

Análise sobre o estado da arte em Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões

Jéferson C. Nobre¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Porto Alegre – RS – Brazil

jcnobre@inf.ufrgs.br

Abstract. *This paper describes the state of art in Delay-Tolerant Networks, which are networks prepared to face extreme environments like deep space. These systems can't work with some assumptions traditionally encountered in data communication networks. Furthermore, there is the need of interoperability between the currently used technologies and new proposals, preserving investments and acquired knowledge. It will be presented technical aspects of the architectures and protocols of these networks, showing the researches that have been done nowadays about specific points.*

Resumo. *Este artigo descreve o estado da arte nas Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões, que são redes preparadas para enfrentar ambientes extremos como o espaço sideral. Esses sistemas não podem contar com algumas das características tradicionalmente encontradas nas redes de comunicação de dados. Além disso, existe a necessidade de interoperabilidade entre as tecnologias utilizadas atualmente e novas propostas, preservando investimentos e conhecimento adquirido. Serão apresentados aspectos técnicos das arquiteturas e protocolos dessas redes, demonstrando as pesquisas que estão sendo realizadas atualmente sobre pontos específicos.*

1. Introdução

O conceito de Rede Tolerante a Atrasos e Desconexões ou *Delay-Tolerant Network* (DTN) é relativamente novo na área de redes de comunicação de dados. Apesar de utilizar idéias tradicionais em outros contextos como o sistema postal [Cerf et al. 2007], o desenvolvimento desse tipo de arquitetura de forma padronizada é bastante recente. É importante frisar que as últimas tentativas nesse sentido procuram manter soluções de transporte já difundidas como o TCP e propor formas de integração, inclusive com sistemas proprietários.

A possibilidade de utilização de sistemas de comunicação de dados padronizados em redes com características extremas é bastante desejável [Akyildiz et al. 2004]. Além disso, inúmeras aplicações em ambientes hostis cada vez mais são propostas, propiciando a formulação de novas oportunidades experimentais. Arquiteturas que possibilitem interoperabilidade em situações extremas não podem ser fundamentadas nos mesmos pré-requisitos utilizados em redes tradicionais de comunicação de dados. Dessa forma, redes com conectividade intermitente, atraso longo ou bastante variável, taxas de transmissão altamente assimétricas ou alta taxa de erros são candidatas à utilização de uma arquitetura DTN.

A idéia precursora das DTNs foi a *InterPlanetary Internet* (IPN), uma "rede de redes" destinada a proporcionar serviços de comunicação confiáveis para a transmissão de dados científicos entre planetas e para navegação de veículos em missões no espaço sideral [Akyildiz et al. 2004]. No entanto, foi observado que muitas das dificuldades encontradas nesse ambiente também estavam presentes em outras redes de computadores. Após as aplicações astronômicas, as DTNs foram implementadas em contextos militares [Parikh and Durst 2005], mas há indicações que essa abordagem aumentará sua utilização gradualmente em muitos outros contextos como redes de sensores sem fio, universalização de serviços de telecomunicação, redes veiculares, ambientes aquáticos, entre outros [Warthman 2003].

O *Internet Research Task Force* (IRTF) definiu um grupo de pesquisa chamado *Delay-Tolerant Networking Research Group* (DTNRG) para desenvolver tecnologias que contribuam para a disposição de DTNs. Esse grupo cumpre o papel de aglutinar a comunidade interessada nessas redes, produzindo especificações, padronizações, implementações de referência, artigos acadêmicos, livros, etc. Além disso, são disponibilizadas listas de discussão e um *wiki*.

