

# Consumo de energia em redes Ad-Hoc para uso em ambientes de comando e controle

Marcelo F. Vasconcelos\*, Ronaldo M. Salles  
Instituto Militar de Engenharia (IME)  
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro,  
RJ, Brasil, 22290-270  
\* vasconcelos@ime.eb.br

**RESUMO:** A minimização do consumo de energia em redes Ad-Hoc constitui uma grande preocupação para os administradores desse tipo de rede. Com a disponibilidade cada vez maior de recursos de redes, as operações que envolvem os conceitos de Comando e Controle, sejam civis ou militares, podem cada vez mais se beneficiar desse tipo de estudo. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica dos principais conceitos de redes de comando e controle, bem como sobre o consumo de energia em redes Ad-Hoc, que são bastante utilizadas nesse tipo de ambiente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Comando e Controle. Redes Ad-Hoc. Consumo de energia.

**ABSTRACT:** Minimizing energy consumption in Ad-Hoc networks is a major concern for network administrators. With the increasing availability of network resources, operations involving the concepts of command and control, whether civilian or military, can increasingly benefit from this type of study. This work presents a bibliographic review on main concepts of command and control networks and energy consumption on Ad-Hoc Networks, which are commonly used on command and control environments

**KEYWORDS:** Command and Control. Ad-Hoc Networks. Energy Consumption.

## 1. INTRODUÇÃO

As redes de computadores se tornaram uma ferramenta essencial para todas as pessoas. Diversas situações do cotidiano agora estão fortemente ligadas às redes, seja na utilização de serviços básicos, no entretenimento ou na interação com outras pessoas.

Além dessa utilização essencialmente pela população civil em situações de normalidade, as redes de computadores também desempenham um papel fundamental em situações de defesa civil e guerras, através de cenários de comando e controle (C2).

Situações de guerra são hostis para as redes de comunicações. Além das limitações impostas pela infraestrutura, como por exemplo fonte de energia limitada, existem dificuldades impostas pelo inimigo, como ataques cibernéticos e ataques a integridade física da rede por meio de interferência eletromagnética ou bombardeios.

A guerra moderna pressupõe a troca de informações rápidas e o processo de tomada de decisão está diretamente ligado ao rápido fluxo de informações. Com as novas tecnologias disponibilizadas, informações de sensores, imagens e vídeos estão cada vez mais presentes no campo de batalha e a disponibilização desse conteúdo, para o ponto central onde as decisões estratégicas são tomadas, é vital para o sucesso das operações.

Operações militares em que os tomadores de decisões estratégicas não têm conhecimento de todos os dados para a correta tomada de decisão, podem ser levadas ao insucesso, seja pela vitória do inimigo ou por baixas causadas por situações de fogo amigo. O fogo amigo ocorre quando tropas da mesma força se atacam por puro desconhecimento uma da outra.

Redes de C2 apresentam características bem definidas, como a demanda de tráfego variável, a distribuição em uma área geográfica definida e a necessidade de conexão em tempo real. A combinação entre a demanda de tráfego variável e a necessidade de conexão em tempo real, podem ser fundamentais para alcançar o objetivo desejado. Não atender a es-

sas demandas no momento que elas ocorrem, pode significar uma situação de fracasso.

Com o objetivo de aumentar as chances de sucesso em operações militares, beneficiando-se de todas as informações possíveis no momento mais adequado, as redes de computadores aplicadas aos ambientes de C2 precisam atender as demandas de tráfego impostas pela situação e manter o seu funcionamento pelo maior tempo possível.

Neste artigo será apresentada uma revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos de redes de C2 e outros tópicos de interesse para o estudo da redução do consumo de energia em redes de C2. Os tópicos abordados são: características relacionadas com o consumo de energia em redes Ad-Hoc, redes de sensores e minimização do consumo de energia.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a revisão da literatura e a seção 3, as considerações finais.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção serão apresentadas as revisões literárias divididas em quatro partes, a primeira para redes de comando e controle, a segunda para redes wireless Ad-Hoc, a terceira para redes de sensores e a quarta para redução do consumo de energia em redes.

A primeira parte compreendeu a coleta de dados sobre trabalhos que envolvam redes de comando e controle, buscando o maior número de informações sobre as características de topologia e tráfego que são importantes nestes cenários. Os resultados nessa parte da pesquisa levaram a definição das características específicas de ambientes de comando e controle. Os principais tópicos são apresentados na subseção 2.1

A segunda parte realizada foi o estudo das redes wireless Ad-Hoc, especialmente em relação aos possíveis casos de minimização do consumo de energia na ligação entre os nós. As revisões dos principais trabalhos estão apresentadas

na subseção 2.2. A minimização do consumo de energia na topologia existente é um tópico de interesse, pois em redes de C2 os nós podem estar sendo alimentados por fontes de energia limitadas, com isso, garantir o seu funcionamento pelo maior tempo possível é um objetivo a ser alcançado. Mesmo em redes com infraestrutura, as áreas de cobertura podem ser atendidas por diferentes combinações de nós e a redução no consumo de energia é igualmente importante.

A terceira parte realizada foi o estudo de redes de sensores que compõem uma grande área de pesquisa, com diversas aplicações civis e militares. Esse tipo de rede busca garantir uma cobertura para uma determinada área de interesse e disponibilizar os dados coletados para um processo de tomada de decisão.

A quarta e última parte apresenta alguns trabalhos de interesse com o objetivo de reduzir o consumo de energia em redes que podem ser utilizadas em ambientes de C2.

## 2.1 Redes de Comando e Controle

O termo Comando e Controle (C2) é um termo militar utilizado para gerenciar pessoas e recursos [1]. O cenário de C2 possui algumas características específicas, que não fazem parte das preocupações levadas em conta em um projeto de redes usual. Uma rede de C2 possui como principal característica levar os dados coletados ao longo da rede para um ponto central. A partir deste, os dados são processados e transformados em informações, que, por sua vez, são utilizados para o auxílio no processo de tomada de decisão.

Os ambientes em que são empregadas as técnicas de C2 normalmente são hostis ou com limitações de infraestrutura, como, por exemplo, nas operações militares ou situações de desastres.

Em [2] são apresentados diversos conceitos de interesse a respeito do uso de redes em ambientes de C2. A seguir serão apresentados alguns desses conceitos que servirão de apoio na definição da pesquisa realizada.

Operações militares apresentam uma cadeia de comando muito bem definida. Isso não quer dizer que não exista comunicação fora dessa cadeia de comando, mas a maior parte da comunicação seguirá a cadeia. Essa característica afeta diretamente a topologia, pois os locais ocupados pelos postos de comando são geralmente fixos e esses pontos vão ser origem e destino de grande parte do tráfego nessa rede.

