

Adaptive: An Adaptive Routing Protocol for Vehicle Delay-Tolerant Networks

R. Silva, P. Braga, H. Mendes, and M. Aguiar

Abstract—The aim of this work is to propose a new routing protocol for a Delay-Tolerant Networks (DTN) called Adaptive. This protocol is based in predictable contacts concept and uses the history of meeting nodes to determine the best way to route and drop packets on network. The following performance metrics were used to evaluate the Adaptive: delivery rate, average delay and average number of hops. The Adaptive performance was then compared to the following routing protocols commonly used in the literature: First Contact, Direct Transmission, Prophet, Epidemic and Spray and Wait. The simulations were based on a vehicle DTN build from real traces collected from city buses. Two scenarios were simulated: 1) alternating transmission range of all the nodes and 2) alternating the amount of data generated on the network per user. The simulations showed that the Adaptive presented satisfactory results in both scenarios. It was able to achieve the best delivery rates when nodes had a transmission range of 300 meters or more. In addition, the Adaptive has shown that it is able to adapt well to the various data traffic intensities imposed on the network.

Index Terms—Routing, Vehicular Networks, Real Mobility, Connectivity.

I. INTRODUÇÃO

UMA demanda cada vez maior por acesso a informação juntamente com o avanço das tecnologias de redes sem fio impulsionou o surgimento de várias aplicações no campo da computação móvel. A forma com que os dispositivos móveis acessam, processam, encaminham e recebem os dados na rede tem fomentado o desenvolvimento de novas aplicações e serviços de rede que sejam cada vez mais eficientes.

Um exemplo clássico de redes móveis são as MANETs (*Mobile Ad Hoc Networks*), redes compostas por dispositivos móveis como smartphones, tablets, palmtops e PDAs. Nessas redes os nós se comunicam diretamente entre si, não dependendo de nenhuma infraestrutura para operar. Além disso, os nós operam também como roteadores, encaminhando pacotes uns para os outros. São redes flexíveis, de topologia dinâmica, rápida instalação, possui enlaces intermitentes e com largura de banda limitada, além de haver uma preocupação constante com a conservação de energia [1].

Este trabalho foi financiado parcialmente pelo CNPq.

R. F. Silva, Professor Adjunto do Departamento de Computação, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, Brasil (e-mail: rodrigo.f.silva@ufes.br).

P. H. A. Braga, formado em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Tocantins (UFT), Palmas, Brasil. Atualmente é Analista de TI do Banco do Brasil (e-mail: peterhabraga@gmail.com).

H. de A. Mendes, Professor Adjunto do Departamento de Computação, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, Brasil (e-mail: helderamendes@yahoo.com.br).

M. O. Aguiar, Professor Adjunto do Departamento de Computação, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, Brasil (e-mail: marcelootone@gmail.com).

As VANETs (*Vehicular Ad Hoc Networks*) são um tipo especial de redes móveis onde os nós são veículos como carros, ônibus e motocicletas. Dentre as principais características que as diferenciam, destacam-se: longos e variáveis atrasos na entrega dos dados, podendo durar horas; conectividade esparsa, especialmente quando a densidade de veículos é baixa; transmissões intermitentes devido às altas velocidades dos nós e; altas taxas de erros [2][3]. Há vários tipos de serviços que as VANETs podem prover, sobretudo com o avanço das aplicações inteligentes de Internet das Coisas (IoT). Contudo, o mais importantes dentre eles é o de segurança rodoviária. O objetivo é reduzir o número de acidentes por meio do compartilhamento de informações entre os veículos na rede [4].

Embora as redes móveis tenham crescido ao longo dos últimos anos, há ainda inúmeros desafios que devem ser abordados com o intuito de tornar essas redes mais eficientes. Nesse sentido, as Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões (*Delay-Tolerant Networking - DTN*) [5] foram criadas para contornar parte desses problemas, especialmente no que diz respeito aos longos atrasos e frequentes desconexões existentes nas redes veiculares.

As DTNs implementam uma técnica diferenciada de comutação de pacotes e de armazenamento persistente dos dados. Os pacotes são transmitidos na rede pelo método armazena-transporta-encaminha, nó a nó, até que alcancem seus respectivos destinos. Nesse mecanismo, um nó pode armazenar um pacote até encontrar outro que tenha maiores chances de roteá-lo em direção ao destinatário, podendo este ficar armazenado em nós intermediários por um tempo maior do que ocorreria nos protocolos de roteamento tradicionais [6].

O objetivo de qualquer sistema de transmissão de dados é minimizar o atraso na entrega dos dados e alcançar uma taxa de entrega satisfatória, sem que isso sobrecarregue a rede. Uma abordagem comum é explorar os contatos entre os nós da forma mais eficiente possível. Entretanto, os protocolos de roteamento para DTNs conhecidos não são capazes de garantir isso, porque desconhecem de maneira detalhada o histórico de conexões existentes na rede, característica crucial para melhorar o desempenho do algoritmo de roteamento [7].

Apesar da maioria dos protocolos de roteamento propostos ultimamente ostentarem resultados satisfatórios, estes são alcançados apenas quando os protocolos são avaliados em cenários para os quais foram projetados. Quando comparados com outras propostas e em cenários distintos dos originais, o desempenho normalmente fica aquém do esperado ou exhibe resultados que oscilam drasticamente [8].

Portanto, um protocolo de roteamento eficiente para DTNs

deve conter a habilidade de identificar as características das movimentações dos nós e de se adaptar conforme a mobilidade observada. Em uma rede com contatos previsíveis, informações como os horários de contato e a duração deles podem ser utilizadas para melhorar o processo de tomada de decisão, garantindo, assim, uma forma mais inteligente de roteamento.

Muitos algoritmos de roteamento para DTNs baseados no histórico de movimentações dos nós foram propostos nos últimos anos. Dentre eles, citam-se o *Prophet* [9], o *Scheduling-Prophet* [10] e o *NECTAR* [11]. Contudo, nenhum dos roteamentos pesquisados na literatura utilizam o histórico dos encontros para reconhecer padrões e, com isso, estimar quando serão os próximos contatos e por quanto tempo durarão os respectivos enlaces de transmissão. A ideia é que a previsibilidade dos encontros possa ser utilizada pelo algoritmo de roteamento como uma métrica de sua política de encaminhamento de pacotes.

