

An Intelligent Edge-Traffic Routing Architecture for Vehicular Data-Mule Services

G. Araújo and L. Sampaio

Abstract—Using vehicles as a data mule in vehicular networks contributes to a greater capacity for data offloading from network devices in urban computing scenarios. The biggest obstacle in this type of solution resides in the complexity of managing a communication infrastructure composed of elements spread over different levels of the network. This work proposes the intelligent Edge-Traffic Routing (iETR) architecture, which provides geocast data mule services in urban computing to transport high volumes of data, based on requirements defined by the application. We implement and evaluated iETR through simulation. The results show that it can successfully reduce data transfer times and ensure application scalability, through vehicles distributed at the network edge.

Index Terms—Data Offloading, Data Mule, Urban Computing, VANET.

I. INTRODUÇÃO

Em cenários de computação urbana [1], soluções de descarregamento e transferência de dados em massa são necessárias para otimizar recursos e garantir escalabilidade de redes metropolitanas e aplicações distribuídas na borda. Tais benefícios motivaram a proposição de diferentes soluções para lidar com o problema de transferência de dados entre a borda e núcleo da rede [2].

Tendo em vista descarregamento, estratégias foram propostas para fazer o uso de redes heterogêneas como alternativa à redução de tráfego de dados em redes celulares [2], [3]. O problema, contudo, é que muitas soluções oportunistas trabalham com entrega baseada no melhor esforço e desconsideram o custo, largura de banda e taxa de dados necessária para oferecer serviços de qualidade. Em muitos casos, não existe um mecanismo de incentivo para um dispositivo na rede encaminhar dados. Além disso, poucas propostas dão enfoque na possibilidade de segmentação do tráfego e oportunidade de utilizar agentes móveis, responsáveis pelo transporte físico de dados entre dispositivos de rede e pontos de acesso na borda, conectados à Internet. Outras iniciativas utilizam veículos do transporte público [4], [5], devido às rotas e veículos serem previamente conhecidos, para soluções de encaminhamento de dados em cidades inteligentes. Entretanto, essas propostas não gerenciam as demandas em tempo real e não consideram que a densidade de veículos pode variar bastante, dependendo de determinados horários, dias da semana, eventos etc. Assim, torna-se um desafio garantir escalabilidade da proposta à medida que a demanda por transporte de dados aumenta.

Uma estratégia bem explorada na literatura, para coletar dados em redes sem fio de sensores (do inglês, *Wireless Sensor Networks* – WSNs), é utilizar o suporte de um agente especial móvel conhecido como “Mula de Dados” (do inglês, *Data Mobile Ubiquitous LAN Extensions – Data Mule*) [6], [7]. Em tais soluções, tanto os dispositivos de rede quanto a mula de dados utilizam tecnologias de comunicação sem fio, podendo possuir equipamentos com diferentes alcances. A comunicação ocorre apenas quando a distância entre esses nós está dentro do raio de alcance de comunicação dos seus equipamentos. Durante o tempo de visita (contato), a mula pode fazer *upload* e *download* de dados para alcançar o descarregamento.

O serviço de mula de dados contribui para a otimização do uso de recursos de redes metropolitanas. Contudo, o seu gerenciamento é uma tarefa complexa, uma vez que necessita utilizar roteamento multimodal para seleção de caminhos para múltiplas mulas, fazer gerenciamento de velocidade de deslocamento e realizar o escalonamento de tarefas para coleta de dados em cada um dos dispositivos solicitados. Em [7]–[9] os autores retratam o problema e complexidade de escalonamento e planejamento de rotas para mula de dados (do inglês, *Data Mule Scheduling Problem – DMSP*). O DMSP pode ser reduzido em um problema de caminho mínimo em um grafo ponderado, o que o remete à classe de problemas \mathcal{NP} -difícil na teoria da complexidade computacional. Nesse caso, desenvolver algoritmos eficientes para resolução em um tempo computacional aceitável, é um grande desafio, a medida que o número de pontos para coleta dos dados é maior. Apesar desta complexidade, em computação urbana o problema pode ser visualizado de uma outra perspectiva, em função dos possíveis benefícios obtidos com sua solução. Isto porque veículos que trafegam na região metropolitana possuem recursos computacionais para fazer o transporte de dados sob demanda, oportunisticamente, e a partir de modelos de incentivos, que os fazem atuar como “Uber” de dados.

O DMSP pode ser concebido em cenários de redes veiculares a partir do padrão de comunicação C-V2X (do inglês, *Celular Vehicle-To-Everything communication*). O C-V2X é definido pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) como uma alternativa ao padrão IEEE 802.11p para conectividade entre veículos e demais dispositivos de borda, sendo, portanto, ideal para cenários de cidades inteligentes [10]. Desta forma, a comunicação e conectividade C-V2X potencializa a utilização de veículos para mula de dados. Contudo, devido a complexidade para implementação de serviços desta natureza em cenários urbanos, faz-se necessário uma estrutura que permita o funcionamento, disponibilidade, gerenciamento e controle do serviço em tempo real, de forma flexível e sob

MSc. Araújo, G. is with Federal University of Bahia - UFBA, Salvador, Brazil and Federal University of Recôncavo da Bahia - UFRB, Cruz das Almas, Brazil. (e-mail: guilherme.araujo@ufrb.edu.br)

Prof. Dr. Sampaio, L. is with Federal University of Bahia - UFBA, Salvador, Brazil. (e-mail: leobino@ufba.br)

demanda. Ademais, é preciso considerar, além da capacidade dos veículos em armazenar conteúdo temporariamente, aspectos de roteamento multimodo, mobilidade e tráfego na rede veicular, estimativa de tempo necessário para realizar o transporte de dados e verificação de requisitos de desempenho e capacidade, para entrega do conteúdo dentro do prazo estipulado. Assim, este trabalho busca identificar como prover serviços otimizados de transporte de dados em massa de forma escalável, confiável e sob demanda em centros urbanos.

