

Avaliação de algoritmos DTN para ambiente operacional tático: um estudo de caso do Esquadrão de Cavalaria Mecanizado

Gustavo C. Sampaio¹, Guilherme C. Sampaio¹, Ronaldo M. Salles²

¹Centro Tecnológico do Exército, Rio de Janeiro, Brasil

²Programa de Engenharia de Computação, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO: *Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões é uma arquitetura de rede que possui a proposta de melhorar a performance das redes de comunicações em cenários desafiadores. As pesquisas em torno do uso de DTN tem se intensificado em muitos campos, contudo, existem poucos trabalhos no meio militar que se preocupam com a questão do gasto de energia de uma rede DTN. Este artigo apresenta uma avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento de rede considerando-se características do cenário militar, com suas redes de comunicações, unidades de tropas e rádios militares com recursos limitados de bateria. Verificou-se que o protocolo de roteamento Spray and Wait possui um desempenho muito bom em um cenário militar com recursos limitados de energia, tendo características de escalabilidade e sendo menos custoso em relação ao consumo de energia.*

PALAVRAS-CHAVE: *Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões. DTN. Cenário Militar. Redes de Comunicações.*

ABSTRACT: *Delay-Tolerant Network is a network architecture that proposes the improvement of the performance of communication networks in challenging scenarios. The research on DTN has intensified in many fields, however, there are few studies in military scenarios that consider the energy expended in a DTN network. This article presents a performance evaluation of the routing protocols for this type of network, considering characteristics of the military scenario - communications networks, troop units and military radios with limited battery resources. It has been found that the Spray and Wait routing protocol performs very well in a military scenario with limited power resources. It has scalability features and is less costly regarding power consumption.*

KEYWORDS: *Delay-Tolerant Networks. DTN. Military Scenario. Communications Networks.*

1. INTRODUÇÃO

No final da década de 90 o Departamento de Defesa dos Estados Unidos foi o pioneiro na criação de um novo conceito de guerra, a Guerra Centrada em Redes [1]. A motivação era ganhar vantagem no cenário militar, utilizando tecnologias de rede para disseminar entre as forças militares as informações colhidas no campo de batalha.

Com o passar dos anos, o emprego dessas tecnologias foi se intensificando. Antes, o cenário militar que era limitado a transmissões de voz, agora conta com transmissões de dados, o que possibilitou transmissões de vídeo em tempo real, transmissões de dados de sensores, compartilhamentos de localização da tropa, entre outros de forma a melhorar a consciência situacional dos comandantes das forças, caracterizando um ciclo de comando e controle.

A Guerra Centrada em Redes é uma forma de atuar na guerra com a visão específica oriunda da era da informação. Ela enfoca o espaço de batalha como uma rede integrada e escalonada em outras redes. Entre os benefícios desse paradigma podemos destacar o compartilhamento da consciência situacional, o aumento da rapidez nas decisões, a agilidade na identificação de alvos e a sincronização das ações.

A Guerra Centrada em Redes possui quatro domínios. O domínio físico se caracteriza pelo ambiente onde ocorrerá o conflito. O domínio da informação é o que permite o fluxo de informações entre as forças empregadas nas operações. O domínio cognitivo é aquele em que residem as intenções do comandante, a doutrina, a tática, as técnicas e os procedimentos. O domínio social é aquele em que os seres

humanos interagem, trocam informações, formam a consciência compartilhada e tomam decisões colaborativas.

Para permitir o uso dessa doutrina e facilitar a interoperabilidade entre os sistemas, o protocolo IP foi o escolhido na época para trafegar as informações das redes de comunicações militares. Infelizmente, a estabilidade que o protocolo IP necessita em redes de computadores não é a mesma encontrada em um cenário militar.

O cenário militar, pela alta mobilidade possui atrasos longos e variáveis, tem taxas de erro elevadas e conta com frequentes desconexões [2]. Já o protocolo IP necessita que haja um caminho definido entre a origem e o destinatário.

Com o intuito de permitir a comunicação de dados em cenários cujas conexões são periódicas, intermitentes e propensas a interrupções, surgiram as Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões (DTN). A proposta da DTN é melhorar a performance das redes de comunicações em cenários desafiadores. Por conta disso as pesquisas em torno do uso de DTN tem se intensificado em muitos campos.

Segundo [4] o Exército Brasileiro até 2022 estará totalmente inserido na era do conhecimento (informação/incerteza), onde o espaço de batalha é não linear, ocorrem ações simultâneas em todo o espectro de operações, opera-se em um ambiente informacional (C4IVR), as operações de informação permitem a obtenção da superioridade de informação e a consciência situacional será um dos principais ativos para a tomada de decisão.

Aliado a isso, temos o fato de que os combates modernos têm se caracterizado pelo uso maciço de tecnologia, pela presença de civis e da mídia no ambiente operacional, pelo emprego de estruturas de combate com maior proteção coletiva, velocidade e letalidade seletiva, pela utilização de aeronaves remotamente pilotadas e pela capacidade de operar no espaço cibernético [5].

Contudo, as comunicações do Exército Brasileiro são muito limitadas em um ambiente operacional tático. Existe na rede lógica uma hierarquia entre nós que permeia toda a topologia da rede. Cada nó da rede só pode se comunicar com um conjunto de nós pré-estabelecidos.

Nesse caso, um nó só pode enviar uma mensagem para outro nó quando há plena comunicação entre eles. Por conta da alta mobilidade dos nós, temos frequentes desconexões e atrasos longos na entrega das mensagens. Isso acaba dificultando as comunicações em um cenário militar já que várias mensagens críticas acabam sendo descartadas ou são entregues com muito atraso. Para resolver esse problema, a rede lógica deve ser dinâmica, de forma que todos os nós presentes na rede possam ajudar na transmissão das mensagens.

Com o uso de algoritmos DTN, a rede lógica vai poder se adaptar ao ambiente usando os nós disponíveis na rede. Quando ocorrer uma indisponibilidade na rede, prejudicando o remetente de enviar a mensagem diretamente para o destinatário, outros nós podem ajudar no encaminhamento da mesma. Assim a rede utilizará múltiplos saltos para que a mensagem chegue ao destino, contribuindo assim para o sucesso da operação militar.

1.1 Objetivo

O presente artigo visa ao estudo e análise de algoritmos DTN em cenários militares com o objetivo de minimizar a perda de mensagens por frequentes desconexões e/ou indisponibilidade de rádios por falta de bateria.

Os cenários militares serão identificados a partir do estudo de mobilidade das operações realizadas pelo Esquadrão de Cavalaria Mecanizado do Exército Brasileiro e o gasto de energia dos rádios militares com cada protocolo de roteamento utilizado.

2. REDES DTN

Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões (DTN) define uma rede de comutação de mensagens do tipo store-and-forward, ou seja, uma rede cujos nós armazenam as mensagens em seus buffers e, no tempo certo, encaminham as mesmas para outros nós [6]. Diferentemente da implementação IP que requer que haja um caminho definido entre o remetente e o destinatário, a DTN pode armazenar mensagens nos nós intermediários por um tempo, aguardando a disponibilidade para um próximo salto.

Pelo fato de um pacote ser transmitido de um nó DTN para outro nó DTN, ele não precisa seguir da origem até o destino em um caminho ininterrupto. Se um pacote chega em um nó DTN e não existe conectividade para o próximo nó DTN no caminho, ele é mantido, armazenado nesse nó até que a conexão esteja disponível, possivelmente via um novo caminho, ou até que o tempo do pacote acabe e ele seja expirado.

O mecanismo de confiabilidade da Rede DTN depende da transferência da custódia dos pacotes entre os roteadores

DTN. Cada pacote DTN marcado com entrega confiável tem um ou mais nós custodiantes cujo trabalho é garantir que o pacote chegará no nó de destino.