As operações militares são baseadas em missões. As unidades que participam dessas missões devem cooperar entre si em busca de um objetivo único. O conhecimento prévio desse objetivo também pode influenciar na rede a ser utilizada, possibilitando uma certa previsibilidade nas necessidades de tráfego.

As operações são realizadas em áreas determinadas e por um período de tempo definido e a disposição dos nós não será aleatória.

Outra característica importante é a imprevisibilidade do campo de batalha, onde equipamentos podem simplesmente desaparecer sem aviso prévio e a rede deve se adaptar para manter o seu funcionamento. Este tópico específico será atendido por meio da busca pelo aumento da resiliência que é por si só um grande tópico de pesquisa em redes de computadores, conforme [3], [4], [5] e [6].

Considerando resiliência como a habilidade de uma entidade de tolerar, resistir e automaticamente se recuperar de desafios nas condições da rede, ataques coordenados e anomalias no tráfego [7], é possível verificar que a definição é

bastante genérica, o que possibilita o estudo e aplicação através de diversas técnicas.

Os oponentes das operações militares estarão sempre buscando interromper as comunicações para interromper a cadeia de comando. Com isso a rede deve ser resiliente e capaz de se adaptar aos diversos tipos de desafios e formas de interrupção e manter o seu funcionamento.

Em [8] é apresentada uma proposta de rede sem fio *multihop* composta dos próprios equipamentos dos usuários que se conectam à rede e ao mesmo tempo aumentam a cobertura. Foram apresentados bons resultados para *streaming* de vídeo e voz para até sete saltos na topologia. A proposta é eficiente economicamente e funciona de forma transparente para os usuários. Os testes foram realizados após um terremoto no Japão. Este trabalho colabora com a ideia de criar uma rede de forma rápida em situações específicas, como a recuperação de desastres.

A proposta do uso de rádios cognitivos em veículos em situações de recuperação de desastres é apresentada em [9]. O uso do rádio cognitivo se justifica pela indisponibilidade da infraestrutura existente e a necessidade de consumo de banda. O uso de veículos também foi escolhido devido a todas as agências envolvidas fazerem o uso de veículos para o atendimento das vítimas.

Em [10] é apresentada uma metodologia independente de protocolo que busca a redução do consumo de energia em redes MANET (*Mobile Ad-Hoc Networks*) utilizadas em desastres e operações de resgate.

## 2.2 Redução do consumo de energia em redes Ad-Hoc

As redes *Ad-Hoc* são muito adequadas para o ambiente de C2 e a possibilidade de interligação entre qualquer nó traz a flexibilidade necessária para atuar em ambiente hostil e sem infraestrutura considerada. A vantagem de poder utilizar praticamente qualquer combinação de interligação entre os nós também traz a desvantagem da dificuldade de determinar a ligação que minimiza o consumo de energia. Para o presente artigo, será considerado que os nós formam uma rede *wireless Ad-Hoc* e, por isso, faz-se necessário uma maior investigação sobre esse tipo de rede.

Redes *wireless Ad-Hoc* são compostas por diversos dispositivos transmissores de comunicação por rádio que formam uma rede sem qualquer infraestrutura especial [11]. Existem cenários importantes onde a infraestrutura para a construção de uma rede de dados com cabos metálicos ou fibra óptica não é viável, seja pela situação geográfica não favorável pelo tempo necessário para implementação ou pelo alto investimento necessário. Para esses cenários descritos, a utilização de uma rede *wireless Ad-Hoc* é adequada.

As redes *wireless Ad-Hoc* podem ser utilizadas em situações de desastres naturais, batalhas ou outros cenários com limitações de infraestrutura de comunicação de dados e infraestrutura elétrica [8]. Em tais situações, diversos dispositivos *wireless* podem formar uma rede temporária sem a necessidade de qualquer infraestrutura estabelecida e administração centralizada, obrigando os nós a cooperar entre si a fim de viabilizar a comunicação entre nós distantes. Esta topologia é conhecida também como rede *wireless Ad-Hoc multihop* [12].

O consumo de energia dos nós é um fator crítico para as redes *wireless Ad-Hoc*. Os dispositivos que fazem parte de uma rede *Ad-Hoc* geralmente são alimentados por baterias que possuem capacidade limitada. Em muitos cenários

é difícil a substituição ou a recarga da bateria. Dessa forma, a redução do consumo de energia dos nós é geralmente a melhor maneira para estender o tempo de vida da rede. A desativação de um nó por falta de energia pode prejudicar o funcionamento da rede.

Até este ponto, este artigo se refere à redução do uso de energia. Entretanto, como potência é energia por unidade de tempo, reduzir o uso de energia ou reduzir a potência necessária são duas formas de abordar o mesmo problema. Em alguns trabalhos apresentados neste artigo, o objetivo é redução da potência e não será feita a substituição por uso de energia para seguir a metodologia utilizada.

### 2.2.1 MPSC - Min-Power Symmetric Connectivity

Para a caracterização do MPSC (*Min-Power Symmetric Connectivity*), será necessária uma definição de atribuição de potência aos nós da rede, considerando que é preciso minimizar a potência total da rede, que é o somatório das potências atribuídas a cada nó e manter algumas propriedades da rede como a conectividade. Este problema é conhecido como *Min-Power Symmetric Connectivity*, é abordado em [13], [14] e [15] e atende ao objetivo de minimizar o consumo de energia.

Diversas soluções têm sido propostas na literatura para lidar com a questão citada acima. Neste trabalho, serão apresentadas algumas soluções envolvendo a questão da conservação de energia.

Uma rede *Ad-Hoc multi-hop* é um conjunto finito de estações localizadas em uma área geográfica que são capazes de se comunicar, transmitindo e recebendo sinais de rádio. Portanto para cada estação  $t$ , é atribuída uma potência de transmissão denotada por  $p(t)$  que fornece o alcance da transmissão denotado por  $r(t)$ .

A potência de transmissão de um nó está relacionada ao consumo de energia, ou seja, quanto maior a potência de transmissão, maior será o alcance da rede e também o consumo de energia do nó. Cada nó pode ajustar sua potência de transmissão entre zero e uma potência de transmissão máxima denotada por  $p^*(t)$ . O modelo mais comum de atenuação para a potência do sinal é a queda do sinal conforme  $1/r^k$  onde  $r$  é a distância até a antena do transmissor e  $k$  é uma constante real dependente do ambiente *wireless*, tipicamente entre 2 e 4, de acordo com [16].

Diferente das redes com cabo metálico ou fibra óptica, onde uma transmissão de um nó  $i$  geralmente pode alcançar somente o nó  $m$ , em redes *wireless* com antenas omnidirecionais é possível chegar a vários nós com uma única transmissão. Esta propriedade é uma das vantagens da rede *wireless*, ou seja, a facilidade de comunicação *Multicast* e *Broadcast*.

