

# Análise Baseada em Redes Complexas para Identificação da Estrutura de Comando de Operação Militar como Fator de Alta Vulnerabilidade

Silvio Roberto Assunção de Oliveira Filho, Iran Victor Pinheiro Moura  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

**Resumo-** Uma rede é uma representação das várias ligações entre objetos ou indivíduos que topologicamente se relacionam de modo não trivial. Em uma rede de comunicações, os objetos são os equipamentos rádios e as ligações as comunicações em si, que saem de um ponto a outro. A cadeia de comando e controle de uma operação militar necessita de uma estrutura de comunicações formada por elementos, postados em uma área a qual se deseja ocupar, que se comunicam por rádio. Em uma estrutura clássica militar, uma Brigada é uma grande unidade que se subdivide em postos de comando, regimentos, batalhões, entre outros. A identificação da estrutura do adversário possibilita obter vantagens em um conflito militar, como a identificação da posição geográfica do posto de comando, bem como das subdivisões da estrutura militar do inimigo. Nesse estudo, foram analisados os dados de comunicações de uma operação militar, com o intuito de verificar a possibilidade de identificação desses postos de comando e dos diferentes grupamentos militares, utilizando métricas e algoritmos de Teoria de Redes Complexas. Assim, demonstrou-se que analisando as comunicações, mesmo sem avaliar o conteúdo da mensagem, que pode ser considerado criptografado, foi possível a identificação de grande parte da cadeia principal de comando da Brigada, bem como a identificação de suas subdivisões, utilizando métricas e algoritmos de análise de redes complexas. Com o intuito de identificar as vulnerabilidades da estrutura de comunicações e com isso, posteriormente serem criadas metodologias e doutrinas que considerem e tratem esse fator de risco em uma operação militar.

**Palavras-Chave** - redes complexas, redes hierárquicas, identificação de comunidades.

## I. INTRODUÇÃO

O estudo de redes complexas é um tema que abrange diversas áreas de conhecimento, tais como a ciência da computação, matemática, física, biologia e sociologia. O termo redes complexas refere-se a um grafo que apresenta uma estrutura topográfica não trivial, composto por um conjunto de vértices (nós) que são interligados por meio de arestas [1]. O estudo de redes na forma de grafos é um dos pilares da matemática discreta e teve início em 1735, quando Euler propôs uma solução para o problema das pontes de Königsberg, originando a teoria dos grafos [2].

A quantidade de ligações ou arestas de cada nó ou vértice define o seu grau, bem como a centralidade e a sua conectividade em relação a todos os outros vértices. Esses valores são utilizados como métricas básicas para o estudo da rede. Além desses, nesse estudo são utilizados os conceitos de comunidades, que são agrupamentos de nós que se conectam mutuamente, formando subgrupos internos.

As redes sociais são representações de entidades, representados por vértices, e pelas interações entre elas, as ligações ou arestas. No contexto de sociedades humanas, a centralidade e a conectividade podem ser usadas, por exemplo, para determinar os indivíduos que melhor se relacionam com os demais ou para identificar os indivíduos mais influentes [2].

Com o avanço da tecnologia da informação e a disponibilidade de computadores e redes de comunicação que permitem a análise de dados em grandes quantidades, houve uma mudança significativa na Teoria de Redes. Atualmente, são comuns estudos com redes envolvendo milhares de vértices, as quais antes eram estudadas como estruturas compostas por dezenas ou, em casos extremos, centenas de vértices. A mudança de paradigma revelou várias características que diferem substancialmente as redes observadas no mundo real das redes aleatórias, tidas por muitos anos como o principal modelo de redes [1].

Descobriu-se que a topologia e a evolução das redes do mundo real apresentam propriedades organizacionais bastante robustas e distintas das redes aleatórias. Essa é a principal razão pela qual as redes passaram a ser chamadas de redes complexas.