O fato dos roteadores DTN poderem armazenar mensagens dá a possibilidade de fazerem uso das informações de tempo e agendamento que o IP não pode fazer. Por exemplo, a abordagem IP para rotear datagramas é construir uma imagem da conectividade atual da rede (via protocolos de roteamento como RIP, OSPF, etc) e rotear os datagramas usando somente essa informação de quais sistemas estão alcançáveis naquele instante. Por outro lado, a DTN é livre para usar informações sobre como a rede estará no futuro. Assim um roteador DTN pode alcançar diversos nós e não passar a custódia de uma mensagem, decidindo adiar a transmissão na espera que um nó específico seja alcançado em algumas horas.

2.1 Protocolos de roteamento

A liberdade que a DTN tem para decidir em que ocasião uma mensagem deve ser encaminhada ou armazenada deu origem a vários algoritmos. A seguir destacaremos os algoritmos Epidemic, Spray And Wait, First Contact, Direct Delivery, Prophet e Maxprop.

2.2 Epidemic

O roteamento Epidemic é historicamente o primeiro algoritmo de roteamento DTN. Segundo [7] é um algoritmo bem simples e se comporta como uma enchente na rede. No algoritmo Epidemic cada nó replica sua mensagem para os nós que ele contactar no caminho e que não possuem a cópia dessa mensagem. A distribuição da mensagem é transitiva ao longo de redes ad hoc, e as mensagens eventualmente alcançam seu destino.

Pela decisão de replicar a mensagem por toda a rede, esse algoritmo causa uma elevada sobrecarga, e o grande número de cópias da mensagem que trafega pela rede pode causar congestionamentos. Contudo, ele possui uma alta taxa de entrega. Esse processo é muito similar à difusão de uma epidemia. Um indivíduo portador de uma doença, ao ter contato com outro indivíduo não contaminado, transmite a mesma. Essa semelhança permite que trabalhos realizados para modelar a propagação de uma epidemia possam ser usados para modelar DTN's epidêmicas.

Como vantagem do uso do algoritmo de roteamento Epidemic, podemos citar a alta taxa de entrega por conta de múltiplas cópias de uma mensagem trafegar pela rede. Numa situação de emergência, o uso deste algoritmo para entrega de uma mensagem urgente pode significar que a mensagem seja entregue em tempo oportuno. Como desvantagem mais mensagens são trafegadas, mais recursos de memória são utilizados no buffer de cada nó e uma quantidade maior de energia será gasta durante as transmissões. Essa desvantagem pode se tornar crítica em um sistema em que os nós tenham recursos limitados de buffer e bateria.

Como armazenar e transmitir mensagens consome energia, bem como métricas tradicionais de desempenho,

como ciclos de CPU, memória e largura de banda, é importante equilibrar o consumo de todos os recursos do sistema na transmissão de mensagens para o seu destino final.

2.3 Spray And Wait

Os algoritmos de roteamento baseados em epidemia possuem uma alta probabilidade de entrega, porém eles gastam muita energia, o que pode degradar significativamente suas performances [8]. Além disso, os esforços realizados para reduzir significativamente o overhead desses algoritmos acabam por aumentar o tempo de entrega das mensagens.

O algoritmo Spray And Wait também é baseado em epidemia mas ele limita o encaminhamento cego que o algoritmo Epidemic realiza. Ele associa um número M que indica o máximo de cópias disponíveis de uma mensagem trafegando na rede.

Na fase inicial de Spray (pulverizar), o nó origem inicialmente pulveriza um número M de cópias da mensagem para M nós distintos. Após receberem a cópia da mensagem, todos os M nós entram na fase Wait (espera) e aguardam até que aconteça a transmissão direta para o nó destino. Existem dois tipos de algoritmos Spray and Wait. No Source Spray and Wait, o nó origem envia todas as M cópias da mensagem para os primeiros M nós distintos que ele encontra.

No Binary Spray and Wait, o nó origem inicialmente começa com M cópias da mensagem. Quando ele encontra o primeiro nó com nenhuma das cópias então o nó origem encaminha para ele $(M/2)$ cópias da mensagem e mantém $(M/2)$ cópias armazenadas. Então esse processo se repete para ambos os nós que possuem $(M > 1)$ cópias da mensagem, e quando um nó fica apenas com uma mensagem ele entra no modo de espera até que aconteça a transmissão direta para o nó destino.

Segundo [9], sob alta ou baixa carga o uso do Spray And Wait resulta em bem menos transmissões e atrasos menores do que algoritmos baseados em inundações, como o Epidemic. O Spray And Wait é um algoritmo altamente escalável, exibindo um desempenho bom e previsível para uma grande variedade de tamanhos de rede, densidades de nós e níveis de conectividade. Além disso, à medida que o tamanho da rede e o número de nós aumentam, o número de transmissões por nó que o Spray and Wait requer para obter o mesmo desempenho diminui.

2.4 First Contact

O algoritmo de roteamento First Contact é um algoritmo bem simples. Quando o nó origem cria uma mensagem, ele verifica quem são os nós que possuem contato com ele nesse momento. De forma aleatória um desses nós é escolhido e a mensagem é transmitida para o mesmo. Se no momento que uma mensagem é criada o nó origem não possui contato com outro nó, ele esperará até estabelecer conexão com algum nó a fim de transmitir a mensagem para o mesmo.

Segundo [10], esse algoritmo funciona mal em topologias não triviais pois a escolha do próximo salto é

realizada totalmente de forma aleatória e, ao longo do caminho selecionado, a mensagem pode não ter um progresso até o destino.

Uma mensagem também pode oscilar entre um conjunto de nós (especialmente quando frequentes contatos acontecem entre um conjunto pequeno de nós) sem alcançar o destino. Esse algoritmo requer apenas um conhecimento local sobre a rede, e sua implementação é bem simples.

2.5 Direct Delivery

Direct Delivery é o algoritmo de roteamento mais simples de todos. Um nó A , quando encontra o nó B , só encaminha uma mensagem para ele se B for o destinatário da mensagem. Nesse esquema o atraso de entrega pode ser ilimitado pois não há garantia que o nó A vai encontrar o nó B pelo caminho.

Em cenários limitados quanto à bateria, tamanho de buffer dos nós e largura de banda para as transmissões, esse algoritmo se destaca por realizar apenas uma transmissão por mensagem [11]. O algoritmo Direct Delivery funciona de forma similar às comunicações do Exército Brasileiro, tendo em vista que quando uma mensagem é criada durante uma operação militar, sua custódia só é repassada para o destinatário da mesma.

2.6 Prophet

Para aumentar a probabilidade de entrega e reduzir o desperdício de recursos de rede que acontece no roteamento Epidemic, um novo tipo de protocolo de roteamento foi proposto e chamado de PROPHET [12].

No PROPHET, se um nó visitou uma localidade várias vezes então existe uma possibilidade que esse padrão se repita no futuro. Nesse algoritmo cada nó usa uma métrica de probabilidade chamada previsibilidade de entrega para transferir mensagens para nós de confiança. Essa previsibilidade é associada em cada nó A para cada nó B de destino.

O protocolo de roteamento PROPHET é preferível em situações nas quais alguns dos nós móveis criam padrões de conectividade que não são completamente aleatórios. Os dispositivos móveis sem fio portados por humanos criam tais padrões de mobilidade através de atividades periódicas diárias ou semanais.

2.7 Maxprop

Segundo [13] o protocolo de roteamento MaxProp usam-se vários mecanismos em conjunto para aumentar a taxa de entrega e diminuir a latência das mensagens entregues. O MaxProp também faz uso de mecanismos para definir a ordem na qual os pacotes são transmitidos e excluídos. De acordo com [14], no roteamento MaxProp cada nó inicialmente define uma probabilidade de encontro com todos os outros nós da rede e, então, troca esses valores com os seus nós vizinhos.