Existem poucas iniciativas em apresentar o estado da arte em DTNs, devido, inclusive, à área ser relativamente nova. Ocorreram alguns esforços, sendo que citaremos dois que possuem maior interesse no contexto desse trabalho. O primeiro esforço está relacionado ainda aos aspectos históricos das DTNs, focando nas IPNs [Akyildiz et al. 2004]. Nesse artigo, os autores apresentam os desenvolvimentos ocorridos até então (2004) e apontam oportunidades de pesquisa, sendo que dentre essas, algumas ainda persistem em aberto. O texto ainda possui um aspecto interessante em relação ao formato, que consiste no fato de estudar os obstáculos e as alternativas propostas utilizando a abstração de camadas. Outro material interessante é um minicurso sobre DTN realizado para o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC) [Oliveira et al. 2007], apresentando uma visão bastante completa sobre o assunto. Aparentemente, o texto foi preparado como base para um treinamento, dessa forma, o mesmo é um pouco extenso, não sendo indicado para fornecer uma visão objetiva sobre o estado da arte na área, e sim, como uma referência em português.

Nesse artigo, procuramos demonstrar o estado da arte nas DTNs, assim como uma explicação inicial sobre a arquitetura proposta pelo DTNRG [Cerf et al. 2007]. A maior contribuição desse artigo é apresentar o momento atual de pesquisa na área de DTN de uma forma clara e compacta.

O restante do artigo é organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve a arquitetura DTN. A Seção 3 comenta aspectos de segurança das DTNs. A Seção 4 discorre sobre algumas implementações. A seção 5 traz algumas conclusões e oportunidade de pesquisa.

2. Arquitetura

A padronização da arquitetura DTN é bastante recente (Abril, 2007), dessa forma, será dada maior ênfase nesse tópico no presente trabalho. Os elementos principais da arquitetura DTN são a comutação "não conversacional" de mensagens e o armazenamento persistente dos dados entre os nós através de uma nova camada entre a camada de aplicação e a camada de transporte [Oliveira et al. 2007]. Esse novo elemento consiste, além da ca-

mada propriamente dita, de um protocolo de comunicação e de um formato de datagrama, chamado de *Bundle* ou agregado (e assim *Bundle Layer* ou camada de agregação). Dessa forma, para um nó pertencer à rede DTN basta que o mesmo implemente essas definições.

2.1. Camada de Agregação

A camada de aplicação, em sistemas preparados para DTN, produz mensagens de tamanho arbitrário, chamadas de *Application Data Units* (ADUs). Os ADUs são transformados pela camada de agregação em um ou mais *bundles* que consistem de dois ou mais "blocos". O bloco primário é obrigatório, funcionando como um cabeçalho (não recebe esse nome porque não está necessariamente no início do *bundle*). Entre os blocos restantes, somente um pode conter os dados úteis a serem transmitidos e ainda foram propostos blocos de extensão, contendo campos adicionais [Oliveira et al. 2007].

Os campos principais do *bundle* (que estão no bloco primário) são *Endpoint Identifiers* (abaixo descritos) de origem e destino, *timestamp* de origem, indicação de vida útil, designação de classe de serviço e o comprimento total [Cerf et al. 2007].

Em relação à fragmentação e remontagem, os *bundles* podem ser manipulados através de dois métodos: fragmentação pró-ativa, onde um nó pode dividir ADUs em múltiplos blocos e transmiti-los separadamente como *bundles*, sendo o destino responsável pela remontagem e fragmentação reativa, onde nós que compartilham uma aresta no grafo DTN podem fragmentar cooperativamente um *bundle* parcialmente transmitido.

2.2. Comutação "não conversacional" de mensagens

O processo de comutação da arquitetura DTN será didaticamente dividido em algumas partes. Lembremos, no entanto, que as funções descritas abaixo estão intimamente relacionadas e a eficiência das DTNs depende de sua integração.

2.2.1. Método *Store-and-Forward*

O método *store-and-forward* é utilizado pela arquitetura DTN para propiciar a comunicação fim-a-fim em ambientes com conectividade intermitente, atraso bastante longo ou variável, taxas de dados muito assimétricas e altas taxas de erros [Cerf et al. 2007]. Através de armazenamento persistente, mensagens inteiras ou seus fragmentos são encaminhados do espaço de armazenamento de um nó para o de outro nó, percorrendo o caminho da origem ao destino [Demmer 2004].