Adotando o modelo acima de atenuação do sinal e adotando a convenção usual detalhada em [15] em que cada nó possui a mesma eficiência de transmissão e o mesmo limite de sensibilidade de detecção, a potência proporcional necessária para estabelecer uma ligação do nó  $i$  para o nó  $j$ , separados por uma distância  $d_{ij}$ , é então dada pela Equação 1.

$$P_{ij} = (d_{ij})^k \quad (1)$$

A Figura 1 mostra a comunicação entre os nós  $i$  e  $m$ , porém, como os nós  $j$  e  $k$  estão a uma distância menor que o nó  $m$ , estes também receberão o sinal originário em  $i$ , ou seja, eles estão dentro do alcance da transmissão do nó  $i$  para o nó  $m$ .

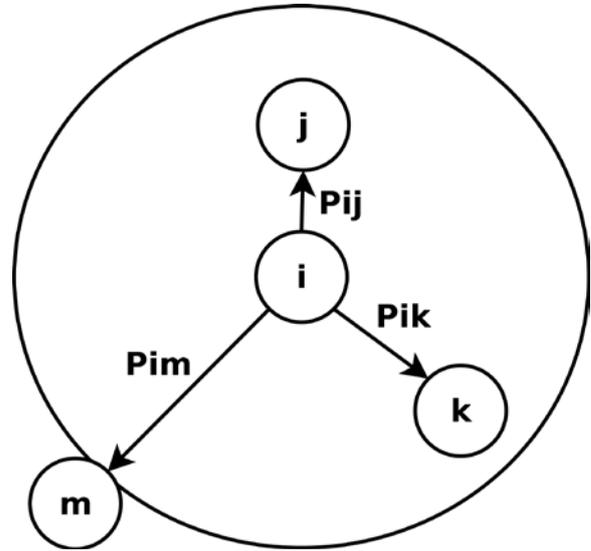


Fig. 1 – Modelo de Comunicação

Analisando a Figura 1, se o alcance de transmissão do nó  $k$  for suficientemente grande para alcançar o nó  $i$ , então teremos uma comunicação bidirecional entre os nós  $i$  e  $k$ . Neste trabalho iremos considerar apenas enlaces bidirecionais, e o custo  $p(i, k)$  representa os requisitos de potência para ambos os nós  $i$  e  $k$  estabelecerem um enlace bidirecional entre  $i$  e  $k$ . Com este pressuposto, os requisitos de potência para estabelecer um enlace bidirecional entre dois nós  $u$  e  $v$  separados por uma distância  $r$  está representada pela Equação 2:

$$p(u, v) = p(v, u) = r^k \quad (2)$$

A rede *wireless Ad-Hoc* pode ser representada por um grafo  $G(V, E, c)$ , onde  $V$  é o conjunto dos nós da rede;  $E$  é o conjunto de enlaces; e  $c$  é o custo ou requisito de potência para o enlace bidirecional entre dois nós (custo).

Formalmente, seja  $V$  o conjunto de nós da rede. Uma atribuição de alcance da transmissão é uma função  $r: V \rightarrow R^+$ . Um enlace bidirecional entre  $u$  e  $v \in V$  é estabelecido sobre a atribuição do alcance da transmissão se  $r(u) \geq p(u, v)$  e  $r(v) \geq p(v, u)$ . Seja  $B(r)$  o conjunto de todos os enlaces bidirecionais estabelecidos entre pares de nós de  $V$  sob a designação do alcance  $r$ .

A definição do Problema de acordo com [15] é dada por: Dado um conjunto de nós  $V$  e requisitos de potência simétricos  $p(u, v) = p(v, u)$ ,  $u$  e  $v \in V$ ; encontrar uma atribuição de alcance de transmissão  $r: V \rightarrow R^+$  minimizando  $\sum_{(v \in V)} r(v)$  sujeito as restrições que o grafo  $(V, B(r))$  seja conexo.

Considerando a rede *wireless Ad-Hoc* como um grafo, outra maneira de visualizar o problema é encontrar a árvore geradora do grafo com o mínimo de custo de potência. Seja  $G = (V, E, c)$  um grafo com custo nos enlaces e seja  $uv$  um enlace bidirecional entre os nós  $u$  e  $v \in V$ . O custo  $c(uv)$  de um enlace com  $u$  e  $v \in V$  corresponde ao requisito de potência  $p(u, v) = p(v, u)$ . Para o nó  $u \in V$  e a *Spanning Tree*  $T$  de  $G$ , seja  $uu_t$  o enlace de máximo custo incidente para  $u$  em  $T$ , ou seja,  $uu_t \in T$  e  $c(uu_t) \geq c(uv)$  para todos os  $uv \in T$ . O custo da potência da *Spanning Tree*  $T$  é dado pela Equação 3.x

$$p(T) = \sum_{u \in V} uu_t \quad (3)$$

Essa nova visualização do problema é possível, pois cada grafo conexo contém uma árvore geradora, então dado um grafo, é necessário encontrar a árvore geradora com o míni-

mo de custo de potência.

A definição do problema de acordo com o conceito de *Minimum Power-Cost Spanning Tree* apresentado acima é dado por: Seja  $G = (V, E, c)$  um grafo com custo nos enlaces, encontrar a *Spanning Tree*  $T$  de  $G$  com mínimo custo de potência.

Onde:

- $X_{uv}$  para todo  $uv \in E$ ,  $X_{uv}$  é definido como 1 se  $uv$  pertencer ao *Spanning Tree*  $T$  e é definido como 0 no caso contrário. Estas variáveis são definidas como variáveis da árvore.
- $Y_{uv}$  para todo  $uv' \in E' := uv, vu' | uv \in E$ ,  $Y_{uv'}$  é definido como 1 se  $v = ut$ , ou seja, se  $uv \in T$  e  $c(uv) \geq c(uw)$  para todo  $uw \in T$ . Estas variáveis são definidas como variáveis de alcance.

Note que existem  $|E|$  variáveis da árvore e  $2|E|$  variáveis de alcance. Definimos  $ST$  como o conjunto de todos os vetores incidentes de todas as *Spanning Trees* de  $G$  (visualize como subconjunto de  $E$ ).