O objetivo deste trabalho é realizar a análise dos dados de comunicações de uma operação militar realizada pelo Exército Brasileiro, a qual nos interessa as ligações de cada nó com os demais integrantes da rede. Através da aquisição dos dados de comunicações entre escalões e de acordo com as métricas já descritas, busca-se através da metodologia aplicada identificar a estrutura hierárquica e suas subdivisões durante a manobra. Embora tal rede seja de pequena dimensão, sua caracterização topológica não-trivial a identifica como uma instância de uma rede complexa, e os conceitos da teoria associada foram utilizados para a definição de sua estrutura a partir dos dados acima mencionados. Em última análise, foi demonstrado que o simples monitoramento das transmissões, sem necessariamente identificação de conteúdo da mensagem, permite a reconstrução da topologia de rede que caracteriza os escalões de comando.

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção II estão expostas as bases teóricas de referência, a seção III trata do caso de estudo das comunicações da Brigada na Operação

Ágata, a comparação entre a constituição real e a identificada por esse estudo, como fator de vulnerabilidades nas comunicações. A seção IV apresenta as considerações finais.

## II. REFERENCIAL TEÓRICO

### A. Grafos

Dentre algumas definições para os grafos, a que melhor se encaixa nesse estudo é que o grafo é um conjunto finito de nós ou vértices e de arestas, isto é ligação entre os nós, onde cada aresta é um par de elementos [3].

### B. Redes Complexas

Uma rede é um grafo no qual há um conjunto de vértices e um conjunto de arestas que conectam esses vértices [2]. As arestas estabelecem algum tipo de relação entre dois vértices de acordo com o problema modelado. As arestas podem ser direcionadas ou não, exemplos de grafos direcionados são as mensagens de e-mails, os quais são direcionados de um remetente para um destinatário, ou não direcionados. Porém, nesse estudo não são considerados os direcionamentos por não serem relevantes para os objetivos propostos.

É importante lembrar que nem todo grafo pode ser considerado uma rede complexa, pois essa classificação só é possível se o grafo apresentar algumas propriedades topológicas nas métricas que não estão presentes em grafos simples [2]. Algumas delas são descritas a seguir:

### C. Métricas dos Grafos

Dado um grafo  $G$ , suas métricas são os valores para quantificar uma característica, uma tendência ou dinâmica do grafo. Podem ser divididas em globais, quando se considera estatísticas, de toda uma rede, ou individuais, estimativas de cada nó [2].

Para fins desse trabalho as redes e os nós serão analisados utilizando as seguintes métricas: a distribuição de graus, a centralidade do nó, demonstrando a importância desses indivíduos na estrutura completa, e o coeficiente de aglomeração, utilizado para a descoberta de comunidades.

1) *Distribuição de Graus*: O grau de um vértice qualquer em uma rede é definido pela quantidade de conexões desse a outros nós. Em redes reais, a presença de nós de elevado grau identifica a presença de “Hubs” ou indivíduos com alta popularidade na rede. A identificação desses hubs possibilita identificar pontos sensíveis que podem desconectar a rede, transformando-a em diversas redes menores.

Em cadeias de comando, esses elos são os que tornam a rede mais suscetíveis a ataques direcionados, pois com a retiradas ou neutralização deles, haverá um desencadeamento catastrófica de toda a estrutura de comando. Ocorrendo uma desconexão do grafo, criando duas ou mais redes separadas.

2) *Coefficiente de Aglomeração*: Os agrupamentos intrínsecos às redes são quantificados por meio do coeficiente de aglomeração, também conhecido como fenômeno de

transitividade. Esse fenômeno ocorre quando um vértice  $A$  está conectado a um vértice  $B$ , e o vértice  $B$  está conectado a um vértice  $C$ , então há uma chance maior do vértice  $A$  também estar conectado ao vértice  $C$ . Para entender melhor, considere a analogia com uma rede social. Nesse caso, pode-se dizer que se  $A$  é amigo de  $B$ , e  $B$  é amigo de  $C$ , existem grandes chances de  $A$  e  $C$  também serem amigos. [2]

3) *Grafo Conexo e Componente Conexo*: Grafo conexo é aquele onde, entre qualquer par de vértices, sempre existe um caminho, ou ligação que os une, caso contrário, são grafos desconexos. [4]

Componente conexa de um grafo é qualquer subgrafo conectado do grafo. A componente conexa máxima é o conjunto de todos os vértices e arestas desse grafo, se esse for completamente conexo. Caso o grafo seja desconexo, o mesmo possui então, vários subgrafos desconexos e consequentemente, várias Componentes Conexas. [2].