No núcleo do protocolo MaxProp existe uma lista classificada com o custo atribuído a cada destino. O custo é uma estimativa da probabilidade de entrega. O valor da

probabilidade é usado para calcular o custo do caminho de destino. Cada nó encaminha mensagens pelo caminho de menor custo. MaxProp atribui uma prioridade alta para novas mensagens e encaminha primeiro as que possuem uma contagem de saltos baixo. Além disso o MaxProp notifica todos os nós a respeito das mensagens que foram entregues, para tentar impedir que a mesma mensagem seja entregue duas vezes.

Quando o buffer está cheio, este algoritmo descarta a mensagem que possui o caminho mais custoso. MaxProp possui baixa performance quando os nós possuem tamanho de buffer pequeno.

3. CAVALARIA MECANIZADA

3.1 Pelotão de Cavalaria Mecanizado

Segundo [15] o Pelotão de Cavalaria Mecanizado é a unidade básica das forças mecanizadas e constitui a peça de manobra do Esquadrão de Cavalaria Mecanizado. Este pelotão possui grande flexibilidade, tendo em vista a variada gama de viaturas e armamentos de que dispõe.

O Pelotão de Cavalaria Mecanizado é constituído por cinco grupos: Grupo de Exploradores, Grupo de Comando, Grupo de Combate, Seção VBR e Peça de Apoio, conforme o organograma da Fig. 1.

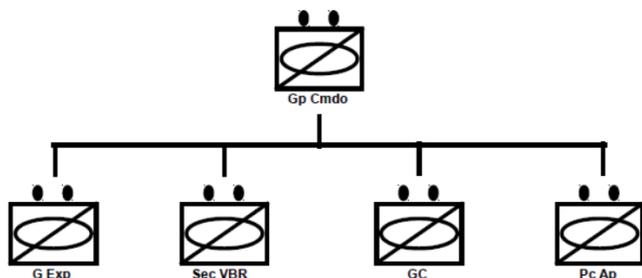


Fig. 1 – Organograma do Pel C Mec

3.2 Composição do Pel C Mec

A Fig. 2 ilustra a composição do Pel C Mec. As quatro primeiras viaturas formam a 1ª e 2ª Patrulhas do Grupo de Exploradores. São compostas por jipes, cada um com três militares. Logo atrás vem mais um jipe com três militares representando o Grupo de Comando. Neste jipe está o Comandante do Pelotão. O primeiro jipe de cada patrulha e o jipe do Comandante do Pelotão possuem uma metralhadora 7,62mm (MAG).

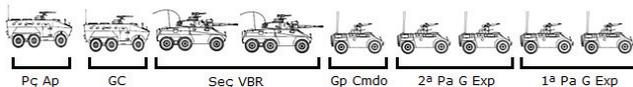


Fig. 2 – Composição do Pel C Mec

Mais atrás temos duas Viaturas Blindadas sobre Rodas (VBR), cada uma com três militares. Na primeira VBR encontra-se o adjunto do Pel C Mec. Essas viaturas são os blindados Cascavel. À retaguarda ainda temos o Grupo de Comando formado por nove militares, que vem em um blindado do tipo Urutu.

A última viatura é a Peça de Apoio. É uma viatura que transporta cinco militares e possui um morteiro 81mm.

3.3 Operações do Pel C Mec

Quando enquadrado no Esquadrão de Cavalaria Mecanizado, as possibilidades do Pel C Mec são:

- participar de operações de reconhecimento;
- participar de missões de segurança;
- realizar operações de contra-reconhecimento;
- realizar operações ofensivas e defensivas;
- realizar ligações de combate;
- ser empregado na segurança da área de retaguarda – SEGAR;
- realizar operações de junção;
- executar ações contra forças irregulares;
- cumprir missões em um quadro de garantia da lei e da ordem, mesmo atuando de forma descentralizada, em reforço aos Batalhões de Infantaria; e
- executar operações tipo Patrulha.

3.4 Esquadrão de Cavalaria Mecanizado

O Esquadrão de Cavalaria Mecanizado é composto por três Pelotões de Cavalaria Mecanizado e mais uma Seção de Comando (Logístico). Na Fig. 3 está descrita a composição de um Esquadrão. A Seção de Comando do Esquadrão é formada por um blindado Cascavel, uma viatura Urutu e dois caminhões 5 Ton 6x6.

Todas as viaturas possuem um rádio com alcance de 8 quilômetros, com exceção dos rádios do Comandante do Esquadrão, Comandante do Pelotão e do Adjunto que possuem alcance de 20 quilômetros. O Esquadrão possui cinco redes de comunicação, a saber:

- Rede de Comunicações dos Grupos de Exploradores;
- Rede de Comunicações das Seções VBR;
- Rede de Comunicações dos Pel C Mec;
- Rede de Comunicações do Esqd C Mec; e
- Rede de Comunicações da Seção de Comando (Logístico).

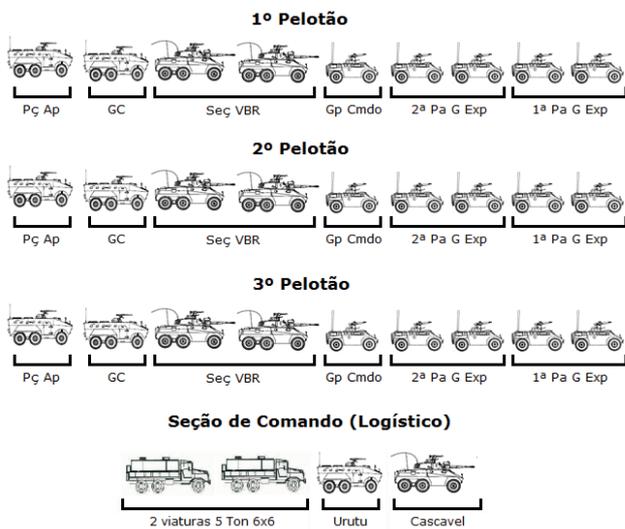


Fig. 3 – Composição do Esqd C Mec

4. MODELOS DE BATERIA

As propriedades mais importantes de uma bateria são a sua voltagem (expressa em Volts, V) e sua capacidade (geralmente expressa em Ampere-hora, Ah). O produto dessas duas propriedades é a medida da energia armazenada na bateria.

Para uma bateria ideal, a voltagem permanece constante ao longo do tempo até o momento que a bateria é descarregada, então a voltagem cai para zero. No caso ideal a capacidade é a mesma para cada carga da bateria. Contudo a realidade é diferente: a voltagem cai durante a descarga e a capacidade efetivamente percebida é menor sob uma carga maior. Esse fenômeno é denominado efeito taxa de capacidade.

No caso ideal é fácil calcular o tempo de vida de uma bateria. O tempo de vida (L) no caso de uma carga constante é calculado através da divisão da capacidade (C) pela corrente de carga (I), conforme Eq. 1.

$$L = \frac{C}{I} \quad (1)$$

$$L = \frac{a}{I^b} \quad (2)$$

Um dos efeitos que desempenham um papel importante é o efeito de recuperação da bateria. Este é o efeito na qual a bateria pode recuperar alguma da sua capacidade energética durante períodos de inatividade. Essa característica aumenta o tempo de vida útil da bateria.

Segundo [17] uma bateria é constituída de células em série, paralelas ou a combinação de ambas. Cada célula é

formada por dois eletrodos: um anodo e um catodo, separados por um eletrólito. Durante a descarga (fase que a bateria fornece corrente elétrica a um circuito externo), o anodo fornece elétrons para o circuito externo enquanto o catodo recebe elétrons desse circuito. Esses elétrons se originam das reações eletroquímicas e são denominados espécies eletroativas.

Na Fig. 4 são apresentados os diferentes estados de operação de uma bateria. Segundo [17] quando a bateria está totalmente carregada a superfície do eletrodo contém a concentração máxima de espécies eletroativas, existindo uma distribuição uniforme em toda a região linear de comprimento (w) do eletrólito conforme a Fig. 4 (A).

Quando uma carga é conectada aos terminais da bateria, inicia-se o processo de descarga da mesma, ocorrendo um fluxo externo de elétrons entre os eletrodos. Nesse processo as reações eletroquímicas causam a redução do número de espécies eletroativas próximas ao eletrodo.

