

Escalonador multicritério para sistemas de mensagens militares em redes tolerantes a atrasos e desconexões

Guilherme C Sampaio¹, Gustavo C Sampaio¹, Ronaldo M Salles²

¹Centro Tecnológico do Exército
Av. das Américas, 28705. 23020-470
Rio de Janeiro, RJ

²Instituto Militar de Engenharia (IME)
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 222290-290
nononno@ime.br

RESUMO: As redes militares possuem características como baixa largura de banda, alta mobilidade dos nós, alta latência e taxas de erros elevadas, cenário semelhante ao previsto em uma rede tolerante a atrasos e desconexões (DTN). Nos sistemas de Comando e Controle (C2) atuais, o escalonamento de mensagens é realizado com apenas a precedência da mensagem, de forma que mensagens com baixa precedência podem nunca ser entregues ao destinatário. O objetivo deste artigo é avaliar o emprego de escalonadores multicritérios para sistemas de mensagens militares em uma DTN, com o intuito de maximizar a probabilidade de entrega de mensagens. São propostos dois novos escalonadores de mensagens a serem utilizados em conjunto com os algoritmos de roteamento DTN, em substituição à abordagem de entrega direta de mensagens. Com esses escalonadores será possível a entrega de mensagens com baixa precedência em determinados cenários, mesmo que existam mensagens com precedência mais alta no sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Escalonador de Mensagens. DTN. Comando e Controle. Redes Militares.

ABSTRACT: MILITARY NETWORKS HAVE CHARACTERISTICS SUCH AS LOW Bandwidth, high node mobility, high latency and high error rates, a scenario similar to that predicted in a delay and disruption tolerant network (DTN). In current Command and Control (C2) systems, message scheduling is performed with only message precedence, so messages with low precedence can never be delivered to the recipient. The objective of this work is to evaluate the use of multicriteria schedulers for military message systems in a DTN, in order to maximize the probability of message delivery. Two new message schedulers are proposed to be used in conjunction with DTN routing algorithms to replace the direct message delivery approach. With these schedulers it will be possible to deliver messages with low precedence in certain scenarios, even though there are messages with higher precedence in the system.

KEYWORDS: Message Schedulers. DTN. Command and Control. Military Networks.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de novas tecnologias no cenário de comunicações militares tem se intensificado nos últimos anos. A comunicação entre frações de uma tropa, antes restrita à transmissão de voz analógica, agora conta com transmissão digital, tanto para comunicação de dados como para comunicação de voz, formando, assim, redes de dados em ambiente operacional militar.

Em conformidade com essas novas tecnologias, as aplicações de comando e controle passam por um processo evolutivo onde novas ferramentas como transmissão de vídeo em tempo real, envio de informações geográficas e imageamento aéreo têm sido disponibilizadas para permitir uma melhor consciência situacional.

O protocolo IP, flexível e estável nas comunicações em redes de computadores, esbarra em problemas bem conhecidos quando utilizado em cenários de operações táticas: a alta mobilidade dos nós provoca frequentes desconexões [1], levando à indisponibilidade da rede, muitas vezes por períodos superiores a vários dias.

Além das frequentes desconexões, em [2] estes cenários são descritos como constituídos de rádios militares IP half-duplex funcionando na faixa de frequências de VHF, com baixa largura de banda. A dinâmica desses cenários sugere a utilização de redes MANET (mobile ad-hoc network), porém o Exército Brasileiro [2] não possui ainda equipamentos capazes de prover esse tipo de comunicação.

Com o intuito de permitir as comunicações de dados em cenários desprovidos de infraestrutura estável, foram de-

envolvidas as Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões (DTN), que possuem várias técnicas para permitir a integridade e entrega dos dados em ambientes inóspitos [3].

Em uma DTN são utilizados conceitos bem presentes nas redes MANET, como a mobilidade dos nós e a possibilidade de comunicação através de múltiplos saltos. A possibilidade de encaminhamento de mensagens através de múltiplos saltos aumenta a probabilidade de entrega das mensagens, algo que é fundamental em um ambiente operacional militar.

Neste ambiente, as mensagens a serem trafegadas possuem características distintas entre si, como o tempo de vida da mensagem (TTL), precedência da mensagem, que se dividem entre urgentíssima, urgente, preferencial e rotina, além do remetente e destinatário.

Tradicionalmente, as mensagens militares são escalonadas pelos sistemas de comando e controle, utilizando-se apenas o critério de precedência. Mensagens que possuem pouco tempo de vida e não tem precedência alta, serão preteridas no envio. Outra característica do modelo atual é que as mensagens são entregues diretamente ao destinatário. Se o remetente da mensagem não estabelecer conexão com o destinatário durante o período de validade da mensagem, ela nunca será entregue ao destinatário. Essa abordagem atual pode impactar no sucesso de uma operação militar.

Em virtude disso, faz-se necessário o estudo de outras técnicas de escalonamento, que levem em consideração as características distintas das mensagens no processo de tomada de decisão durante o envio da mesma, bem como o estudo das redes tolerantes a atrasos e desconexões e de

seus inúmeros algoritmos de roteamento, que permitem a passagem de custódia da mensagem para outro nó mais promissor na rede.

2. REDES TOLERANTES A ATRASOS E DESCONEXÕES

2.1 Histórico

Em 1998, VintCerf liderou um grupo de engenheiros e pesquisadores com um projeto de Internet interplanetária. Cerf trabalhava no laboratório de jatos propulsores (JPL) da agência espacial americana (NASA). Segundo [4], tal projeto tinha como principal objetivo conectar dois nós situados em planetas distintos presentes no nosso sistema solar. Cerf foi também co-projetista dos protocolos TCP/IP e da arquitetura da internet.

Em 2001 foi feita uma proposta de uma arquitetura para DTN[5]. Esta proposta fez com que os pesquisadores percebessem que os problemas encontrados neste desafio também estavam presentes em outros cenários de comunicações terrestres.

Um ano mais tarde, um grupo liderado novamente por Cerf disponibilizou um Internet Draft sobre a arquitetura DTN [6]. Nesse mesmo ano, Kevin Fall publicou um artigo sobre a arquitetura de redes desafiadoras e o Internet Research Task Force [7] criou o Delay-Tolerant Networking Research Group (DTNRC), um grupo de trabalho voltado exclusivamente para pesquisa em DTN.

Em 2003, Kevin Fall publicou o artigo intitulado Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets [8], um dos trabalhos mais importantes da área e que deu início, na comunidade científica, ao estudo das redes tolerantes a atrasos e desconexões (DTN).

2.2 Delay-Tolerant Network (DTN)

Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões ou Delay-Tolerant Network (DTN) são redes sem fio desprovidas de infraestrutura, onde uma camada de agregação é definida entre a camada de transporte e a camada de aplicação no modelo OSI, o que pode ser visto na Fig. 1.

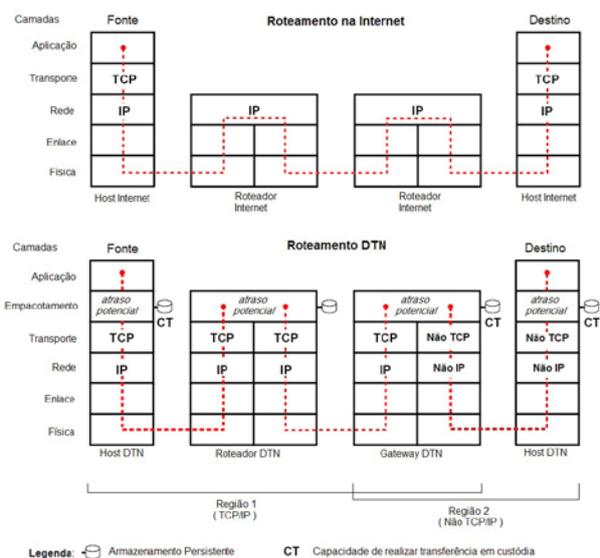


Fig. 1 – Roteamento na internet e Roteamento DTN. Fonte: [1]

Dentre os protocolos mais importantes na implantação de uma rede DTN, temos o bundleprotocol. Tal protocolo im-

plementa o conceito de storeandforward, onde os nós intermediários em uma comunicação fim tem a missão de encaminhar os pacotes ou armazenar em memória para posterior envio, quando não é possível transmitir essa informação para o próximo nó em determinado instante.

Uma rede DTN está inserida na classe das redes desafiadoras (Challenged Networks), que são redes onde a arquitetura TCP/IP, proposta para funcionar na internet, não pode ser adequadamente empregada. Essa classe de redes é prevista para operar em ambientes desafiadores, que podem ser exemplificados por nós operando com alta mobilidade em comunicação sem fio, nós operando em um campo de batalha, em ambientes com restrição de energia, etc.

