

ARTIGO CIENTÍFICO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO



**CIÊNCIA E
TECNOLOGIA**

COMUNICAÇÕES ROBÓTICAS NAS BRIGADAS DE INFANTARIA E CAVALARIA MECANIZADAS EM OPERAÇÕES DE COORDENAÇÃO E COOPERAÇÃO COM AGÊNCIAS

IRAN VICTOR PINHEIRO MOURA¹, DANIEL MOURA FÉLIX CARDOSO²
Mestre em Ciências da Computação¹, Pós-graduado em Guerra Cibernética²

RESUMO: ESTAÇÕES RÁDIO BASE (ERBs) IMÓVEIS UTILIZADAS PARA REDES SEM FIO EM OPERAÇÕES MILITARES (GERALMENTE MONTADAS EM TORRES METÁLICAS, PONTOS GEOGRÁFICOS ALTOS OU NO TOPO DE PRÉDIOS) LIMITAM A COBERTURA FORNECIDA À TROPA A LOCAIS FIXOS E SÃO INSENSÍVEIS A MUDANÇAS COMO OS MILITARES SÃO DISTRIBUÍDOS ESPACIALMENTE. NESTE TRABALHO PROPOMOS UM MÉTODO DE GESTÃO DE MOBILIDADE PARA ESTAÇÕES RÁDIO BASE ROBÓTICAS (ERBRs), AS QUAIS CONSTITUEM O CONJUNTO RÁDIO E ANTENA MONTADO EM VEÍCULOS AÉREOS AUTÔNOMOS COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EMBARCADA, OS QUAIS AJUSTARÃO DINAMICAMENTE SUAS POSIÇÕES DE ACORDO COM A MOVIMENTAÇÃO DOS USUÁRIOS (DEMANDAS ESPECÍFICAS DA TROPA), FORNECENDO ASSIM UMA MELHOR COBERTURA À REDE. NO CENÁRIO CONSIDERADO FAZEMOS UMA ANÁLISE ENTRE OS ASPECTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DA ESTRUTURA ATUAL DE COMUNICAÇÕES DAS BRIGADAS DE INFANTARIA E CAVALARIA MECANIZADAS E DA PROPOSTA DE COMUNICAÇÕES ROBÓTICAS NESTAS GRANDES UNIDADES.

PALAVRAS-CHAVE: COMUNICAÇÕES MÓVEIS, ESTAÇÕES RÁDIO BASE ROBÓTICAS, OTIMIZAÇÃO DE COBERTURA.

INTRODUÇÃO

Maximizar o número de usuários conectados minimizando o custo do serviço é um desafio importante e constante, que deve ser enfrentado independentemente das características da rede. Os usuários também esperam uma cobertura confiável e ampla, ambos requisitos de qualidade que as redes modernas devem cumprir. Atender a essas expectativas é difícil, seja em ambientes internos ou externos, principalmente devido à incerteza resultante da locomoção do usuário e da natureza dinâmica do uso da rede sem fio.

Existem situações em que uma área pode estar cheia de usuários, o que faz aumentar a demanda por serviços de rede, e depois de um curto período poderia estar quase vazia. Rádios e antenas dispostos em locais fixos, embora fáceis de implementar e implantar, não têm a flexibilidade necessária para acomodar os ambientes dinâmicos que as redes sem fio devem atender.

Os avanços nas redes de comunicações, redes veiculares e na robótica sugerem que as capacidades altamente desejáveis dessas facilidades se tornam úteis para trazer melhorias ao serviço de redes sem fio. Por exem-

plo, a relocação autônoma de estações base em resposta ao comportamento de locomoção dos usuários é uma possível solução num futuro previsível, bem como a capacidade de se adaptar de forma flexível à forma geométrica da distribuição dos usuários à medida em que ela muda.

Uma tecnologia candidata clara para o fornecimento de tais capacidades é a ideia de Estações Rádio Base Aéreas (ERBAs) [Hayat et al. 2016], que serão capazes de responder aos padrões de uso geralmente complexos observados na maioria das situações enfrentadas pelas redes de comunicações sem fio [Rahmati et al. 2019]. No entanto, as ERBAs e soluções semelhantes também trarão novos desafios na estimativa de custos de desenvolvimento e implantação, dificultando a comparação de suas eventuais vantagens em relação às tecnologias atuais. Além disso, é razoável esperar que, em algumas situações, o padrão de deslocamento do usuário favoreça o uso de ERBAs, enquanto em outros, a atual tecnologia de antenas fixas pode ser mais rentável. Assim, avaliar a rentabilidade, a viabilidade técnica e outros aspectos dos ERBAs, e ser capaz de comparar consistente e coerentemente esses resultados com a tecnologia atual é um requisito funda-



mental para garantir a introdução bem-sucedida das ERBAs e tecnologias similares.

Atualmente, mesmo considerando regiões onde as ERBs não permeiam toda a região populada, o que provoca algumas zonas sem sinal para telecomunicações, a tecnologia de telecomunicações permeia razoavelmente os centros urbanos, onde existem plenas condições de se fazer planejamentos e implementar infraestrutura básica que funcione bem a longo prazo. Porém em cenários como desastres naturais, regiões pouco populadas ou carentes, e cenários diversos de guerra é difícil ou incerto trabalhar com a hipótese planejamento ou ter condições de construir infraestrutura necessária para operar sistemas de telecomunicações. Nestes cenários específicos, ter a mão um sistema flexível, rápido e independente de estrutura local torna-se uma alternativa para operar com sucesso as telecomunicações.