Diante destas questões, é proposto a **iETR** (do inglês, *intelligent Edge-Traffic Routing*), uma arquitetura para serviços otimizados e flexíveis de transporte de grande volume de dados, entre a borda e o núcleo da rede na Internet, através de mula de dados veicular. A iETR utiliza veículos como possíveis nós de névoa móveis, para permitir elasticidade da infraestrutura de borda e garantir qualidade de serviço e escalabilidade de aplicações de redes metropolitanas. Um controlador de rede faz o planejamento de capacidade sob demanda, e, através de roteamento multimodal e múltiplas mulas veiculares, otimiza o tráfego de dados em massa entre a borda e a Internet. Além disso, a iETR introduz um modelo de incentivo para transporte de dados que visa garantir a entrega de dados dentro do prazo contratado pela aplicação, bem como balancear agentes móveis (veículos) na rede. O plano de controle da arquitetura encapsula toda complexidade do serviço para o plano de aplicação, facilitando desenvolvimento de aplicações distribuídas para cidades inteligentes.

A avaliação da iETR foi feita através de uma prova de conceito que envolveu a concepção de um Sistema Integrado de Gerenciamento e Monitoramento de Câmeras de Segurança Pública (SIG-Mon). O SIG-Mon foi avaliado por meio de simulação, em que foi reproduzida parte da topologia da rede acadêmica da Universidade Federal da Bahia (UFBA). A rede veicular foi composta por automóveis particulares e veículos do transporte público, utilizados como mulas de dados para transferência de dados de câmeras de vigilância espalhadas pelo *campus*. Os experimentos demonstraram a capacidade da iETR em oferecer transferência de dados em massa como serviço de rede, de forma transparente para aplicação.

Este trabalho está organizado em cinco seções. A Seção II apresenta alguns trabalhos relacionados. A Seção III discute detalhes da arquitetura proposta para serviços de mula de dados em computação urbana. A Seção IV descreve a implementação da iETR no ambiente de simulação e os resultados obtidos que serviram como prova de conceito. Por fim, a Seção V apresenta a conclusão e potenciais trabalhos futuros.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

O conceito de mula de dados apresentado na literatura está relacionado a um agente móvel com boa capacidade de armazenamento e equipado com tecnologias de comunicação sem fio, para se comunicar com outros dispositivos de rede e pontos de acesso conectados à Internet. Trata-se de um conceito muito utilizado em cenários de redes móveis ad hoc (MANETs) e redes tolerantes a atrasos e desconexões para prover conectividade entre dispositivos em áreas remotas e a Internet e, conseqüentemente, criar efetivamente um meio de

comunicação [7], [11]. Também é utilizado em redes centradas em conteúdo, como NDN (*Named Data Networking*) [12], [13], em que um dos papéis de dispositivos móveis na rede é transportar e espalhar conteúdo entre diferentes áreas. Apesar dos atrasos iniciais no processo de encaminhamento de dados via mula de dados, é possível obter altas taxas de dados, considerando o tempo total de transferência. Por exemplo, o transporte de 1 TB de dados durante um dia, realizado por uma mula, equivale a uma taxa de efetiva de 100 Mbps. Portanto, ao utilizar centenas ou milhares de agentes móveis como mulas, além de ampliar a área de cobertura, a rede pode aumentar bastante sua capacidade total de vazão dos dados (*throughput*).

Pelo fato do DMSP se tratar de um problema \mathcal{NP} -difícil, muitas propostas na literatura propõem heurísticas para solução do problema [7], [9]. Outras propostas baseiam-se na redução do número de mulas [4], [5], [9], [11], [14] para coleta dos dados e utilização de rotas estáticas ou planejadas previamente. Em [11], os autores utilizaram barcos como agentes móveis para prover conectividade e oferecer alternativas de descarregamento de dados, entretanto, reduz a complexidade do problema escalonando veículos previamente para serviços de coleta de dados. Os trabalhos apresentados em [4], [5] utilizam veículos do transporte público urbano para coleta de dados de sensores espalhados em regiões urbanas. Tais soluções usam veículos que possuem rotas estáticas previamente estabelecidas, o que também reduz a complexidade, mas não garante escalabilidade da proposta. Além disso, em certos horários e dias da semana a densidade desses tipos de veículos caem drasticamente, conseqüentemente, diminui o *throughput*.

Em [13] veículos são utilizados para estratégias de encaminhamento de conteúdo temporário (transitório). Nesta iniciativa, veículos atuam como mulas de dados entre áreas desconectadas, a fim de contribuir oportunisticamente com espalhamento do conteúdo na rede. No entanto, os próprios veículos são responsáveis por decisões individuais de encaminhamento e a entrega é feita no melhor esforço. Assim, não existe um serviço confiável para transporte dos dados que garanta a entrega dentro de um prazo estipulado.