- a) Segue abaixo algumas características dessas redes desafiadoras de acordo com [9]:
- b) Conectividade intermitente: dificuldade de estabelecer e/ou manter uma conexão entre o nó remetente e o nó destinatário. Essa intermitência na conexão pode ocorrer devido a vários fatores como interferências, regiões de sombra entre os nós, etc.
- c) Atrasos longos e/ou variáveis: quando o tempo de propagação de um pacote é considerado longo ou existe atrasos variáveis durante o processamento de um pacote. Isso prejudica as aplicações que dependem de um tempo de resposta específico para o correto funcionamento.

Alta taxa de erros: esses erros ocorrem principalmente por interferências presentes no canal de comunicação por onde trafegam os pacotes. Uma alta taxa de erros tem um impacto muito grande na rede, causando distorções nos dados trafegados, exigindo retransmissões e um gasto maior com processamento.

2.3 Algoritmos de Roteamento DTN

A escolha sobre como encaminhar e armazenar essas mensagens deu origem a vários algoritmos de roteamento, dentre os quais podemos destacar: Epidêmico, FirstContact, Spray and Wait, MaxProp e Prophet. A seguir são apresentadas as características desses algoritmos.

2.3.1 Epidêmico

O algoritmo DTN epidêmico é muito utilizado na literatura por ser um protocolo bem simples. Tal algoritmo visa disseminar a mensagem para o maior número de nós presentes na rede até que ela chegue ao destinatário. Tal abordagem em muito se assemelha à disseminação de uma epidemia e foi amplamente estudada por [3].

Esse algoritmo funciona da seguinte forma: um nó responsável por entregar a mensagem e que não possui conectividade com o nó destinatário, encaminha esta mensagem para o maior número de nós possíveis, sempre que fizer contato com um nó na rede. Esse processo é repetido até que a mensagem chegue ao nó destinatário ou o tempo de vida da mensagem (TTL) se esgote.

Tal algoritmo, apesar de simples, pode causar um grande congestionamento na rede, uma vez que a mensagem poderá ser encaminhada para todos os nós. De acordo com [10], o excesso de tráfego na rede, ao utilizar o algoritmo epidêmico, tem sido uma das principais áreas de pesquisa em DTN.

Neste artigo foi realizada uma modificação no algoritmo, epidêmico implementado no simulador The ONE, de forma

a impedir que um determinado nó continue a disseminar uma mensagem caso ele consiga entregar a mensagem ao nó destinatário. Na versão original do algoritmo a disseminação continuava mesmo depois de entregar a mensagem ao destinatário final, finalizando apenas com a expiração da mensagem. Com a modificação, ao entregar a mensagem ao destinatário final, o nó que enviou a mensagem não manteve mais uma cópia desta mensagem no buffer. A abordagem original só se mostra interessante se o objetivo for de enviar uma mensagem para todos os nós na rede, ou seja, de forma broadcast.

2.3.2 FirstContact

O algoritmo FirstContact é um dos poucos protocolos de roteamento, em uma rede DTN, que não é baseado em inundação. Tal algoritmo não mantém cópias de uma mensagem armazenada em seu buffer, sendo caracterizado como um algoritmo de encaminhamento. Ao passar a custódia de uma mensagem para outro nó na rede, a mensagem é apagada de seu buffer, sendo o nó que acabou de receber a mensagem o único responsável por entregá-la.

O algoritmo funciona da seguinte forma: na primeira fase é escolhida uma mensagem do seu buffer para ser transmitida. Originalmente, tal escolha é feita de forma aleatória ou utilizando o algoritmo FIFO, onde a primeira mensagem que chega é a primeira a sair. Nesse artigo, foram implementadas várias formas de escalonamento das mensagens no buffer, com o objetivo de aumentar a probabilidade de entrega. Após a escolha da mensagem, é verificado se o nó de destino daquela mensagem está conectado a este nó. Caso positivo, a mensagem é transmitida e apagada do buffer. Caso contrário, o algoritmo passa para a segunda fase.

Na segunda fase, é verificado se existe conexão com outros nós na rede. Caso positivo, a custódia daquela mensagem é passada para um dos nós conectados, e agora ele será o único detentor daquela mensagem e responsável por entregá-la ao destinatário.

Como ponto positivo, esse algoritmo contribui para diminuir a probabilidade de congestionamento da rede. Tal congestionamento só se configura se houver um número muito grande de mensagens a serem trafegadas e as conexões existentes não forem capazes de dar vazão a todas as mensagens até que elas sejam entregues ao destinatário.

Como ponto negativo, por não existirem cópias da mensagem na rede, se um nó que possui uma ou mais mensagens não conseguir estabelecer conexão com outro nó, tais mensagens nunca chegarão ao destino. Alguns protocolos de roteamento como o Spray AndWait implementam um roteamento epidêmico controlado, visando disseminar mais de uma cópia da mensagem na rede, sem o intuito de causar um congestionamento.

2.3.3 Direct Delivery

O algoritmo Direct Delivery é um protocolo de roteamento que não se utiliza dos conceitos de uma DTN. Neste protocolo, não existe a passagem de custódia de uma mensagem para um nó intermediário. Todas as transmissões são realizadas diretamente para o nó de destino.

Esse roteamento é muito importante para este trabalho, pois ele funciona exatamente como previsto nas comunicações militares, com entrega direta de uma mensagem. Du-

rante as simulações este protocolo será comparado com os demais protocolos de roteamento DTN, com o objetivo de comprovar os benefícios de se implantar uma DTN em um ambiente operacional tático.

2.3.4 Spray andWait

O algoritmo Spray andWait foi proposto por [11]. De acordo com [12], este algoritmo procura obter os mesmos benefícios da taxa de entrega dos algoritmos baseados em replicação ou inundação, bem como utilizar poucos recursos computacionais, semelhante aos algoritmos baseados em encaminhamento.

Esse algoritmo possui duas fases bem definidas. Na primeira fase é definido como L o número máximo de cópias que uma mensagem pode ter na rede. O nó remetente envia, então, essa mensagem para L nós intermediários. Na segunda fase esses nós intermediários aguardam uma comunicação direta com o nó destinatário para, assim, entregar a mensagem. Tal algoritmo visa controlar a inundação da mensagem na rede, o que é muito presente no algoritmo epidêmico.

Existem duas variações principais deste algoritmo: vanilla e binária [13]. Na vanilla, o nó origem encaminha uma cópia da mensagem para L-1 nós e, em seguida, estes nós entram na segunda fase, a espera, até que encontrem o nó destinatário e entreguem a mensagem. Já na versão binária, o nó origem encaminha metade das mensagens para o primeiro nó que se comunicar, ficando com a outra metade armazenada em buffer. Em seguida, esses dois nós encaminham a metade de suas mensagens para os próximos nós que se comunicarem. Esse processo é repetido até que cada nó contenha apenas uma mensagem. Neste momento, o algoritmo entra em sua fase 2, onde o nó aguarda um possível contato com o nó destinatário para entregar a mensagem.

Desta forma, o protocolo Spray AndWait é considerado um roteamento com inundação controlada, pois existe um número finito de cópias das mensagens, diferente do que ocorre com o Epidêmico.

2.3.5 Maxprop

O algoritmo Maxprop foi proposto por [14] em 2006 e é baseado em inundação da rede. Ao estabelecer conexão com um nó, as mensagens que não estão presentes no outro nó terão a chance de serem copiadas, caso esse novo nó esteja na estimativa do menor caminho para a entrega dessa mensagem. A forma como é realizado esse cálculo é explicada a seguir.

A inteligência do algoritmo reside em estabelecer prioridades para as mensagens presentes no buffer, tanto na escolha de qual mensagem deve ser transmitida primeiro, quanto na escolha de qual mensagem deve ser descartada primeiro. O protocolo mantém uma fila de mensagens ordenadas de acordo com a probabilidade estimada do menor caminho para entregar a mensagem ao destinatário.

No início, cada nó possui um vetor com n-1 posições, onde n é o número de nós na rede. Cada posição desse vetor guarda a probabilidade desse nó encontrar um outro nó. A Eq. 1 representa essa probabilidade.

$$p = \frac{1}{|n|-1} \quad (1)$$

Desta forma, no início todos os nós possuem a mesma probabilidade de encontrar outro nó. Assim que um nó estabelece conexão com outro, a posição no vetor referente à probabilidade desse encontro é adicionada de 1, e, em seguida, todos os valores são normalizados. Durante a conexão, esses nós também trocam seus vetores, de forma que, na situação ideal, cada nó possui um vetor de probabilidades atualizado de cada nó na rede.