### D. Tipos de Redes Complexas

Os três principais modelos de redes são:

1) *Redes Aleatórias*: modelos mais simples, criado por Erdős e Reny, onde todos os vértices têm a mesma quantidade de conexões e as mesmas chances de receberem novas ligações.

2) *Redes mundo-pequeno*: proposta por Watts e Strogatz que adaptaram o modelo básico, no qual as arestas mais próximas têm uma tendência maior de se conectarem.

3) *Redes livres de escala*: proposto por Barabási-Albert, que demonstraram que algumas redes apresentam dinâmicas mais complexas [1].

Devido à maior aderência da rede livre de escala com os modelos reais, inclusive na rede de comunicações considerada nesse trabalho, ela foi utilizada como referência e, por isso, foi detalhada a seguir.

### E. Redes Livres de Escala

Dentre os modelos de redes, os que mais se aproximam da maioria das redes reais, como conexões web, redes de comunicações e estruturas de comando são as redes livres de escala, demonstrada na Fig. 1.

Barabási-Albert demonstraram que algumas redes apresentam uma ordem na dinâmica de estruturação, com características bem específicas. Uma das principais propriedades, denominada conexão preferencial, é a tendência de um novo vértice se conectar a um vértice da rede que tem um grau elevado de conexões.

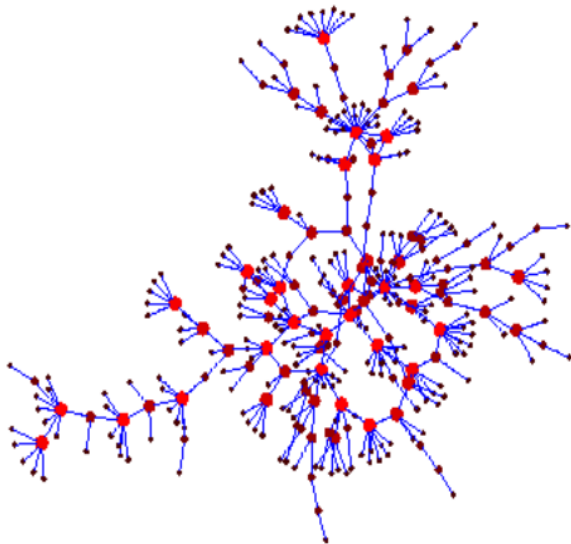


Fig. 1. Rede complexa livre de escala. Fonte: [2]

Essa característica implica em redes com poucos vértices altamente conectados, denominados “hubs”, e muito vértices com poucas conexões.

As redes com essas características são denominadas livres de escala devido à representação matemática da rede (fig. 1) e do efeito de Lei de Potência que o histograma de distribuição de graus possui, demonstrado na fig. 2. [2]

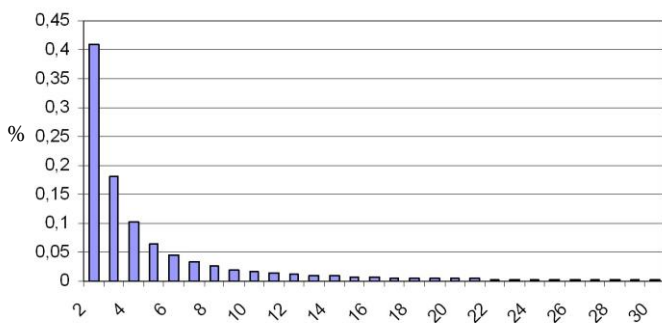


Fig. 2. Distribuição de graus em redes livres de escala. Fonte: [2]