Diante desse cenário, esse trabalho propõe um novo protocolo de roteamento para DTNs que tenha a capacidade de se adaptar às características da rede móvel, usando para isso o conceito de contatos previsíveis. Nessa abordagem, baseado no histórico de contatos anteriormente realizados, os nós são capazes de efetuar previsões mais precisas dos horários e da duração dos próximos encontros. O objetivo é criar um algoritmo de roteamento que apresente um melhor desempenho quando comparado a outros comumente utilizados na literatura para DTNs.

O protocolo de roteamento proposto foi intitulado de Adaptativo e implementado para ser executado no simulador ONE (*Opportunistic Network Environment*) [12]. Seu desempenho foi comparado aos seguintes roteamentos: *First Contact* [13], *Direct Delivery* [14], *Prophet* [9], *Epidemic* [15] e *Spray and Wait* [16]. As métricas de desempenho consideradas foram: taxa de entrega, atraso médio e número médio de saltos. Nas simulações foram utilizados dados reais da mobilidade urbana, coletados manualmente via GPS de 25 ônibus circulares durante um dia de movimentações na cidade de Muriaé, estado de Minas Gerais, Brasil. Com base nos *traces* capturados, foi formada uma DTN veicular cujas comunicações ponto-a-ponto (P2P) entre os usuários eram feitas por intermédio dos ônibus.

O restante desse trabalho está organizado da seguinte forma: na seção II é apresentada a fundamentação teórica do artigo, descrevendo o funcionamento dos principais protocolos de roteamento para DTNs; o Adaptativo é descrito com detalhes na seção III; a seção IV corresponde a uma análise e parametrização da área de estudo; os resultados são apresentados na seção V e; na seção VI são feitas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Protocolos de Roteamento para DTNs

As abordagens de roteamento DTN existentes concentram-se em tentar maximizar a entrega de dados fim-a-fim levando em consideração episódios intermitentes de conectividade. Dessa forma, embasado na estratégia de transmissão, os protocolos de roteamento podem ser classificados em duas

categorias principais: baseados em replicação ou em encaminhamento [17]. Os protocolos encaminhadores escolhem quais pacotes serão transmitidos, já os replicadores repassam cópias dos pacotes a cada contato.

Por escolherem quais pacotes serão transmitidos na rede, os protocolos encaminhadores possuem maiores custos de processamento das informações de roteamento. Entretanto, o tráfego de dados tende a ser menor. Por outro lado, os protocolos replicadores possuem um custo baixo de manutenção das informações de roteamento, porém, o número de pacotes circulando na rede tende a ser muito maior, podendo ocasionar a perda de muitos deles caso a capacidade de armazenamento nos nós se esgote (estouro de *buffer*) [17].

1) *First Contact*: É o mais simples dos algoritmos de roteamento, realiza um esquema de encaminhamento onde quase nenhuma informação da rede é necessária. Nele, o nó simplesmente encaminha o pacote a um de seus vizinhos, aleatoriamente. Se o nó não estiver em contato com nenhum outro, ele armazena o pacote e o envia ao primeiro nó no qual vier a estabelecer contato. Embora seja um roteamento de fácil implementação, o protocolo apresenta um aumento da latência em cenários onde o número de nós móveis é grande. Além disso, por ser essencialmente aleatório, o encaminhamento dos pacotes pode não obter qualquer progresso em direção ao nó destino [13].

2) *Direct Delivery*: O objetivo é fazer uma entrega direta ao destinatário. Após gerar um pacote, um nó *A* o encaminha a outro nó *B* somente se este for o nó destino do pacote. Sua principal vantagem é a simplicidade e o uso de um número mínimo de saltos para que os dados sejam entregues [14]. Contudo, como a entrega depende de um contato direto entre a origem e o destino, o atraso na entrega dos dados pode ser alta e até ilimitada, diminuindo o desempenho desse protocolo [18].

3) *Prophet*: A fim de diminuir o número de retransmissões, o *Prophet* considera o histórico de encontros entre os nós ao encaminhar um determinado pacote apenas para outro que tenha maior probabilidade de entregá-lo ao destinatário. A frequência dos encontros é utilizada para calcular a previsibilidade de entrega ($P_{(A,C)}$) que, por sua vez, possui também uma propriedade transitiva. Ou seja, se o nó *A* encontra frequentemente o nó *B*, e o nó *B* encontra frequentemente o nó *C*, considera-se que o nó *A* também possui uma grande probabilidade de entregar os pacotes destinados a *C* e vice-versa. O valor de ($P_{(A,C)}$) aumenta sempre que os nós *A* e *C* se encontram e diminui se deixam de se encontrar. O tempo é controlado por uma constante de envelhecimento γ [9]. Resultados de simulações demonstraram que o *Prophet* apresenta um desempenho razoável em redes com alta mobilidade ou no caso dos nós possuírem grandes alcances de comunicação. Contudo, foi observado também que ele possui baixo desempenho em redes com poucos nós e que o algoritmo utilizado para a atualização da tabela de rotas não consegue adaptar-se rapidamente às frequentes mudanças na topologia da rede [19].

4) *Epidemic*: Baseia-se na teoria de algoritmos epidêmicos, replicando os pacotes a cada contato entre os nós enquanto houver espaço em *buffer*. O principal objetivo é espalhar os

pacotes de modo a maximizar a taxa de entrega e reduzir a latência, com suposições mínimas a respeito da topologia e da conectividade da rede. Cada nó contém uma lista com os pacotes que possui. Quando uma conexão é estabelecida, os nós trocam suas respectivas listas e, em seguida, solicitam o envio de cópias dos pacotes que ainda não possuem. O *Epidemic*, entretanto, ocupa rapidamente todo o espaço de armazenamento dos nós, podendo acarretar na perda e, conseqüentemente, no não repasse de alguns pacotes, impactando negativamente a taxa de entrega da rede [15].