Formulação de uma ILP - *Integer Linear Program*

Min

$$\sum_{uv \in E'} c(uv) \cdot y_{uv'} \quad (4)$$

Sujeito a

$$\sum_{v \in V / uv \in E'} y_{uv'} = 1 \quad \forall u \in V \quad (5)$$

$$x_{uv} \leq \sum_{uv' \in E' / c(uw) \geq c(uv)} y_{uv'} \quad \forall uv' \in E' \quad (6)$$

$$x \in \text{conv}(ST)$$

A restrição na Equação 5 reforça que deve ser selecionada exatamente uma variável de alcance para cada nó  $v \in V$ , ou seja, define corretamente o alcance de cada nó. A restrição na Equação 6 reforça que um enlace  $uv$  está incluído na árvore somente se o alcance de cada ponto da extremidade é, pelo menos, o custo do enlace. A restrição na Equação 7 reforça que, de fato, as variáveis da árvore formem uma árvore geradora. As restrições nas Equações 8 e 9 são restrições de domínio das variáveis. Existem diversas descrições lineares para  $x \in \text{conv}(ST)$ . Será utilizada a formulação em [15]:

$x \in \text{conv}(ST)$  se e somente se  $e$  para todo  $S \subseteq C \subseteq E$ , onde  $Y(S)$  é o conjunto de enlaces  $E$  com ambas as extremidades em  $S$ .

O problema descrito através das duas definições detalhadas nesta subseção e apresentadas em [15], é conhecido como problema do MPSC - *Minimum Power Symmetric Connectivity*. Diversos trabalhos foram apresentados para a resolução do MPSC, como, por exemplo, [13] e [14].

Em [17] são apresentadas duas outras formulações de Programação Linear Inteira Mista para o problema do MPSC. Antes de apresentar essas duas novas formulações, serão apresentados alguns conceitos utilizados.

O grafo  $G^2 = (V; A; p)$  é um grafo completo, direcionado e ponderado que foi derivado do grafo  $G = (V; E; c)$  pela definição  $A = \{(i,j), (j,i) \mid i, j \in V\}$ , ou seja, para cada aresta em  $E$ , há dois respectivos arcos em  $A$  e um arco simulado  $(i,i)$  com

$p(i,i)=0$  inserido em cada  $i \in V$ . A Figura 2 mostra um exemplo, sem considerar a proporção entre a distância entre os nós e a potência da transmissão de um grafo direcionado que foi derivado de um não direcionado.

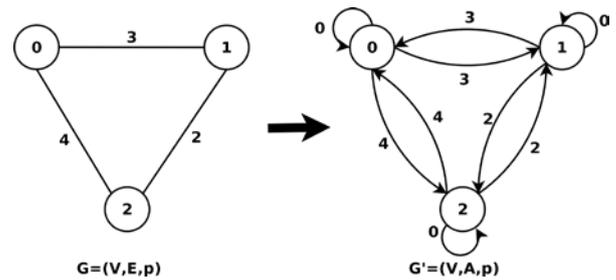


Fig. 2 – Um grafo direcionado  $G'$  derivado de um grafo não direcionado  $G$

Definição: Seja  $(i, j) \in A$ ,  $i$  é definido ancestral de  $(i, j)$  conforme a Equação 10.

$$a_j^i = \begin{cases} i, & \text{se } p_{ij} = \min_{k \in V} p_{ik} \\ \text{argmax}_{\{k \in V\} | p_{ik} < p_{ij}}, & \text{nos casos contrários} \end{cases} \quad (10)$$

De acordo com essa definição,  $(i, a_j^i)$  é um arco originado no nó  $i$  com o maior custo tal que  $p_i a_j^i < p_{ij}$ . No caso do ancestral não existir para o arco  $(i, j)$ , o vértice  $i$  é retomado, ou seja, um arco simulado  $(i, i)$ .

A Figura 3 ilustra o conceito de nó ancestral, o arco  $(i, k)$  é o ancestral do arco  $(k, m)$ ; o arco  $(i, j)$  é o ancestral do arco  $(i, k)$  e o arco simulado  $(i, i)$  é retomado com ancestral de  $(i, j)$ .

Quanto aos custos para as formulações matemáticas,  $c_{ij}$  é a potência necessária para acessar  $j$  de  $i$ , enquanto  $c_{ik}$  é a potência adicional necessária para alcançar  $k$  quando  $j$  já foi alcançado a partir de  $i$ . Analogamente,  $c_{km}$  é a potência adicional necessária para o nó  $i$  alcançar o nó  $m$  ao mesmo tempo que  $k$  já foi alcançado.

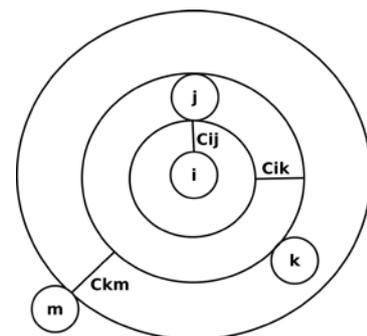


Fig. 3 – Custos para as formulações matemáticas

As duas formulações que serão descritas a seguir são baseadas em um mecanismo incremental sobre as variáveis que representam as potências de transmissão. Os custos associados a estas variáveis são calculados de acordo com a Equação 11.

$$c_{ij} = p_{ij} - p_i a_j^i \quad \text{para qualquer } (i,j) \in A \quad (11)$$

O valor  $c_{ij}$  é igual ao requisito de potência para estabelecer uma transmissão do nó  $i$  para o nó  $j$  ( $p_{ij}$ ), menos o requisito da potência do nó  $i$  para alcançar o nó  $a_j^i$  ( $p_i a_j^i$ ).

A primeira formulação proposta em [17] utiliza o conceito de fluxo de rede onde um nó é eleito como origem do

fluxo, e uma unidade de fluxo é enviada a partir de  $s$  para todos os outros nós. A variável do nó  $s$  responsável pelo *broadcast* é a raiz do *Spanning Tree*, e uma unidade do fluxo é enviada para todos os nós. A variável  $x_{ij}$  (com  $i \neq j$ ) representa o fluxo do arco  $(i,j)$ . A variável  $y_{ij}$  (com  $i \neq j$ ) é definida como 1 quando o nó  $i$  tem uma potência de transmissão que permita alcançar  $j$ ,  $y_{ij}=0$  em casos contrários.

Formulação de uma MILP - *Mixed Integer Linear Program*.

Min

$$\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot y_{ij} \quad (12)$$

Sujeito a

$$y_{ij} \leq y_i \cdot a_j^i \text{ para qualquer } (i,j) \in A, a_j^i \neq i \quad (13)$$

$$x_{ij} \leq (|V|-1) y_{ij} \text{ para qualquer } (i,j) \in A \quad (14)$$

$$x_{ji} \leq (|V|-1) y_{ji} \text{ para qualquer } (i,j) \in A \quad (15)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{(k,i) \in A} x_{ki} = \begin{cases} |V| - 1, \text{ se } i = s \\ -1 \text{ demais casos} \end{cases} \text{ qualquer } i \in V \quad (16)$$

$$x_{ij} \in \mathbb{R} \text{ qualquer } (i,j) \in A \quad (17)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \text{ qualquer } (i,j) \in A \quad (18)$$

A restrição 13 realiza um mecanismo incremental, forçando as variáveis associadas com o arco  $(i, a_j^i)$  a assumir em o valor 1 quando a variável associada com o arco  $(i,j)$  possui o valor 1, ou seja, os arcos originados no mesmo nó são ativados em ordem crescente de potência. As restrições 14 e 15 conectam as variáveis de fluxo  $x$  nas variáveis  $y$ . A equação 16 define o problema do fluxo, enquanto as equações 17 e 18 são restrições de domínio.