#### F. Detecção de Comunidades em Redes Complexas

4) *Comunidades*: Uma característica das estruturas complexas é a possibilidade de se encontrar subgrupos com características análogas. Sistemas complexos são normalmente organizados em compartimentos que têm suas próprias regras ou funções. Na representação por redes, esses compartimentos aparecem como grupos de vértices com alta densidade de conexão entre eles, enquanto conexões entre esses e outros grupos são relativamente esparsas. Tais grupos são chamados de comunidades. Estruturas de comunidades parecem ser comuns a várias redes reais, e a habilidade de encontrar e analisar tais comunidades podem prover valorosa ajuda para entender e visualizar a estrutura global do sistema de relações definido pela rede [4].

Nesse estudo, a identificação de comunidades correspondeu às subdivisões da estrutura de comando. Ou seja, a identificação das subunidades: os Regimentos, os Grupamentos e os postos de Comando que constituintes da Brigada militar considerada no estudo.

Outra forma de separação em comunidades utilizada nesse estudo foi a separação hierárquica, em nós de comando e de execução, esses chamados na linguagem militar como elos operacionais.

#### G. Algoritmo de Newman

Este algoritmo é um dos mais utilizados para a identificação de comunidades de redes. Possui a característica de não precisar ser informada a quantidade de *clusters* ou grupos a serem identificadas. Sendo melhor detalhado em [4].

### III. CASO DE ESTUDO

#### A. AS COMUNICAÇÕES EM UMA BRIGADA

A Brigada é uma grande unidade militar independente, ou seja, possui todas as subunidades necessárias para se manter em uma operação militar. Entre elas: postos de comando, unidades táticas de execução militar, de comunicações e logísticas. [5]

A quantidade de subdivisões varia de acordo com o tipo e da área de realização da missão, porém normalmente é constituída por 8 ou 10 subunidades.

As comunicações entre esses elos são realizadas por meio de postos de comunicações que se utilizam de equipamentos rádios, os quais são colocados em geral, próximos aos comandantes. Além do comando da Brigada, cada subunidade também possui uma estrutura de comunicações e o posto de comando, até o mais baixo elemento hierárquico.

#### B. A COMUNICAÇÃO DA OPERAÇÃO ÁGATA

Para esse estudo, foram obtidos dados coletados durante a operação militar do Ministério da Defesa, chamada de Ágata, em um período de 7 dias contínuos.

Como forma de descaracterização de informações sigilosas e para diminuir o escopo de estudo, foi realizado o particionamento dos dados, utilizando apenas as comunicações de um dia específico, escolhido arbitrariamente.

Os dados eram constituídos apenas do código único do emissor, do receptor e da hora de transmissão. Simulando que essa comunicação foi interceptada por alguma antena e o código único, como sendo a posição geográfica da transmissão-recepção. O conteúdo da mensagem foi considerado criptografado, logo não sendo considerado nesse estudo.

As métricas de quantidade de conexões de cada par transmissor-emissor não foram consideradas, e nem a orientação da conexão, ou seja, quando houve uma comunicação de A para B, os dois nós foram inseridos no grafo e a aresta foi criada. Em uma segunda comunicação,

tanto A-B ou B-A, nada era inserido, visto que já constavam na rede.

### C. METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DOS DADOS

O tratamento dos dados da rede de comunicações da Brigada ocorreu da seguinte forma:

- Os dados foram 1183 conexões emissor-receptor, que foram analisados no aplicativo análise de redes complexas Ucinet [6] gerando a estrutura de rede demonstrada na Fig. 3.

- Foram identificados 112 nós, o que corresponde à totalidade dos postos de comunicações da Brigada.