5) *Spray and Wait*: O objetivo é gerar um pequeno número de cópias dos pacotes a fim de assegurar que o número de transmissões seja pequeno e controlado, diminuindo a probabilidade de ocorrer estouros de *buffers* e congestionamentos. Para cada pacote gerado, o nó origem repassa cópias somente para os L primeiros nós distintos que vier a encontrar. Uma vez que as cópias foram distribuídas, apenas transmissões diretas são permitidas. Desse modo, o *Spray and Wait* combina a velocidade de um roteamento epidêmico com a simplicidade de uma transmissão direta para o nó destino [16]. Esse protocolo consegue reduzir significativamente a sobrecarga de dados na rede, apresentando comumente melhor desempenho quando comparado a outros protocolos de roteamento. Além disso, não requer o uso de qualquer informação da rede nem de encontros passados [20].

Segundo [21], embora tais algoritmos de roteamento possam apresentar um desempenho satisfatório em alguns cenários específicos, eles não são adequados para serem implantados num cenário urbano. Esse argumento pode ser justificado pelo fato das ruas e outros locais públicos serem fixos, a densidade dos nós ser variável, a trajetória de movimentação ser influenciada por hábitos cotidianos e a topologia da rede está em constante mudança. Portanto, desenvolver um algoritmo de roteamento que leve em consideração essas características tem sido um dos principais problemas no campo das DTNs.

B. Trabalhos Relacionados

Em [22] é proposto um método híbrido de roteamento baseado em uma política de prioridades. Os pacotes gerados na rede foram classificados e ordenados segundo as seguintes prioridades: alta, média e baixa. As estratégias de encaminhamento implementadas foram: inundação para os pacotes com alta prioridade, inundação controlada para os de prioridade média e encaminhamento para os pacotes com prioridade baixa. O método implementado foi comparado aos roteamentos: *First Contact*, *Spray and Wait* e *Epidemic*. Os resultados mostram que o método proposto obteve as melhores taxas de entrega, embora o atraso médio para entregar os dados tenha sido até 150% maior quando comparado aos demais protocolos de roteamento.

Uma estratégia de roteamento para DTNs que divide a rede em sub-redes chamadas regiões foi proposta em [23]. Os nós foram classificados em intra-região, inter-região e nó de custódia. Os primeiros são nós estacionários localizados dentro de uma região e são os únicos a atuarem como fonte ou destino dos pacotes. Os nós inter-região podem se mover de uma região para outra, coletando pacotes de uma e os entregando

em outras regiões. Os nós de custódia (estacionários) recebem os pacotes de uma região e os entrega aos nós inter-região. A técnica de roteamento utilizada foi a replicação controlada. Os resultados mostraram que a estratégia proposta superou os roteamentos *First Contact*, *Spray and Wait* e *Epidemic* em relação a taxa de entrega, sobrecarga e atraso médio.

Uma extensão para o roteamento *Prophet* chamado *Scheduling-Prophet* foi proposto em [10] com o objetivo de melhorar a eficiência desse protocolo. Um método de incremento por médias foi utilizado para tornar as alterações da métrica "previsibilidade de entrega" mais suaves. O algoritmo também faz uso de confirmações para notificar a todos os nós da rede quais pacotes já foram entregues. Os autores afirmam terem conseguido resolver o problema do descarte de pacotes e ao mesmo tempo melhorar o desempenho do protocolo. Para isso, dois novos mecanismos foram implementados: um para gerenciamento dos pacotes e outro para transferência deles. De fato, quando comparado aos protocolos *Prophet* original e ao *Epidemic*, o *Scheduling-Prophet* alcançou melhores resultados conseguindo aumentar a taxa de entrega e reduzir o *overhead* e o número de pacotes descartados na rede.

[24] propôs um protocolo de roteamento que, considerando o estado da rede, controla dinamicamente o número de cópias dos pacotes gerados e seleciona quais nós podem fazer essas cópias. O algoritmo implementado utiliza um método para incrementar o número de cópias que um pacote pode ter utilizando como base para os cálculos a probabilidade de entrega e o tempo de vida do pacote. O desempenho do protocolo foi comparado aos do *Prophet* e do *Spray and Wait* por meio do ONE utilizando como base das simulações um modelo de mobilidade sintético e o mapa da cidade de Yamagata, Japão. No cenário analisado, os resultados mostraram que o protocolo proposto apresentava as melhores taxas de entrega e as menores sobrecargas de dados na rede, independente do número de nós considerados nas simulações.

III. O ROTEAMENTO ADAPTATIVO

O Adaptativo é um protocolo de roteamento encaminhador proposto pelos autores desse trabalho para ser utilizado em DTNs, sejam elas pessoais ou veiculares. Ele é baseado no conceito de contatos previsíveis, ou seja, faz uma análise histórica dos horários e duração dos contatos entre os nós da rede para tomar decisões mais produtivas de encaminhamento dos pacotes. A estratégia adotada para melhorar o desempenho do protocolo tira proveito do hábito das pessoas de, na maioria das vezes, percorrerem diariamente os mesmos trajetos. Por isso, segundo [25], os padrões de mobilidade podem ser facilmente identificados.

O roteamento adaptativo faz as seguintes pressuposições: cada nó tem uma capacidade de armazenamento ilimitada para pacotes que eles originam, mas uma capacidade de armazenamento fixo para carregar pacotes originadas por outros nós; as oportunidades de transferência de dados são limitadas, tanto em duração como em largura de banda e; cada nó constrói dinamicamente uma tabela contendo informações dos intervalos e da duração dos contatos entre ele e os demais nós da rede.

A partir disso, o Adaptativo calcula uma métrica de roteamento denominada Horário Previsto de Encontro (*HPE*) para dois nós quaisquer. Essa métrica fundamenta-se na ideia de que, em cenários determinísticos, é provável que nós vizinhos se reencontrem em intervalos aproximadamente fixos de tempo. É feita uma verificação do histórico de horários de encontros passados a fim de estabelecer um padrão de intervalos entre os contatos, útil para determinar qual será o próximo *HPE* e a duração dele.