Em particular em cenários de guerra, a imprevisibilidade, a curta duração de certos tipos de operações, localidades sem infraestrutura mínima, a geografia muitas vezes desfavorável, a urgência das operações e a crescente demanda de facilidades atreladas a redes de dados levantam a demanda de um serviço de telecomunicações flexível, ágil, de fácil desdobramento e reposição. Neste caso é razoável considerar as telecomunicações satelitais, porém elas não possuem as mesmas características de flexibilidade de operação e fácil reposição da proposta de ERBAs, sem considerar o elevado custo de implementação.

Este artigo aborda uma proposta de gestão de mobilidade para ERBAs propondo um modelo de simulação e otimização capaz de suportar a avaliação de tecnologias atuais e futuras em diferentes locais. O aspecto de simulação do modelo garante tanto a viabilidade técnica quanto a flexibilidade necessárias para realizar experimentos com tecnologias de ponta que ainda não estão totalmente desenvolvidas. Como para esta proposta, a ERBA terá autonomia para decisão a partir do método de gestão de mobilidade, o termo ERBA passa a ser ERBR (Estação Rádio Base Robótica).

Após essa breve introdução, a seção 1 apresenta uma seleção de pesquisas atuais sobre estações base móveis, a seção 2 fornece ao leitor os conceitos fundamentais usados em nossa investigação, e a seção 3 apresenta a metodologia proposta para a avaliação de ERBRs juntamente com os aspectos específicos de comunicações nas Brigadas de Cavalaria e Infantaria Mecanizadas, e nas Operações de Coordenação e Cooperação com Agências. Na seção 4 será discutido os resultados experimentais, e na seção 5 será visto as conclusões associadas, bem como algumas perspectivas para trabalhos futuros.

1 TRABALHOS RELACIONADOS

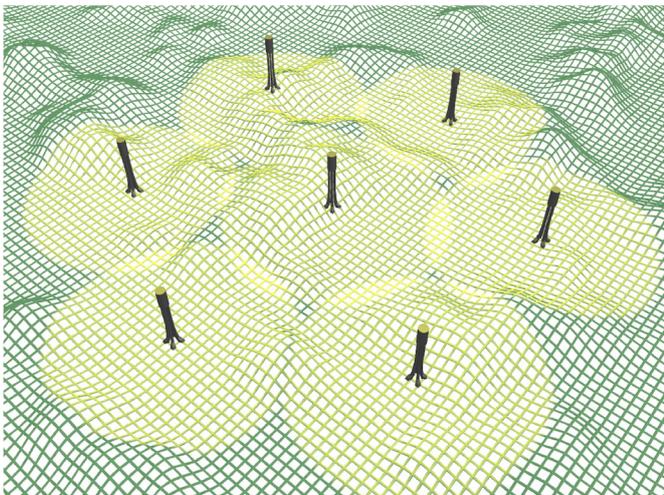
Os sistemas de comunicações móveis (telefonia celular, por exemplo) são os principais impulsionadores do mercado de comunicação sem fio. A arquitetura básica de um sistema móvel, independentemente de sua tecnologia adotada, é formada por três componentes: dispositivos móveis (por exemplo, celulares), Centro de Comutação e Controle e ERBs [Rappaport 2001]. Um exemplo real de tais sistemas é mostrado na Figura 1, que ilustra a divisão da área de cobertura em partes menores, conhecidas como células. Cada célula é atendida por uma ERB e inclui transceptores com potência de transmissão limitada, antenas posicionadas e técnicas para reutilizar bandas de frequência, todas configuradas para fornecer comunicação com dispositivos móveis (por exemplo, telefones celulares) dentro de sua área de cobertura.

A característica fixa das ERBs (geralmente posicionada no topo das torres metálicas) é muitas vezes uma desvantagem que afeta a cobertura oferecida ao usuário, já que há propensão a obstáculos físicos bloqueando temporariamente a visada direta entre as antenas e os usuários (que estão se movendo), causando zonas de silêncio (zonas sem cobertura de sinal). Esses fatores são agravados pela constante dependência do usuário a uma conexão muitas vezes permanente, um requisito em grande parte dos aplicativos de dis-



positivos móveis conectados à Internet. Além disso, os locais onde ficam as ERBs são escolhidos para fornecer a maior cobertura a uma localidade, mas essa opção não considera o número de usuários que a ERB atende [Padueli 2012]. Em resumo, a configuração fixa empregada à ERB apresenta muitas limitações que afetam negativamente a cobertura, além de ser ineficiente em termos de uso de energia (insensibilidade do sistema à existência ou não de usuários sendo cobertos a cada instante).

FIGURA 1 Estrutura básica do sistema de telefonia celular



Fonte: o autor

Uma maneira de abordar os problemas de confiabilidade acima citados de ERBs fixas é a realocá-las. [Younis and Akkaya 2008] estudou a realocação de ERBs ao longo do tempo e discutiu as questões de quando realocar, onde realocar e como gerenciar as realocações para aumentar a confiabilidade da rede. Tais aspectos se concentraram em três atributos principais: a longevidade da rede (por exemplo, otimizando o equilíbrio do tráfego), a pontualidade na entrega de dados (por exemplo, evitando ou minando o congestionamento do tráfego de dados) e a segurança física. No entanto, as melhorias de desempenho em termos de rendimento, energia e atraso pelo reposicionamento da ERB apresentam seus próprios desafios (logística, viabilidade comercial etc.) e não abordam totalmente as situações que envolvem padrões complexos de mobilidade do usuário, algo comum em muitos cenários.