Verificamos que esse método não é exclusivo das DTNs, porém existem diferenças significativas na utilização de *store-and-forward* nesse ambiente. Em relação ao uso nas camadas inferior de redes tradicionais, as discrepâncias são o período em que o datagrama pode ser armazenado e o tamanho do mesmo. Já em comparação com aplicações como correio de voz e correio eletrônico, a principal divergência é que nesses sistemas existe uma centralização desse armazenamento [Warthman 2003].

2.2.2. Transferência de Custódia

As etapas intermediárias da transmissão de mensagem entre a origem e o destino podem se utilizar de um mecanismo chamado Transferência de Custódia, realizado pela camada

de agregação, que consiste na transferência da responsabilidade da mensagem entre nós. A arquitetura DTN não exige que todos os nós implementem a Transferência de Custódia [Fall 2003].

A simples transferência de responsabilidade por um *bundle* não garante confiabilidade fim-a-fim, sendo que para possuímos essa característica, o nó possuidor da custódia deve solicitar uma confirmação de recebimento ao próximo nó e assim, somente após a recepção dessa mensagem, a custódia terá sido transferida [Warthman 2003].

2.2.3. Nós e *Endpoints*

É possível caracterizar um nó DTN como um equipamento que implemente a camada de agregação [Cerf et al. 2007]. Esses elementos podem se reunir em grupos chamados *endpoints*. Um *bundle* é considerado como entregue para um *endpoint* quando um subgrupo mínimo de nós do *endpoint* recebeu o *bundle* sem erro. Esse subgrupo é chamado de *minimum reception group* (MRG) do *endpoint*, podendo ser de um nó (*unicast*), um de um grupo de nós (*anycast*), ou todos de um grupo de nós (*multicast* e *broadcast*). É importante ressaltar que nós podem estar em MRG de múltiplos *endpoints*. Cada *endpoint* é identificado por um *Endpoint Identifier* (EID), que corresponde a um nome expresso sintaticamente como um *Uniform Resource Identifier* (URI). O desejo de uma aplicação de receber ADUs destinados para um determinado EID é chamado de “registro”, e é persistente em um nó.

A resolução de endereços em DTNs utiliza o conceito de vinculação tardia, ou seja, a vinculação não ocorre necessariamente na fonte no momento que a origem envia uma mensagem para o destino. Devido às características atípicas das DTNs, a vinculação na origem pode não ser possível.

2.2.4. Roteamento

O cenário de roteamento em DTNs é bastante complexo, devido a características já citadas das mesmas como a inexistência temporária de um caminho fim-a-fim, rotas que dependem de variáveis temporais, etc [Jain et al. 2004]. Dessa forma, diversas soluções foram propostas e ainda estão sendo estudadas, focando em algumas classes de DTNs definidas conforme as informações disponíveis sobre a topologia da rede. Uma divisão possível [Oliveira et al. 2007] seria roteamento determinístico, no qual a topologia da rede pode ser dinâmica mas é inteiramente conhecida, e roteamento estocástico, sendo que nesse cenário, o comportamento da rede não é completamente conhecido, e dessa forma o cálculo de rotas é mais difícil.

Em geral, podemos dizer que as DTNs necessitam de algoritmos de roteamento conscientes do estado da conectividade e da topologia da rede para operar eficientemente. Esses algoritmos devem estar prontos para operar com partições e caminhos múltiplos. Também existem propostas de roteamento epidêmico e estudos sendo realizados sobre tópicos como conhecimento imperfeito da topologia, contatos probabilísticos, contatos oportunistas, falta de conectividade, etc [Jones et al. 2005].

3. Segurança da Arquitetura de DTN

A segurança em DTNs é um tópico que vem sendo discutido e abordado com bastante ênfase, pois o protocolo de agregação não definiu completamente os aspectos de segurança na sua especificação. O DTNRG disponibilizou dois *Internet Drafts* sobre essa questão, um que aborda os aspectos relacionados à segurança em DTNs [Farrell and Cahill 2006] e outro sobre um protocolo de segurança de agregação chamado *Bundle Security Protocol* [Symington 2006].