A. Cálculo do Intervalo Entre Contatos (*IEC*):

O *IEC* é calculado da seguinte maneira. Quando um contato entre dois nós ocorre, o horário desse contato é adicionado a uma estrutura de dados existente em ambos os nós. Nesse sentido, cada nó contém uma espécie de tabela armazenando os horários de encontros realizados com os demais nós da rede. Essa tabela contém três campos: um para identificar o nó vizinho, o segundo para armazenar todos os encontros realizados entre eles e o terceiro para armazenar a duração desses encontros. Como exemplo, um nó *A* poderia armazenar o seguinte histórico de encontros:

B = [12:30, 12:59, 14:01, 15:00, 16:00, 16:31, 17:02, 17:32]
 C = [12:45, 13:31, 14:01, 14:30, 15:01, 15:44, 16:14, 16:45]
 D = [14:01, 14:45, 15:29, 16:01, 16:31, 17:00, 17:45, 18:31]

O $IEC_{(A,B)}$ para os nós *A* e *B*, por exemplo, é calculado levando em consideração o Horário Atual de Encontro ($HAE_{(A,B)}$) entre os nós e o Horário do Último Encontro ($HUE_{(A,B)}$) entre eles.

$$IEC_{(A,B)} = HAE_{(A,B)} - HUE_{(A,B)} \quad (1)$$

O *IEC* armazenado em *A* ficaria então:

B = [29, 62, 59, 60, 31, 31, 30]
 C = [46, 30, 29, 31, 43, 30, 31]
 D = [46, 44, 30, 30, 29, 45, 46]

Dentre os *IEC* amostrados, nota-se ser possível que alguns deles tendem a se repetir com muita frequência, denotando um certo padrão existente entre os horários de encontros dos nós. Nessa amostra, por exemplo, foi identificado que o nó *A* se encontra com o nó *B* aproximadamente de 30 em 30 ou de 60 em 60 minutos. Semelhantemente, os *IEC* entre *A* e *D* são sempre aproximadamente de 30 ou de 45 minutos. Com a inclusão de novos horários de contatos é possível, inclusive, identificar sequências determinísticas de encontros dos nós, caso existam. Analogamente, também é possível prever a duração dos contatos entre os nós.

B. Cálculo do *HPE* e Política de Encaminhamento

O Adaptativo utiliza um algoritmo de reconhecimento de padrões para determinar se existe uma sequência pré-definida de *IEC*. Caso exista, ele retorna o horário de um possível próximo encontro entre dois nós da rede. Com isso, é possível determinar qual nó possui maior probabilidade de entregar cada pacote ao seu respectivo destinatário. Essa probabilidade é calculada com base no menor horário previsto para um próximo encontro entre dois nós.

Para realizar um cálculo preciso do *HPE*, é necessário que os nós tenham informações suficientes a respeito dos horários e das durações dos encontros passados. Portanto, no início da simulação, como ainda não se tem uma base de dados alimentada o suficiente, o Adaptativo utiliza a frequência dos encontros entre os nós para determinar para qual nó encaminhar determinado pacote. Após τ instante de tempo, ele começa a encaminhar com base no cálculo do *HPE*. O Adaptativo deve ser calibrado para determinar o valor mais apropriado para o parâmetro τ de modo a alcançar um melhor desempenho.

Na sequência, o Adaptativo utiliza como critério para encaminhamento dos pacotes o menor *HPE*, levando em consideração o instante de tempo atual da simulação. Suponha que *A* e *B* estejam conectados e que *A* possui um pacote destinado a *Z*. Nesse caso, são calculados:

$$HPE_{(A,Z)} = HAE_{(A,Z)} + IEC_{(A,Z)} \quad (2)$$

$$HPE_{(B,Z)} = HAE_{(B,Z)} + IEC_{(B,Z)} \quad (3)$$

O pacote armazenado em *A* só será repassado para *B* se $HPE_{(B,Z)} < HPE_{(A,Z)}$. Contudo, a decisão de encaminhamento também se baseia em uma propriedade transitiva. Ou seja, se *B* tiver previsão de encontrar um nó *C* e este, por sua vez, prevê encontrar *Z*, ambos em um curto espaço de tempo, é verificado então se $HPE_{(C,Z)} < HPE_{(A,Z)}$. Caso a inequação seja verdadeira, o pacote é então transmitido para o nó *B* na expectativa que chegue mais rapidamente ao seu destino. Para realizar esse cálculo, os nós trocam constantemente suas respectivas estruturas de dados de modo que, cada nó possa ter uma visão geral da rede.

A política de encaminhamento do Adaptativo garante que não haja um excesso de pacotes duplicados na rede, evitando sobrecarga-lá. Além disso, o controle das retransmissões é mais rígido, fazendo com que estas sejam menores do que em outros protocolos. Leva-se em consideração que um nó só pode repassar seus pacotes a um nó intermediário caso este tenha de fato mais chances de entregá-lo ao destinatário.

C. Política de Descarte dos Pacotes

Sabe-se que a capacidade de armazenamento dos nós (*buffer*) é limitada e por isso, eventualmente, pode acontecer de alguns pacotes terem de ser descartados. Portanto, é indispensável que os protocolos de roteamento tenham uma política eficiente de descarte de pacotes.

O Adaptativo busca em primeiro lugar evitar que os pacotes sejam descartados. Nesse caso, antes dos *buffers* encherem completamente, o protocolo tenta repassar os pacotes com maior *HPE* para outros nós que declarem ter espaço de armazenamento sobrando. Isso é feito mesmo que ocasione um atraso maior na entrega dos dados pois, é preferível que o pacote demore mais para chegar no destinatário do que seja descartado em algum momento e nunca tenha chances de ser entregue. Sempre que um nó tenha espaço de armazenamento disponível maior que um limiar η , ele aceita receber pacotes cujo destino sejam outros nós.

Caso o descarte de um pacote seja inevitável, o Adaptativo prevê que o pacote a ser descartado é o que possuir maior *HPE*. Ou seja, o descarte é feito seguindo uma ordem decrescente dos valores da variável *HPE*. O descarte pode ocorrer caso um nó que já tenha seu *buffer* todo preenchido gere um novo pacote.

