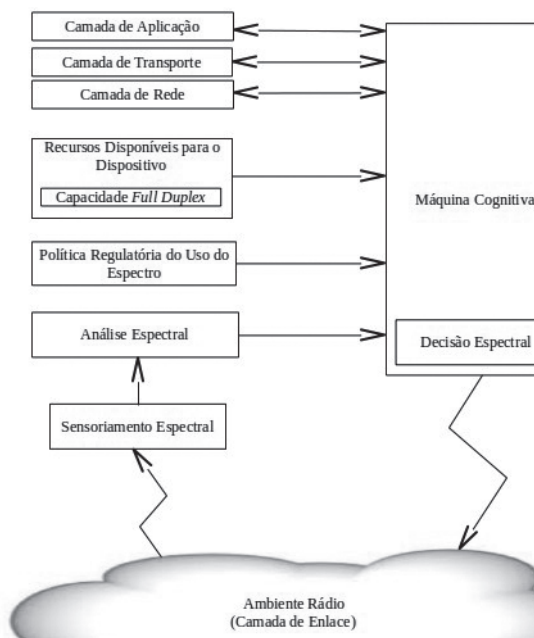
Uma propriedade importante desta proposta de arquitetura é que ela possibilita o funcionamento das redes prontas para uso sem a necessidade de mudanças nestas, possibilitando assim o aproveitamento das diversas infraestruturas legadas existentes.

A primeira função dos nós cognitivos é realizar, em tempo de operação, sem perda de capacidade, alcance e/ou mobilidade, a troca de tecnologias utilizadas. Como exemplo desta função temos o caso no qual uma aplicação do RCTD1 deseja se comunicar com sua aplicação correspondente no REB2. Nesta hipótese, a rede cognitiva fará o roteamento das mensagens.

Outra função dos nós cognitivos é aumentar a segurança na camada física das redes de comunicações táticas sem fio. Assim, caso o nó RC1 possua a capacidade FD, este produzirá, ao mesmo tempo que recebe dados, guerra eletrônica, via ataque de interferência, como uma medida contra uma possível interceptação de dados pelo inimigo.

Os nós cognitivos também tem a função de aumentar o desempenho da redes rádios, especialmente em cenários de alto tráfego ou de interferência eletromagnética. Para executar esta, os nós cognitivos, graças a sua capacidade de sensoriamento do espectro, determinarão quais partes do espectro estão disponíveis e selecionarão o melhor canal para transmitir, assim como outros parâmetros de transmissão para um desempenho ótimo.

Para realizar as funções citadas acima, os nós cognitivos precisarão de uma arquitetura que permita a comunicação das diversas camadas da rede com uma Máquina Cognitiva. Um exemplo desta arquitetura é mostrado na **figura 10**.



**Fig. 10** – Arquitetura para Nós Cognitivos em Redes Táticas Sem Fios.

A Máquina Cognitiva é o elemento principal desta arquitetura. Esta é responsável pela Decisão Espectral, na qual escolhe os parâmetros mais adequados para a transmissão, dados pelos quatro tipos de informação [17]: 1) do ambiente rádio; 2) dos requisitos de QoS da aplicação; 3) dos recursos disponíveis para o dispositivo; e 4) da política regulatória do uso do espectro.

Nossa proposta de arquitetura encontra-se em fase de estudo de viabilidade. Estamos aplicando-a em nossos estudos sobre mecanismos que aumentem a segurança na camada física das redes de comunicações táticas sem fio e, paralelamente, atendam aos requisitos e características destas redes.

## 7. Conclusões e proposta de trabalhos futuros

Conforme exposto [1], nenhuma das tecnologias de redes de comunicações prontas para uso reúne condições de suportar todos os Princípios de Emprego das Comunicações do EB bem como os Requisitos Operacionais Básicos do Sistema de Comando e Controle desta instituição. Por

exemplo, um sistema que possibilita altas mobilidades e alcances não será dotado de altas taxas de transmissão.

Outro aspecto abordado [1] é que três requisitos são estritamente relacionados e constituem um forte compromisso no sistema de comunicações militar: alcance, capacidade e mobilidade. O forte relacionamento existente se dá, em geral, pelo fato que ao variar um dos fatores os outros dois também variam. Na verdade, ao se maximizar dois fatores o terceiro acaba sendo minimizado. Este aspecto ilustra uma lacuna das redes não cognitivas: a necessidade de automaticamente utilizar duas ou mais tecnologias para que possa maximizar, numa mesma situação, o alcance a capacidade e a mobilidade.

As tecnologias de rádios cognitivos e a de transmissão *full-duplex* em banda são propostas para enfrentar os desafios citados neste trabalho visando maximizar, ao mesmo tempo, o alcance, a capacidade e a mobilidade das redes de comunicações militares.

Um aspecto que deve ser considerado ao enfrentar estes desafios é necessidade de existência de uma arquitetura

peculiar às redes de comunicações militares de modo a solucionar os desafios citados acima e prover os fundamentos para o correto e claro fluxo de informações e a interoperabilidade entre os diversos sistemas.