Trabalhos relacionados incluem o Gowda, que propôs o uso de pontos de acesso móveis em redes internas, iMob [Gowda et al. 2016]. Nesse caso, a meta-heurística Optimal Stopping Theory (OST) foi usada para definir a realocação dos pontos de acesso. Para esse mesmo tipo de problema, [Karvounas et al. 2010] utilizou Simulated Annealing (SA) e Ant Colony Optimization (ACO) para otimizar a posição dos pontos de acesso em relação aos usuários.

Em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), a questão dos problemas de otimização relacionados à cobertura é abordada por [Liu 2015], que trata do problema de perda de conectividade de nós usando um método de otimização global para localizar uma árvore minimamente conectada, enquanto adota um algoritmo de recuperação para substituir os nós ausentes. A técnica também emprega um esquema de agendamento hierárquico que se baseia no pré-tratamento da falha do nó. [Gou et al. 2017] modelou um problema de otimização com restrições, equilibrando a cobertura de rede e o consumo de energia. O objetivo era obter cobertura máxima dos nós, com informações sobre a taxa de cobertura e consumo de energia dos nós ativos, onde a importância de nós individuais é função da distância de seus pares.

Para redes veiculares, uma abordagem muito estudada é explorar os dispositivos computacionais e de comunicação embutidos em veículos para estabelecer uma rede veículo-veículo (V2V) em vez de depender da infraestrutura local [Wu et al. 2004]. Esse arranjo faz com que veículos trafeguem constantemente informações sobre si mesmos e requeira suporte criptográfico sofisticado para superar problemas de privacidade [Freudiger et al. 2007]. Os nós de rede não devem estar a muitos saltos de um nó com acesso direto à Internet [Gerla and Kleinrock 2011], o que pode ser um problema para confiar na tecnologia de ERBs estáticas em zonas escassamente povoadas. No caso de [Ding et al. 2007], um modelo e seu correspondente estudo de simulação de

uma rede multi-hop com nós móveis auxiliados por nós estáticos foram apresentados, mostrando melhora no caso de baixa densidade de veículos. [Zhou et al. 2015] defendem o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) como nós de redes auxiliares para redes terrestres e V2V e fornecem ao leitor uma revisão sobre o estado da arte nessa área.

Algoritmos heurísticos de otimização têm sido usados no projeto e gerenciamento de redes sem fio. Para Redes de Sensores Distribuídos (RSD), Lin e Chiu apresentaram uma solução para o problema de posicionamento do sensor usando o método SA para obter o posicionamento ideal de sensores, minimizando o erro máximo de distância, usando uma limitação de custo mínimo [Lin and Chiu 2005]. [Kang et al. 2017] usou o método Genetic Algorithm (GA) para otimização multiobjetivo da posição e caminhos dos coletores de dados em RSSF, com foco na manutenção da conectividade. Algoritmos heurísticos de otimização, tais como Artificial Bee Colony (ABC), também são usados para projetar Phased Array Antenna (PAA) [Zhang and Zhang 2017].

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRINCÍPIOS DE EMPREGO DAS COMUNICAÇÕES

Tomando por base o Manual de Campanha EB70-MC-10.241, AS COMUNICAÇÕES NA FORÇA TERRESTRE [Exército Brasileiro], os princípios que garantem a qualidade das comunicações no teatro de operações, ou seja, a eficácia e a eficiência dos meios são:

- a. Tempo integral: interoperabilidade dos meios de comunicações;
- b. Rapidez: velocidade de desdobramento dos meios de comunicações;
- c. Amplitude de desdobramento: alcance útil de toda a cobertura da rede;
- d. Integração: capacidade de ligação entre sistemas de comunicações distintos e

entre escalões diferentes;

e. Flexibilidade: capacidade de readaptação do sistema frente às iminentes mudanças que ocorrem nas operações;

f. Apoio em profundidade: disposição de material e pessoal para apoiar os escalões subordinados;

g. Continuidade: capacidade de reestabelecimento do sistema, em caso de falhas;

h. Confiabilidade: diversidade de meios para o emprego das comunicações;

i. Emprego centralizado: concentração dos meios de comunicações em centros e eixos de comunicações para um melhor aproveitamento dos mesmos;

j. Apoio cerrado: eficiência das comunicações através de menores distâncias entre os elementos apoiados;

k. Segurança: segurança dos meios de comunicações e dos dados trafegados; e

l. Prioridade: instalação do sistema priorizando atender os elementos de maior importância na rede, considerando tempo, material e pessoal.

2.2 CARACTERÍSTICAS DAS COMUNICAÇÕES NAS BRIGADAS DE INFANTARIA E CAVALARIA MECANIZADAS

As Operações no Amplo Espectro, bem definidas no manual de campanha EB70-MC-10.223, OPERAÇÕES [Exército Brasileiro 2017], reúnem os três tipos de operações básicas em situação de guerra (Ofensiva e Defensiva) e de não-guerra (Cooperação e Coordenação com Agências).

Essas operações são desenvolvidas simultaneamente, visando atender às diversas demandas do combate na Área de Operações. Para tal, a preparação e organização para o combate modula a tropa de forma a atender da melhor forma possível essa demanda.

Portanto, logisticamente falando, a



modularidade das Unidades Operacionais da Força Terrestre deve permitir o cumprimento de qualquer tarefa para a qual estiverem em condições de executar.