IV. ÁREA DE ESTUDO E DADOS UTILIZADOS

A confiabilidade dos resultados gerados está diretamente ligada a área de estudo adotada. O desempenho dos protocolos pode variar significativamente segundo as condições de mobilidade dos nós [26]. Portanto, é de extrema importância que os movimentos sejam reais ou que reproduzam cenários realistas.

A área de estudo utilizada nesse trabalho consiste em uma DTN veicular formada pelas movimentações de 25 ônibus públicos urbanos ao longo de todo um dia de funcionamento (de 5:40 às 23:30 horas). Os traces utilizados na montagem da rede foram coletados via GPS na cidade de Muriaé, estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). Foram identificadas 15 linhas de ônibus e, ao todo, 32 trajetos distintos. Um trajeto é o percurso feito por um ônibus partindo do ponto inicial da linha ao qual pertence até o ponto final dessa linha. O percurso de volta foi considerado um novo trajeto. Consulte [27] para mais informações a respeito desses *traces*.



Fig. 1. Trajeto percorrido pelos ônibus públicos de Muriaé.

As simulações ocorreram tomando como referência aproximadamente 16 horas de movimentações dos ônibus. Levou-se em consideração que todos os 25 ônibus continham 25 passageiros se comunicando na rede e que cada um dos passageiros estava gerando aproximadamente 5 pacotes TCP (1500 Bytes) por segundo. Os dados gerados eram transmitidos aos ônibus como se estes fossem as estações base dos passageiros. Os ônibus então roteavam os pacotes até seus destinatários, considerando que eles possuíam um raio de transmissão sem fio de 100 metros.

Os protocolos de roteamento foram avaliados tomando como referência dois cenários: (1) alternando o raio de transmissão dos nós da rede (ônibus) e (2) alternando a quantidade de dados gerados na rede por usuário. Os resultados obtidos até os primeiros 3000 segundos foram eliminados como sendo o tempo transiente. Os parâmetros adotados nas simulações são apresentados na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Parâmetro	Valor
Tempo de simulação	59000 segundos ($\approx 16,4$ horas)
Área de simulação	9 Km x 8 Km
Nº de nós (ônibus)	25
Passageiros conectados por ônibus	25
Raio de transmissão	100 metros
Velocidade de Transmissão	11 Mbps
Capacidade de Armazenamento	5 GB
Tamanho dos Pacotes	1500 B
Tempo Transiente Eliminado	3000 segundos

As métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento foram:

- Taxa de entrega: razão entre o número de pacotes entregues e o número de pacotes criados na rede;
- Atraso médio: tempo médio decorrido desde a geração de um pacote até sua chegada ao destino;
- Número de saltos: número médio de nós pelos quais o pacote passou até chegar ao seu destino.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi utilizado o simulador ONE [12] para obter os resultados do desempenho dos protocolos de roteamento avaliados. O ONE é um simulador específico para DTNs, já conhecido e testado pela comunidade científica. O Adaptativo foi então implementado como um módulo desse simulador. Os resultados apresentados nesse trabalho são frutos da média de 10 rodadas de simulação.

Os protocolos *First Contact*, *Direct Delivery* e *Epidemic* não necessitam de nenhuma parametrização prévia. Por outro lado, para o *Prophet* foi necessário informar a constante de inicialização da previsibilidade de entrega ($P_{init} = 0,75$), a constante de envelhecimento ($\gamma = 0,98$) e o valor de inicialização da constante de transitividade ($\beta = 0,25$). Tais valores foram sugeridos por [28]. Foram experimentados vários valores para o parâmetro L do *Spray and Wait*. Os resultados apresentados retratam o melhor desempenho observado por esse protocolo nos dois cenários avaliados.

O valor de τ parametrizado no Adaptativo foi de 2 horas. Tendo em vista que a primeira hora de simulação é desconsiderada dos resultados por causa da eliminação do tempo transiente, o Adaptativo começa a encaminhar pacotes com base no cálculo do *HPE* após 3 horas de aprendizado. Esse tempo foi considerado suficiente para que todos os ônibus já

tenham feito ao menos uma vez seus percursos de ida e volta de suas respectivas linhas.

A. Cenário 1: Alternando o Raio de Transmissão dos Nós

As simulações resultantes do Cenário 1 avaliado levou em consideração as informações apresentadas na Tabela I para diferentes raios de transmissão dos nós. As simulações foram feitas separadamente e os seguintes raios de transmissão foram considerados: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 e 400 metros.

Os resultados relativos a taxa de entrega são apresentados na Figura 2. Os protocolos Adaptativo e *Spray and Wait* foram os que apresentaram os melhores resultados. O roteamento Adaptativo obteve um desempenho ligeiramente melhor que o *Spray and Wait* a partir de um raio de 300 metros. Isso ocorreu porque os pacotes começaram a ser duplicados e encaminhados na rede mais rapidamente, acarretando mais descartes. Isso mostrou que o *Spray and Wait* é sensível a capacidade de armazenamento dos nós e que o Adaptativo se destaca pela eficiência do seu algoritmo de encaminhamento. O *Epidemic* alcançou os piores resultados justamente porque muitos pacotes deixaram de circular na rede por terem sido descartados. Nesse caso, os pacotes mais antigos ainda não entregues eram eliminados para dar lugar aos novos que estavam chegando, ocasionando a não entrega de muitos pacotes antigos na rede.

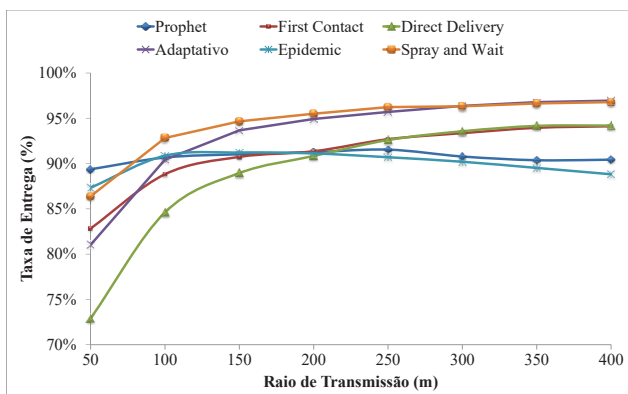


Fig. 2. Taxa de entrega vs. raio de transmissão.