De posse dos vetores de probabilidades, antes de enviar uma mensagem, é possível calcular o menor caminho para entrega da mensagem ao destinatário. Essa mensagem é então enviada para o próximo nó contido no menor caminho estimado.

2.3.6 Prophet

Prophet, Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity é um protocolo de roteamento que se utiliza do histórico de encontros entre os nós para a tomada de decisão. Esse algoritmo estuda as conexões passadas entre os nós para estimar qual nó intermediário tem maior probabilidade de entregar a mensagem ao nó de destino no futuro. Esse algoritmo se baseia no fato de que os encontros entre os nós no mundo real não é algo aleatório.

Esse algoritmo utiliza o conceito de vizinhança, assumindo que determinado nó tem uma probabilidade maior de entregar a mensagem ao destinatário que outros, pois encontros passados entre esses nós voltarão a ocorrer em um futuro próximo.

Um algoritmo adaptativo calcula a previsibilidade de entrega de cada nó. Um nó A armazena a previsibilidade de entrega de cada nó na rede, representado por $P(A,B)$, onde B é o outro nó na rede. Inicialmente essa previsibilidade é igual a zero.

Assim que um encontro ocorre, a previsibilidade é atualizada de acordo com a Eq.2:

$$P(A,B)_{new} = P(A,B)_{old} + (1 - P(A,B)_{old}) \times \kappa \quad (2)$$

Na Eq. 2, κ é uma constante de inicialização, utilizada no cálculo de previsibilidade de contato direto, sendo por padrão igual a 0,75.

Da mesma forma, as previsibilidades dos demais nós que não se conectaram com o nó A são envelhecidas de acordo com a Eq.3:

$$P(A,C)_{new} = P(A,C)_{old} \times \nu \chi \quad (3)$$

Na Eq.3, χ é uma constante de envelhecimento utilizada para diminuir o valor de previsibilidade de uma rota ao longo do tempo e ν é a quantidade de tempo que se passou desde o último encontro.

As previsibilidades são trocadas entre A e B e a propriedade transitiva de previsibilidade é usada para atualizar a previsibilidade dos destinos C para os quais B tem um valor de $P(B,C)$, na suposição de que A provavelmente encontrará B novamente. Isso pode ser visto na Eq.4:

Na Eq.4, ν é um fator de escala para a transitividade da previsibilidade, sendo recomendado o valor de 0,25.

3. ESCALONADOR TRADICIONAL

3.1 Introdução

De acordo com [17], os Sistemas de Comando e Controle (SC2) utilizam apenas um critério, a precedência, para a classificação do valor do conteúdo das mensagens que trafegam nos sistemas estratégicos e táticos.

A precedência é escolhida pelo remetente da mensagem, que estabelece o nível de prioridade que a mensagem deve ter de acordo com a urgência necessária à entrega da mesma. Uma mensagem com maior precedência sobre outra significa que apresenta uma relevância maior para o cenário de operações. Com as precedências estabelecidas, o escalonador de mensagens irá priorizar as mensagens que possuírem maior precedência.

Segundo [17], nas Forças Armadas Brasileiras são empregados 4 níveis de precedência, a saber:

- Urgentíssima: tem precedência sobre todas as demais, interrompendo o processamento e transmissão de outras mensagens;
- Urgente: tem precedência sobre as demais de precedência mais baixa;
- Preferencial ou Prioridade: tem precedência mais alta que se pode dar às mensagens administrativas;
- Rotina: inclui todas as mensagens que a importância não justifique precedência mais elevada.

Embora seja possível definir um tempo de vida para cada mensagem de acordo com o tempo máximo que ela deve ser entregue ao destinatário após a sua criação, [18] apresenta um prazo de validade para cada mensagem de acordo com sua precedência. As mensagens com precedência urgentíssima devem ser entregues em um prazo de até 10 minutos após a sua criação. Já as mensagens urgentes admitem um atraso de até 60 minutos em sua entrega. As mensagens com prioridade devem ser entregues em até 6 horas. Por fim, admite-se a entrega das mensagens de rotina em até 24 horas. Esses valores são empregados pela OTAN, pelas Forças Armadas Americanas e estão presentes também nos estudos científicos sobre redes militares.

3.2 Funcionamento do Algoritmo

O escalonador tradicional implementa 4 filas de prioridades, uma para cada nível de precedência existente. Assim que uma mensagem chega ao sistema, é verificado o seu nível de precedência e, então, ela é armazenada na fila correspondente. As mensagens são armazenadas na fila de acordo com a ordem de chegada, utilizando o algoritmo (FIFO, First In First Out), ou seja, a primeira mensagem a chegar também é a primeira a sair.

Assim que o sistema estabelece uma conexão de dados com outro nó na rede, é verificado na fila de mais alta precedência se existe uma mensagem para ser enviada. Caso positivo, a primeira mensagem da fila é selecionada para envio. Caso negativo, o escalonador procura na próxima fila, neste caso, a fila de mensagens urgentes. Esse processo é realizado toda vez que o canal de comunicações estiver disponível para enviar uma mensagem.

O algoritmo de escalonamento tradicional possui também uma regra de preempção. Quando uma nova mensagem chega ao sistema e o canal de transmissão está ocupado enviando uma mensagem de precedência menor que a nova mensagem, a transmissão dessa mensagem é interrompida e o canal de comunicações é disponibilizado para o envio da nova mensagem com mais alta precedência. A Fig. 2 apresenta um diagrama do escalonador tradicional.

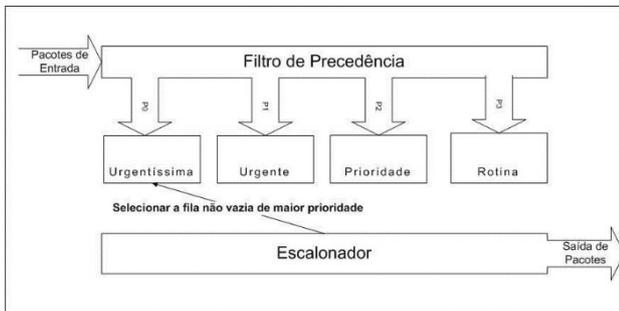


Fig. 2 – Escalonador Tradicional.

O Escalonador Tradicional não possui técnicas de gerenciamento de buffer. Assim que uma das filas de precedência atinge sua lotação máxima, a chegada de uma nova mensagem com a mesma precedência é tratada com o rejeite da mesma.

Segundo [17], alguns escalonadores já foram sugeridos com a finalidade de melhorar o atendimento das mensagens em uma rede baseada em precedência, mas nestes algoritmos é mantido o conceito das mensagens de maior precedência usurparem os recursos de comunicação existentes.

3.3 Problemas

O Escalonador Tradicional apresenta muitos problemas que o tornam ineficiente, de acordo com [19]. Tal escalonador pode apresentar muito atraso e até perda das mensagens que possuem precedência baixa, como as mensagens de rotina ou prioridade.

Em uma operação militar, se o fluxo de mensagens for superior à capacidade do canal [20], ocorrerá um congestionamento na fila de mensagens com prioridade baixa.

Apesar de não ter prioridade alta, uma mensagem com precedência de rotina ou prioridade pode conter informações relevantes para o sucesso de uma operação militar. A não entrega das mesmas pode ter um impacto relevante para as aplicações de C2 e, conseqüentemente, para a operação militar.

A falta de uma política de gerenciamento de buffer também é um ponto negativo do Escalonador Tradicional. Quando uma fila de precedência atinge seu limite, as novas mensagens com a mesma precedência são descartadas. O descarte excessivo de novas mensagens no sistema pode impactar o funcionamento das aplicações de Comando e Controle (C2).

Outro ponto negativo é a preempção de mensagens. Ao chegar uma nova mensagem no sistema, se uma mensagem com prioridade mais baixa está sendo transmitida no momento, essa transmissão é abortada e a nova mensagem tem sua transmissão priorizada. Tal técnica é muito prejudicial para o sistema. Todo o tempo gasto na seleção de uma mensagem, estabelecimento da conexão e transmissão é desperdiçado. Todo esse processo ocasiona também gastos desnecessários de energia, algo que é muito crítico no campo de batalha, mesmo se referindo a rádios veiculares, onde o gasto excessivo de energia impactará na autonomia da viatura militar.

O Escalonador Tradicional também não possui regras para tratar as mensagens que estão há muito tempo no buffer e cujos tempos de vida estão perto de expirar. Como exemplo, uma mensagem nível prioridade sempre terá precedência sobre uma mensagem rotina, mesmo que a mensagem de rotina tenha apenas 1 hora até a sua expiração e a mensagem prioridade tenha apenas acabado de ser criada com 6 horas de vida. Um algoritmo de escalonamento de mensagens militares pre-

cisa levar em consideração o tempo de vida das mesmas, pois o tempo é algo preponderante para o sucesso de uma operação militar.