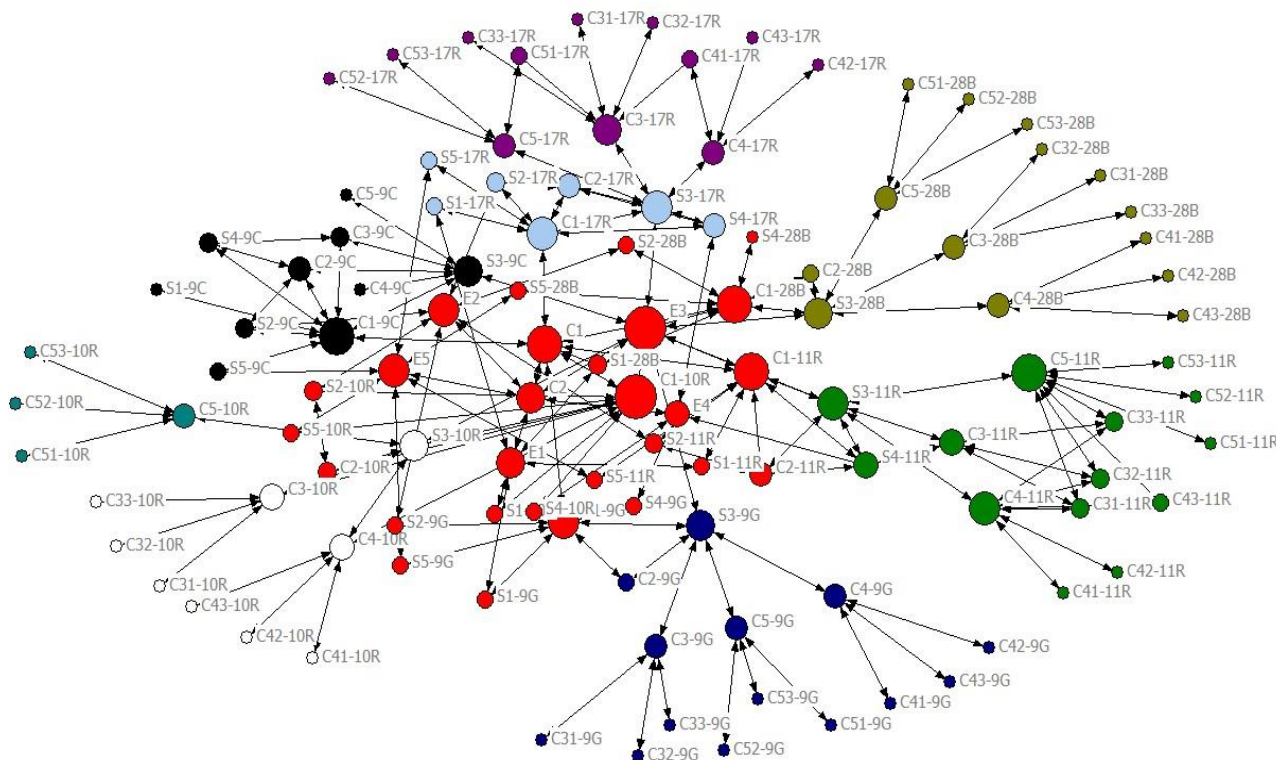


Fig. 3. Rede de comunicações da Operação Ágata gerada pelo Ucinet [8]. Tamanhos dos nós proporcionais ao grau. Cores das comunidades encontradas por meio do algoritmo de Newman.

Na Fig. 3, os tamanhos dos nós foram dimensionados de acordo com o grau do nó, definido pela quantidade de conexões, e o posicionamento na estrutura ocorreu de acordo com essa quantidade de conexões.

Os códigos dos nós foram gerados arbitrariamente no momento da inserção dos dados no aplicativo.

Em seguida foi aplicado o algoritmo de Newman, com os limitantes de quantidades mínimas de 5 e de no máximo 10 comunidades. A identificação resultante produziu as comunidades identificadas por cores na Fig. 3.

### D. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A distribuição dos graus da rede segue conforme o modelo da rede livre de escala [2], mostrada na Fig. 4.