Na Fig. 4 (B) é observada a difusão de espécies em direção ao eletrodo com o intuito de reequilibrar a concentração. Segundo [18], quanto mais alta for a corrente de descarga, menor será a concentração das espécies eletroativas na superfície do eletrodo.

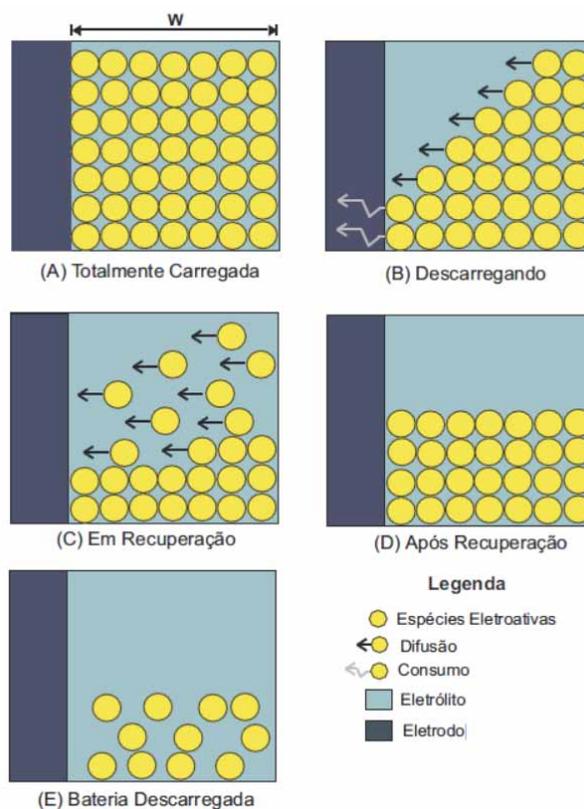


Fig. 4 – Diferentes estados de operação da bateria [17]

A tensão da bateria é reduzida à medida que a concentração diminui. Quando a tensão da bateria atinge um limite inferior ao valor de corte (cutoff threshold), as reações eletroquímicas não podem mais ocorrer e a bateria para de fornecer carga ao sistema. Nesse momento, a bateria está indisponível mas não está completamente descarregada, conforme mostrado na Fig. 4 (E).

Segundo [17], em qualquer momento, antes da tensão atingir o limite inferior ao valor de corte, é possível ocorrer o efeito de recuperação, o que aumenta a vida útil da bateria. Isso ocorre quando a corrente exigida na bateria é reduzida e há a difusão das espécies eletroativas, Fig. 4 (C), fazendo com que a concentração próxima à superfície do eletrodo aumente, até o gradiente de concentração ser anulado. Neste momento a concentração das espécies apresenta novamente uma distribuição uniforme, mas com um valor de capacidade menor, o que indica que ocorreu o efeito de recuperação da capacidade da bateria, conforme Fig. 4 (D).

Os modelos de bateria são criados para a captura das características e funcionamento de uma bateria real, considerando suas operações de carga e descarga. Eles são bastante úteis quando se pretende analisar o comportamento de descarga em projetos de sistemas alimentados por baterias.

Segundo [17] existem vários modelos de estado de carga de baterias com diferentes características e complexidade distintas. Existem os modelos estocásticos [19] que modelam o comportamento da bateria como um processo estocástico discreto no tempo em que o estado do processo representa o estado de carga da bateria; modelos eletroquímicos [20] que são baseados em equações diferenciais parciais complexas que exigem informações específicas da bateria o que dificulta muito a modelagem de determinados tipos de baterias; os modelos elétricos [21] que possuem uma caracterização rigorosa dos componentes do modelo como, por exemplo, tensão de circuito aberto, autocarga, dependências como temperatura, número de ciclos, corrente, entre outras; e finalmente os modelos analíticos que se destacam por serem simples de implementação e relativamente rápidos na execução, quando comparados aos modelos anteriores.

Muitos modelos analíticos de baterias podem incluir modelos de carga constante e de carga variável e conseguem capturar o efeito de taxa de capacidade e o efeito de recuperação. Esses modelos são flexíveis em relação à implementação e podem ser facilmente configurados para diferentes tipos de baterias. Por conta disso, esses modelos foram escolhidos para serem utilizados nas simulações desse trabalho.

Um modelo de bateria analítica baseado na difusão dos íons no eletrólito foi desenvolvido por Rakhmatov e Vrudhula em 2001 [16]. O modelo descreve a evolução da concentração das espécies eletroativas no eletrólito para prever a vida útil da bateria sob uma determinada carga.

Segundo [22], o modelo de bateria Rakhmatov-Vrudhula é um modelo analítico mais realista que o linear pois consegue capturar o efeito de taxa de capacidade e o efeito de recuperação. Esse modelo tenta estimar o tempo de vida de uma bateria utilizando apenas dois parâmetros específicos, conforme podemos verificar na Eq. 3. O parâmetro α está relacionado à capacidade da bateria, e o parâmetro β_2 ao comportamento não linear durante os períodos de carga e descarga.

$$\alpha = \sum_{k=1}^n 2I_{k-1} A(L, t_k, t_{k-1}, \beta_2) \quad (3)$$

Segundo [22], a Eq. 3 descreve o impacto do perfil de descarga no tempo de vida da bateria, onde I_{k-1} é a corrente de descarga durante o período k-1. A função A calcula o impacto do comportamento não linear na descarga da bateria, onde L é o tempo de vida da bateria, t_k é o tempo de duração do período k e t_{k-1} é o tempo de duração para o período k-1 [16].

5. METODOLOGIA E SIMULAÇÕES

Será avaliado o desempenho dos algoritmos DTN segundo os seguintes aspectos:

- tempo de vida da rede;
- probabilidade de entrega de mensagens;
- tempo médio de entrega de mensagens;
- sobrecarga de mensagens na rede.

Para avaliar o tempo de vida da rede, será definida uma métrica que analisa a quantidade de nós vivos na rede e como estes se comportam ao longo das simulações quando o número de mensagens gerado nela aumenta. Nessa métrica, o tempo de vida da rede é definido pelo intervalo entre o início da simulação até o momento que 60% dos nós tenham esgotado totalmente os recursos de bateria. Desta forma, pretende-se analisar quais dos protocolos consegue manter uma maior quantidade de nós vivos em um tempo médio de simulação.

5.1 Ambiente de Simulação

As simulações foram realizadas utilizando a versão 1.6.0 do The Opportunistic Network Environment (The ONE) [23], um simulador baseado em eventos discretos, específico para redes DTN [24]. O The ONE é um projeto com apoio de vários institutos como o Nokia Research Center e o EIT ICT Labs.

Ele foi desenvolvido em Java e tem a capacidade de simular o movimento de nós usando diversos modelos de movimento. O The ONE já possui alguns modelos de movimento prontos para uso mas também permite a criação de outros modelos. Outra característica do The ONE é a possibilidade de rotear mensagens entre os nós usando algoritmos de roteamento DTN.

Além disso, o The ONE possui uma interface gráfica que permite acompanhar em tempo real os nós se movendo pelo cenário e as mensagens sendo trafegadas pela rede. O The ONE também pode importar arquivos externos com dados de mobilidade e trocas de mensagens. Ao final da simulação, ele pode gerar uma grande variedade de relatórios sobre as estatísticas gerais dos movimentos dos nós, das mensagens trafegadas na rede, do uso dos buffers dos nós, do gasto de energia nos nós, entre outros.

Segundo [22], o simulador The ONE permite empregar mapas reais em sua execução, através de um conjunto de

dados formatados, conhecidos como o formato Well Known Text. Por meio dele, é possível importar todas as restrições de movimento das entidades, tais como, estradas, ruas e pontos de interesse. Com esse tipo de restrição, as simulações tendem a obter resultados mais próximos da realidade enriquecendo, assim, a pesquisa. Para utilizar as restrições, o simulador contém um padrão de mobilidade chamado Shortest Path Map-Based Movement que é derivado do modelo Random Waypoint [25]. Neste, nos pontos de decisões, o nó escolhe um destino aleatoriamente, e, baseando-se nas restrições do mapa, caminha até ele utilizando o menor caminho encontrado através do algoritmo de Dijkstra.