4. ESCALONADORES MULTICRITÉRIO

As mensagens militares são muito importantes para o sucesso de uma operação. O problema ocorre quando a disponibilidade do canal não é capaz de dar vazão ao alto fluxo de mensagens geradas pelas aplicações de comando e controle (C2). Em um ambiente operacional militar, o congestionamento de mensagens é muito frequente [20].

Com isso, faz-se necessário o estudo de técnicas de escalonamento de mensagens na fila de transmissão com o intuito de maximizar a probabilidade de entrega das mensagens, permitindo, inclusive, que mensagens de baixa prioridade tenham chances de serem entregues ao destinatário. No estudo de novos escalonadores de mensagens militares, faz-se necessário o emprego de novos critérios para a classificação eficiente das mensagens. Com esses critérios, será realizado o cálculo da Prioridade Final (PF) das mensagens de acordo com as regras do escalonador proposto.

Segundo [17], novos escalonadores de mensagens em ambiente operacional militar devem seguir o conceito da M-QoS (QoS militar), onde os fluxos de mensagens de menor prioridade devem ter seus níveis degradados ao invés de serem totalmente cortados pelo sistema. Com isso, mesmo que haja mensagens com prioridade alta no sistema, as mensagens de baixa prioridade devem ter chances de serem entregues, permitindo, assim, uma coexistência mais justa.

Nesses novos escalonadores é importante que exista uma política eficiente de gerenciamento de buffer, o que não existe na abordagem tradicional. Quando uma nova mensagem chega ao sistema e o buffer está cheio, essa mensagem é, então, descartada pelo escalonador tradicional. Esta nova política de escalonamento se propõe a avaliar a PF da mensagem nova e das mensagens armazenadas, descartando a mensagem com menor PF, que é a mensagem de menor relevância para o sistema.

Outra política importante no uso de novos escalonadores é a extinção do uso de preempção de mensagens.

4.1 Ordenação Multicritério

Vários métodos de decisão multicritério estão disponíveis na literatura. Este trabalho selecionou os métodos de ordenação lexicográfica [21] e função valor [22], os mesmos utilizados por [17] no estudo de escalonadores de mensagens militares em canais HF.

4.1.1 Ordenação Lexicográfica

O método de ordenação lexicográfica na matemática é a forma com que é ordenado o produto cartesiano de dois conjuntos A e B. A ordenação lexicográfica do produto cartesiano $A \times B$ é definida por:

- Se (a_1, b_1) e (a_2, b_2) pertencem a $A \times B$, então $(a_1, b_1) < (a_2, b_2)$ se e somente se:
 - $a_1 < a_2$, ou
 - $a_1 = a_2$ e $b_1 < b_2$

Aplicando o mesmo método para dois conjuntos de n elementos cada, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ e $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, $A < B$ se e somente se o primeiro elemento a_i for menor que b_i , para i variando de 1 a n.

Com a ordenação lexicográfica no escalonador multicritério, cada elemento a_i será associado a um critério estabelecido para uma mensagem militar.

4.1.2 Método Função Valor

O método da função valor foi proposto inicialmente por [22], onde o objetivo é fornecer uma fórmula matemática da função valor no qual $U: R_k \rightarrow R$ que represente sua preferência. Logo o problema da função valor é maximizar $U()$.

Para calcular a PF de uma mensagem, foi escolhida a função valor barreira, que é um método de penalidade muito utilizado para resolver problemas de desigualdade. Assim como em [17], foi escolhido a função barreira inversa para este trabalho, definida por:

$$x \in \mathbb{R}^n \rightarrow f(x) = \frac{k}{g(x)} \quad (5)$$

Essa função será aplicada com os critérios selecionados para obter o valor da PF de uma mensagem.

4.2 Critérios

Com o objetivo de calcular a prioridade final (PF) de uma mensagem, foram selecionados dois critérios: tempo de vida (T_i) e precedência da mensagem (P_i).

Seguindo a mesma abordagem de [17], o tempo de vida ou validade de uma mensagem foi selecionado como critério de valor militar de uma mensagem. Tal critério terá prioridade sobre o critério precedência, visto que o objetivo deste trabalho é minimizar a perda de mensagens, sendo o tempo o fator primordial.

O tempo de vida de uma mensagem será o definido por [18], por se tratar do mesmo tempo utilizado pela OTAN e pelas Forças Armadas Americanas.

4.3 Escalonador Lexicográfico

O primeiro escalonador proposto é o escalonador lexicográfico. Este escalonador ordenará o buffer de acordo com a PF de cada mensagem. A mensagem que obtiver a maior PF terá seu envio priorizado.

A PF de uma mensagem é calculada, realizando a ordenação lexicográfica para cada critério. A ordem dos critérios foi escolhida de acordo com sua importância no objetivo de maximizar a entrega das mensagens e pode ser vista abaixo:

- Tempo de vida da mensagem - (T_i);
- Precedência da mensagem - (P_i).

Primeiramente é escolhido o critério de tempo de vida de uma mensagem (T_i). As mensagens presentes no buffer são, então, ordenadas com prioridade para a que possuir menor tempo de vida (T_i). Após isso é escolhido o critério de precedência (P_i) como desempate para as mensagens que possuem o mesmo tempo de vida. Neste caso, quando uma mensagem i possui o mesmo tempo de vida de uma mensagem j , é comparada a precedência entre elas e a mensagem com maior precedência tem prioridade no buffer.

4.4 Escalonador Barreira

O segundo escalonador proposto é o escalonador barreira. Este escalonador também irá ordenar o buffer de acordo com a PF de cada mensagem, onde a maior PF será prioriza-

da no buffer.

A função foi definida como sendo o tempo de vida (T_i) de uma mensagem M , conforme apresentado na Eq. 6:

$$g(M_i) = T_i \quad (6)$$

A constante para uma mensagem i foi definida como sendo a precedência da mensagem (P_i), conforme apresentado na Eq. 7:

$$k = P_i \quad (7)$$

Logo, a prioridade final (PF) de uma mensagem i () é definida pela Eq. 8:

$$PF(M_i) = \frac{P_i}{T_i} \quad (8)$$

Com isso, a prioridade final (PF) cresce conforme a mensagem estiver perto de expirar e esse crescimento é mais acentuado para as mensagens que possuem maior precedência.

5. SIMULAÇÃO

O objetivo do presente trabalho é o estudo e análise de técnicas multicritério no escalonamento de mensagens em redes tolerantes a atrasos e desconexões e sua comparação com a abordagem atual.

Para isso, as estratégias a serem avaliadas são:

- uso do escalonador tradicional;
- uso do escalonador lexicográfico;
- uso do escalonador barreiras.

Foi avaliado o desempenho dos escalonadores de acordo com os seguintes aspectos:

- probabilidade total de mensagens entregues;
- probabilidade de mensagens entregues por nível de prioridade.

Foi avaliada a influência do alcance do enlace de comunicação. Foi analisado também em quais situações cada escalonador é mais indicado, assim como os benefícios de se implantar uma DTN em um ambiente operacional tático com passagem de custódia de mensagens frente à abordagem atual de entrega direta de mensagens. Para isso, será determinado o melhor algoritmo DTN para cada situação.

5.1 Ambiente de Simulação

Para a simulação dos escalonadores propostos e do escalonador tradicional em uma rede tolerante a atrasos e desconexões (DTN), foi escolhido o simulador The ONE.

O simulador The ONE foi desenvolvido com o apoio do Centro de Pesquisas da Nokia na Finlândia e teve sua primeira release em 2007. Atualmente o simulador encontra-se na versão 1.6.0 de 2015 e seu código encontra-se disponível em um repositório público no GitHub, onde é possível se tornar um colaborador do projeto desenvolvendo novas funcionalidades.

Para este trabalho foi escolhida a versão 1.5.1-RC2, uma versão anterior à atual versão e que apresenta mais estabilidade, assim como uma variedade maior de algoritmos de roteamento para simulação.

O The ONE permite o desenvolvimento e simulação de algoritmos DTN em linguagem de programação Java.

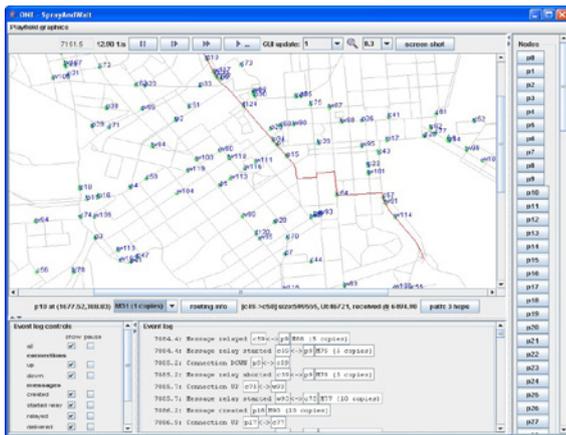


Fig. 3 – The ONE Simulator: ambiente gráfico.