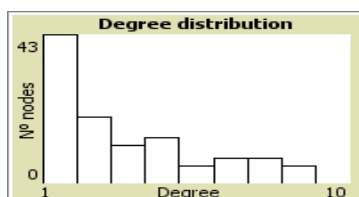


Fig. 4. Distribuição dos graus da rede de comunicações

Os dados foram analisados utilizando-se as informações de constituição de uma Brigada, sendo os seguintes resultados detalhados na Tabela 1.

TABELA I COMPARAÇÃO ENTRE AS UNIDADES DA BRIGADA E AS COMUNIDADES ENCONTRADAS NA REDE

Estrutura Real da Bda BRAVO	Estruturas identificadas
8 unidades <sup>1</sup>	9 “comunidades”
9 Comandantes + 5 Assessores = 14 postos de relevância hierárquica <sup>2</sup>	14 nós com grau igual ou superior a 7
Comandante da Brigada <sup>3</sup>	1 nó com maior centralidade e maior grau (10)

<sup>1</sup> A estrutura real é de 7 subdivisões, considerando-se que o Comando e o Estado-Maior se constituem de uma única estrutura de relacionamento. <sup>2</sup> O Comandante Geral e todos os outros comandantes, além do Estado-Maior foram identificados nos vértices com grau acima de 6. <sup>3</sup> O comandante geral destacou-se com a maior centralidade e o maior grau 10.

As comunidades encontradas foram consideradas, de acordo com a quantidade de componentes e as suas estruturas, sendo obtidos os seguintes resultados demonstrados na Tabela 2:

TABELA II RESULTADOS OBTIDOS NA IDENTIFICAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE ACORDO COM A ANÁLISE DOS DADOS DA REDE DE COMUNICAÇÕES.

Brigada		Informações obtidas através da Análise		
Organização	Qtd	Qtd	Comunidade	Acerto
Comdo Bda + EM Bda	7	7 21	vermelha (outras OM) <sup>1</sup>	100%
Batalhão B1	19	6 4 9	vermelha azul-turquesa branco	63%
Batalhão B2	19	5 14	vermelha verde	74%
Batalhão B3	19	12 7	roxa (tropa) azul-claro (EM) <sup>2</sup>	100%
Batalhão LOG	19	5 14	vermelha verde-musgo	74%
Grupo de Artilharia	19	5 14	vermelha azul	74%
Companhia de Engenharia	10	10	preta	100%
<b>Total de nós</b>	<b>112</b>	<b>112</b> <b>100%</b>	<b>Média de identificação</b>	<b>83%</b>

<sup>1</sup> Devido ao relacionamento dos comandantes e assessores dos quartéis subordinadas com o comandante geral da Bda, alguns elos foram considerados nessa comunidade (principal comunidade de comando), o que corrobora com a fácil identificação dos postos de comando e dos elos com maior grau hierárquico. <sup>2</sup> Divisão da OM em Estado-Maior e Unidades Operacionais.

Por intermédio da análise de rede de comunicações da organização, com o uso do aplicativo de análise de redes complexas, foi possível realizar a verificação dos nós mais importantes da rede e por intermédio do conhecimento da rede real da Brigada, foi possível verificar que existe a possibilidade de determinar os escalões de comando e os nós que correspondem aos comandantes das unidades militares subordinadas e dos assessores diretos.

Os elos identificados como de maior grau e com maior coeficiente de aglomeração foram os mais importantes para a estrutura da rede hierárquica analisada, e tais nós, são os correspondentes aos escalões de comando da Brigada. Tal fato pode ser comprovado tendo-se conhecimento da estrutura real da rede. Os nós que correspondem aos comandantes possuíam maior coeficiente de aglomeração e maior grau. Para realizar essa análise de detecção de comunidades nos dados de comunicações, o emprego do fundamento do algoritmo de Newman foi satisfatório na detecção das estruturas.