Além de todas as características mencionadas acima, O simulador The ONE foi escolhido por ter bastante suporte técnico através de uma comunidade e por permitir a execução de grandes conjuntos de cenários concomitantes e por possuir scripts fáceis para a criação de cenários.

5.2 Configuração do Ambiente

Como interface de rede das entidades nas simulações, foi utilizado o rádio handheld Falcon III da empresa Harris. Sua escolha se deve pelo fato de ser largamente utilizado em operações militares, inclusive pelo Exército Brasileiro.

O rádio utilizado nos experimentos é o Rádio VHF Handheld Falcon III. Para que fossem obtidos os seus reais valores de consumo de energia em cada operação de escaneamento e transmissão, o rádio foi ligado em uma bateria externa e foram realizadas as medições. O Rádio Falcon III trabalha em 10,8V, possui capacidade energética de 4,8 Ah e trabalha nas potências de 0,25W, 2W e 5W. Por uma proteção de segurança do rádio, não foi possível realizar medições para a potência de 5W. Na Tabela 1 estão as medições encontradas.

Tab 1: Gasto de energia do Rádio Falcon III

Potência (W)	Escaneamento (mA)	Transmissão (mA)
0,25	170	950
2	230	1500

Como uma aproximação, iremos supor que há uma relação linear entre potência de transmissão e consumo de energia. Sendo assim as fórmulas do gasto de energia nas operações de escaneamento e transmissão são equações de retas. A partir dos dados da Tabela 1, pode-se calcular as Eq. 4 e Eq. 5. Essas equações calculam respectivamente os gastos de energia nas operações de escaneamento e transmissão através do valor da Potência de Transmissão. Essas fórmulas serão úteis em alguns cenários analisados. Com as características do rádio consolidadas, a precisão dos resultados nos levará à segurança de dados mais realísticos.

$$G_S = 170 + \frac{240}{7}(P_T - 0,25) \quad (4)$$

$$G_T = 950 + \frac{2200}{7}(P_T - 0,25) \quad (5)$$

Os protocolos de roteamento utilizados foram os seguintes: Epidemic, Spray and Wait, First Contact, Prophet, Maxprop e Direct Delivery. O Direct Delivery representa bem as comunicações atuais da Cavalaria Mecanizada onde uma mensagem só é roteada para outro nó se este for o nó destinatário da mensagem. Foi criada a classe Energy.java com as funções de gastos de energia. Essa classe é usada por todas as classes de protocolos de roteamento do The ONE.

Para o protocolo de roteamento Spray and Wait, utilizou-se o espalhamento binário. O número inicial de cópias escolhido foi de 6 mensagens, valor padrão para o simulador.

O modelo de bateria utilizado foi o Rakhmatov-Vrudhula por ser um modelo analítico mais realista que o linear por conseguir capturar o efeito de taxa de capacidade e o efeito de recuperação da bateria. O conjunto de parâmetros para o modelo de bateria Rakhmatov-Vrudhula foi baseado no modelo de Sausen [17] sendo o valor padrão correspondente ao tipo alcalina, cuja constante de não linearidade β_2 é definida como 4074. Essa constante é utilizada no cálculo de suas operações.

A quantidade de nós da simulação depende da escolha da tropa a ser utilizada. Para um Pelotão de Cavalaria Mecanizado foram utilizados 9 nós, enquanto que o Esquadrão de Cavalaria Mecanizado faz uso de 31 nós.

Na simulação foi utilizado um mapa no formato wkt da cidade do Rio de Janeiro com cerca de 30km de largura e 30km de comprimento. Foi utilizado o site OpenStreetMap para exportar a área desejada em um arquivo de formato osm e em seguida esse arquivo foi convertido para formato wkt utilizando-se a ferramenta osm2wkt disponível no site do The ONE. O uso de unidades de tropa da Cavalaria Mecanizada do Exército Brasileiro em um cenário urbano está de acordo com a operação da Cavalaria que visa cumprir missões de GLO (Garantia da Lei e da Ordem), mesmo atuando de forma descentralizada.

Para a transmissão de mensagens, foi utilizada a velocidade de transmissão de 1,2kbps o que se assemelha ao uso da forma de onda Narrowband, desenvolvida no Projeto Rádio Definido por Software do Ministério da Defesa (RDS-Defesa). O tamanho das mensagens a serem trafegadas pela rede varia entre 300 bytes e 500 bytes, o que condiz com o tamanho mínimo das mensagens trafegadas no software de Comando e Controle C2 em Combate, utilizado nas operações do Exército Brasileiro.

A Fig. 5 ilustra o modelo de 2 raios [26] que se baseia em ótica geométrica para o cálculo da intensidade do campo no receptor. São mostrados dois raios sendo lançados pela antena transmissora e o seu recebimento na antena receptora, onde são combinados em um único sinal.

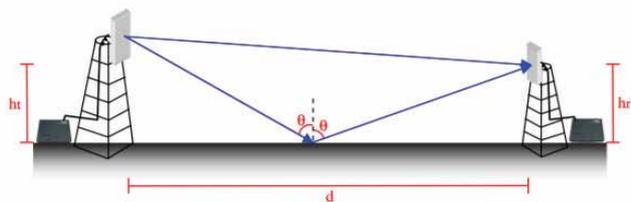


Fig. 5 – Modelo de Propagação de 2 raios [27]

Segundo [27] após algumas simplificações, a potência recebida na propagação em Terra Plana é dada pela Eq. 6. Essa fórmula será utilizada em alguns cenários analisados.

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{h_T h_R}{d^2} \right)^2 \quad (6)$$

$$P_T \propto d^4 \quad (7)$$

Da Eq. 6, mantendo todas as demais variáveis constantes, temos a Eq. 7, onde P_T (potência de transmissão) é proporcional a d^4 , onde d é o alcance.

Aqui cabe uma observação: o efeito do desvanescimento lento está sendo modelado por uma função determinística baseado no modelo de propagação de terra plana. Isso foi considerado suficiente para a inserção do efeito do aumento da distância entre terminais sobre os enlaces. Pode ser considerado que os esquemas de equalização, entrelaçamento e correção de erros poderão resolver os efeitos advindos do fenômeno multipercurso.

Na Tabela 2 estão definidos os parâmetros utilizados na simulação:

Tab 2: Parâmetros de configuração da simulação

Atributo	Valor
Tempo de simulação	14400 segundos
Capacidade inicial das baterias	4,8Ah
Tamanho das mensagens	300 a 500 bytes
Tamanho do buffer	10MB
Intervalo de varredura	10 segundos
Velocidade de deslocamento	36 a 54 Km/h
Modelo de movimento	ShortestPathMapBasedMovement
Intervalo entre novas mensagens	20 segundos
Tempo de vida das mensagens	20 minutos

5.3 Cenário analisado

Para conduzir a avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento escolhidos, foram realizadas simulações em um cenário pertinente.

Nesse cenário serão definidos como potência máxima e alcance máximo do rádio os valores de 5W e 8km respectivamente. A partir daí, os valores de potência serão diminuídos até chegar no valor mínimo da potência do rádio que é de 0,25W.

Através das Eq. 4, Eq. 5 e Eq. 7, para cada valor de potência de transmissão os valores dos respectivos alcances, gastos de escaneamento e gastos de transmissão foram calculados. Os valores obtidos estão na Tabela 3.

Nesse cenário considera-se que o operador do rádio Falcon III pode variar os valores de potência de transmissão para os valores sugeridos na Tabela 3 e, conseqüentemente, variar o alcance máximo do rádio. O objetivo desse cenário é analisar o desempenho de cada algoritmo de roteamento para cada potência sugerida.