5.2 Variáveis, algoritmos e configurações

Para a montagem dos cenários a serem simulados, serão detalhados a seguir as variáveis, os algoritmos e as configurações a serem utilizados com seus respectivos valores.

5.2.1 Algoritmo de Mobilidade

Para a mobilidade dos nós na rede foi utilizado o algoritmo de mobilidade Shortest Path Map Based Movement. Foi gerado uma carta vetorial da cidade do Rio de Janeiro com dimensões de 30km x 30km para ser utilizada no deslocamento das 9 viaturas do Pelotão de Cavalaria Mecanizado (Pel C Mec).

5.2.2 Infraestrutura de Comunicações

Foram implementadas no simulador as 3 redes de comunicação de dados do Pel C Mec, descritas em [23]. Cada rede é composta por um número específico de nós e as mensagens são trocadas dentro dessas redes. Os nós que participam de mais de uma rede podem funcionar como uma ponte na troca de mensagens entre uma rede e outra.

5.2.3 Escalonadores

Serão utilizados o escalonador tradicional das Forças Armadas Brasileiras e os escalonadores propostos neste trabalho, o Lexicográfico e o Barreira.

5.2.4 Protocolos de Roteamento

Para a simulação foram utilizados os 6 protocolos de roteamento explicados na Seção 2.3. De posse desses 6 protocolos de roteamento, foi realizada a implementação no simulador The ONE dos escalonadores tradicional, lexicográfico e barreira, dando origem a um total de 18 protocolos de roteamento que foram utilizados nas simulações.

5.2.5 Taxa de Transmissão

A taxa de transmissão foi baseada em uma das formas de onda em desenvolvimento no Projeto RDS-Defesa, que tem o objetivo de equipar as Forças Armadas Brasileiras com uma família de Rádios Definidos por Software. Foi utilizada

a forma de onda com taxa de transmissão de 16kbps.

5.2.6 Mensagens

Foi utilizado o software C2 em Combate do Exército Brasileiro para medição do tamanho das mensagens a serem trafegadas na rede. O software permite o envio de mensagens com até 5000 caracteres e anexos de até 30MB. As mensagens sem anexo variam entre 300 bytes a 1500 bytes. Como neste trabalho a taxa de transmissão é baixa, as mensagens sem anexo foram as escolhidas para esta simulação. Será implementado no simulador um algoritmo aleatório de forma a criar as mensagens com tamanhos que variam entre 300 bytes a 1500 bytes.

O intervalo de criação das mensagens foi definido no simulador como 1 mensagem nova a cada 5 segundos. Como são 9 nós na rede, em média cada nó recebe uma mensagem a cada 45 segundos. Durante a criação das mensagens, um algoritmo aleatório determina a precedência da mensagem entre os valores rotina, preferencial, urgente e urgentíssima.

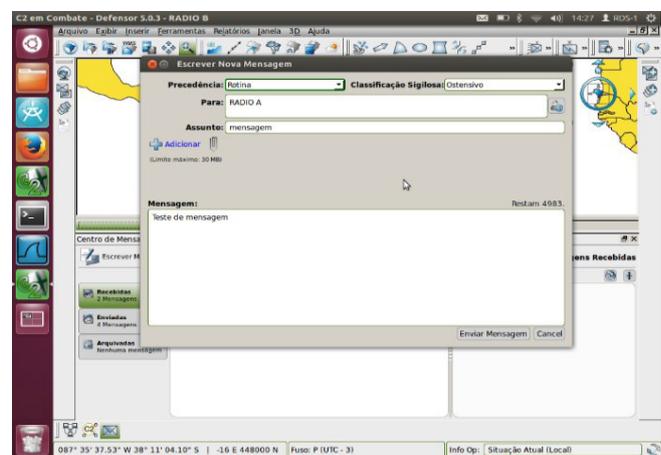


Fig. 4 – C2 em Combate: módulo de mensagens.

5.2.7 Duração da Operação

Como configuração do tempo de simulação, as operações tinham a duração de 2 dias. Esse tempo foi escolhido baseado no tempo de vida das mensagens. Como a mensagem com precedência de rotina tem a maior duração de 24 horas e é desejável, na simulação, que todas as mensagens tenham chances de expirar antes da entrega, a duração da simulação tem que ser maior que 24 horas. Logo, foi utilizado o valor de 2 dias de simulação.

5.2.8 Alcance do Rádio

O alcance do rádio foi variável e teve os seguintes valores: 500 metros, 1km, 2km, 5km e 8km.

O modelo de propagação do sinal eletromagnético levou em conta os efeitos de desvanecimento plano e lento. Isso foi considerado suficiente para a inserção do efeito do aumento da distância entre terminais sobre os enlaces.

O efeito do multipercursos não foi levado em consideração, devido às curtas distâncias envolvidas entre os nós, à largura de banda dos rádios considerados e ao fato de que se pode assumir que os esquemas de equalização, entrelaçamento e correção de erro poderão resolver os efeitos advindos de tal fenômeno.

5.3 Cenário de Simulação

O objetivo deste cenário foi avaliar os escalonadores

com os diversos algoritmos de roteamento DTN verificando a influência da variação do alcance na probabilidade de entrega de mensagens.

Tab1: Cenário de simulação

| Parâmetros | Valores |
|---------------------|---------------------------------------|
| Escalonadores | Tradicional, Lexicográfico e Barreira |
| Duração | 2 dias |
| Buffer | 300 KB |
| Tamanho da mensagem | 300 Bytes a 1500 Bytes |
| Taxa de transmissão | 16 kbps |
| Alcance | 500m, 1km, 2km, 5km e 8km |

O intervalo de confiança da simulação ficou em torno de 1% para os parâmetros avaliados com probabilidade entre 95% a 99%. Para atingir esse intervalo de confiança, foi necessário executar 1000 simulações no cenário proposto.

6. RESULTADOS

6.1 Probabilidade Total de Mensagens Entregues

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos nas simulações para o critério probabilidade total de mensagens entregues na rede.

O protocolo de roteamento MaxProp apresentou desempenho superior aos demais protocolos em todos os alcances simulados. Os escalonadores lexicográfico e barreira apresentaram resultados muito semelhantes no roteamento MaxProp. Esse mesmo protocolo no escalonador tradicional apresentou um desempenho quase 10% inferior aos escalonadores propostos para os alcances de 1km e 2km, conforme pode ser visto na Tabela 2. Já nos extremos do gráfico, tanto no alcance mínimo de 500 metros, quanto no alcance máximo de 8km, todos os escalonadores para o MaxProp apresentaram resultados bem próximos.

Essa proximidade dos resultados no alcance de 500 metros pode ser explicada pelo efeito que o alcance do rádio tem na probabilidade de entrega das mensagens. Com um alcance baixo de 500 metros, as estratégias de priorização de mensagens pelos escalonadores não foram suficientes o bastante para garantir a entrega das mensagens que possuíam uma precedência maior e tempo de vida baixos. Esses resultados se repetiram para quase todos os protocolos de roteamento, com exceção do SprayAndWait. Neste protocolo foi criadas 6 cópias para cada mensagem e, durante uma comunicação, metade das cópias foram transferidas para o outro nó. Como o SprayAndWait Tradicional não apresenta uma política eficiente de descarte de buffer, quando o buffer está próximo de encher, não é possível transferir todas essas cópias das mensagens e, com isso, a transferência é rejeitada integralmente.