O levantamento dos trabalhos destacados nesta seção teve como foco principal propostas que utilizam agentes móveis, em áreas urbanas, responsáveis por realizar a coleta e transporte de dados entre dispositivos de rede através de serviços de mula de dados. No entanto, existe um amplo conjunto de soluções para o alto volume de dados produzido por aplicações na borda da rede [2], [3]. Contudo, a arquitetura apresentada neste trabalho difere das demais descritas na literatura por permitir serviços otimizados para transporte físico de grande volume de dados, além de tratar de limitações apresentadas relacionadas a confiabilidade, escalabilidade e viabilidade em cenários de computação urbana.

III. ARQUITETURA iETR PARA MULA DE DADOS EM COMPUTAÇÃO URBANA

Na iETR, os veículos são utilizados como mulas de dados para aumentar o raio de cobertura de uma infraestrutura de névoa fixa e permitir ampliar a vazão de dados entre a borda e núcleo da rede, em diferentes cenários de computação urbana. Para isso, a arquitetura foi projetada para

endereçar quatro requisitos fundamentais: (i) Disponibilidade, visa garantir provimento do serviço a diferentes tipos de dispositivos; (ii) Elasticidade, relacionada ao uso dinâmico dos recursos conforme a demanda por descarregamento; (iii) Escalabilidade, de modo a apoiar diferentes tipos de aplicações de transferência de dados em massa entre a borda e a Internet, com centenas ou milhares de dispositivos espalhados em áreas urbanas; (iv) Flexibilidade, permite serviços de roteamento ciente de aplicação para garantir níveis mínimos de qualidade de serviço aos usuários e sistemas.

As próximas subseções apresentam e detalham o funcionamento dos componentes e das camadas da arquitetura iETR tendo em vista atender os requisitos mencionados acima.

A. Visão Geral

A Figura 1 resume a iETR. Seus elementos proveem o transporte de dados bidirecional, sem conexão, entre a borda e o núcleo da rede, distribuídos em camadas conforme a seguir:

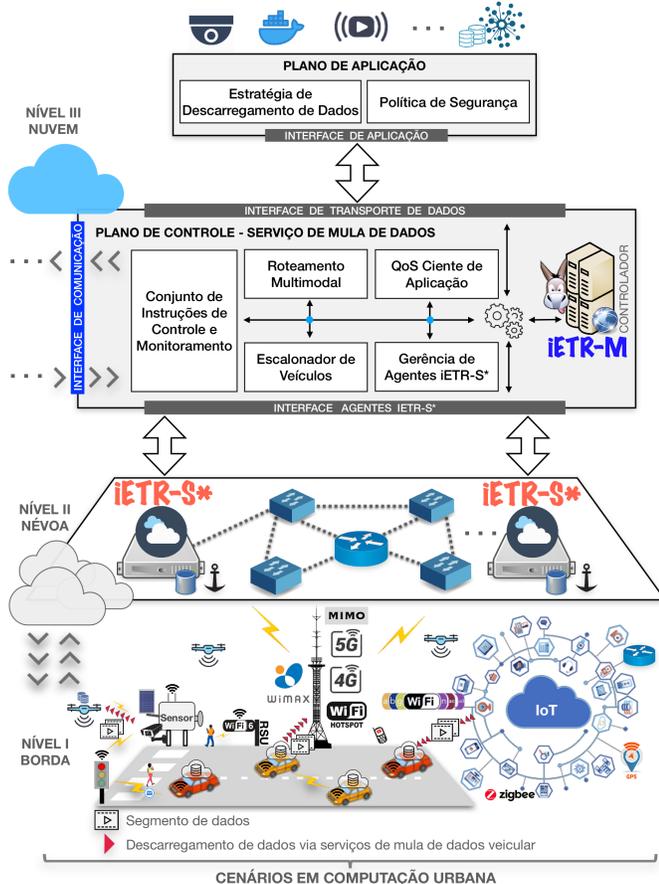


Fig. 1. Visão geral da arquitetura iETR para serviços de transporte e descarregamento de dados via mula de dados.

- **Nuvem:** Concentra os elementos que fazem o planejamento, controle, escalonamento e gerência centralizada das requisições por serviços de transporte de dados para Internet. A finalidade é garantir a flexibilidade na disponibilização de serviços sob demanda, abstraindo para o usuário toda complexidade envolvida. Possuem aplicações de rede que projetam diferentes estratégia de descarregamento e adotam políticas de segurança.

- **Névoa:** Permite diferentes mecanismos de encaminhamento (e.g., roteamento por segmento, IPv6, NDN) para diferentes tipos de redes e tecnologias, como MPLS, 5G, WIFI6. A finalidade é multiplicar a capacidade de descarregamento de dados usando múltiplas canais de transmissão e recepção para explorar a propagação em múltiplos caminhos. Possui componentes responsáveis pela gerência local de infraestruturas de névoa e transporte de dados. Seus elementos orquestram serviços de ancoragem de veículos e descarregamento através de tecnologias de comunicação sem fio disponíveis.
- **Borda:** Localiza-se dispositivos IoTs (do inglês, *Internet-of-Things*), veículos, RSUs (do inglês, *Roadside Units*), ERBs (Estações Radio Base) e pontos de acesso georeferenciados. Os dispositivos são equipados com tecnologias de comunicação sem fio (e.g., 5G, WIFI6) e os veículos fazem o transporte físico de dados na rede. Esta camada também contempla elementos que ajudam a oferecer conectividade à Internet para outros nós.