Tomando novamente o manual de campanha EB70-MC-10.241, AS COMUNICAÇÕES NA FORÇA TERRESTRE [Exército Brasileiro 2018], a Brigada é uma Grande Unidade, considerada como o módulo básico de emprego da Força Terrestre (F Ter), com organização interarmas e constituída por unidades de combate, de apoio ao combate e de apoio logístico.

As Brigadas possuem uma arma base, o que lhe implementa uma doutrina básica de combate (normalmente Infantaria ou Cavalaria), e uma natureza, o que lhe reúne meios distintos umas das outras para o cumprimento das diversas missões.

Pode-se citar como natureza das Brigadas de Infantaria as seguintes: Blindada, Mecanizada, Motorizada, de Selva, de Fronteira, Leve Aeromóvel, Leve GLO, Leve de Montanha e Paraquedista. As Brigadas de Cavalaria se dividem apenas em duas: as Blindadas e as Mecanizadas.

Dentro do estudo das possibilidades e limitações das diversas Brigadas existentes no Exército Brasileiro, foram elencadas aquelas que possuem missões de maior necessidade de cobertura de terreno: a Brigada de Infantaria Mecanizada (Bda Inf Mec) e a Brigada de Cavalaria Mecanizada (Bda C Mec).

Segundo o manual OPERAÇÕES [Exército Brasileiro 2017], nas operações ofensivas, os resultados mais decisivos são alcançados por forças potentes e altamente móveis.

Os tipos de operações ofensivas que mais demandam deslocamento físico no terreno são: a Marcha para o Combate, onde a fração cerra seus meios à frente em busca do inimigo; o Ataque, destacando-se o envolvimento do inimigo em sua retaguarda profunda; o Aproveitamento do Êxito, momento em que a fração, após lograr êxito, prossegue nas ações

de ataque antes do inimigo se reorganizar; e a Perseguição, que é a operação destinada a cercar e destruir uma força inimiga que está em processo de desengajamento.

As operações defensivas de maior alcance no terreno, também muito bem desempenhadas por unidades mecanizadas são os Movimentos Retrógrados, que visam basicamente retardar o avanço da tropa inimiga, permitindo assim fazer com que as tropas que providenciam a Defesa de Área produzam melhores posições defensivas e as que planejam o contra-ataque possam se preparar melhor para essa ação.

Os Graus de Segurança que a Bda C Mec pode prover são: a Cobertura, onde provê uma segurança a determinada região ou força com elementos distanciados ou destacados; a Proteção pela atuação de elementos à frente, retaguarda ou flancos imediatos; e a Vigilância estabelecendo em uma larga frente uma segurança pelo estabelecimento de uma série de postos de observação, buscando também detectar a presença do inimigo logo que entre no alcance dos seus instrumentos ópticos ou sensores eletrônicos.

O Reconhecimento, segundo o manual de OPERAÇÕES [Exército Brasileiro 2017], é a ação conduzida com o propósito de obter informes sobre o inimigo e a área de operações. Existem quatro tipos de reconhecimento, sendo eles: de eixo, de zona, de área e de ponto.

A maioria dos elementos da F Ter tem plenas possibilidades de realizar ações de reconhecimento, porém as unidades de cavalaria mecanizada são especificamente organizadas, equipadas e instruídas para cumprirem tais missões.

As ações de Reconhecimento de eixo, de zona e de área, bem como as ações de Segurança, são por natureza operações que abrangem uma grande área e por conta disso, empregam um grande número de frações no terreno. Para isso, os contatos realizados entre essas frações são fundamentais para o sucesso da missão.



Nas operações ofensivas e defensivas elencadas anteriormente neste trabalho, e que podem ser desenvolvidas por ambas as Brigadas, foram identificadas aquelas que demandam uma cobertura de terreno maior.

2.3 CARACTERÍSTICAS DAS COMUNICAÇÕES NAS OPERAÇÕES DE COORDENAÇÃO E COOPERAÇÃO COM AGÊNCIAS

Segundo o manual de OPERAÇÕES [Exército Brasileiro 2017], as operações básicas em uma situação de não-guerra são classificadas como Operações de Cooperação e Coordenação com Agências (Op Coop Coor Ag).

Essas operações (garantia dos poderes constitucionais, garantia da lei e da ordem, atribuições subsidiárias, prevenção e combate ao terrorismo, sob a égide de organismos internacionais, em apoio à política externa em tempo de paz ou crise, outras operações em situação de não guerra) são caracterizadas pela interoperabilidade de sistemas e Forças Táticas e destinam-se a conciliar interesses e coordenar esforços para a consecução de objetivos ou propósitos convergentes que atendam ao bem comum.

Independente das tropas estarem mais concentradas, o terreno normalmente em que se atua nas Op Coop Coor Ag é urbano e com isso, os acidentes artificiais são maior quantidade e de maior densidade (prédios, viadutos, pontes ou qualquer outro tipo de construção arquitetônica), afetando assim os contatos em VHF, UHF e SHF. Portanto, cresce de importância a utilização de repetidoras em posições de dominância para que essas transmissões (bastante comuns pelo tamanho reduzido das antenas, clareza de sinal e outras características relevantes) possam ter cobertura em toda a área de operações.

Entende-se, dessa forma, que um bom sistema de Comunicações Rádio para atuação em ambiente urbano ofereça um serviço contínuo e confiável além de flexível e que ofereça integração com os equipamentos rádio das diversas agências que as FFAA trabalham em

cooperação. A continuidade e confiabilidade no sistema podem ser garantidas pela implementação de Estações Repetidoras que providenciem um serviço sem interrupções.