Em contrapartida, o protocolo *Epidemic* apresentou os menores atrasos na entrega dos pacotes (vide Figura 3). Nesse caso, os pacotes que não eram perdidos ele os entrava rapidamente, gastando em média 23 minutos para isso. Os maiores atrasos foram obtidos pelos protocolos *First Contact* e *Direct Delivery* por eles não permitirem duplicatas de pacotes circulando na rede. Como já era esperado, a medida que o raio aumenta, o atraso médio tende a diminuir. O Adaptativo e o *Spray and Wait* apresentaram resultados medianos, levando em média 35 e 34 minutos para entregar os pacotes gerados, respectivamente.

É possível observar por meio da Figura 4 que o aumento do raio não interfere muito no número de nós intermediários que os pacotes passam até chegar ao destinatário. A maior parte dos roteamentos precisaram de menos do que 3 saltos para isso. A única exceção foi o *First Contact*, que apresentou

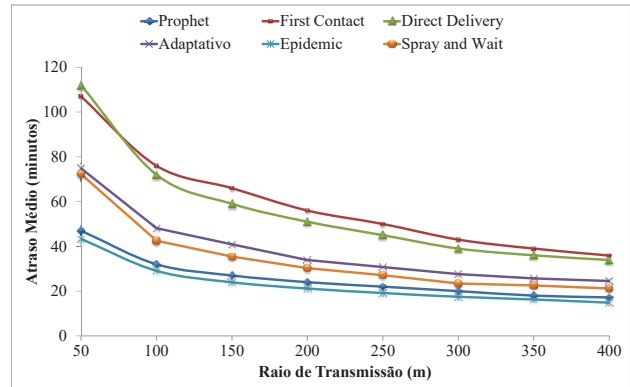


Fig. 3. Atraso médio vs. raio de transmissão.

um número muito maior de saltos devido à sua característica endêmica, responsável por repassar os pacotes sempre para o próximo nó com quem tiver contato. Por isso, a média de saltos desse protocolo foi 11. Na outra ponta, o *Direct Delivery* precisa de um único salto para entregar os pacotes, já que ele não utiliza nós intermediários para auxiliar no roteamento. O Adaptativo precisou, em média, de 1.56 saltos para entregar os pacotes.

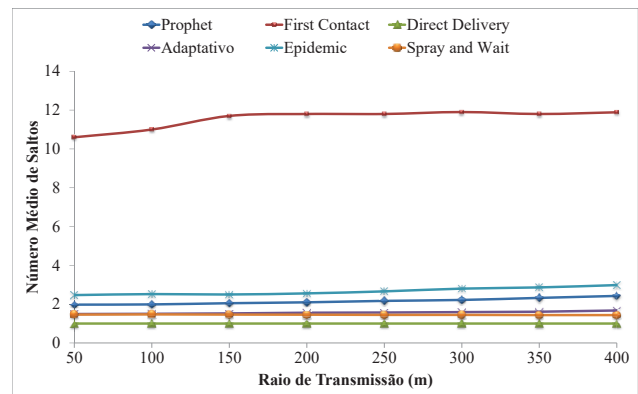


Fig. 4. Número médio de saltos vs. raio de transmissão.

B. Cenário 2: Alternando a Quantidade de Dados Gerados

Pesquisas indicam que a quantidade de dados circulando na Internet aumentou significativamente nos últimos anos [29]. Isso nos leva a analisar conjunturas que contenham intenso tráfego de dados sendo gerado pelos nós da rede móvel. O objetivo desse cenário é analisar o desempenho dos protocolos de roteamento em função da carga de dados gerada e transmitida na rede. Nesse sentido, foram consideradas as seguintes quantidades de dados sendo gerada por usuário por segundo: 150, 500, 750, 1000, 1250 e 1500 KBytes.

A Figura 5 mostra que as taxas de entrega de todos os roteamentos analisados são impactadas negativamente pelo aumento da quantidade de dados circulando na rede. À medida que a quantidade de dados circulando aumenta, mais deles são jogados fora pela falta de capacidade de armazenamento dos

nós (ônibus), configurada a princípio como sendo 5 GBytes. O raio de transmissão configurado nesse cenário foi de 100 metros para todos os nós da rede.

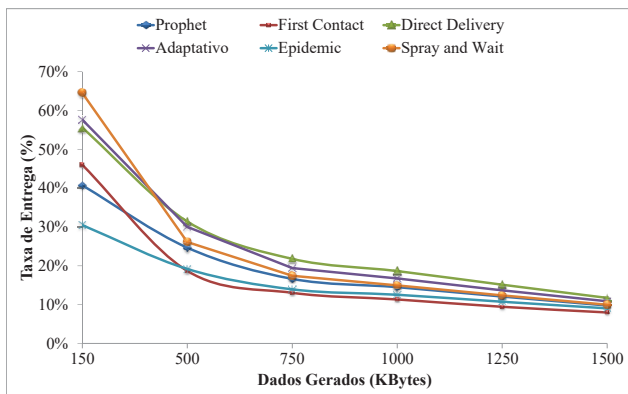


Fig. 5. Taxa de entrega vs. dados gerados.

O protocolo menos afetado foi o *Direct Delivery*. Isso ocorreu porque ele não usa nós intermediários para rotear os pacotes, proporcionando maior equidade em relação a quantidade de dados armazenado e transportado por cada ônibus na rede. O Adaptativo, embora também tenha obtido uma curva decrescente para a métrica taxa de entrega, conseguiu obter taxas superiores a maior parte dos protocolos de roteamento analisados. Isso fez sobressair sua política inteligente de descarte de pacotes, responsável por evitar um descarte desnecessário deles e, quando tiver que ocorrer, descartar os pacotes com menor chances de serem entregues na rede.