Assim, foi possível atingir todos os objetivos propostos inicialmente. E além desses, diante da análise dos resultados pode-se chegar a outras conclusões:

a. Com a análise dos nós com graus de 1 a 2 foi possível identificar praticamente toda a composição da menor subunidade militar. Tendo em vista que os nós estão dispersos no terreno, é possível, aliado à posição geográfica, determinar a dispersão das unidades e a abrangência das operações;

b. A análise dos nós de grau 3 possibilitam detectar os comandantes das subunidades de menor constituição de combate de uma Brigada.

c. A análise dos nós de grau 4 possibilitam detectar os comandantes de escalões intermediários das subunidades e

que são elementos de elevado valor militar na condução das operações militares, pois são os que conduzem e coordenam as atividades no nível operacional.

d. A análise dos nós de grau acima de 6 possibilitam a detecção dos comandantes de primeiro nível das subunidades.

e. Enfim, restaram 2 (dois) nós com graus acima de 7 e que possuíam a mesma localização. A análise realizada permitiu sugerir no modelo analisado com exatidão, o nó onde se encontra o comandante da Brigada. Sendo de extrema importância a análise para o possível emprego de ações para inutilizar o posto de comando da Brigada.

Ações essas que podem ser por meio de interferidores rádios que, conhecendo a posição detalhada, podem surtir melhor efeito. Considerando que os equipamentos interferidores de comunicações, não possuem uma abrangência muito grande, mas que se forem direcionados, atingem um elevado nível de eficácia, ao se focar para as posições mais importantes que representam menos de 30% da área total da operação, atingiria mais de 95% da cadeia de comando.

#### IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do acima exposto e do que foi verificado em face do experimento foi possível sugerir uma organização de batalha aproximada da real organização da unidade militar hierarquizada que foi empregada na operação militar.

Assim, verifica-se a importância de doutrinas que se preocupem com a fragilidade causada pela análise dos dados obtidos por meio de comunicações de rádios para determinação de escalões de comando de frações militares em uma operação militar.

Para dificultar essa análise será muito importante o uso de meios tecnológicos para descaracterização da rede de modo a não permitir a análise e a caracterização como uma rede hierárquica.

As mudanças nos procedimentos e táticas específicas com esse propósito também contribuem para a proteção de informações cruciais ao inimigo, mesmo sem utilizar ferramentas tecnológicas avançadas, desde que se conheça a vulnerabilidade e a gama de conhecimentos que são facilmente adquiridos com a aplicação da metodologia utilizada nesse estudo.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Barabási, A. L. (2003). Linked: How everything is connected to everything else and what it means for business, science and everyday life. Plume.
- [2] Redes Complexas: conceitos e Aplicações. Disponível em [http://www.icmc.usp.br/CMS/Arquivos/arquivos/envia/dos/BIBLIOTECA\\_113\\_RT\\_290.pdf](http://www.icmc.usp.br/CMS/Arquivos/arquivos/envia/dos/BIBLIOTECA_113_RT_290.pdf). Acesso em 16 Mar 18.
- [3] Amorim, Raabe Marques Uma Análise das Redes de Colaboração. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em [https://www.ufpe.br/ppge/images/disser\\_tacoes/dissertacao\\_133.pdf](https://www.ufpe.br/ppge/images/disser_tacoes/dissertacao_133.pdf). Acesso em 08 Abril de 2018.
- [4] Strogatz, S. H. (2001). Exploring complex networks. Nature, 410:268–276. <http://dx.doi.org/10.1038/35065725>. 7, 9
- [5] Exército Brasileiro. Manual de Operações C 100-5. Disponível em [http://minha.teca.com.br/generais/Documentos/Manuais+EB/C+100-5+Opera\\*c3\\*a\\*c3\\*b5es\\_3446262.pdf](http://minha.teca.com.br/generais/Documentos/Manuais+EB/C+100-5+Opera*c3*a*c3*b5es_3446262.pdf). Acesso em 29 Mai 18.
- [6] Borgatti, S.P., Everett, M.G. and Freeman, L.C. 2002. Ucinet for Windows: Software for Social Network Analysis. Harvard, MA: Analytic Technologies.