Tab2: Probabilidade total de mensagens entregues

| Probabilidade total de mensagens entregues (%) | | | | | |
|--|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Algoritmos/alcance | | 500m | 1km | 2km | 5km |
| FirstContact Lexicográfico Barreira | Tradicional | 14,59 | 30,80 | 47,19 | 81,30 |
| | | 17,39 | 37,07 | 56,10 | 83,08 |
| | | 17,35 | 36,55 | 56,05 | 83,69 |
| SprayAndWait Lexicográfico Barreira | Tradicional | 4,86 | 9,56 | 16,31 | 26,48 |
| | | 15,92 | 31,24 | 46,71 | 65,25 |
| | | 10,05 | 24,52 | 39,61 | 51,69 |
| Epidemic Lexicográfico Barreira | Tradicional | 13,70 | 26,42 | 40,92 | 42,51 |
| | | 16,99 | 35,09 | 53,59 | 68,54 |
| | | 16,22 | 33,06 | 50,54 | 58,01 |
| MaxProp Lexicográfico Barreira | Tradicional | 15,12 | 32,74 | 58,53 | 95,10 |
| | | 17,89 | 40,32 | 68,11 | 95,93 |
| | | 17,74 | 39,68 | 67,86 | 95,97 |
| Prophet Lexicográfico Barreira | Tradicional | 13,80 | 26,84 | 42,86 | 48,89 |
| | | 17,52 | 35,65 | 52,02 | 62,01 |
| | | 16,12 | 30,22 | 44,46 | 46,04 |
| Direct Delivery Lexicográfico Barreira | Tradicional | 13,03 | 24,39 | 32,68 | 38,68 |
| | | 16,64 | 32,51 | 42,83 | 51,42 |
| | | 15,59 | 24,55 | 30,88 | 39,09 |

Já para o alcance de 8km, as probabilidades de entrega são bem distintas entre os algoritmos utilizados. Com um alcance de 8km, o MaxProp Lexicográfico apresentou uma probabilidade de entrega de 98,19%, resultado bem superior aos 39,36% de entrega do algoritmo DirectDelivery Tradicional, que é o utilizado nos rádios militares das Forças Armadas Brasileiras. Somente com a implantação do escalonador lexicográfico no roteamento DirectDelivery já se eleva a probabilidade de entrega para 53,77%, conforme pode ser visto na Tabela 2 e na Fig. 5.

Os protocolos MaxProp e FirstContact foram os únicos algoritmos DTN que conseguiram uma taxa de entrega superior a 90% com alcance de 8km. Com exceção do DirectDelivery, o FirstContact é o único protocolo que não é baseado em inundação. Para as simulações foi verificado que a maioria dos algoritmos teve o buffer cheio com quase 11 horas de simulação. No caso do FirstContact, o buffer ficou abaixo de 12% de ocupação com o referido alcance. Essa folga no buffer e alcance alto permitiram uma boa vazão na entrega das mensagens na rede. Já o MaxProp, com sua estratégia de estimar o menor caminho para entrega de uma mensagem, conseguiu a melhor probabilidade de entrega da simulação e seu buffer chegou a 53% de ocupação no escalonador lexicográfico.

O escalonador lexicográfico foi superior em praticamente todos os algoritmos, seguido pelo escalonador barreira. A abordagem tradicional só foi superior com o alcance de 8km no roteamento FirstContact, porém a diferença para os demais escalonadores foi menor que 1%. Nas demais situações a abordagem tradicional foi muito inferior aos escalonadores propostos, chegando ao caso de mais de 45% de diferença na probabilidade de entrega de mensagens, comparando com a abordagem lexicográfica no protocolo SprayAndWait com o alcance de 8km.

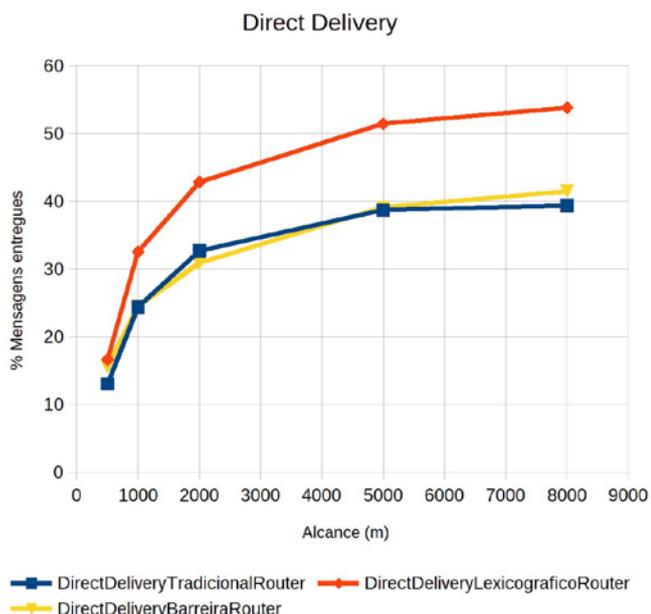


Fig. 5 – Algoritmo Direct Delivery.

6.2 Probabilidade Total de Mensagens Entregues por Nível de Precedência

6.2.1 Mensagens de Rotina

Da análise das entregas de mensagens com nível de precedência rotina na Tabela 3, é possível concluir que o escalonador barreira mostrou desempenho superior aos demais escalonadores. Tal desempenho foi mais notório quando o rádio possuía um alcance baixo, entre 500m e 2km. Isso mostra que o escalonador barreira é muito útil quando a rede for constituída, em sua maioria, por mensagens com precedência baixa, a exemplo de uma operação normal onde não existam conflitos.

Cabe ressaltar o baixo desempenho do escalonador tradicional para as mensagens de rotina. Como esse escalonador dá prioridade para as mensagens com precedência alta e não apresenta regras de escalonamento baseadas no tempo de vida da mensagem, as mensagens de rotina só terão chances de serem entregues se o protocolo de roteamento DTN conseguir dar vazão às mensagens de alta prioridade até chegar nas mensagens de rotina.

O protocolo MaxPropBarreira foi o melhor algoritmo de roteamento na entrega de mensagens de rotina, seguido pelo algoritmo FirstContactBarreira. Esses protocolos conseguiram dar uma vazão maior na entrega de mensagens, impedindo o esgotamento de espaço em buffer e perda de mensagens por expiração do tempo de vida. Suas respectivas versões com o escalonador lexicográfico também apresentaram desempenhos próximos ao escalonador barreira para alcances a partir de 2km.

Tab3: Entrega de mensagens de rotina

| Entrega de Mensagens de Rotina (%) | | | | | |
|------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Algoritmos/alcance | 500m | 1km | 2km | 5km | |
| FirstContact | Tradicional | 3,41 | 16,93 | 26,73 | 77,75 |
| | Lexicográfico | 15,51 | 44,25 | 64,23 | 92,24 |
| | Barreira | 25,48 | 49,48 | 66,06 | 94,44 |
| SprayAndWait | Tradicional | 0,68 | 0,96 | 0,87 | 0,84 |
| | Lexicográfico | 12,29 | 28,93 | 31,23 | 36,67 |
| | Barreira | 13,11 | 27,12 | 30,45 | 34,59 |

| Entrega de Mensagens de Rotina (%) | | | | | |
|------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Epidemic | Tradicional | 3,07 | 5,29 | 5,32 | 4,36 |
| | Lexicográfico | 11,82 | 26,77 | 36,52 | 32,67 |
| | Barreira | 23,16 | 31,99 | 36,77 | 30,87 |
| MaxProp | Tradicional | 3,95 | 15,74 | 40,87 | 98,61 |
| | Lexicográfico | 16,17 | 47,17 | 80,28 | 99,55 |
| | Barreira | 26,66 | 54,20 | 85,17 | 99,57 |
| Prophet | Tradicional | 3,06 | 5,38 | 5,89 | 5,55 |
| | Lexicográfico | 12,60 | 23,92 | 31,20 | 28,30 |
| | Barreira | 23,65 | 29,17 | 31,76 | 28,79 |
| Direct Delivery | Tradicional | 3,21 | 5,87 | 7,86 | 8,65 |
| | Lexicográfico | 12,06 | 22,59 | 29,34 | 37,85 |
| | Barreira | 24,74 | 31,73 | 31,85 | 35,64 |

6.2.2 Mensagens Preferenciais

Da análise das entregas de mensagens com nível de precedência preferencial, é possível concluir que o escalonador lexicográfico foi superior em quase todas as análises, com exceção do protocolo FirstContact para os alcances de 5km e 8km.

Tab 4: Entrega de mensagens Preferenciais

| Entrega de Mensagens de Preferenciais (%) | | | | | |
|---|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Algoritmos/alcance | 500m | 1km | 2km | 5km | |
| FirstContact | Tradicional | 23,66 | 48,72 | 69,03 | 91,76 |
| | Lexicográfico | 29,73 | 53,28 | 71,87 | 94,27 |
| | Barreira | 24,74 | 48,51 | 71,39 | 95,11 |
| SprayAndWait | Tradicional | 0,64 | 1,06 | 1,02 | 0,76 |
| | Lexicográfico | 34,98 | 57,94 | 69,70 | 69,11 |
| | Barreira | 18,41 | 41,83 | 60,59 | 57,65 |
| Epidemic | Tradicional | 18,19 | 30,09 | 31,39 | 20,20 |
| | Lexicográfico | 30,58 | 54,96 | 66,85 | 59,81 |
| | Barreira | 23,92 | 48,08 | 63,81 | 54,24 |
| MaxProp | Tradicional | 24,74 | 51,61 | 75,81 | 99,03 |
| | Lexicográfico | 31,20 | 59,53 | 85,50 | 99,61 |
| | Barreira | 25,44 | 53,30 | 83,03 | 99,61 |
| Prophet | Tradicional | 18,39 | 30,27 | 31,90 | 25,45 |
| | Lexicográfico | 32,55 | 60,26 | 71,44 | 56,74 |
| | Barreira | 23,48 | 46,59 | 61,72 | 49,78 |
| Direct Delivery | Tradicional | 18,21 | 32,72 | 36,14 | 36,00 |
| | Lexicográfico | 30,05 | 53,26 | 55,71 | 56,70 |
| | Barreira | 22,26 | 32,16 | 35,67 | 40,44 |

Como as mensagens preferenciais possuem tempo de vida de 6 horas e a operação teve duração de 2 dias, a ordenação lexicográfica foi mais sensível ao tempo, já que o primeiro critério de escalonamento foi o critério de tempo de vida da mensagem.