Embora pareça estranho, o aumento da quantidade de dados circulando na rede fez cair o tempo médio gasto para entregar os pacotes aos seus respectivos destinatários (vide Figura 6). Não houve mérito algum por parte dos protocolos que justificasse essa queda. De fato, o que ocorreu foi que muitos pacotes começaram a ser perdidos na rede e os que eram entregues, se dava porque conseguiam alcançar seu destino rapidamente. Nota-se que os protocolos *Prophet*, Adaptativo, *Epidemic* e *Direct Delivery* obtiveram aproximadamente os mesmos atrasos médios a partir de 500 KBytes gerados por usuário. Os protocolos responsáveis pelos menores atrasos foi o *First Contact* e o *Spray and Wait*.

Conforme pode-se observar na Figura 7, o número médio de saltos necessários para entregar os pacotes não foi drasticamente alterado em função da carga de dados gerada na rede para os protocolos *Prophet*, Adaptativo e *Spray and Wait*. Eles gastaram em média 1,88; 1,30 e 1,96 saltos, respectivamente, para que os pacotes alcançassem seu destino. Como já era esperado, o algoritmo de roteamento do *Direct Delivery* só permite fazer 1 salto. A política de transmissão de dados do Adaptativo fez com que ele só encaminhasse pacotes para os nós que encontrariam o destinatário do pacote mais rapidamente. Isso evitou retransmissões desnecessárias e diminuiu a sobrecarga de dados na rede, fazendo com que menos pacotes sejam perdidos e, assim, mais deles tenham chances de serem entregues.

De modo geral, o protocolo proposto nesse trabalho mostrou

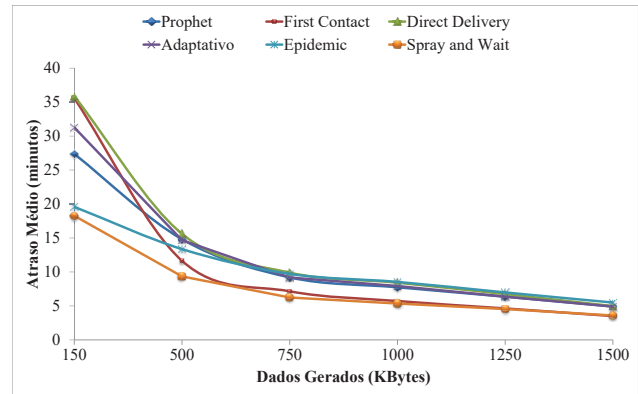


Fig. 6. Atraso médio vs. dados gerados.

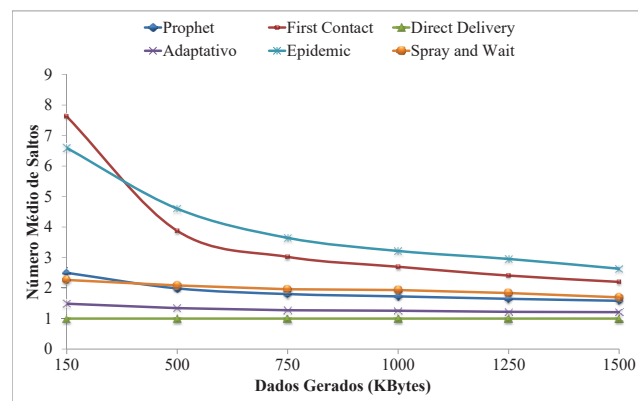


Fig. 7. Número médio de saltos vs. dados gerados.

ser versátil e ter a capacidade de se adaptar dinamicamente às condições atuais da rede. Sua política de encaminhamento garante elevadas taxas de entrega, sobretudo em cenários onde os nós possuem maiores raios de transmissão e em redes com tráfego de dados menos intenso. As movimentações determinísticas dos ônibus serviram como base para que o Adaptativo efetuasse cálculos mais precisos do HPE, primordial para alcançar maiores taxas de entrega. As simulações mostraram também que a sobrecarga de dados é baixa quando se usa o Adaptativo e que ele faz uso, em média, de um menor número de nós intermediários para entregar os pacotes na rede.

VI. CONCLUSÃO

O protocolo Adaptativo, objeto de estudo desse trabalho, apresentou resultados satisfatórios para todas as métricas analisadas (taxa de entrega, atraso médio e média de saltos) em ambos os cenários investigados (variando o raio de transmissão e a quantidade de dados gerada na rede). Observou-se que para um raio de transmissão igual ou superior a 300 metros, o Adaptativo alcança as melhores taxas de entrega de dados na rede veicular analisada. Ficou claro também que, quando comparado aos demais algoritmos de roteamento, o Adaptativo sofre menos ao ser utilizado em redes com intenso tráfego de dados. As estratégias de encaminhamento e descarte de pacotes adotadas pelo Adaptativo foram fundamentais para que ele

obtivesse tal desempenho, mostrando ser um protocolo que consegue se adaptar às adversidades impostas a rede móvel dinamicamente configurada.