Tab 3: Potência e Alcance médio do rádio nas simulações

Potência (W)	Alcance (m)	Escaneamento (mA)	Transmissão (mA)
0,25	3783	170	950
0,50	4499	179	1029
0,75	4979	187	1107
1,00	5350	196	1186
1,50	5921	213	1343
2,00	6362	230	1500
2,50	6727	247	1657
3,00	7041	264	1814
3,50	7318	281	1971
4,00	7566	299	2129
4,50	7792	316	2286
5,00	8000	333	2443

6. RESULTADOS

O número de simulações utilizado nos dois cenários foi definido baseado na métrica apresentada por [28], onde as simulações devem terminar quando o valor de δ atingir valor próximo de 1 de acordo com a Eq. 8, onde β é o número de simulações e σ é o desvio padrão da amostra baseada nos β valores.

$$\frac{\sigma}{\sqrt{\beta}} < \delta \quad (8)$$

O intervalo de confiança da simulação ficou em torno de 1% para os parâmetros avaliados com probabilidade entre 95% a 99%. Foi necessário executar em torno de 300 simulações para atingir esse intervalo de confiança.

6.1 Tempo de Vida da Rede

Este quesito teve como objetivo verificar qual dos algoritmos de roteamento analisados levará a um maior tempo de vida da rede. Leva-se em consideração que esta métrica é definida pela quantidade de nós vivos na rede e como estes se comportam ao longo das simulações quando a potência de transmissão aumenta e, conseqüentemente, os gastos de energia nas operações de escaneamento e transmissão de dados também aumentam.

Para a montagem de alguns gráficos, será considerado como tempo de morte da rede como o tempo total de simulação (14400 segundos ou 4 horas), ou seja, a rede se manteve viva até o fim da simulação. Isso se deve ao fato de que, nas execuções de alguns cenários, todos os nós permaneceram com capacidade de bateria suficiente para realizar transmissões de mensagens e escaneamento da rede até o término das simulações.

O tempo de vida da rede é definido pelo intervalo de tempo entre o início da simulação até o momento em que 60% dos nós tenham esgotado os seus recursos de bateria. Assim, nesta etapa verifica-se que algoritmos de roteamento conseguem manter uma maior quantidade de nós com recursos de bateria por mais tempo. Algumas simulações foram finalizadas sem que o limiar de 60% dos nós mortos fosse alcançado. Para fins de análise desses casos, durante a confecção dos gráficos foi considerado que 60% dos nós esgotaram seus recursos no último segundo de vida da rede (14400 segundos).

Averigua-se, no gráfico da Fig. 16 até a potência de 0,25W, todos os algoritmos de roteamento mantiveram mais de 60% dos nós vivos até o fim da simulação. A partir de 0,5W o algoritmo Epidemic esgota os recursos de bateria de 60% de seus nós faltando 1 minuto para o fim da simulação. Neste cenário, o algoritmo Epidemic possui desempenho pior que todos os outros algoritmos para todas as potências simuladas.

Percebe-se também que o algoritmo de roteamento que mantém a rede viva por mais tempo foi o Direct Delivery. A rede se manteve viva até o uso da potência de 3W.

Considerando todos os algoritmos de roteamento, é possível concluir que o Direct Delivery é a melhor escolha quando se busca um maior tempo de vida da rede, enquanto que o Epidemic possui o pior desempenho nesse quesito.

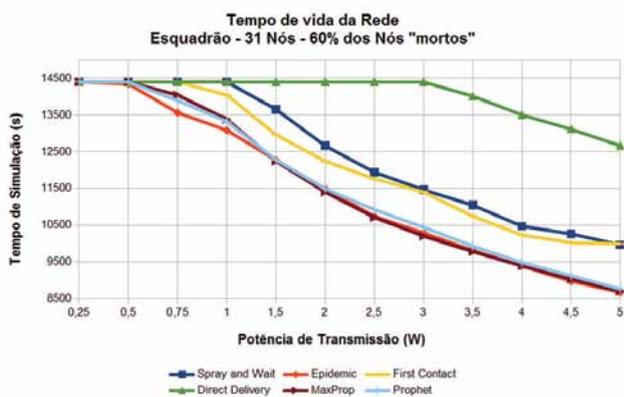


Fig. 6 – Tempo de Vida da Rede

6.2 Probabilidade de Entrega de Mensagens

Essa métrica é importante no sentido de elucidar o comportamento dos algoritmos DTN em um cenário de recursos limitados de bateria em relação à probabilidade de entrega de mensagens. Existem muitos trabalhos na literatura que estudam o comportamento desses algoritmos em cenários de limitação de buffer e alcance, mas são poucos que analisam a questão do gasto de energia.

Percebe-se pelos gráficos da Fig. 7 que quase todos os algoritmos obtiveram seu ponto ótimo na potência mínima de 0,25W, com exceção do First Contact cujo ponto ótimo foi em 0,5W. Com o aumento da potência e consequentemente aumento dos gastos de energia, a falta de bateria contribuiu significativamente para a queda de desempenho de todos os algoritmos durante a simulação. Podemos citar nesse caso o desempenho do algoritmo Maxprop que para a potência de 0,5W obteve probabilidade de entrega de mensagens na ordem de 62%, enquanto que para a potência máxima de 5W, essa probabilidade de entrega caiu para aproximadamente 38%, uma mudança bem significativa.

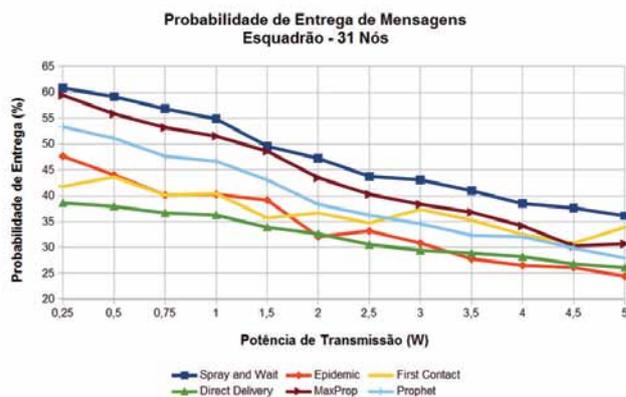


Fig. 7 – Probabilidade de Entrega de Mensagens

O algoritmo Direct Delivery teve o pior desempenho na entrega das mensagens. Mesmo tendo uma sobrevida maior dos nós na rede em relação aos demais algoritmos, nota-se que essa probabilidade de entrega baixa se deve às limitações do mesmo nas estratégias de encaminhamento das mensagens.

O algoritmo Epidemic costuma ter um desempenho muito bom em cenários que não possuem limitações de tamanho de buffer, como é o nosso cenário. Por sua estratégia de um nó entregar uma cópia de cada uma de suas mensagens para todos os nós que for encontrando no caminho, geralmente a probabilidade de entrega de mensagens se torna alta. No nosso cenário de limitações de recursos de bateria, por realizar muitas transmissões de mensagens e assim esgotar a bateria dos nós antes dos demais algoritmos, o desempenho do Epidemic caiu drasticamente na entrega das mensagens. Nota-se que o algoritmo Epidemic só foi melhor que o Direct Delivery, se tornando pior que este para as simulações das potências mais altas.

O Spray and Wait se destacou como o melhor algoritmo para todas as potências simuladas. Essa tendência se evidenciou ainda mais com o aumento da potência, tendo seu desempenho se acentuado em relação ao Maxprop. Percebe-se que o algoritmo Spray and Wait possui maior escalabilidade por ter uma estratégia de roteamento menos complexa que as estratégias do Maxprop e Prophet e por causar uma inundação controlada na rede limitando, assim, o número de cópias máximo que uma mensagem pode ter na rede.