2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DESEJÁVEIS PARA UM SISTEMA DE ERBRs

Tomando por base os princípios de emprego dos vetores aéreos orgânicos do Exército, os quais constam no manual EB-20-MC-10.214 VETORES AÉREOS DA FORÇA TERRESTRE [Exército Brasileiro 2014b]:

- a. Atuar com máxima iniciativa;
- b. Explorar a complementaridade;
- c. Explorar a mobilidade e o alcance;
- d. Centralizar a coordenação;
- e. Explorar as capacidades incorporadas;
- f. Explorar a flexibilidade; e
- g. Sincronizar as ações.

Nota-se que, buscando atender a todos os tipos possíveis de redes de comunicações (diferentes frequências, voz, dados, LTE) um SARP (Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas) com aeronaves categoria 2, capacidade média de embarcar o conjunto rádio, antena e alimentação do sistema (até aproximadamente 10 quilos), autonomia de voo de pelo menos 8 horas, velocidade não menor que a velocidade de um homem caminhando (6 km/h), flexibilidade de operar de forma autônoma, com algoritmo embarcado e também remotamente pilotado teria condições razoáveis de atender as demandas operacionais do sistema proposto de ERBRs.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem por finalidade comparar a eficiência do serviço de comunicações prestado por ERBs fixas, já utilizadas em operações pelo Exército Brasileiro e por ERBRs, conforme descritas.



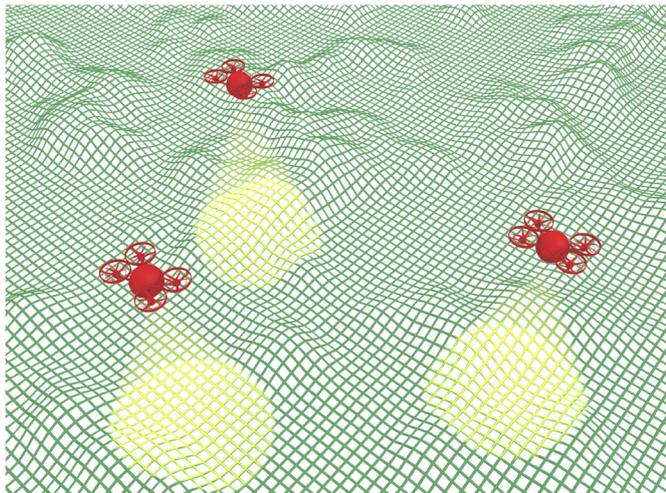
Nesta seção iremos descrever a modelagem matemática da solução computacional, propor o algoritmo e também enunciar quais parâmetros são úteis para avaliar qualidade de comunicações nas operações militares.

3.1 ALGORITMO PROPOSTO PARA GERIR O SISTEMA DE ERBRs

Buscando viabilizar a avaliação da realocação dinâmica de ERBRs para melhorar a cobertura oferecida a uma rede sem fio, propõe-se modelar ERBRs embarcadas em robôs aéreos (quadricópteros, balões ou qualquer dispositivo programável capaz de voar, como pode ser visto na Figura 2).

Uma das principais vantagens das ERBRs é a capacidade de reposicionamento em determinada área para aumentar o número de usuários cobertos. No esquema proposto, a posição relativa de ERBRs em relação aos usuários é determinada dinamicamente por SA.

FIGURA 2 Estrutura de rede sem fio com a proposta de ERBRs. Exemplos de antenas que fazem uso da geometria fractal da Curva de Koch



Fonte: o autor

Agora será apresentada a formulação ao problema da relocação de ERBR. Suponha que no instante k as posições de m usuários estejam disponíveis no vetor $U_k = [U_k(1), \dots, U_k(m)]^T$. Vamos supor também que existem

exatamente n ERBRs para esta tarefa com posições no vetor $R_k = [R_k(1), \dots, R_k(n)]^T$, para cada instante k . A tarefa é encontrar valores ótimos para R_k , denominados R_k^* , para todos os k .

Seja h uma função que retorna a distância entre o usuário u e a ERB mais próxima $h: U_k \times R_k \rightarrow \mathbb{R}$, conforme definido na equação 1.

$$h(u, R_k) = \min_{1 < i < n} \{ \|U_k(u) - R_k(i)\|_2 \} \quad (1)$$

Considerando que uma ERBR é capaz de fornecer sinal em um círculo com um raio fixo γ , e tomando x como uma distância qualquer entre um usuário e a ERBR mais próxima, seja $s: \mathbb{R} \rightarrow \{0,1\}$ uma função auxiliar utilizada para verificar a cobertura dos usuários, conforme definido na equação 2.

$$s(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x < \gamma \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

Nota-se que a composição de h com s retorna se um usuário arbitrário u é atendido ou não pela rede de ERBRs. Assim, o número total de usuários atendidos pelo conjunto de ERBRs R_k no instante k é avaliado por $S: U_k \times R_k \rightarrow N$ (equação 3).

$$S(U_k, R_k) = \sum_{i=1}^m s \circ h(U_k(i), R_k) \quad (3)$$

Assim, dado um conjunto de ERBRs e um conjunto de usuários para fornecer serviço num instante k , o objetivo é definido conforme descrito na equação 4.

$$F = \max_{R_k} S(U_k, R_k) \quad (4)$$

Uma preocupação a respeito da Equação 4 é que não há penalidade para múltiplas ERBRs fornecerem sinal para um mesmo usuário. Para evitar isso, define-se a soma de todos os links entre ERBRs e usuários como $G: U_k \times R_k \rightarrow N$, conforme descrito na equação 5.



$$G(U_k, R_k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s \circ \|U_k(i) - R_k(j)\|_2 \quad (5)$$