A segunda formulação proposta em [17], é definida uma variável  $z_{ij}$  para a *Spanning Tree*. A variável  $z_{ij}$  é igual a 1 se o enlace  $(i,j)$  pertencer a *Spanning Tree*,  $z_{ij}=0$  caso contrário. A variável  $y_{ij}$  (com  $i \neq j$ ) é igual a 1 quando a potência de transmissão do nó  $i$  consegue alcançar  $j$ , e  $y_{ij}=0$ , caso contrário.

Formulação de uma MILP - *Mixed Integer Linear Program*

Min

$$\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot y_{ij} \quad (19)$$

Sujeito a

$$y_{ij} \leq y_i \cdot a_j^i \text{ para qualquer } (i,j) \in A, a_j^i \neq i \quad (20)$$

$$z_{ij} \leq y_{ij} \text{ para qualquer } (i,j) \in E \quad (21)$$

$$z_{ij} \leq y_{ji} \text{ para qualquer } (i,j) \in E \quad (22)$$

$$\sum_{(i,j) \in E, i \in S, j \in V/S} z_{ij} \geq 1 \text{ qualquer SCV} \quad (23)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \text{ qualquer } (i,j) \in E \quad (24)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \text{ qualquer } (i,j) \in A \quad (25)$$

A restrição 20 realiza um mecanismo incremental, forçando as variáveis associadas com o arco  $(i, a_j^i)$  a assumir o valor 1 quando a variável associada com o arco  $(i,j)$  possui o valor 1, ou seja, os arcos originados no mesmo nó são ativados em ordem crescente de potência. As restrições 21 e 22 conectam as variáveis *Spanning Tree*  $z$  nas variáveis  $y$ . A equação 23 afirma que todos os vértices têm que ser mutuamente conectados no subgrafo induzido pelas variáveis  $z$ , enquanto as equações 24 e 25 são restrições de definição do domínio.

Em [15], é apresentado um algoritmo eficiente que reduz o consumo de potência comparado com o algoritmo MST.

O cálculo para obter uma *minimum spannig tree* possui duas implementações muito conhecidas: o algoritmo de *Prim* [18] e o algoritmo de *Kruskal* [19]. Os dois algoritmos são gulosos e bastante utilizados.

O algoritmo começa calculando o MST do grafo conexo. Procura um enlace, geralmente com o custo máximo ou que permita um ganho máximo; retira o enlace e reconecta o grafo com o aumento mínimo de custo de potência; repete o procedimento. Este algoritmo é baseado na noção da decomposição *k-restricted* de uma árvore  $T$ . Neste trabalho, também é defendido um ganho de potência em alguma bifurcação da Árvore Geradora Mínima; existe então a definição de conjunto *Fork* ( $F$ ), que são pares de enlaces que compartilham um nó comum, e a diminuição do custo da potência da Árvore Geradora é obtido com a adição de enlaces “ $k$ ”  $F$  e a retirada de enlaces da MST.

A complexidade do problema MPSC é NP-difícil, conforme apresentado em [20]. Uma noção do esforço envolvido nesse problema está na Fórmula de Cayley [21]: para um valor  $n$  inteiro positivo, o número de árvores que contenha os  $n$  vértices é  $n^{(n-2)}$ . Para uma topologia com 10 nós ( $n = 10$ ), existem  $10^8 = 100.000.000$  topologias possíveis. Se um computador levar 0,1 segundo para calcular cada possibilidade, encontrar a topologia com o menor consumo de potência levaria quase 4 meses. Essa complexidade levou ao estudo de diversas heurísticas, e muitas delas relacionadas com problemas de otimização.

## 2.2.2 MPSU - Min-Power Symmetric Unicast

Em [15], é apresentada uma solução para uma variação do MPSC, chamada de MPSU - *Min-Power Symmetric Unicast*. Esta metodologia é considerada a solução ótima e em tempo polinomial para escolha do caminho de menor potência em redes *Ad-Hoc*.

Este problema consiste em escolher o melhor caminho para chegar a um nó de destino, partindo de um nó específico. Esta abordagem pode ser resolvida através de programação dinâmica determinística, conforme apresentado em [22].

O método para o cálculo do MPSU consiste na construção de um grafo auxiliar direcionado e a utilização do algoritmo de *Dijkstra* [23], através de uma abordagem de programação

dinâmica, conforme o proposto em [24].

Na Figura 4 é possível verificar que o caminho mais curto que seria obtido pelo algoritmo de *Dijkstra*. Pode não ser aquele que minimiza a potência total da rede. As ligações possíveis entre os nós s e t apresentam duas opções: a primeira seriam as ligações s, t e a segunda as ligações s, v e v, t. Na primeira, a potência total da topologia seria de 50 unidades de potência (Nó s consumindo 25 unidades e o nó t consumindo 25 unidades), enquanto que na segunda seria de 41 unidades de potência (Nó s consumindo 9 unidades, nó v consumindo 16 unidades e o nó t consumindo 16 unidades).

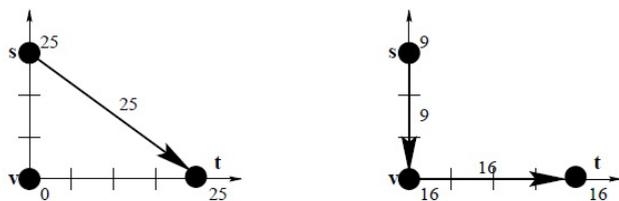


Fig. 4 – Possibilidades de ligação entre os nós s e t

A definição do problema MPSU é: seja  $G(V, E, c)$  um grafo e  $uv$  o enlace que liga os nós  $u$  e  $v$ . O custo  $c(uv)$  de um enlace, onde  $uv \in E$ , correspondente a potência de forma simétrica, ou seja  $p(u,v) = p(v,u)$ .

O custo de potência de um caminho  $s-t$  é  $P(s = v_0, v_1, \dots, v_k = t)$  é

$$p(P) = \sum_{i=0}^{k-1} \min(c(v_i, v_{i+1})) \quad (26)$$

Sujeito à restrição de obter um caminho contínuo ente s e t.

A solução proposta em [15] consiste na criação de um grafo auxiliar  $G' = (V', E', c')$  e então utilizar o algoritmo de *Dijkstra* em  $G'$ . A construção do grafo  $G'$  está descrita a seguir.