No entanto, esse protocolo de segurança pode ser opcionalmente implementado na camada de agregação [Symington 2006]. Com a habilitação desses procedimentos de segurança, três opções de entrega se tornam disponíveis:

- pedido de confidencialidade - a confidencialidade garante o sigilo das informações trocadas por pontos de extremidade. Neste caso, é exigido que as informações das ADUs sejam secretas para os nós DTN que não sejam a origem ou os membros do EID de destino;
- pedido de autenticação - a autenticação garante que uma dada entidade é realmente quem ela diz ser;
- pedido de detecção de erro - requer que o conteúdo nos campos que não podem ser alterados (ex. EID da fonte, EID de destino, carga útil) seja fortemente verificado para garantir a integridade dos dados, ou seja, afirmar que as informações recebidas por um nó não foram modificadas durante o trânsito ao longo da rede.

A despeito dos documentos estarem disponíveis, o trabalho ainda é muito recente e apresenta diversos tópicos em aberto. Apesar de já existirem protocolos eficientes de autenticação e de controle de acesso, esses protocolos foram projetados para operar em redes com pequenos atrasos e não apresentariam um desempenho aceitável em DTNs.

4. Implementações de DTNs

As implementações existentes das DTNs são utilizadas para diversas aplicações, referentes a ambientes considerados desafiadores para redes tradicionais, possuem em comum a dificuldade de manter uma comunicação fim-a-fim com baixa latência e pequena perda de pacotes [Oliveira et al. 2007]. Podemos citar como exemplos de tais infra-estruturas redes de sensores sem fio, redes *mesh*, comunicações entre dispositivos com restrições de energia, comunicações rurais, comunicações em campo de batalha, comunicações submarinas e comunicações interplanetárias.

Atualmente, existem muitos estudos em relação a áreas excluídas digitalmente e propostas sobre como fazer a integração das mesmas. Como as soluções tradicionais de redes são muito caras ou possuem dificuldades técnicas para serem implementadas nessas áreas, uma alternativa que está sendo considerada é o uso de DTNs, já que essa tecnologia teria condições de lidar com esses ambientes. Essas localidades se encontram em áreas rurais ou residenciais habitadas por pessoas de baixo poder aquisitivo e assim não são atrativas comercialmente para soluções como *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL) e *Cable Modem*.

Uma proposta para esse cenário é a arquitetura DakNet [Pentland et al. 2004]. Com o objetivo de prover acesso à Internet em áreas remotas, esse serviço utiliza "mulas" de dados, aqui chamadas de pontos de acesso móveis. Podem ser utilizados ônibus,

motos ou barcos, sendo esses responsáveis pelo transporte físico dos dados entre as localidades afastadas e os grandes centros, alcançando *backbones* comerciais. Há projetos pilotos implementados em Ruanda, Camboja, Costa Rica e Índia.

O projeto CarTel [Hull et al. 2006] consiste em um sistema computacional de sensores móveis desenvolvido para a aquisição, processamento, transmissão e visualização de informações. Cada nó processa localmente seus dados antes de enviá-los para uma estação central chamada "portal", sendo essa comunicação realizada através de contatos oportunistas com uma rede sem fio ou com "mulas" de dados. Dessa forma, a arquitetura precisa tolerar conectividade variável e intermitente. Algumas aplicações propostas pelos autores para essa arquitetura são monitoramento de tráfego, monitoramento ambiental, diagnósticos automobilísticos, produção e armazenamento de imagens georreferenciadas e trocas de dados através de mulas.