B. Componentes da iETR

A iETR propõe dois elementos principais, iETR-M (Mestre) e iETR-S* (Sub-Sistema), para gerência, controle e suporte de serviços distribuídos de transporte e descarregamento de dados via múltiplas mulas de dados veiculares, respectivamente. Além de tais elementos, a iETR ainda conta com dispositivos de rede, unidades de acostamento, estações radio base e veículos que fazem parte da rede veicular. Os papéis e funções de cada componente foram definidos conforme a seguir.

1) *iETR-M*: É o controlador responsável por planejar, calcular e otimizar rotas multimodais de acordo com a infraestrutura e largura de banda disponível entre a localização geográfica dos dispositivos de origem e destino dos dados. Além disso, é papel do iETR-M planejar a capacidade, gerenciar a demanda, monetização e custo do serviço. Tais ações são baseadas na infraestrutura disponível, tecnologias a serem utilizadas, tempo e distância necessária a ser percorrida por veículos, a fim de atender uma requisição para serviço.

2) *iETR-S**: Localiza-se próximo à borda da rede e tem como principais funções monitorar, gerenciar uma determinada infraestrutura de névoa e tecnologias disponíveis para descarregamento de dados. O iETR-S* ajuda o iETR-M na realização de serviços de transporte de dados e auxilia veículos, presentes na área de cobertura de uma infraestrutura, em serviços de ancoragem e descarregamento de dados, utilizando tecnologias apropriadas e disponíveis para transmissão dos dados.

3) *Dispositivos de Rede*: Localizam-se próximos da borda ou centralizados no núcleo da rede e apoiam a geração de dados e coleta de informações do ambiente. Cada dispositivo ou aplicação pode encaminhar para iETR-M requisições de serviços de descarregamento ou transporte de dados em massa. Os dispositivos de borda, através de protocolos de ancoragem, também auxiliam no processo de transmissão dos dados, quando agente móvel, responsável pela coleta das informações, entra no raio de comunicação do dispositivo.

4) *RSUs/ERBs*: A iETR visa aumentar as taxas de dados através da otimização de recursos de comunicação e integração

de redes heterogêneas. Assim, a arquitetura aproveita parte da infraestrutura já existente de redes celulares, com tecnologias LTE/4G e 5G, e pontos de acesso, espalhados pela cidade com tecnologias WiFi, para também aumentar a conectividade e alcance do serviço.

5) *Veículos*: Tais elementos oferecem elasticidade ao serviço de descarregamento de dados. Estão presentes na borda e atuam como nós distribuídos de um serviço de repositório de dados móvel, controlado pelo iETR-M, para aumentar a área de cobertura de uma infraestrutura fixa de névoa e melhorar *throughput*. O papel dos veículos é transportar dados fisicamente entre dispositivos de borda e uma infraestrutura de névoa gerenciada pelo iETR-S*, atuando como mula de dados.

C. *Funcionamento*

Para prover serviços de transporte e descarregamento de dados através da rede viária, a iETR utiliza um grafo, $G_{RV} = (V(G_{RV}), A(G_{RV}))$, para modelagem e representação do ambiente veicular e infraestrutura urbana disponível. O conjunto $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ representa os cruzamentos (vértices), enquanto o conjunto $A = \{a_{12}, a_{13}, \dots, a_{ij}\}$ corresponde ao conjunto de vias (arestas). Dessa forma, a aresta a_{ij} é definida por um par de vértices subsequentes $(v_i, v_j) \in V(G_{RV})$. Além disso, $P = \{p_{12}, p_{13}, \dots, p_{ij}\}$ é o conjunto de pesos que representa a condição de tráfego em cada via. O conjunto de pesos $D = \{d_{12}, d_{13}, \dots, d_{ij}\}$ representa a distância, em metros, de cada aresta a_{ij} no cenário. Seja $N = \{n_1, n_2, \dots, n_i\}$ o conjunto de veículos na rede, uma rota qualquer $R \forall n \in N$ implica $R = \{a_{ij}, \dots, a_{mn}\} \mid R \subseteq A(G_{RV})$. Assim, resumidamente, uma rota veicular para iETR-M representa um caminho no grafo, que identifica ruas que um veículo n tem que percorrer a partir de uma localização de origem ou posição atual até o destino final, passando por pontos de coleta e descarregamento de dados na borda da rede.

O iETR-M também utiliza um grafo ponderado e dirigido, $G_{TN} = (V(G_{TN}), A(G_{TN}))$, para modelar toda topologia de névoa disponível e possibilitar calcular o tempo necessário para transmissão de dados entre componentes iETR-S*, em determinada infraestrutura de névoa, e a Internet. O tempo total para transferência de dados para iETR corresponde ao somatório do tempo de transporte (realizado por mulas de dados na rede veicular) e tempo de transmissão dos dados (entre nós iETR-S* e a Internet). Assim, o controlador iETR-M, através dos sub-controladores iETR-S*, mantém informações atualizadas de engenharia de tráfego de toda infraestrutura de névoa disponível para descarregamento de dados em áreas urbanas. Dessa maneira é possível monitorar, em tempo real, o fluxo em toda rede disponível e, conseqüentemente, estimar o tempo necessário para transferência de dados.