Como trabalhos futuros recomenda-se avaliar o Adaptativo em outras redes móveis, montadas, se possível, a partir da movimentação de pessoas e veículos em grandes centros urbanos, com um número ainda maior de nós gerando e transmitindo dados na rede. Recomenda-se também fazer uma análise mais detalhada sobre o valor dos parâmetros a serem configurados no Adaptativo. Espera-se que uma calibração mais adequada possa gerar resultados ainda melhores.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Moudni, M. Er-rouidi, H. Mouncif, and B. E. Hadadi, "Secure routing protocols for mobile ad hoc networks," in *2016 International Conference on Information Technology for Organizations Development (IT4OD)*. IEEE, mar 2016, pp. 1–7.
- [2] W. Wu, Z. Yang, and K. Li, "Internet of Vehicles and applications," in *Internet of Things*, A. D. R. Buyya, Ed. Elsevier, 2016, ch. 16, pp. 299–317.
- [3] Y. Tang, N. Cheng, W. Wu, M. Wang, Y. Dai, and X. Shen, "Delay-minimization routing for heterogeneous vanets with machine learning based mobility prediction," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3967–3979, April 2019.
- [4] M. R. Ghorri, K. Z. Zamli, N. Quosthoni, M. Hisyam, and M. Montaser, "Vehicular ad-hoc network (vanet): Review," in *2018 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, May 2018, pp. 1–6.
- [5] A. V. Vasilakos, Y. Zhang, and T. Spyropoulos, Eds., *Delay Tolerant Networks*, 1st ed. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, apr 2016.
- [6] L. Gao, S. Yu, T. H. Luan, and W. Zhou, *Delay Tolerant Networks*, 1st ed., ser. SpringerBriefs in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [7] S. Krug, M. Aumüller, and J. Seitz, "Hybrid scheme to enable dtn routing protocols to efficiently exploit stable manet contacts," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2018, no. 1, p. 237, Oct 2018.
- [8] A. Picu and T. Spyropoulos, "Dtn-meteo: Forecasting the performance of dtn protocols under heterogeneous mobility," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, no. 2, pp. 587–602, April 2015.
- [9] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelén, "Probabilistic routing in intermittently connected networks," *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 7, no. 3, pp. 19–20, 2003.
- [10] Y. Mao, C. Zhou, Y. Ling, and J. Lloret, "An Optimized Probabilistic Delay Tolerant Network (DTN) Routing Protocol Based on Scheduling Mechanism for Internet of Things (IoT)," *Sensors*, vol. 19, no. 2, p. 243, jan 2019.
- [11] E. C. R. de Oliveira and C. V. N. de Albuquerque, "NECTAR," in *Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing - SAC '09*. New York, New York, USA: ACM Press, 2009, p. 40.
- [12] A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, "The one simulator for dtn protocol evaluation," in *Proceedings of the 2Nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, ser. Simutools '09. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST, 2009, pp. 55:1–55:10.
- [13] S. Jain, K. Fall, and R. Patra, "Routing in a delay tolerant network," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 34, no. 4, pp. 145–158, Aug. 2004.
- [14] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Single-copy routing in intermittently connected mobile networks," in *2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004.*, Oct 2004, pp. 235–244.
- [15] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks," *Technical Report*, 06 2000.
- [16] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks," *Direct*, pp. 252–259, 2005.
- [17] A. P. da Silva, S. Burleigh, and K. Obraczka, Eds., *Delay and Disruption Tolerant Networks: Interplanetary and Earth-Bound – Architecture, Protocols, and Applications*, 1st ed. CRC Press, sep 2018.
- [18] M. Grossglauser and D. N. C. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, pp. 477–486, Aug. 2002.
- [19] E. C. R. D. Oliveira, "Análise do protocolo nectar em cenários com mobilidade e frequentes interrupções," *SBRC XXVII*, pp. 771–784, 2009.
- [20] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 16, no. 1, pp. 77–90, 2008.
- [21] H. Wang, H. Lv, H. Wang, and G. Feng, "DCAR: DTN Congestion Avoidance Routing Algorithm Based on Tokens in an Urban Environment," *Journal of Sensors*, vol. 2017, pp. 1–9, 2017.
- [22] M. R. Penurkar and U. A. Deshpande, "Priority-based scheduling policy for a hybrid routing algorithm in a vehicular delay toleant network," in *2016 International Conference on Computing, Analytics and Security Trends (CAST)*, Dec 2016, pp. 578–583.
- [23] T. Bhotmange and M. Penurkar, "Region based routing in delay tolerant networks," in *2015 International Conference on Computing Communication Control and Automation*, Feb 2015, pp. 315–321.
- [24] Y. Kuronuma, H. Suzuki, and A. Koyama, "An Adaptive DTN Routing Protocol Considering Replication State," in *2017 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. IEEE, mar 2017, pp. 421–426.
- [25] A. Yassine, S. Singh, and A. Alamri, "Mining human activity patterns from smart home big data for health care applications," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13 131–13 141, 2017.
- [26] M. Appiah, "The impact of mobility models on the performance of mobile ad hoc network (manet)," in *2016 International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE)*, Nov 2016, pp. 208–213.
- [27] R. F. Campos, C. A. V., Moraes, L. F. M. de, Silva, "Caracterização da Mobilidade Veicular e o seu Impacto nas Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões," in *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, Gramado, RS, Brasil, 2010, pp. 585–598.
- [28] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelén, "Probabilistic routing in intermittently connected networks," *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, pp. 19–20, July 2003.
- [29] A. D. Donald and G. Murali, "Selective ensemble of Internet traffic classifiers for improving malware detection," in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*. IEEE, aug 2017, pp. 3548–3551.



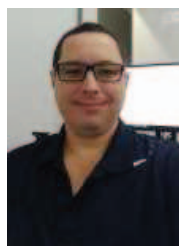
Rodrigo Freitas Silva Técnico em Informática Industrial pelo CEFET-MG (2001), graduado em Ciência da Computação pela UFJF (2006), mestre em Engenharia de Sistemas e Computação pela COPPE/UFRJ (2010) e doutor em Ciências Florestais pela UFES (2018) com ênfase em Otimização de Recursos. Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Computação do CCENS/UFES. Tem experiência na área de Ciência da Computação, Otimização Combinatória e Redes de Computadores.



Pedro Henrique Alves Braga Graduado em Ciência da Computação pela UFT (2012). Atualmente trabalha como Analista de TI no Banco do Brasil (BB) atuando no suporte de infraestrutura de TI, servidores (Físicos e Virtuais), virtualização, backup (Tivoli TSM - Spectrum Protect), Storage (High-end) e Fileservices.



Helder de Amorim Mendes Possui Bacharelado em Informática pela UFV (1992), mestrado em Computação pela UFF (2004) e doutorado em Ciências Florestais pela UFES (2016). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Computação do CCENS/UFES. Tem experiência na área de Ciência da Computação com ênfase em Redes de Computadores e Arquitetura de Sistemas de Computação.



Marcelo Otone Aguiar Graduado em Processamento de Dados pela UNESC (2005), licenciado em Matemática pelo CUS (2011), especialização em Gerenciamento de Projetos pela UVV (2008) e em Informática na Educação pelo IFES (2014), mestre em Administração pela FUCAPE (2012). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Computação do CCENS/UFES. Atua na área de Otimização, Estrutura de Dados, Processamento de Dados e Implementação de Sistemas.