O portal e os nós móveis do projeto CarTel utilizam uma pilha de protocolos DTN chamada CafNet. Através do método *carry-and-forward*, essa pilha proporciona serviço para aplicações trocarem mensagens através de diferentes condições de rede com ou sem conectividade fim-a-fim. Além disso, a camada de rede da CafNet provê *buffering* para alcançar alta utilização quando uma conexão está disponível. Esse projeto foi implantado em seis carros como experiência em Boston e Seattle (EUA) por um ano, sendo utilizado para analisar redes metropolitanas Wi-Fi, diagnósticos automobilísticos e deslocamentos na cidade.

Comunicações submarinas são também um contexto estudado para a implementação de DTNs [Jim Partan 2006]. As redes submarinas podem ser caracterizadas por sua cobertura espacial e pela densidade de nós, fatores que possuem grandes implicações no funcionamento dessas infra-estruturas. De acordo com essas características, as arquiteturas DTN podem ser uma solução bastante eficiente para as questões de mobilidade e espacialidade em redes submarinas. Os nós dessa infra-estrutura podem ser bóias, veículos submarinos autônomos e nós repetidores, provendo funcionalidades de alcance, localização e navegação,

O caráter altamente intermitente e a taxa de transferência de modems acústicos exacerbam a necessidade de aproveitamento dos contatos oportunistas em uma rede submarina. Além disso, a capacidade de muitos nós de possuírem armazenamento permanente aliada as características das técnicas de roteamento desenvolvidas para DTNs, fazem das mesmas, uma boa opção para estas infra-estruturas.

Um campo bastante promissor para as DTNs é o contexto militar, como podemos perceber em diversas pesquisas [Parikh and Durst 2005] [Scott 2005]. Em geral, essas pesquisas procuram lidar com as dificuldades encontradas em campos de batalha (por exemplo, particionamento de rede pela distância) para a troca de informações entre a unidade, ponto considerado vital para a superioridade militar em um futuro próximo. Muitos planos para a utilização de tecnologias IP falharam em função da instabilidade dos caminhos fim-a-fim, sendo assim, considerada a opção de uso de uma arquitetura DTN.

Uma forma de utilizar uma arquitetura DTN em conjunto com tecnologias IP é o desenvolvimento de *proxies* de camada de aplicação, traduzindo protocolos IP em *bundles* [Scott 2005]. O artigo descreve a utilização de um sistema com essas características em

veículos militares. Além disso, são discutidas aplicações militares onde os dispositivos móveis tenham contatos intermitentes com redes sem fio ou satélites e protótipos que incorporam software desenvolvido pelo DTNRG.

Uma aplicação bastante interessante para as DTNs é a proposta de utilização de equipamentos móveis pessoais [Kansal et al. 2007]. Os autores propõem aumentar a utilidade desses dispositivos através do emprego dos mesmos como sensores móveis conectados em rede. A escolha inicial foi o telefone celular, já que esse equipamento, além de ser bastante difundido e possuir conectividade, contém dois sensores, uma câmera e um microfone. Algumas aplicações como mapeamento de ruído em áreas residenciais, imagens atualizadas dinamicamente para mapas e aplicações que utilizem áudio e vídeo como métrica para análises comerciais foram propostas no artigo.

Existem, no entanto, alguns problemas em implementar um sistema com essas características. Por exemplo, a intermitência de conexão e a alta mobilidade dificultam a transmissão das informações adquiridas pelos sensores para uma base de dados centralizada. É nesse contexto que soluções DTN podem auxiliar no desenvolvimento de mecanismos que disponibilizem uma infra-estrutura tolerante a essas dificuldades.

Aplicações interplanetárias foram o impulso inicial para as DTNs [Akyildiz et al. 2004]. Nesses sistemas, existe a necessidade para uma infra-estrutura comum para a conectividade interplanetária e tecnologias de comunicação distribuída para prover suporte a aplicações científicas e futuramente, comerciais. Além disso, é altamente desejável que essa arquitetura possa ser interoperável com padrões de redes tradicionais como a Internet.

Uma infra-estrutura implementada de acordo com esses requisitos é utilizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e chamada de *NASA Space Internet*. Essa malha é descrita como uma "rede de redes", com enlaces especiais relativos a conexões interplanetárias e rede locais, utilizando protocolos Internet em conjunto com uma arquitetura DTN.