Para gerar uma solicitação de serviço de descarregamento de dados, basta um dispositivo de rede encaminhar uma requisição para controlador iETR-M, na Internet, passando: a localização para coleta dos dados, tempo limite (*deadline*), volume de dados em bytes e endereço de destino, para onde os dados devem ser encaminhados. O iETR-M irá avaliar a solicitação, escalonar veículos baseado na infraestrutura disponível e definir a melhor rota multimodal levando em consideração a menor estimativa de tempo calculada. Os custos são

baseados na demanda, tempo necessário e distância percorrida pelo veículo para transporte dos dados. Concluída a fase de planejamento, o iETR-M avalia se consegue cumprir o prazo (*deadline*) sugerido. Caso consiga atender, uma mensagem de retorno com informações sobre o tempo e custo necessário para o serviço é encaminhada ao nó que fez a solicitação. O controlador aguarda uma confirmação para iniciar o serviço.

A Figura 2 ilustra em alto nível essa sequencia básica de mensagens, operações e interações dos componentes da arquitetura iETR, para uma requisição típica de transporte de dados via mula de dados veicular, feita por um dispositivo na borda da rede. É possível observar que após receber uma requisição o controlador iETR-M já encaminha para o devido nó iETR-S* mensagens DMSA (*Data Mule Service Advertisement*). O sub-controlador na névoa então define a tecnologia a ser utilizada e publica as mensagens de anúncio na rede. Veículos ao receberem tais mensagens, na área de cobertura, podem se candidatar para atender a demanda específica, enviando uma mensagem de interesse com as devidas informações. A RSU/ERB e iETR-S* encaminham a mensagem de interesse dos veículos para o controlador na Internet. Nesse momento, é responsabilidade do iETR-M fazer todo planejamento de capacidade e controle discutido anteriormente para, depois do aceite do dispositivo de rede, prosseguir com o serviço, encaminhando a rota multimodal para o veículo selecionado para transporte dos dados. É responsabilidade do agente móvel, ao finalizar a entrega dos dados, enviar uma notificação para o controlador, confirmando encerramento do serviço de mula de dados.

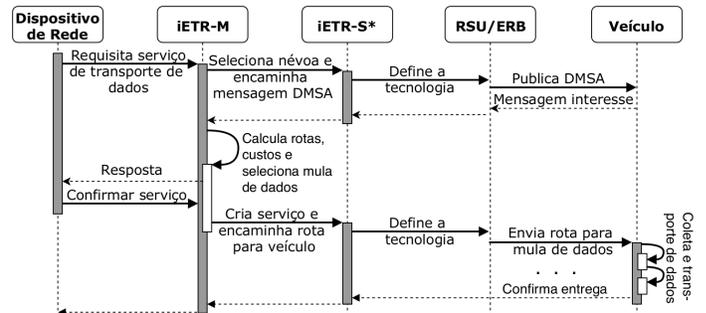


Fig. 2. Sequência básica de mensagens e operações para serviços de mula de dados na arquitetura iETR.

O algoritmo de escalonamento e seleção de veículos para mula de dados, proposto para arquitetura, e instalado no iETR-M, seleciona k -veículos interessados mais próximos do ponto de coleta dos dados e calcula, dentre os k -veículos, o que possui a rota mais rápida para transporte dos dados. As informações de velocidade média, necessárias para estimar o tempo de deslocamento dos veículos nas vias, são obtidas através da interação entre outros sistemas de transporte inteligentes (do inglês, *Intelligent Transportation System – ITS*), como, por exemplo, Waze e Google Maps, que avaliam e estimam as condições de tráfego e mobilidade na rede veicular.

D. *Mecanismo de Incentivo*

A arquitetura iETR utiliza um mecanismo de incentivo para transporte de dados, a fim de aumentar a oferta de

veículos para realização do serviço de descarregamento. Essa estratégia é importante devido à densidade de veículos na rede veicular variar conforme o horário, dia da semana ou épocas do ano. Para isso, a Equação 1, que se baseia em um fator multiplicativo de uma unidade monetária u_m (por padrão R\$1,00) e um peso ρ , é utilizada para estimar o valor base de recompensa I para o veículo selecionado para transporte.

$$I = (t_{transporte} + d_{viagem}) \times u_m \times \rho \quad (1)$$

A equação proposta leva em consideração o tempo em minutos para transporte dos dados $t_{transporte}$ e a distância em quilômetros d_{viagem} entre os pontos de coleta e descarregamento. O peso ρ é, por padrão, igual a 1. Porém, pode ser utilizado para otimizar estimativas de custos a partir de outros parâmetros, tais como a tecnologia utilizada para transferência dos dados, demanda do serviço de transporte, densidade de agentes móveis na rede, etc. Desta forma, se muitos dispositivos de rede solicitarem transporte de dados simultaneamente, em uma determinada região, o valor da recompensa do mecanismo de incentivo deve flutuar e ficar mais alto que o normal. Essa flutuação ajuda a atrair mais veículos (mulas) para a região com alta demanda. Consequentemente, no curto espaço de tempo, a rede consegue balancear dinamicamente a demanda e garantir a elasticidade necessária para aumentar a vazão de dados até a infraestrutura fixa de névoa disponível.