Esse escalonador mostra-se importante quando as mensagens têm níveis de precedência e tempo de vida intermediários, em comparação com os demais níveis existentes.

Com um alcance baixo de 500 metros, O SprayAndWaitLexicográfico apresentou a maior probabilidade de entrega de 34,98%, seguido pelo MaxPropLexicográfico com 31,20% de entrega. Com 1km de alcance do rádio, o ProphetLexicográfico entregou 60,26% das mensagens, seguido

pelo MaxPropLexicográfico com 59,53%, SprayAndWaitLexicográfico com 57,94% e FirstContactLexicográfico com 53,28% de entrega. A partir dos 2km de alcance, é notório o desempenho superior do protocolo MaxPropLexicográfico chegando a 99,76% de entrega de mensagens preferenciais com alcance de 8km do rádio.

6.2.3 Mensagens Urgentes

Da análise das entregas de mensagens com nível de precedência urgente, pode-se concluir que o escalonador tradicional mostrou-se eficiente em quase todos os alcances simulados, com destaque para as simulações onde os rádios possuíam alcances baixos variando entre 500 metros e 2km. Com um alcance de 500 metros, o SprayAndWaitTradicional entregou 21,53% das mensagens, quase 8% superior ao escalonador lexicográfico.

Tab 5: Entrega de mensagens urgentes

| Entrega de Mensagens Urgentes (%) | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Algoritmos/alcance | 500m | 1km | 2km | 5km | |
| FirstContact | Tradicional | 14,91 | 27,75 | 45,63 | 75,63 |
| | Lexicográfico | 12,05 | 26,01 | 44,80 | 72,41 |
| | Barreira | 9,55 | 23,74 | 43,08 | 72,32 |
| SprayAndWait | Tradicional | 21,53 | 43,76 | 69,93 | 69,74 |
| | Lexicográfico | 13,80 | 31,52 | 68,07 | 93,31 |
| | Barreira | 7,04 | 23,87 | 53,31 | 66,86 |
| Epidemic | Tradicional | 15,71 | 32,37 | 60,39 | 73,30 |
| | Lexicográfico | 12,60 | 29,50 | 55,13 | 91,15 |
| | Barreira | 8,68 | 25,40 | 49,29 | 73,13 |
| MaxProp | Tradicional | 14,83 | 31,55 | 57,94 | 91,06 |
| | Lexicográfico | 12,03 | 26,96 | 54,19 | 92,06 |
| | Barreira | 9,61 | 25,22 | 51,84 | 92,34 |
| Prophet | Tradicional | 16,60 | 35,11 | 65,67 | 83,27 |
| | Lexicográfico | 12,65 | 29,69 | 52,73 | 81,70 |
| | Barreira | 7,82 | 22,18 | 41,21 | 52,36 |
| Direct Delivery | Tradicional | 14,79 | 28,44 | 42,90 | 55,25 |
| | Lexicográfico | 12,20 | 27,71 | 43,06 | 55,22 |
| | Barreira | 7,86 | 16,97 | 28,25 | 39,89 |

À medida que os alcances dos rádios foram aumentando, o escalonador lexicográfico teve resultados bem próximos do escalonador tradicional, com exceção dos protocolos Epidêmico e SprayAndWait onde a abordagem lexicográfica foi muito superior à tradicional chegando a 95,85% de entrega no Epidêmico Lexicográfico frente aos 64,17% de entrega no Epidêmico Tradicional. Esses dois algoritmos de roteamento são muito sensíveis a espaço de armazenamento de mensagens, pois são baseados em inundação da rede. Com alcance alto, a estratégia de escalonamento lexicográfico onde o valor militar de uma mensagem está associado ao tempo de vida da mesma na qual mostrou-se mais eficaz.

Nesta simulação é notória a superioridade do protocolo SprayAndWait em entregar as mensagens urgentes. Tal protocolo dissemina 6 cópias de cada mensagem na rede de forma binária, passando, assim, a custódia de metade das cópias de uma mensagem para outro nó. Essa estratégia foi importante para entregar as mensagens urgentes no tempo necessário, já que possuem tempo de vida baixo de apenas 1 hora. O protocolo MaxProp só apresentou vantagens em relação ao SprayAndWait quando o alcance dos rádios chegou a 8km.

Todos os seus escalonadores apresentaram taxas de entrega semelhantes, com o MaxPropBarreira chegando a 96,66% de entrega de mensagens urgentes.

6.2.4 Mensagens Urgentíssimas

Da análise das entregas de mensagens com nível de precedência urgentíssima, conclui-se que o escalonamento tradicional foi novamente mais eficiente quando o alcance variou entre 500m e 2km, um desempenho parecido ao analisado na entrega de mensagens urgentes. A partir dos 5km de alcance, a abordagem lexicográfica obteve ligeira vantagem em relação a abordagem tradicional.

Tab 6: Entrega de mensagens urgentíssimas

| Entrega de Mensagens de Urgentíssimas (%) | | | | | |
|---|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Algoritmos/alcance | | 500m | 1km | 2km | 5km |
| FirstContact | Tradicional | 16,42 | 29,83 | 47,29 | 80,00 |
| | Lexicográfico | 12,28 | 24,71 | 43,85 | 73,17 |
| | Barreira | 9,58 | 24,59 | 43,49 | 72,92 |
| SprayAndWait | Tradicional | 4,44 | 8,19 | 20,41 | 70,79 |
| | Lexicográfico | 2,77 | 7,27 | 17,39 | 66,10 |
| | Barreira | 1,48 | 5,36 | 14,10 | 47,69 |
| Epidemic | Tradicional | 17,75 | 38,16 | 66,84 | 72,74 |
| | Lexicográfico | 12,67 | 28,94 | 55,75 | 91,03 |
| | Barreira | 9,24 | 27,20 | 52,21 | 74,57 |
| MaxProp | Tradicional | 16,67 | 31,95 | 59,63 | 91,75 |
| | Lexicográfico | 12,24 | 27,68 | 52,52 | 92,55 |
| | Barreira | 9,33 | 25,48 | 51,66 | 92,34 |
| Prophet | Tradicional | 17,31 | 36,76 | 68,29 | 82,85 |
| | Lexicográfico | 12,43 | 29,25 | 53,39 | 81,24 |
| | Barreira | 9,35 | 22,98 | 42,92 | 53,54 |
| Direct Delivery | Tradicional | 15,80 | 30,56 | 43,72 | 55,44 |
| | Lexicográfico | 12,39 | 26,63 | 43,01 | 55,98 |
| | Barreira | 7,96 | 17,24 | 27,71 | 40,31 |

Até 1km de alcance, o algoritmo Epidêmico, com sua abordagem tradicional, conseguiu entregar o maior número de mensagens urgentíssimas. Com 2km de alcance, temos uma ligeira vantagem no algoritmo ProphetTradicional. De 5km em diante, o protocolo MaxPropLexicográfico conseguiu uma ligeira vantagem em relação ao Epidêmico Lexicográfico, entregando o maior número de mensagens urgentíssimas com 96,92% de entrega com alcance de 8km.

Percebe-se que para mensagens urgentíssimas que possuem tempo de vida muito baixo de apenas 10 minutos, o protocolo Epidêmico, com sua disseminação semelhante a uma epidemia, é o mais indicado para entregar as mensagens no prazo requerido. O que diferencia é o alcance, no qual a abordagem tradicional funciona bem em alcances curtos e a abordagem lexicográfica apresenta resultados mais satisfatórios em alcances longos.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo foi realizado um estudo com o objetivo de propor o emprego de escalonadores multicritérios para sistemas de mensagens militares em redes tolerantes a atrasos e

desconexões, comparando-os com o escalonador tradicional utilizado pelas Forças Armadas Brasileiras.