Consequentemente, a definição de uma arquitetura de redes cognitivas para redes de comunicações militares é um passo importante na utilização tanto da tecnologia de RC quanto de FD para estas redes. Devido a complexidade desta arquitetura, uma estratégia mais segura é propor arquiteturas parciais para as camadas física, de enlace de dados, de redes, de transporte e superiores. Outra abordagem é dividir a arquitetura por requisito ou conjunto de requisitos, por exemplo: desempenho, segurança etc.

Outro aspecto a ser abordado é que o enlace, estudado neste trabalho, é apenas um dos componentes dos sistemas de comunicações. Aspectos relacionados às outras camadas de um sistema de comunicações devem ser investigados para que as redes de comunicações militares possam efetivamente atender aos seus objetivos, conforme preconizado pelo Exército.

## Referências bibliográficas

- [1] Salles, R. M.; Moura, D. F. C.; Carvalho, J. M. A.; Silva, M. R.; Novas perspectivas tecnológicas para o emprego das comunicações no exército brasileiro; Revista Militar de Ciência e Tecnologia 2008, XXV, 68.
- [2] Brasil; Constituição da República Federativa do Brasil, Senado Federal, Brasília, 1988.
- [3] Brasil; Estado Maior do Exército; EB20-MC-10.202 - Manual de Campanha - FORÇA TERRESTRE COMPONENTE, Estado Maior do Exército, Brasília, 2014.
- [4] Brasil; Estado Maior do Exército; EB20-MF-10.103 - Manual de Fundamentos - OPERAÇÕES, Estado Maior do Exército, Brasília, 2015.
- [5] Brasil; Estado Maior do Exército; EB20-MF-10.1205 - Manual de Campanha - COMANDO E CONTROLE, Estado Maior do Exército, Brasília, 2015.
- [6] Elmasry, G. F.; Tactical wireless communications and networks: design concepts and challenges, John Wiley & Sons, West Sussex, 2012.
- [7] Brasil; Estado Maior do Exército; C-11.61 - Manual de Campanha – COMUNICAÇÕES NA DIVISÃO DE EXÉRCITO, Estado Maior do Exército, Brasília, 1995.
- [8] Brasil; Exército Brasileiro; Departamento de Ciência e Tecnologia; Centro Integrado de Telemática do Exército; <http://www.citex.eb.mil.br/>, acessada em: dezembro de 2018.
- [9] Brasil; Estado Maior do Exército; C-11.1 - Manual de Campanha – EMPREGO DAS COMUNICAÇÕES, Estado Maior do Exército, Brasília, 1997.
- [10] Brasil; Estado Maior do Exército; PORTARIA Nº 032 - EME, DE 19 DE MAIO DE 2003; Estado Maior do Exército, Brasília, 2003.
- [11] Michael, R. J.; Frater. M. R.; Tactical communications for the digitized battlefield. Artech House, Norwood, 2002.
- [12] Wongthavarawat, K.; Ganz, A.; IEEE 802.16 based last mile broadband wireless military networks with quality of service support; Military Communications Conference 2003, 2, 779.
- [13] Juarez, J. C. ; Dwivedi, A.; Hammons, A. R.; Jones, S. D.; Weerackody, V.; Nichols, R. A.; Free-space optical communications for

- next-generation military networks; IEEE Communications Magazine 2006, 44, 11.
- [14] Tanenbaum, A. S.; Redes de Computadores; Editora Campus, São Paulo, 2003.
- [15] Molisch, A. F.; Wireless Communications; John Wiley & Sons, Nova Jersey, 2012.
- [16] Mitola, J.; Cognitive Radio: Model-Based Competence for Software Radios; Tese de Doutorado, Instituto Real de Tecnologia, Estocolmo, 1999.
- [17] Doyle, L.; Essentials of cognitive radio; Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- [18] Haykin, S.; Cognitive radio: brain-empowered wireless communications; IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2005, 23, 201.
- [19] Hu J.; Wellman, M.; Multiagent reinforcement learning: Theoretical framework and an algorithm; 15th International Conference on Machine Learning 1998, 15, 242.
- [20] Linden, R; Algoritmos Genéticos; Brasport, Rio de Janeiro, 2006.
- [21] Reed, J; Bostian, W; Understanding the issues in software defined cognitive radio; IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks 2005, 5, 611.
- [22] Akyildiz, I. F.; Lee, W.; Vuran, M. C.; Mohanty, S.; Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey; Computer Networks Journal 2006, 50, 2127.
- [23] Sabharwal, A.; Schniter, P.; Guo, D.; Bliss, D. W.; Rangarajan, S.; Wichman, R.; In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2014, 32, 1637.
- [24] Riihonen, T.; Korpi, D.; Rantula, O.; Valkama, M.; On the prospects of full-duplex military radios; Military Communications and Information Systems International Conference 2017, 16, 1.
- [25] Wang, B.; Wu, Y.; Liu, K. R.; Clancy, T. C.; An anti-jamming stochastic game for cognitive radio networks; IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2011, 29, 877.
- [26] Camilo, M.; Moura, D.; Galdino, J.; Salles, R. M.; Anti-jamming defense mechanism in cognitive radios networks; Military Communications Conference 2012, 11, 1.