Agora define-se $P: U_k \times R_k$ (equação 6) uma função que retorna a penalidade para múltiplos links fornecidos. Considera-se que o link fornecido por apenas uma ERBR é suficiente para atender a cada usuário.

$$P(U_k, R_k) = G(U_k, R_k) - S(U_k, R_k) \quad (6)$$

Seja $C: U_k \times R_k \rightarrow \mathbb{Z}$ uma função utilizada para verificar o número total de usuários atendidos pelo conjunto de ERBRs R_k , porém considerando a penalidade da equação 6, conforme definido na equação 7:

$$\begin{aligned} C(U_k, R_k) &= S(U_k, R_k) - P(U_k, R_k) \\ &= 2S(U_k, R_k) - G(U_k, R_k) \end{aligned} \quad (7)$$

Considerando as penalidades, a equação 3 se transforma na equação 7. Então, dado um conjunto de ERBRs e um conjunto de usuários para fornecer serviço no instante k , a função objetivo é definida conforme visto na Equação 8.

$$F = \max_{R_k} C(U_k, R_k) \quad (8)$$

Neste ponto, um pequeno número de estratégias de solução está disponível. Supondo que a dinâmica de movimentação dos usuários seja desconhecida, que todas as ERBRs possam fornecer o serviço individualmente e que todas as ERBRs e posições dos usuários sejam conhecidas. Com base nessas suposições, as posições ideais das ERBRs iniciais R_0^* são alcançadas resolvendo-se o problema de otimização sem restrições na equação 9.

$$R_0^* = \operatorname{argmax}_{R_0} C(U_0, R_0) \quad (9)$$

Necessita-se também considerar que toda a rede de ERBR é alimentada por um ponto o qual transmite o sinal que é repetido para rede através dos rádios e antenas embarcados nos veículos aéreos. Assim, ao menos uma ERBR deve estar próxima deste ponto, e cada ERBR não pode distar mais que δ uma

da outra, sendo δ o alcance máximo do enlace ponto-a-ponto feito entre duas ERBR.

Seja $D: U_k \times U_k \rightarrow \mathbb{Z}$ uma função utilizada para calcular as distâncias entre uma ERBR r e as demais ERBR. Tem-se que:

$$D(r, R_k) = \|R_k(u) - R_k(i)\|_2, 1 < i < n \quad (10)$$

Admitindo a existência de uma região de interesse, $\Pi_{k=0}$, sobre a qual o número de usuários atendidos deve ser maximizado, então o problema formulado tem n variáveis reais bidimensionais (já que cada posição da ERBR $R_0(i) \in R_0$ tem 2 coordenadas) restrito ao conjunto Π_0 que tem m usuários no instante $k=0$. Assim, torna-se fácil verificar que o problema cresce exponencialmente com robôs, usuários e tamanho da região. Devido a esse crescimento, o uso de um método meta-heurístico, como GA, ABC ou SA, é justificado.

É importante enfatizar que os métodos de busca de mínimos e máximos globais baseados em meta-heurísticas são sensíveis à parametrização e, portanto, uma parametrização adequada para qualquer um dos métodos mencionados seria capaz de aproximar a solução. Como prova de conceito, escolhemos SA [Ingber 1989]. Também é possível usar uma variante mais eficiente, conforme verificado em [Ingber 1993] ou até mesmo outra técnica de busca heurística.

Para esse trabalho, a ideia dessa meta-heurística advinda da metalurgia, a qual baseia-se no resfriamento gradativo de um material a partir de uma alta temperatura inicial que o leva a estados mínimos de energia, se resume em dar total liberdade na região (iniciar com máxima temperatura, decrescendo ao longo das iterações) para o conjunto de ERBRs avaliar como seria a cobertura da rede, a partir de variados reposicionamentos (o qual depende do número de iterações) das ERBRs na região, e guardar qual posicionamento gerou maior cobertura de usuários da rede. A aleatoriedade do reposicionamento do conjunto de ERBRs a cada iteração (perturbação) é feito com um ruído gaussiano, o qual depende também da temperatura. A estratégia (algorit-



mo) usando o SA é:

1. Inicialize aleatoriamente o conjunto $R_0^{j=0}$ dentro de Π_0 e a temperatura do sistema como $T_{j=0} = T_{max}$;

2. Avalie $C(U_0, R_0^j)$;

3. Perturbe cada $R_k(i) \in R_0^j$ com ruído Gaussiano, $N(0, \sigma^2)$, em que σ^2 é baseado em T para obter R_0^{j+1} . Assegure-se de que $R_0^{j+1} \in \Pi_0$ e que $D \leq \delta$;

4. Avalie $C(U_0, R_0^j)$;

5. Mova para este novo conjunto se o custo for igual ou maior que o anterior ou mover de qualquer maneira com uma probabilidade relacionada a T ;

6. Reduza a energia do sistema ($T^{j+1} < T$);

7. Incremente j e repita os passos 3 a 6 ate $T^j < T^{min}$; e

8. Defina R_0^+ como o ultimo valor mínimo de R_0^j . Esta é uma solucao sub-ótima encontrada.

Escolhas adequadas de T_{min} e T_{max} , amplitude de perturbação e queda de temperatura são essenciais para a solução convergir. Essa classe de técnicas não garante viabilidade ou convergência para um mínimo global, mas diferentemente das técnicas baseadas em gradientes, é menos vulnerável a ficar bloqueado em mínimos locais, pois há subconjuntos de Π_0 tais que S é constante. Sabe-se também que S é descontínuo e sua derivada nem sempre é possível de ser calculada. Além disso, pelo menos é possível garantir que:

$$C(U_0, R_0^0) \leq C(U_0, R_0^+) \leq C(U_0, R_0^\infty) \leq C(U_0, R_0^*)$$

Ou seja, a solução após a busca heurística é melhor ou igual ao ponto inicial original.