A construção do grafo se inicia com a colocação de todos os vértices de  $V$  em  $V'$ . Para cada enlace  $(u, v)$  de  $G$  dois vértices são adicionados em  $G'$ ,  $[u, v]$  e  $[v, u]$ , os dois ligados com custo  $c(u, v)$ . Cada vértice  $v$  de  $G$  também é preservado em  $G'$ . Para cada  $v$ , os vértices adjacentes são distribuídos, por exemplo  $\{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ , tal que  $c(v, u_i) \leq c(v, u_{i+1})$ , para todo  $1 \leq i \leq k-1$ . Adicionalmente todos os vértices  $[v, u_i]$  são conectados por dois caminhos diferentes,  $P1 = (v, [v, u_1], \dots, [v, u_{k-1}], [v, u_k])$  e  $P2 = ([v, u_k], [v, u_{k-1}], \dots, [v, u_1], v)$ , conforme a Figura 5. O custo dos arcos no caminho  $P1$  é colocado como  $c(v, u_1), c(v, u_2) - c(v, u_1), \dots, c(v, u_k) - c(v, u_{k-1})$ , respectivamente, enquanto os custos para todos os arcos em  $P2$  são colocados como zero. A Figura 6 mostra o grafo  $G'$  para o exemplo da Figura 4.

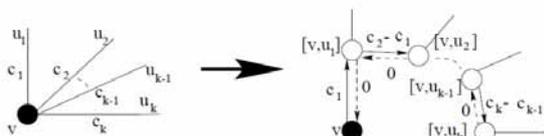


Fig. 5 – Construção do grafo  $G'$

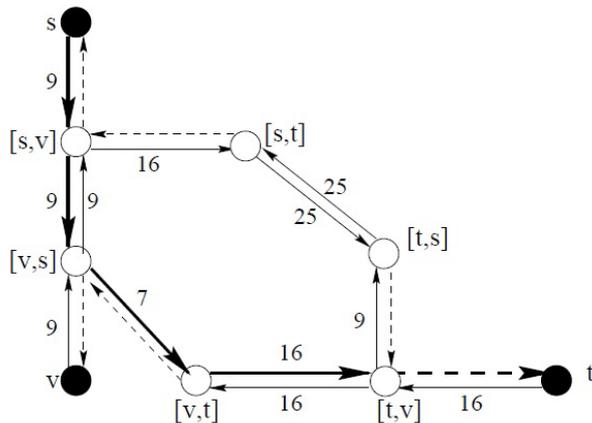


Fig. 6 – Exemplo do grafo  $G'$  para a Figura 4

Para cada caminho  $s - t$  de  $P$  em  $G$  existe um caminho correspondente  $s - t$  de  $P'$  em  $G'$  com o mesmo custo. De fato, considerando um caminho  $P = (s = w_1, w_2, \dots, w_l = t)$  em  $G$ , por construção, existe um caminho  $P'$  em  $G'$  percorrendo, em ordem, os vértices  $w_1, [w_1, w_2], [w_2, w_1], \dots, [w_{l-1}, w_l], [w_l, w_{l-1}], w_l$ , tal que:

- O custo do enlace conectando  $w_1$  a  $[w_1, w_2]$  em  $P'$  é  $c(w_1, w_2)$ ;
- O custo do enlace conectando  $[w_{i-1}, w_i]$  a  $[w_i, w_{i-1}]$  em  $P'$  mais o custo do sub caminho conectando  $[w_i, w_{i+1}]$  a  $[w_i, w_{i+1}]$  em  $P'$  é igual ao  $\min\{c(w_{i-1}, w_i), c(w_i, w_{i+1})\}$  para todo  $2 \leq i < l$ ;
- O custo do enlace conectando  $[w_{l-1}, w_l]$  to  $[w_l, w_{l-1}]$  é  $c(w_{l-1}, w_l)$ ;
- O custo do sub caminho conectando  $[w_l, w_{l-1}]$  a  $w_l$  é 0.
- Portanto, o custo de  $P'$  é igual ao custo de  $P$ .

### 2.3 Redes de Sensores

Redes de sensores representam uma grande área de pesquisa e também possuem características de interesse para redes de C2, como, por exemplo, a cooperação necessária entre todos os nós para manter a rede funcionando. Nesta subseção serão apresentadas algumas dessas características em comum.

O tópico *Wireless Sensor Networks (WSNs)* é apresentado em [25] e consiste em um grupo de sensores pequenos, de baixo custo e baixo consumo de energia que coletam dados do ambiente com o objetivo de proporcionar o seu processamento através de uma rede sem fio. Esse tipo de rede de sensores é largamente utilizado em ambientes militares, atendimento de saúde e outras aplicações.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos ao longo dos anos e os tópicos de pesquisa ainda em aberto são: eficiência energética, limitações de recursos como consumo de energia por exemplo, Robustez, Segurança e Tolerância a Falhas.

Em [26] são apresentas diversas abordagens para endereçar os problemas de redes de sensores divididos por áreas de abordagem: protocolos de roteamento, algoritmos genéticos, teoria dos jogos, *swarm intelligence* e segurança.

Após uma extensa revisão, os seguintes itens ainda permanecem em aberto:

- Em clusterização utilizando teoria dos jogos, há uma suposição de que há apenas uma cabeça de cluster em cada região, e esta suposição não é razoável, e também limita a

aplicabilidade de metodologia;

- Existem muitas pesquisas com foco em eficiência energética, porém não consideram uma otimização através das camadas de rede, como por exemplo estratégias de roteamento aliadas a estratégias de filas;
- Os algoritmos com foco em eficiência energética não consideram ambientes heterogêneos que tem um grande efeito em energia e tempo de vida da rede e também não consideram a mobilidade dos nós;
- Muitas pesquisas foram realizadas em ambientes estáticos, porém ambientes dinâmicos são uma realidade e precisam ser atendidos.

Em [27], duas técnicas de otimização baseadas no diagrama de Voronoi são utilizadas para obter uma redução no consumo de energia: reduzir o raio de alcance dos sensores e colocar em sleep mode sensores sem uso no momento.

Ambientes hostis para aplicação de redes de sensores são considerados em [28], onde é apresentada a alocação aleatória dos sensores como a única abordagem viável em um primeiro momento. Posteriormente a movimentação dos sensores é feita considerando maximizar a cobertura, minimizando o custo para movimentar os nós. São utilizados os algoritmos Artificial Immune System (AIS), Normalized Genetic Algorithm (NGA) e Particle Swarm Optimization (PSO). Os resultados obtidos variaram de acordo com o tempo de cálculo e menor número de sensores necessários.

A questão do tempo necessário para otimizar uma rede de sensores é abordada em [29], onde os resultados apresentados são melhores do que outros métodos de uso geral.