As redes tolerantes a atrasos e desconexões apresentam características muito semelhantes a uma rede operacional tática e seus principais algoritmos de roteamento foram comparados com o algoritmo de entrega direta de mensagens DirectDelivery utilizado nas comunicações militares.

Também foi proposto o emprego do critério tempo de vida da mensagem (TTL) de forma a calcular a prioridade final (PF) de uma mensagem, o qual foi definido como o valor militar de uma mensagem.

Para a simulação foi implantada a rede de comunicação de dados do Pel C Mec composta por 3 subredes onde poucos nós podem funcionar como uma ponte entre uma subrede e outra [23]. Os enlaces de comunicação entre os nós na rede são ponto a ponto.

O alcance máximo de 8km dos rádios foi definido de acordo com o previsto em [23] e a taxa de transmissão de 16kbps foi baseada em uma forma de onda de dados atualmente em desenvolvimento no Projeto RDS-Defesa.

Na simulação foram implantadas as 9 viaturas do Pel C Mec com suas velocidades de deslocamento, de acordo com o previsto em [23]. O deslocamento das tropas foi realizado em um mapa vetorial da cidade do Rio de Janeiro representando uma operação de GLO.

Trabalhando em um cenário de grande variação no alcance dos rádios, o escalonador lexicográfico é o mais adequado, principalmente se o buffer de mensagens for limitado e tiver problemas de armazenamento durante uma operação. A combinação do escalonador lexicográfico com o protocolo MaxProp mostrou-se a mais adequada.

O escalonador barreira, combinado com o roteamento MaxProp, foi o mais adequado para ser utilizado em uma operação militar no qual as mensagens de rotina são maioria na rede. Esse escalonador mostrou-se eficiente ao ser mais sensível na priorização de mensagens que estão há mais tempo no sistema e seus tempos de vida estão se esgotando.

O escalonador lexicográfico também apresentou um desempenho superior aos demais quando a operação possui uma carga maior de mensagens com precedência preferencial, sendo melhor empregado com o algoritmo SprayAndWait para cenários de alcance de 500 metros, considerado baixo para uma transmissão. Para alcances a partir de 1km o protocolo MaxProp é o mais recomendado de ser utilizado com o mesmo algoritmo de escalonamento.

O escalonador tradicional foi o mais adequado para utilização em cenários nos quais as mensagens urgentes são predominantes no sistema, tendo seu uso recomendado para enlaces com alcance de até 2km. Para enlaces maiores a abordagem lexicográfica foi a mais eficiente. Ambos os escalonadores apresentaram melhores resultados na entrega de mensagens urgentes quando combinados com o protocolo SprayAndWait.

Em cenários de operações críticas onde a carga de mensagens urgentíssimas no sistema é predominantemente maior, o escalonador tradicional novamente é o mais adequado para alcances de até 2km, sendo mais adequado de ser utilizado com o protocolo Epidêmico. A forma de disseminação das mensagens nesse protocolo, semelhante à uma epidemia, mostrou-se a mais recomendada para as mensagens urgentíssimas, cujo tempo de vida é de apenas 10 minutos.

Apesar do escalonador tradicional ser melhor empregado em operações críticas onde as mensagens urgentes e ur-

gentíssimas são mais frequentes, seu uso deve ser evitado quando o buffer do sistema estiver perto de atingir sua capacidade total. Isso ocorre devido ao fato do escalonamento tradicional não ter uma política de gerenciamento de buffer, rejeitando todas as mensagens novas criadas no sistema e as mensagens recebidas de outro nó na rede.

Foi verificado o baixo desempenho do algoritmo DirectDelivery com escalonamento tradicional, exatamente a mesma abordagem utilizada pelas Forças Armadas Brasileiras. Enquanto o escalonador lexicográfico apresentou taxas de entrega de até 98,19% com o roteamento MaxProp em alcance de 8km, o escalonador tradicional não passou dos 39,36% com o roteamento DirectDelivery. Com apenas a substituição do escalonador tradicional pelo lexicográfico no protocolo DirectDelivery, as taxas de entrega subiram para 53,77%.

Da análise dos resultados deste trabalho, ficaram evidente os benefícios da implantação de uma rede DTN em cenários de emprego militar. Sugere-se, primeiramente, a substituição do escalonador tradicional pelo escalonador lexicográfico, que apresentou melhores resultados na maioria das situações avaliadas. A implementação do escalonador barreira também se mostra importante para operações do dia a dia onde as mensagens de rotina são mais frequentes e esse escalonador é mais apropriado para essa situação. Em segundo plano sugere-se o desenvolvimento de uma camada de custódia de mensagens entre a camada de transporte e camada de aplicação dos sistemas militares, bem como a implementação dos algoritmos DTN para uso conjunto com o escalonadores multicritério propostos neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fall, K. Disruption tolerant networking for heterogeneous ad-hoc networks. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), v. 4, p. 2195–2201, 2005.
- [2] Castro, T.; Senna, V. Estudo preliminar para definição dos softwares componentes da FAC2F Ter. Brasília: DCT-EB, 2016. 47 p. (Relatório Técnico, 02/2016-DC2).
- [3] De Abreu, C. S.; Salles, R. M. Modeling message diffusion in epidemic dtn. Ad Hoc Networks, v. 16, n. 2, p. 197–209, 2014.
- [4] IPNSIG. InterPlanetary Networking Special Interest Group. Disponível em: <<http://ipnsig.org/>>. Acesso em: 26 ago. de 2016.
- [5] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, E. Travis, and H. Weiss. Interplanetary Internet (IPN): Architectural Definition. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/draft-irtf-ipnrg-arch-00>>. Acesso em: 23 jul. de 2018.
- [6] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss. Delay-Tolerant Network Architecture: The Evolving Interplanetary Internet. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/draft-irtf-ipnrg-arch-01>>. Acesso em: 23 jul. de 2018.
- [7] IRTF. Internet Research Task Force. Disponível em: <<http://irtf.org/>>. Acesso em: 23 jul. de 2018.
- [8] Fall, K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. Berkeley: Intel Research, 2003. (Relatório Técnico, RB-TR-03-003).
- [9] F. Warthman. Delay-tolerant networks (dtns): A tutorial. Disponível em: <<http://www.warthman.com/projects-IRTF-Interplanetary-Internet-IPN-Delay-Tolerant-Networks-DTN-Tutorial.htm>>. Acesso em: 23 jul. de 2018.
- [10] Maurice J. Khabbaz, C. M. A.; Fawaz, W. F. Disruption tolerant networking: A comprehensive survey on recent developments and persisting challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 14, n. 2, p. 607–640, 2011.
- [11] ACM SIGCOMM CONFERENCE (ACM), 2005., 2005, Philadelphia. Proceedings... Philadelphia: ACM, 2005.
- [12] Roald Otnes, Michael Goetz, P. V. W.; Zorzi, M. Underwater Acoustic Networking Techniques. 1. ed. Alemanha: Springer, 2012. 83 p.
- [13] Athanasios V. Vasilakos, Y. Z.; Spyropoulos, T. Delay Tolerant Networks: Protocols and Applications. 1. ed. Flórida, EUA: CRC Press, 2011. 362 p.

- [14] IEEE Infocom 2006 (IEEE), 2016., 2006, Barcelona. Proceedings... Barcelona: IEEE, 2006.
- [15] DTNRG. IRTF Delay-Tolerant Networking Research Group. Disponível em: <<https://irtf.org/concluded/dtnrg>>. Acesso em: 23jul. de 2018.
- [16] A. Lindgren, A. Doria, E. Davies, and S. Grasic. Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/rfc6693>>. Acesso em: 23jul. de 2018.
- [17] Dos Santos Cardoso, S. Escalonador Multi-Critério Para Sistemas de Mensagens Militares em Redes Sem Fio de Baixo Desempenho. 2007. 134 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação)– Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.comp.ime.eb.br/pos/arquivos/publicacoes/dissertacoes/2007/2007-Sergio.pdf>>. Acesso em: 23jul. de 2018.
- [18] Kingston, J. Dynamic precedence for military ip networks. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), v. 1, p. 5, 2000.
- [19] Xiao, H.; Beard, C. Support for high priority traffic using preemption. University of Missouri, v. 1, p. 8, 2001.
- [20] Pitt, K.; Devens, W. Information value information based resource management of the defense information systems network. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), v. 1, p. 5, 1999.
- [21] Zikina, A. V. A lexicographic optimization algorithm. Omsk State Technical University, v. 65, p. 363–368, 2003.
- [22] Miettinen, K. M. Nonlinear multiobjective optimization. Kluwer's International Series, v. 1, p. 298, 1998.
- [23] Regimento de Cavalaria Mecanizado. Manual de Campanha. 2. ed. Brasília: Estado-Maior do Exército, 2002. 432 p.