3.2 MÉTRICAS PARA AVALIAR AS DIFERENÇAS ENTRE O SISTEMA PROPOSTO E O SISTEMA VIGENTE

Avaliando os princípios que garantem a qualidade das comunicações no teatro de operações citado em 1, pretende-se escolher quais destes princípios têm maior impacto na avaliação de qualidade de um sistema de comunicações com ERBs estáticas, fixas e outro

com ERBRs, as quais por natureza são móveis, inteligentes e autônomas. Os princípios escolhidos foram:

- a. Tempo integral;
- b. Rapidez;
- c. Amplitude de desdobramento;
- d. Integração;
- e. Flexibilidade;
- f. Continuidade;
- g. Confiabilidade;
- h. Emprego centralizado;
- i. Segurança; e
- j. Prioridade

Para quantificar a avaliação, será adotado um sistema de pesos com suas devidas justificativas, os quais serão atribuídos a cada princípio avaliado de cada um dos dois sistemas propostos, os quais são:

- a. **muito eficiente:** 3 pontos;
- b. **razoavelmente eficiente:** 2 pontos;
- c. **pouco eficiente:** 1 ponto;

Para evitar arbitrariedade ou algum erro indesejável nas atribuições dos pesos, cada justificativa da atribuição deverá estar devidamente amparada na definição de cada princípio descrito em 2.1.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Da comparação feita entre a tecnologia vigente e a proposta, obteve-se os resultados constantes na tabela 1.

Como a energia é um aspecto de muita relevância no contexto do sistema da ERBRs, tomamos o **Tempo Integral** como o maior ponto fraco, em virtude da grande quantidade de energia que o sistema precisa para operar. **Rapidez** e **Amplitude de Desdobramento** são fortes no sistema em virtude da mobilidade aeronáutica.

A **Integração** e a **Confiabilidade** não diferem em muito do sistema de ERBs vigentes



TABELA 1 Resultados obtidos pela comparação entre as tecnologias vigente e proposta

PARÂMETRO	ERB	ERBR
Tempo integral	Muito eficiente	Pouco eficiente
Rapidez	Pouco eficiente	Muito eficiente
Amplitude de desdobramento	Razoavelmente eficiente	Muito eficiente
Integração	Razoavelmente eficiente	Razoavelmente eficiente
Flexibilidade	Pouco eficiente	Muito eficiente
Continuidade	Pouco eficiente	Muito eficiente
Confiabilidade	Razoavelmente eficiente	Razoavelmente eficiente
Emprego centralizado	Razoavelmente eficiente	Muito eficiente
Segurança	Pouco eficiente	Muito eficiente
Total	15	23

Fonte: o autor

em virtude da variedade de sistemas e protocolos de proteção que podem ser empregados em ambos, sem grandes distinções.

A possibilidade de operar o sistema por software embarcado, o que garante a Inteligência Artificial do sistema, entrega um excelente serviço de **Flexibilidade, Continuidade, Emprego Centralizado e Segurança**, tendo em vista a possibilidade de embarcar todos os comportamentos e protocolos desejáveis que o sistema adote para que seja célere e resiliente a panes comuns atreladas a estes parâmetros.

CONCLUSÃO

Dos resultados pode-se verificar os pontos fortes e fracos de ambos os sistemas, nos quais a proposta das ERBRs se mostra uma clara oportunidade de solução para muitos dos problemas das Comunicações do Exército. Contudo, em virtude da limitação de energia do sistema, acredita-se que um sistema híbrido, o qual se use tanto das ERBs quanto das ERBRs, seria uma proposta mais eficiente, em todos os sentidos técnicos e operacionais.

Tomando por base o vigente PLANO ESTRATÉGICO DO EXÉRCITO, constante no Boletim Especial do Exército 28/2014 [Exército Brasileiro 2014a] o qual propõe que a Força Terrestre deve gerar capacidades em seus elementos de emprego, dispondo de forças militares capazes de atuar de forma conjunta, dotadas de **Flexibilidade, Adaptabilidade,**

Modularidade, Elasticidade e Sustentabilidade (FAMES), as quais são as características das Forças Armadas da Era do Conhecimento, acreditamos que a tecnologia ERBRs e uma solução razoavelmente adequada em termos técnicos e operacionais, para as necessidades e percalços atuais de Comunicações da Força Terrestre.

Para trabalhos futuros acredita-se que abordar as questões atreladas a redes distribuídas, proteção eletrônica e cibernética do sistema de ERBRs seria útil para o desenvolvimento científico da proposta.