IV. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Esta seção descreve a metodologia empregada, as ferramentas e métricas utilizadas para avaliação dos cenários propostos. A avaliação da iETR foi realizada a partir de um estudo experimental conduzido por meio de simulações. Os experimentos serviram como prova de conceito e permitiu atestar a viabilidade e potencialidade do serviço de transporte de dados, via mula de dados veicular, para transferência de dados em massa em escala metropolitana.

A. Sistema de Transporte Inteligente

Uma aplicação ITS simples foi utilizada e implementada para veículos estimarem as velocidades médias nas vias. Necessário para o controlador iETR-M obter informações atualizadas das condições do tráfego na rede veicular. Para selecionar um veículo responsável por estimar a velocidade média, em um segmento da via, a proposta apresentada em [15] foi adaptada para agrupamento dos nós (veículos), e, baseado na medida de centralidade do grupo (*cluster*) selecionar o veículo coletor ideal. Nesse caso, somente veículos na mesma via e direção de deslocamento participam do processo de validação colaborativa, através da comunicação V2V.

A Equação 2 é utilizada pelo veículo coletor, responsável por chegar a uma decisão consensual sobre a velocidade média (v_m) na via atual, no intervalo de classificação (Δt). Basicamente a equação corresponde ao somatório das velocidades (v_i) estimadas, dividido pela quantidade de veículos vizinhos (N) que participaram do processo. Objetivo do sistema não é obter a velocidade média exata, mas uma estimativa feita pelos próprios veículos sobre as condições do tráfego nas vias.

$$v_m = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \quad (2)$$

Mensagens de dados com a velocidade média estimada colaborativamente são transmitidas por veículos coletores na rede, através da comunicação V2I. A infraestrutura então irá retransmitir os dados para a aplicação que gerou a solicitação inicial na rede para o serviço. Ao receber diferentes estimativas de velocidade, para a mesma via, a aplicação ITS utiliza a menor delas, considerando um possível gargalo na via. O iETR-M adota que vias sem informações sobre a velocidade média são consideradas vias sem veículos, consequentemente sem tráfego, e, por isso, nesse caso são utilizadas velocidades médias iguais a máxima permitida no local.

B. Cenário de Aplicação iETR

Os experimentos foram implementados a partir da reprodução da topologia de rede *multicampi* da UFBA, envolvendo CAN (*Campus Area Network*) I e II, conforme ilustra a Figura 3. Neste cenário, foram utilizados veículos particulares (privados) e ônibus do serviço BUZUFBA. O BUZUFBA, sistema de transporte público *intercampi* é composto por cinco ônibus que fazem locomoção dos estudantes que têm aulas nos *campi* e unidades da UFBA, na cidade de Salvador (BR).

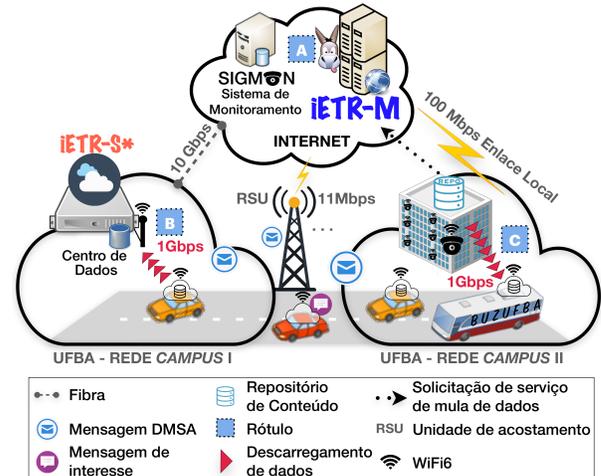


Fig. 3. Cenário da rede acadêmica da UFBA e tecnologias utilizadas para simulação e implementação da iETR.

Os experimentos reproduziram o SIG-Mon da UFBA para fazer o monitoramento e gravação de imagens de segurança, ilustrados pelos rótulos A e C da Figura 3. As câmeras de segurança estão espalhadas pelo *campus* II da Universidade e coletam dados para alimentar um sistema centralizado de monitoramento e vigilância. Como pode ser observado na figura, um repositório local, junto às câmeras, é utilizado para armazenamento temporário dos dados capturados e, assim, viabilizar descarregamento de dados para o sistema na Internet. Devido à maior capacidade computacional, a instalação do iETR-S* foi realizada próxima ao centro de dados da UFBA e, consequentemente, foi utilizada como infraestrutura de névoa para iETR (Figura 3 rótulo B).

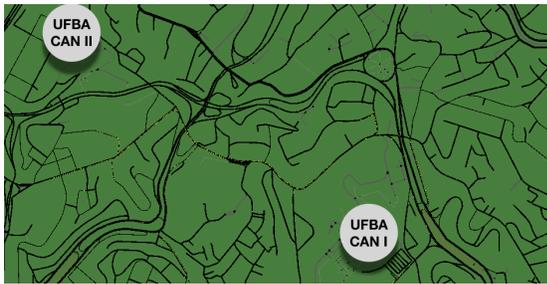


Fig. 4. Mapa da cidade de Salvador (BR) no SUMO.