Nota-se que para a potência máxima de 5W, cenário este que possui o maior gasto de energia nas operações de escaneamento da rede e transmissão de mensagens, um algoritmo simples como o First Contact, cuja estratégia de roteamento é repassar a custódia de uma mensagem para o primeiro contato que encontrar pelo caminho, obteve um excelente desempenho sendo o segundo melhor algoritmo, só perdendo para o Spray and Wait. Percebe-se que para cenários com poucos nós e potência máxima, cujo tempo de vida dos nós é baixo, uma estratégia simples de rotear as mensagens para o primeiro nó disponível encontrado pelo caminho se mostrou bem eficiente.

6.3 Tempo Médio de Entrega de Mensagens

Numa operação militar não basta termos a garantia de que uma mensagem será entregue, o tempo que ela leva para chegar ao destinatário é um fator preponderante nesse caso. Em situações críticas, onde mensagens com prioridade urgente são trafegadas na rede, pretende-se utilizar algoritmos de roteamento que minimizem o tempo de entrega dessas mensagens.

Conforme gráfico da Fig. 8, o Epidemic obteve o pior desempenho para dez das doze potências simuladas. Nas potências de 3W e 5W, o algoritmo Maxprop apresentou o maior tempo de entrega.

Durante toda a simulação, os algoritmos Direct Delivery e Spray and Wait obtiveram comportamentos similares em relação ao tempo médio de entrega de mensagens. Para as potências de 0,25W até 1,5W, o Spray and Wait obteve o melhor desempenho, com tempo médio de entrega de mensagens variando entre 4 a 10 minutos. A partir daí, para todas as potências de 2W até 5W, o Direct Delivery obtém tempo de entrega sempre 1 minuto abaixo do tempo de entrega do Spray and Wait.



Fig. 8 – Tempo Médio de Entrega de Mensagens

A partir de 3W, como o tempo de vida da rede é menor, o First Contact também se destaca em termos de tempo de entrega de mensagens pela sua estratégia simples de roteamento. Prophet e Maxprop que possuem estratégias custosas, obtém desempenho similar, tendo tempo de entrega na faixa dos 20 minutos até a potência de 3W.

O Maxprop, que obteve um excelente desempenho em termos de probabilidade de entrega, deixou a desejar nesse

questito com um tempo médio de entrega de mensagens elevado em relação aos demais algoritmos. Aqui cabe ressaltar que estratégias mais simples de roteamento e menos danosas à rede obtiveram tempo de entrega menor.

6.4 Sobrecarga da Rede

Este quesito teve como objetivo verificar qual dos algoritmos de roteamento levará a um melhor desempenho da simulação em termos de sobrecarga da rede. Leva-se em consideração que esta métrica é definida pela quantidade de mensagens criadas na rede.

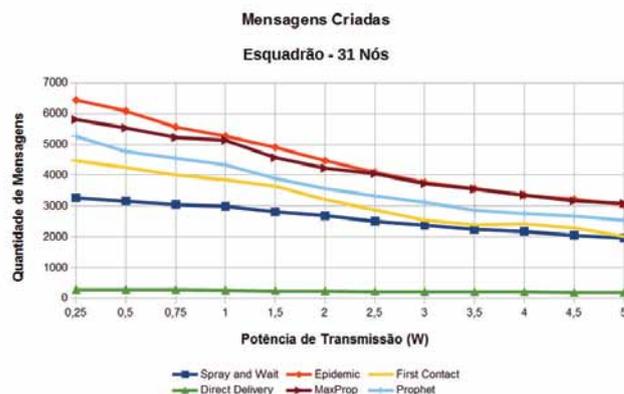


Fig. 9 – Mensagens Criadas na Rede

Pretende-se analisar como os algoritmos de roteamento se comportam ao longo das simulações quando os gastos de energia aumentam. Espera-se que o aumento do gasto de energia impacte na quantidade de mensagens criadas.

Conforme gráfico da Fig. 9, percebe-se que o algoritmo Direct Delivery se destacou em relação aos demais por sobrecarregar menos a rede. Por conta de sua estratégia de roteamento não realizar cópias de mensagens, o Direct Delivery só trafegou na rede mensagens de nós que estavam vivos no momento da criação da mensagem no nó

Percebe-se novamente o ocorrido na análise do tempo médio de entrega de mensagens. Nota-se que o Epidemic, pela estratégia de inundação de mensagens na rede, e o Maxprop, pela complexidade do algoritmo, obtiveram um mau resultado em relação aos demais gerando maior sobrecarga na rede. Novamente o Spray and Wait se destacou durante toda a simulação por conta de sua estratégia de inundação controlada e o First Contact se destacou no final por conta da simplicidade de sua estratégia perante um cenário de limitação de energia.

7. CONCLUSÃO

Para o tempo de vida da rede, à medida que a potência de transmissão aumenta, o tempo de vida da rede diminui, comportamento já esperado tendo em vista que com o aumento da potência de transmissão, os gastos de energia nas operações de escaneamento e transmissão de dados também aumentam.

O algoritmo Direct Delivery foi o melhor de todos chegando a ter um tempo de vida da rede em torno de 32 minutos a mais que os demais algoritmos para algumas potências simuladas. Esse resultado se deve ao fato do algoritmo Direct Delivery só transmitir uma determinada mensagem quando encontra o nó destinatário da mesma realizando, assim, menos transmissões que os demais algoritmos e conseqüentemente gastando menos energia.

Percebe-se que o algoritmo Epidemic é o que possui pior desempenho e isso se deve ao fato desse algoritmo causar inundações de mensagens na rede gastando mais energia por ter mais transmissões. No geral, os algoritmos Spray and Wait e First Contact se destacaram em relação aos algoritmos Epidemic, Maxprop e Prophet. Essa diferença se deve ao fato dos algoritmos Epidemic, Maxprop e Prophet possuírem estratégias de roteamento que geram mais transmissões de mensagens na rede em relação ao First Contact e Spray and Wait.

Considerando todos os algoritmos de roteamento, é possível concluir que o Direct Delivery é a melhor escolha quando se busca um maior tempo de vida da rede. Em segundo lugar temos o Spray and Wait e o First Contact. O Epidemic possui o pior desempenho nesse quesito.

Para a probabilidade de entrega de mensagens, percebe-se que a maioria dos algoritmos obteve seu ponto ótimo para as potências baixas de 0,25W e 0,5W. Nota-se que com o aumento da potência a falta de bateria contribuiu significativamente para a queda de desempenho de todos os algoritmos durante a simulação. O Maxprop, para a potência de 0,5W, obteve probabilidade de entrega de mensagens na ordem de 62%, enquanto que para a potência máxima de 5W, essa probabilidade de entrega caiu para aproximadamente 38%, uma mudança bem significativa.

Os algoritmos Direct Delivery e Epidemic obtiveram os piores resultados na entrega de mensagens. Mesmo tendo um tempo de vida maior da rede em relação aos demais algoritmos, nota-se que o mau desempenho do Direct Delivery se deve às limitações do mesmo nas estratégias de encaminhamento das mensagens. O Epidemic, por realizar muitas transmissões de mensagens e assim esgotar a bateria dos nós bem antes dos demais algoritmos, teve um desempenho muito ruim na entrega das mensagens.

Os algoritmos Spray and Wait e Maxprop foram os melhores na entrega de mensagens para todas as potências simuladas obtendo resultados na faixa de 60% para as potências mais baixas. Percebe-se que para cenários cujo tempo de vida dos nós é baixo, a estratégia simples do First Contact de rotear as mensagens para o primeiro nó disponível encontrado pelo caminho se mostrou bem eficiente.

Considerando todos os algoritmos de roteamento, é possível concluir que o Spray and Wait é a melhor escolha quando se busca uma maior probabilidade de entrega. Em segundo lugar temos o Maxprop. O Direct Delivery, seguido do Epidemic possuem o pior desempenho nesse quesito.

Para o tempo de entrega das mensagens, o Epidemic, Prophet e Maxprop obtiveram os piores resultados, enquanto que o First Contact teve um bom desempenho para potências altas. O Maxprop, que obteve um excelente desempenho em termos de probabilidade de entrega, deixou a desejar nesse quesito com um tempo médio de entrega de mensagens elevado

em relação aos demais algoritmos. Cabe ressaltar que estratégias mais simples de roteamento e menos danosas a rede obtiveram tempo de entrega menor, com destaque para o Spray and Wait e o Direct Delivery que obtiveram os melhores resultados.