ROBOTIC COMMUNICATIONS IN MECHANIZED INFANTRY AND CAVALRY BRIGADES, AND IN COORDINATION AND COOPERATION OPERATIONS WITH AGENCIES

ABSTRACT: IMMOBILE RADIO BASE STATIONS (RBSs) USED FOR WIRELESS NETWORKS IN MILITARY OPERATIONS (USUALLY MOUNTED ON METAL TOWERS, HIGH GEOGRAPHIC POINTS OR ON TOP OF BUILDINGS) LIMIT THE COVERAGE PROVIDED TO THE TROOP TO FIXED LOCATIONS AND ARE INSENSITIVE TO CHANGES IN HOW THEY ARE DISTRIBUTED SPATIALLY. IN THIS WORK WE PROPOSE A METHOD OF MANAGEMENT OF MOBILITY FOR ROBOTIC RADIO STATIONS (RRBSs), WHICH CONSTITUTE THE RADIO SET AND ANTENNA MOUNTED ON AUTONOMOUS AIR VEHICLES WITH EMBEDDED ARTIFICIAL INTELLIGENCE, WHICH WILL DYNAMICALLY ADJUST THEIR POSITIONS ACCORDING TO THE MOVEMENT OF THE (DEMANDS SPECIFIC TO THE TROOP), THUS PROVIDING BETTER NETWORK COVERAGE. IN THE SCENARIO CONSIDERED, WE ANALYZE THE



POSITIVE AND NEGATIVE ASPECTS OF THE CURRENT COMMUNICATIONS STRUCTURE OF THE MECHANIZED INFANTRY AND CAVALRY BRIGADES AND THE ROBOTIC COMMUNICATIONS PROPOSAL IN THESE LARGE UNITS.

KEYWORDS: COVERAGE OPTIMIZATION, MOBILE COMMUNICATIONS, ROBOTIC BASE RADIO STATIONS.

REFERÊNCIAS

- Ding, Y., Wang, C., and Xiao, L. (2007). A static-node assisted adaptive routing protocol in vehicular networks. In Proceedings of the fourth ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks, pages 59-68. ACM.
- Exército Brasileiro (2014a). Plano Estratégico do Exército, volume 1. Ministério da Defesa.
- Exército Brasileiro (2014b). Vetores Aéreos na Força Terrestre, volume 1. Ministério da Defesa.
- Exército Brasileiro (2017). Operações, volume 1. Ministério da Defesa.
- Exército Brasileiro (2018). As Comunicações na Força Terrestre, volume 1. Ministério da Defesa.
- Freudiger, J., Raya, M., Felegyhazi, M., Papadimitratos, P., and Hubaux, J.-P. (2007). Mix-zones for location privacy in vehicular networks. In ACM Workshop on Wireless Networking for Intelligent Transportation Systems (WiN-ITS), number LCA-CONF- 2007-016.
- Gerla, M. and Kleinrock, L. (2011). Vehicular networks and the future of the mobile internet. *Computer Networks*, 55(2):457-469.
- Gowda, M., Dhekne, A., and Roy Choudhury, R. (2016). The case for robotic wireless networks. In Proceedings of the 25th International Conference on World Wide Web, WWW '16, pages 1317-1327.
- Guo, Y.-n., Cheng, J., Liu, H.-y., Gong, D., and Xue, Y. (2017). A novel knowledge-guided evolutionary scheduling strategy for energy-efficient connected coverage optimization in wsns. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 10(3):547-558.
- Hayat, S., Yanmaz, E., and Muzaffar, R. (2016). Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4):2624-2661.
- Ingber, L. (1989). Very fast simulated re-annealing. *Mathematical and Computer Modelling*, 12(8):967 - 973.
- Ingber, L. (1993). Simulated annealing: Practice versus theory. *Mathematical and Computer Modelling*, 18(11):29 - 57.
- Kang, Z., Zeng, H., Hu, H., Xiong, Q., and Xu, G. (2017). Multi-objective optimized connectivity restoring of disjoint segments using mobile data collectors in wireless sensor network. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017(1):65.
- Karvounas, D., Tsagkaris, K., and Demestichas, P. (2010). Position optimization for moving access points. 2010 Future Network and Mobile Summit, pages 1-8.
- Lin, F. Y. and Chiu, P.-L. (2005). A near-optimal sensor placement algorithm to achieve complete coverage-discrimination in sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 9(1):43-45.
- Liu, Guo, C. Z. (2015). A hierarchical scheduling scheme in wsns based on node-failure pretreatment. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11:7.
- Padueli, M. P. (2012). As estações radio base na cidade de São Paulo: uma abordagem sobre os riscos e uma contribuição para os sistemas de gerenciamento.
- Petit, J., Schaub, F., Feiri, M., and Kargl, F. (2015). Pseudonym schemes in vehicular networks: A survey. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 17(1):228-255.
- Rahmati, A., He, X., Guvenc, I., and Dai, H. (2019). Dynamic mobility-aware interference avoidance for aerial base stations in cognitive radio networks. *arXiv preprint arXiv:1901.02613*.
- Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edition.
- Wu, H., Fujimoto, R., Guensler, R., and Hunter, M. (2004). Mddv: a mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks, pages 47-56. ACM.
- Younis, M. and Akkaya, K. (2008). Node positioning for increased dependability of wireless sensor. *Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*, 62:225.
- Zhang, X. and Zhang, X. (2017). A non-revisiting artificial bee colony algorithm for phased array synthesis. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017(1):7.
- Zhou, Y., Cheng, N., Lu, N., and Shen, X. S. (2015). Multi-uav-aided networks: aerial-ground cooperative vehicular networking architecture. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 10(4):36-44.
- Iran Victor Pinheiro Moura é Mestre em Ciências da Computação pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Atualmente, exerce a função de Instrutor na Escola de Comunicações e pode ser contactado pelo email: victorpinheirojcg@gmail.com.
- Daniel Moura Félix Cardoso é Pós-graduado em Guerra Cibernética pelo Centro de Instrução de Guerra Eletrônica. Atualmente, exerce a função de Instrutor na Escola de Comunicações e pode ser contactado pelo email: felix.daniel@eb.mil.br.