C. Ambiente de Experimentação

A fim de reproduzir o ambiente da Figura 3, foi utilizado o simulador de rede OMNET++, versão 5.3, em conjunto com o simulador de tráfego e mobilidade para veículos – SUMO, versão 0.32. Além disso, a geração do tráfego de dados de dispositivos IoTs foi realizada através do *framework* INET, versão 3.99. Finalmente, a rede veicular foi reproduzida através do *framework* Veins, versão 4.7.1.

Para simular a mobilidade dos veículos na rede veicular foi utilizado o mapa real da cidade de Salvador (BR). A distância entre os *campis* (CAN I e CAN II) é de aproximadamente 1,8 km em linha reta. Além da mobilidade dos ônibus do BUZUFBA no itinerário pré-determinado, a mobilidade dos demais veículos na cidade foi reproduzida, porém de forma aleatória, na densidade de 500 veículos/km². A Figura 4 apresenta o mapa de parte da cidade no SUMO, importado do OpenStreetMap, com um tamanho de aproximadamente 2,5 km². No mapa foram utilizadas cinco RSUs, com raio de cobertura de 300 metros.

D. Metodologia de Avaliação

A metodologia adotada na avaliação consistiu na mudança da quantidade de câmeras de vídeo que, conseqüentemente, aumenta ou diminui a quantidade de fluxo de dados entre a borda e o núcleo da rede. As métricas utilizadas para avaliação tiveram como objetivo permitir avaliar a capacidade da proposta à medida que o volume de dados aumenta na rede. A Tabela I resume os parâmetros de simulação. Como pode ser observado, a taxa de movimentação foi de 50% e a câmera só coleta e armazena dados do ambiente quando detecta movimento. Para o cenário proposto, foi considerado que cada câmera Intelbras VIP-S4020G2, na borda da rede, armazena localmente os dados coletados da hora atual. Em seguida, uma requisição para descarregamento desses dados é feita para controlador iETR-M.

Três cenários foram utilizados na avaliação conforme os parâmetros da Tabela I. O primeiro cenário (**Sem iETR**) usa somente a rede local de 100 Mbps (Figura 3 rótulo C) para fazer *upload* de dados coletados de sensores IoTs. O segundo cenário (**iETR**) utiliza uma infraestrutura de névoa, próximo ao centro de dados da UFBA e com uma maior capacidade computacional, para instalação do iETR-S*. O terceiro cenário (**iETR-BUZUFBA**) aproveita os próprios ônibus da Universidade para serviços de transporte de dados na rede. Nos três cenários, os dispositivos possuem conexão de 100

TABLE I
FLUXO DE DADOS ESTIMADO PARA A APLICAÇÃO SIG-MON

# Fluxo	Camera(s) IP	Tx. de Movimento	MB/h
F1	1	50%	1382.4
F2	10	50%	13824
F3	20	50%	27648
F4	30	50%	41472
F5	40	50%	55296

Mbps com a Internet, e, a estratégia adotada no plano de aplicação é utilizar o meio mais rápido (enlace local ou mula de dados) para transferência dos dados até a Internet. No cenário iETR qualquer veículo na rede, no raio de interesse, pode ser utilizado para serviços de transporte de dados. Nesse caso, foi configurado $k = 10$ para iETR-M, entretanto, existe um custo financeiro associado ao transporte de dados feito por veículos particulares. Em tais cenários, a proposta foi avaliada a partir das métricas tempo de transferência de dados, custo de transporte e *throughput* local.

E. Resultados

Cada cenário proposto foi simulado 33 vezes e os gráficos desta seção, que representam valores médios, possuem intervalos de confiança de 95%. A Figura 5 apresenta o tempo necessário para transferência de dados, em cada cenário simulado, para os fluxos propostos na Tabela I. Verifica-se que para as demandas de Fluxo 1 e Fluxo 2, o tempo de transferência nos três cenários avaliados são bem próximos. Isso ocorre devido o plano de aplicação, nos próprios dispositivos de borda, ao avaliar o meio mais rápido para transporte dos dados selecionar o enlace local de 100 Mbps.

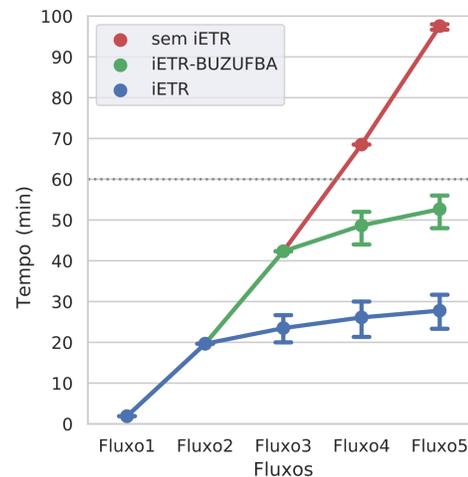


Fig. 5. Tempo de transferência de dados por cenário por fluxo.