5. Conclusão e Oportunidades de Pesquisa

Este artigo apresentou um panorama dos principais aspectos sobre o estado da arte em Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões. Primeiramente, foi apresentado o conceito de DTN, seguindo-se de trabalhos relacionados, a arquitetura completa com a comutação de agregação (Bundle Layer) até o roteamento e segurança. Em seguida, um levantamento sobre onde essas redes podem ser implementadas. A partir destas implementações, pode-se destacar que a área de redes DTN é bastante abrangente e promissora. Percebe-se que a grande maioria dos projetos nesta área são bastante recentes, cujos resultados, apesar de muitos serem preliminares, são realmente satisfatórios.

Além disso, foram destacadas algumas oportunidades de pesquisa como tecnologias de transporte apropriadas para DTNs, proteção integral da infra-estrutura, encaminhamento e atualizações de roteamento com autenticação, roteamento consciente de desconexões, roteamento com conhecimento imperfeito sobre a topologia, conectividade agendada e oportunista e interoperabilidade entre redes radicalmente heterogêneas.

Referências

- Akyildiz, I., Akan, O., Chen, C., and Fang, J. and Su, W. (2004). The state of the art in interplanetary internet. *IEEE Communications Magazine*, 42(7):108–118.
- Cerf, V., Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Durst, R., Scott, K., Fall, K., and Weiss, H. (2007). Delay-tolerant networking architecture. RFC 4838 (Informational).
- Demmer, M. (2004). Implementing delay-tolerant networking. tech. report IRBTR-04-020, Intel Research Berkeley, 2004.
- Fall, K. (2003). A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In *SIGCOMM '03: Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 27–34, New York, NY, USA. ACM Press.
- Farrell, S. and Cahill, V. (2006). Security considerations in space and delay tolerant networks. *smc-it*, 0:29–38.
- Hull, B., Bychkovsky, V., Zhang, Y., Chen, K., Goraczko, M., Miu, A., Shih, E., Balakrishnan, H., and Madden, S. (2006). Cartel: a distributed mobile sensor computing system. In *SenSys '06: Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 125–138, New York, NY, USA. ACM Press.
- Jain, S., Fall, K., and Patra, R. (2004). Routing in a delay tolerant network. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 34(4):145–158.
- Jim Partan, Jim Kurose, B. N. L. (2006). International conference on mobile computing and networking. In *Systems: A survey of practical issues in underwater networks*, pages 17 – 24, Los Angeles, CA, USA. ACM Press.
- Jones, E. P. C., Li, L., and Ward, P. A. S. (2005). Practical routing in delay-tolerant networks. In *WDTN '05: Proceeding of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pages 237–243, New York, NY, USA. ACM Press.
- Kansal, A., Goraczko, M., and Zhao, F. (2007). Building a sensor network of mobile phones. In *IPSN '07: Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, pages 547–548, New York, NY, USA. ACM Press.
- Oliveira, C. T., Moreira, M. D. D., Rubinstein, M. G., Costa, L. H. M. K., and Duarte, O. C. M. B. (2007). Redes tolerantes a atrasos e desconexões. em *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2007*.
- Parikh, S. and Durst, R. C. (2005). Disruption tolerant networking for marine corps condor. pages 325–330 Vol. 1.
- Pentland, A. S., Fletcher, R., and Hasson, A. (2004). Daknet: Rethinking connectivity in developing nations. *Computer*, 37(1):78–83.
- Scott, K. (2005). Disruption tolerant networking proxies for on-the-move tactical networks. pages 3226–3231 Vol. 5.
- Symington, S. F., F. S. e. W. H. (2006). Bundle security protocol specification. Trabalho em andamento, DTN Research Group - draft-irtf-dtnrg-bundle-security-02.txt.
- Warthman, F. (2003). Delay-tolerant networks (dtns): A tutorial. v1.1. Relatório técnico, Warthman Associates.