O objetivo de [30] e [31] é posicionar os sensores de forma a atender uma área a ser coberta completamente com o menor número possível de sensores, de acordo com os obstáculos presentes. Não é considerada a diferença de demanda ao longo da área e sua área de cobertura é fixa. Para alcançar esse objetivo, as características geométricas da área de cobertura são levadas em consideração e é proposto um algoritmo para garantir a cobertura ótima.

Garantir o funcionamento e a minimização do consumo de energia em redes de sensores são tópicos beneficiados pelo green communication. Este tópico é importante e promissor, conforme abordado em [32] e [33]. Mesmo se tratando de redes de sensores com suas características próprias, esta área tem objetivos de economia de energia em comum com redes de C2.

Uma outra abordagem para redução do consumo de energia é apresentada em [34], onde é considerada a economia do consumo de energia através do atendimento temporal das demandas pelos sensores envolvidos, de tal forma a reduzir o consumo de energia em áreas sem demanda em um determinado momento. Em redes de C2, áreas sem demanda não precisam ser cobertas, obtendo o mesmo tipo de economia proposta em [34]. Caso uma nova demanda passe a existir, os nós podem se ajustar de forma a suportar esta demanda.

O tópico Wireless Sensor and Actor Network (WSAN) é apresentado em [35] e possui grande importância na área de Internet of Things (IoT). WSAN são redes formadas por equipamentos que possuem sensores de interesse em um ambiente, como uma residência, por exemplo. Esses equipamentos também têm funções ativas no ambiente e, por isso, são chamados de atores. Os equipamentos se comunicam entre si para garantir que um determinado comando seja encaminhado pela rede. Um exemplo desse ambiente é um sensor de presença que, ao detectar uma movimentação em

uma determinada área de uma casa, faz com que uma lâmpada seja acesa.

## 2.4 Trabalhos Sobre Minimização do Consumo de Energia

Nesta subseção serão apresentados alguns trabalhos com foco em minimização do consumo de energia em redes.

Em [36] é apresentado um novo modelo de roteamento que leva em consideração métricas baseadas no consumo de bateria dos nós. As métricas são: minimizar a energia consumida por pacote; minimizar o tempo de partição da rede; minimizar a variância em níveis de potência nos nós; minimizar o custo por pacote e minimizar o máximo custo de nó. Algumas dessas métricas são de difícil implementação, porém os resultados obtidos foram satisfatórios e as métricas propostas podem ser incorporadas em protocolos de roteamento para redes Ad-Hoc.

Uma revisão dos protocolos de roteamento utilizados em redes Ad-Hoc é apresentada em [37], os protocolos são divididos em protocolos orientados por tabelas e protocolos sob demanda. São descritos os protocolos que se enquadram nas opções e, ao final do texto, é feita uma breve comparação, ressaltando as suas capacidades, diferenças e características.

Um estudo do consumo de energia em vários cenários específicos de uma interface de rede, com relação aos seus estados de funcionamento são apresentados em [38]. Os valores foram coletados de forma experimental e comparados com os valores teóricos previstos. Todas as comparações ficaram dentro do esperado. Uma das conclusões apresentadas é que o consumo de energia não é sinônimo de consumo de banda e a pesquisa por protocolos de roteamento que leve em consideração broadcast, unicast e tamanhos de pacotes deve ser desenvolvidas. Outra conclusão importante é o consumo de energia quando um nó não está transmitindo nem recebendo. Para esse caso, não adicionar o nó no roteamento pode gerar uma redução no consumo de energia em redes Ad-Hoc.

Uma abordagem um pouco diferente das apresentadas até o momento é feita em [39]. Neste trabalho os nós contribuem de forma autônoma para a formação da topologia, através do aumento gradual da sua potência de transmissão, até encontrar com um vizinho. Esta abordagem também reduz o consumo total de potência da rede e evita a existência de nós com baixo grau.

Em [40] é proposto um algoritmo de roteamento que leva em consideração a minimização no consumo de energia pela rede e também o nível de bateria restante nos nós para escolher as melhores rotas. Com esta abordagem em topologias com 15 nós, a longevidade das topologias foi expandida em até 40%.

Em [41] é proposto um algoritmo para minimização de potência para redes Ad-Hoc de uso Militar. Esse algoritmo consiste em utilizar o cálculo exato da topologia de menor consumo de energia, de forma distribuída, através de clusters de nós da rede e combinar esses clusters para obter uma topologia com menor consumo de energia.

Foram utilizadas topologias aleatórias para representar redes reais de C2. O método proposto apresentou resultados importantes de diminuição do consumo de energia que podem ser utilizados para garantir o funcionamento mais eficiente para redes com as características apresentadas. O método proposto não tem um custo computacional elevado, apresentando um tempo de execução adequado para o cená-

rio proposto e podendo ser expandido para redes com mais de 100 nós.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Redes de comando e controle são de grande importância no ambiente militar e possuem características bastante específicas. Algumas dessas características não são consideradas em redes de aplicação civil, por isso existe a necessidade de estudos voltados especificamente para esse tipo de rede.

A questão do consumo de energia é muito importante em situações de batalhas pois garantir o funcionamento da rede em mais alguns minutos ou horas pode ser a diferença entre o sucesso ou fracasso de uma operação.

Neste artigo foram apresentados diversos trabalhos que se aplicam diretamente a redes de comando e controle e também, artigos voltados para redes de aplicações civis que possuem características de interesse na minimização do consumo de energia em redes de comando e controle.

As pesquisas aqui apresentadas podem servir como ponto de partida para novos estudos voltados para o consumo de energia em redes de comando e controle.

### AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Militar de Engenharia.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALBERTS, D. S. e HAYES, R. E. Understanding command and control. Technical report, DTIC Document, 2006.
- [2] HOLLIDAY, P. Swarm-a mobility modelling tool for tactical military networks. Em Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE, pags. 1-7. IEEE, 2008.
- [3] STERBENZ, J. P., HUTCHISON, D., CETINKAYA, E. K., JABBAR, A., ROHRER, J. P., SCHOLLER, M. e SMITH, P. Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Computer Networks*, 54(8):1245-1265, 2010.
- [4] MARINO JR., D. A. e SALLES, R. M. Medindo a robustez de uma rede com o fator de resiliência. Em Proceedings of the IADIS International Conference WWW/Internet 2009, Madrid, Espanha, outubro 2009.
- [5] VASCONCELOS, M. F. e SALLES, R. M. Resilience in computer network management. *NETWORKING 2012*, pags. 109-120, 2012b.
- [6] VASCONCELOS, M. F. e SALLES, R. M. Emprego de resiliência na gerência de redes de computadores. XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 1:100-114, 2012a.
- [7] AGGELOU, G. *Wireless Mesh Networking*. McGraw-Hill Professional, 2008. ISBN 0071482563.
- [8] MINH, Q. T., NGUYEN, K., BORCEA, C. e YAMADA, S. On-the-y establishment of multihop wireless access networks for disaster recovery. *Communications Magazine, IEEE*, 52(10):60-66, 2014.
- [9] SUN, Y. e CHOWDHURY, K. R. Enabling emergency communication through a cognitive radio vehicular network. *Communications Magazine, IEEE*, 52(10): 68-75, 2014.
- [10] RAMREKHA, T. A., TALOOKI, V. N., RODRIGUEZ, J. e POLITIS, C. Energy efficient and scalable routing protocol for extreme emergency ad hoc communications. *Mobile Networks and Applications*, 17(2):312-324, 2012.
- [11] PERKINS, C. E. e ROYER, E. M. Ad-Hoc on-demand distance vector routing. Em *Mobile Computing Systems and Applications*, 1999. Proceedings. WM- CSA'99. Second IEEE Workshop on, pags. 90-100. IEEE, 1999.
- [12] BROCH, J., MALTZ, D. A., JOHNSON, D. B., HU, Y.-C. e JETCHEVA, J. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. Em Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, pags. 85-97. ACM, 1998.
- [13] BLOUGH, D. M., LEONCINI, M., RESTA, G. e SANTI, P. On the symmetric range assignment problem in wireless ad hoc networks. Em *Foundations of Information Technology in the Era of Network and Mobile Computing*, pags. 71-82. Springer, 2002.
- [14] CALINESCU, G., MANDOIU, I. e ZELIKOVSKY, A. Symmetric connectivity with minimum power consumption in radio networks. Em *Foundations of Information Technology in the Era of Network and Mobile Computing*, pags. 119-130. Springer, 2002.
- [15] ALTHAUS, E., CALINESCU, G., MANDOIU, I. I., PRASAD, S., TCHERVENSKI, N. e ZELIKOVSKY, A. Power efficient range assignment for symmetric connectivity in static ad hoc wireless networks. *Wireless Networks*, 12(3):287-299, 2006.
- [16] RAPPAPORT, T. S. e OTHERS. *Wireless communications: principles and practice*, volume 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [17] MONTEMANNI, R. e GAMBARDELLA, L. M. Exact algorithms for the minimum power symmetric connectivity problem in wireless networks. *Computers & Operations Research*, 32(11):2891-2904, 2005.
- [18] PRIM, R. C. Shortest connection networks and some generalizations. *Bell system technical journal*, 36(6):1389-1401, 1957.
- [19] KRUSKAL, J. B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical society*, 7(1):48-50, 1956.
- [20] CLEMENTI, A. E., PENNA, P. e SILVESTRI, R. On the power assignment problem in radio networks. *Mobile Networks and Applications*, 9(2):125-140, 2004.
- [21] CAYLEY, A. A theorem on trees. *Quart. J. Math.*, 23(376-378):69, 1889.
- [22] WINSTON, W. L. e GOLDBERG, J. B. *Operations research: applications and algorithms*, volume 3. Duxbury press Boston, 2004.
- [23] DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1):269-271, 1959.
- [24] SNIEDOVICH, M. Dijkstra's algorithm revisited: the dynamic programming connexion. *Control and cybernetics*, 35(3):599, 2006.
- [25] ISMAIL, W. W. e MANAF, S. A. Study on coverage in wireless sensor network using grid based strategy and particle swarm optimization. Em *Circuits and Systems (APCCAS)*, 2010 IEEE Asia Pacific Conference on, pags. 1175-1178. IEEE, 2010.
- [26] BHAWNA, PATHAK, T. e RANGA, V. A comprehensive survey of clustering approaches in wireless sensor networks. Em *Proceedings of the Second International Conference on Emerging Research in Computing, Information, Communication and Applications (ERCICA 2014)*, 2014.
- [27] TANG, M., YAN, F., DENG, S., SHEN, L., KUANG, S. e XING, S. Coverage optimization algorithms based on voronoi diagram in software-defined sensor networks. Em *Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, 2016 8th International Conference on, pags. 1-5. IEEE, 2016.
- [28] SWEIDAN, H. I. e HAVENS, T. C. Coverage optimization in a terrain-aware wireless sensor network. Em *Evolutionary Computation (CEC)*, 2016 IEEE Congress on, pags. 3687-3694. IEEE, 2016.
- [29] AKBARZADEH, V., GAGNE, C. e PARIZEAU, M. Sensor control for temporal coverage optimization. Em *Evolutionary Computation (CEC)*, 2016 IEEE Congress on, pags. 4468-4475. IEEE, 2016.
- [30] WEI, M. e SHI, Y. Brain storm optimization algorithms for optimal coverage of wireless sensor networks. Em *Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI)*, 2015 Conference on, pags. 120-127. IEEE, 2015.
- [31] ZHU, H. e SHI, Y. Brain storm optimization algorithm for full area coverage of wireless sensor networks. Em *Advanced Computational Intelligence (ICACI)*, 2016 Eighth International Conference on, pags. 14-20. IEEE, 2016.
- [32] MA, X., SHENG, M. e ZHANG, Y. Green communications with network cooperation: a concurrent transmission approach. *IEEE Communications Letters*, 16(12):1952-1955, 2012.
- [33] ZHENG, J., CAI, Y., SHEN, X., ZHENG, Z. e YANG, W. Green energy optimization in energy harvesting wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 53(11):150-157, 2015.
- [34] HAN, C., SUN, L., XIAO, F. e GUO, J. An energy efficiency node scheduling model for spatial-temporal coverage optimization in 3d directional sensor networks. *IEEE Access*, 4:4408-4419, 2016.
- [35] GUO, Y., ZHANG, Y., MI, Z., YANG, Y. e OBADAT, M. S. A distributed coverage optimization and connectivity maintenance

- strategy based on unknown sensors in wsan. Em Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS), 2016 International Conference on, pags. 1-5. IEEE, 2016.
- [36] SINGH, S., WOO, M. e RAGHAVENDRA, C. S. Power-aware routing in mobile ad hoc networks. Em Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, pags. 181-190. ACM, 1998.
- [37] ROYER, E. M. e TOH, C.-K. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. Personal Communications, IEEE, 6(2):46-55, 1999.
- [38] FEENEY, L. M. e NILSSON, M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. Em INFO-COM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, volume 3, pags. 1548-1557. IEEE, 2001.
- [39] WATTENHOFER, R., LI, L., BAHL, P. e WANG, Y.-M. Distributed topology control for power efficiency operation in multihop wireless ad hoc networks. Em INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, volume 3, pags.1388-1397. IEEE, 2001.
- [40] BALAGANESH, M. e VELAN, A. Energy efficient routing in wireless ad hoc networks. Energy, 3(3), 2014.
- [41] VASCONCELOS, M. F. e SALLES, R. M. Minimização de potência para redes adhoc de uso militar. Em XXXIV Simposio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBRT 2016), Santarém, Brazil,2016.