Para a sobrecarga da rede, o Direct Delivery se destacou por sobrecarregar menos a rede por conta de sua estratégia de roteamento de não realizar cópias de mensagens. O Epidemic foi o pior de todos, gerando uma elevada sobrecarga na rede, criando de 16 a 18 réplicas de mensagens para cada mensagem entregue. Mesmo assim, essa sobrecarga da rede não se refletiu em uma maior probabilidade de entrega de mensagens.

O Maxprop, pela complexidade de seu algoritmo, obteve um mau resultado em relação aos demais gerando uma grande sobrecarga na rede. Novamente o Spray and Wait exibiu um ótimo comportamento gerando uma sobrecarga na rede três vezes menor que o algoritmo Epidemic e se destacando, assim, durante toda a simulação por conta de sua estratégia de inundação controlada.

De todos os quesitos analisados, concluímos que o pior dos algoritmos foi o Epidemic por sua estratégia danosa à rede em consumir muitos recursos de energia em menos tempo que os demais algoritmos e, assim, afetar todas as métricas de desempenho. O Direct Delivery, que é usado nas operações militares do Exército Brasileiro exibiu um comportamento bom no tempo de vida da rede e sobrecarga de mensagens mas teve um péssimo desempenho em sua entrega.

O First Contact teve um comportamento mediano; obteve um bom desempenho no tempo de entrega de mensagens, mas um mau desempenho na probabilidade de entrega das mesmas para potências baixas e cenários com mais nós. Ele é mais indicado em cenários de poucos nós e potência alta por sua estratégia simples de roteamento que não causa danos à rede. Os algoritmos Maxprop e Prophet até se destacaram na métrica probabilidade de entrega de mensagens mas tiveram um mau desempenho no tempo de vida da rede, no tempo médio de entrega de mensagens e na sobrecarga da rede.

O destaque foi para o algoritmo Spray and Wait. Ao mesmo tempo que exibiu uma probabilidade de entrega de mensagens e um tempo médio de entrega de mensagens melhor que os demais algoritmos, também obteve um bom desempenho no tempo de vida da rede e sobrecarga da rede. Seus melhores resultados foram para cenários com mais nós evidenciando assim a escalabilidade do algoritmo Spray and Wait.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROODESLAAR, A. Disruption Tolerant Networking in Tactical Communication Networks. 2011. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bachelor Informatica) – UVA, Holanda, 2011.
- [2] FALL, K. Disruption tolerant networking for heterogeneous ad-hoc networks. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), v. 4, p. 2195–2201, 2005.
- [3] LU, Z.; FAN, J. Delay/disruption tolerant network and its application in military communications. 2010 International Conference On Computer Design And Applications, v. 5, p. 231–234, 2010.
- [4] PERI, E. M. Diretriz para a Elaboração da Concepção Estratégica do Exército Brasileiro. Brasília: Estado-Maior do Exército, 2012. 29 p. (Relatório Técnico).
- [5] Manual de Comando e Controle EB20-MC-10.205. 1. ed. Brasília: Estado-Maior do Exército, 2015. 79 p.
- [6] SCOTT, K. Disruption tolerant networking proxies for on-the-move tactical networks. IEEE MILCOM 2005, v. 5, p. 231–234, 2005.

- [7] F. WARTHMAN. Delay-tolerant networks (dtns): A tutorial. Disponível em: <<http://www.warthman.com/projects-IRTF-Interplanetary-Internet-IPNDelay-Tolerant-Networks-DTN-Tutorial.htm>>. Acesso em: 10 jul. de 2018.
- [8] THRASYVOULOS SPYROPOULOS, K. P.; RAGHAVENDRA, C. S. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. *ACM SIGCOMM*, v. 1, p. 252–259, 2005.
- [9] VAHDAT, A.; BECKER, D. Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks. [S.l.: s.n.], 2000. (Relatório Técnico).
- [10] SUSHANT JAIN, K. F.; PATRA, R. Routing in a delay tolerant network. *ACM SIGCOMM*, v. 1, p. 145–158, 2004.
- [11] SPYROPOULOS, T.; PSOUNIS, K. ; RAGHAVENDRA, C. S. Single-copy routing in intermittently connected mobile networks. *IEEE SECON*, v. 1, p. 235–244, 2004.
- [12] DAVIES, E.; GRASIC, S. Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks. [S.l.: s.n.], 2010. (Relatório Técnico).
- [13] BURGESS, J.; GALLAGHER, B.; JENSEN, D. ; LEVINE, B. N. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In: *PROCEEDINGS IEEE INFOCOM 2006. 25TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS*, 1., 2006. Anais... [S.l.]: IEEE, 2006, p. 1–11.
- [14] *IEEE INFOCOM 2006 (IEEE)*, 2016., 2006, Barcelona. *Proceedings...* Barcelona: IEEE, 2006.
- [15] *Regimento de Cavalaria Mecanizado. Manual de Campanha*. 2. ed. Brasília: Estado-Maior do Exército, 2002. 432 p.
- [16] RAKHMATOV, D. N.; VRUDHULA, S. B. K. An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems. In: *IEEE/ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED DESIGN. ICCAD 2001. IEEE/ACM DIGEST OF TECHNICAL PAPERS (CAT. NO.01CH37281)*, 1., 2001. Anais... [S.l.]: IEEE, 2001, p. 488–493.
- [17] SAUSEN, P. S. Gerenciamento integrado de energia e controle de topologia em redes de sensores sem fio. 2008. 123 f. Tese (Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2008.
- [18] DOYLE, T. F. F. M.; NEWMAN, J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell. *The Electrochemical Society*, v. 140, n. 6, p. 1526–1533, 1993.
- [19] PANIGRAHI, D.; CHIASSERINI, C.; DEY, S.; RAO, R.; RAGHUNATHAN, A. ; LAHIRI, K. Battery life estimation of mobile embedded systems. In: *VLSI DESIGN 2001. FOURTEENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON VLSI DESIGN*, 1., 2001. Anais... [S.l.]: IEEE, 2001, p. 57–63.
- [20] J. NEWMAN, K. E. THOMAS, H. H.; WHEELER, D. R. Modeling of lithium-ion batteries. *Power Sources*, v. 1, p. 838–843, 2003.
- [21] CHEN, M.; RINCON-MORA, G. A. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 21, n. 2, p. 504–511, 2006 .
- [22] BATISTA, T. S. Avaliação do Consumo de Energia em Protocolos de Roteamento para Redes Tolerantes a Atrasos e Interrupções. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2011.
- [23] KERÄNEN, A.; OTT, J. ; KÄRKKÄINEN, T. The one simulator for dtn protocol evaluation. In: *IN PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIMULATION TOOLS AND TECHNIQUES (SIMUTOOLS)*, 1., 2009. Anais... [S.l.: s.n.], 2009, p. 57–66.
- [24] PITKANEN, M.; KERANEN, A. ; OTT, J. Message fragmentation in opportunistic dtns. In: *2008 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON A WORLD OF WIRELESS, MOBILE AND MULTIMEDIA NETWORKS*, 1., 2008. Anais... [S.l.]: IEEE, 2008, p. 1–7.
- [25] BETTSTETTER, C.; RESTA, G. ; SANTI, P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 2, n. 3, p. 257–269, 2003.
- [26] DA COSTA RODRIGUES, M. E. Técnicas de Traçado de Raios em Três Dimensões para Cálculo de Campos em Ambientes Interiores e Exteriores. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- [27] NAJNUDEL, M. Estudo de Propagação em Ambientes Fechados para o Planejamento de WLANs. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [28] ROSS, S. M. *Simulation*. 5. ed. Califórnia: Academic Press, 2012. 328 p.