Como pode ser observado na figura, a medida que aumenta o volume de dados, os cenários apresentam comportamentos diferentes. Para o Fluxo 3, por exemplo, verifica-se que a transferência de dados no cenário iETR é 53% mais rápida em relação aos demais cenários. Como o tráfego de veículos

BUZUFBA é baixo, na média um veículo por hora, o cenário iETR-BUZUFBA ao estimar o tempo de transporte de dados para o Fluxo 3, detectou que o menor tempo para transferência dos dados é através do enlace local, de 100 Mbps, na rede interna. Para o Fluxo 4 ambos os cenários iETR e iETR-BUZUFBA utilizaram serviços de mula de dados para transferência do conteúdo capturado pelos dispositivos para o servidor de aplicação, na Internet. Apesar do tempo de transferência no cenário iETR-BUZUFBA ser 84% maior que o cenário iETR, ambos os cenários conseguiram entregar os dados dentro da *deadline* proposta de sessenta minutos.

Observa-se que conforme a demanda de transferência de dados aumenta, com a inclusão de mais câmeras de monitoramento, o enlace local de 100 Mbps não é suficiente para atender a demanda. Por isso, o cenário Sem iETR não escala e não consegue cumprir a *deadline* proposta para garantir qualidade de serviço. Apesar do cenário iETR-BUZUFBA utilizar somente veículos BUZUFBA, e, por isso, ter um tempo médio de transporte maior em relação ao cenário iETR, pode-se concluir que ambas as propostas tem um comportamento escalar, ou seja, à medida que aumenta o número de dispositivos de monitoramento na borda, o tempo necessário para o descarregamento dos dados apresenta um baixo crescimento.

A Figura 6 apresenta o custo para transporte dos dados no cenário iETR. Verifica-se que apesar de conseguir descarregar os dados no menor tempo, para os Fluxos 3, 4 e 5, o cenário iETR tem um custo extra para transporte de dados na rede veicular por utilizar veículos particulares. Nesse caso, a diferença da proposta iETR-BUZUFBA é não ter um custo extra associado ao serviço. Avaliando os resultados apresentados na figura também é perceptível que, conforme o volume de dados aumenta, os custos para transporte dos dados na rede veicular permanecem, de acordo com intervalo de confiança, praticamente estáveis. Nesse caso, para minimizar os custos, pode-se considerar a possibilidade de aumentar o prazo para entrega dos dados de determinada aplicação e, assim, consequentemente, diminuir o número de solicitações de serviços de transporte de dados via mula de dados.

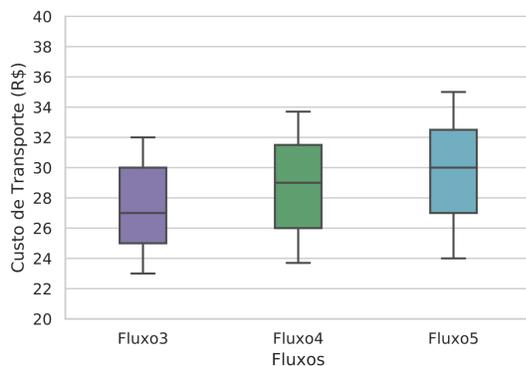


Fig. 6. Custo de transporte no cenário iETR.

As Figuras 7(a), 7(b) e 7(c) ilustram os resultados do monitoramento do *throughput* no enlace local (Figura 3 rótulo C) de 100 Mbps, em cada cenário simulado, no período de uma hora. Nas Figuras 7(b) e 7(c) se observa que os cenários iETR e iETR-BUZUFBA conseguem gerar uma economia de banda

em relação ao cenário Sem iETR (Figura 7(a)), a medida que o volume (fluxo) de dados aumenta. Para o Fluxo 3, por exemplo, o cenário iETR gerou uma economia de tráfego de dados, no período de 1 hora, de aproximadamente 71% comparado com os cenários Sem iETR e iETR-BUZUFBA. Para os Fluxos 4 e 5 a economia de banda, no período de 1 hora, nos cenários iETR e iETR-BUZUFBA foi de 100% quando comparado com cenário Sem iETR. Na Figura 7(a) também podemos visualizar que o cenário Sem iETR não escala, devido limitações na própria largura de banda disponível para transmissão dos dados e, por isso, não cumpre o requisito de qualidade de serviço para os Fluxos 4 e 5, estourando o prazo de sessenta minutos proposto.

V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A arquitetura iETR oferece serviços de transporte e descarregamento de dados que garante elasticidade através do escalonamento de múltiplas mulas de dados em redes veiculares. A iETR permite otimizar recursos de rede e dar maior vazão para grande volume de dados em cenários de computação urbana. O mecanismo de incentivo e recompensa, proposto para serviços de transporte via mula de dados, ajuda a otimizar o tempo de entrega dos dados e melhorar o balanceamento de agentes móveis na rede. Os resultados obtidos de simulação e a discussão apresentada endereçam questões e problemas apresentados no trabalho, mostrando a capacidade e potencialidade da iETR em garantir escalabilidade de aplicações de transferência de dados em massa na borda das redes.

Como trabalhos futuros serão avaliados diferentes estratégias de roteamento multimodal, controle de fluxo e balanceamento distribuído. Além disso, serão verificados protocolos eficientes de ancoragem de veículos para seleção de tecnologias de transferência de dados, bem como implementação da iETR em redes centradas no conteúdo, como NDN.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através dos grants 88887.468235/2019-00, TIC0004/2015 e 432064/2018-4, respectivamente.

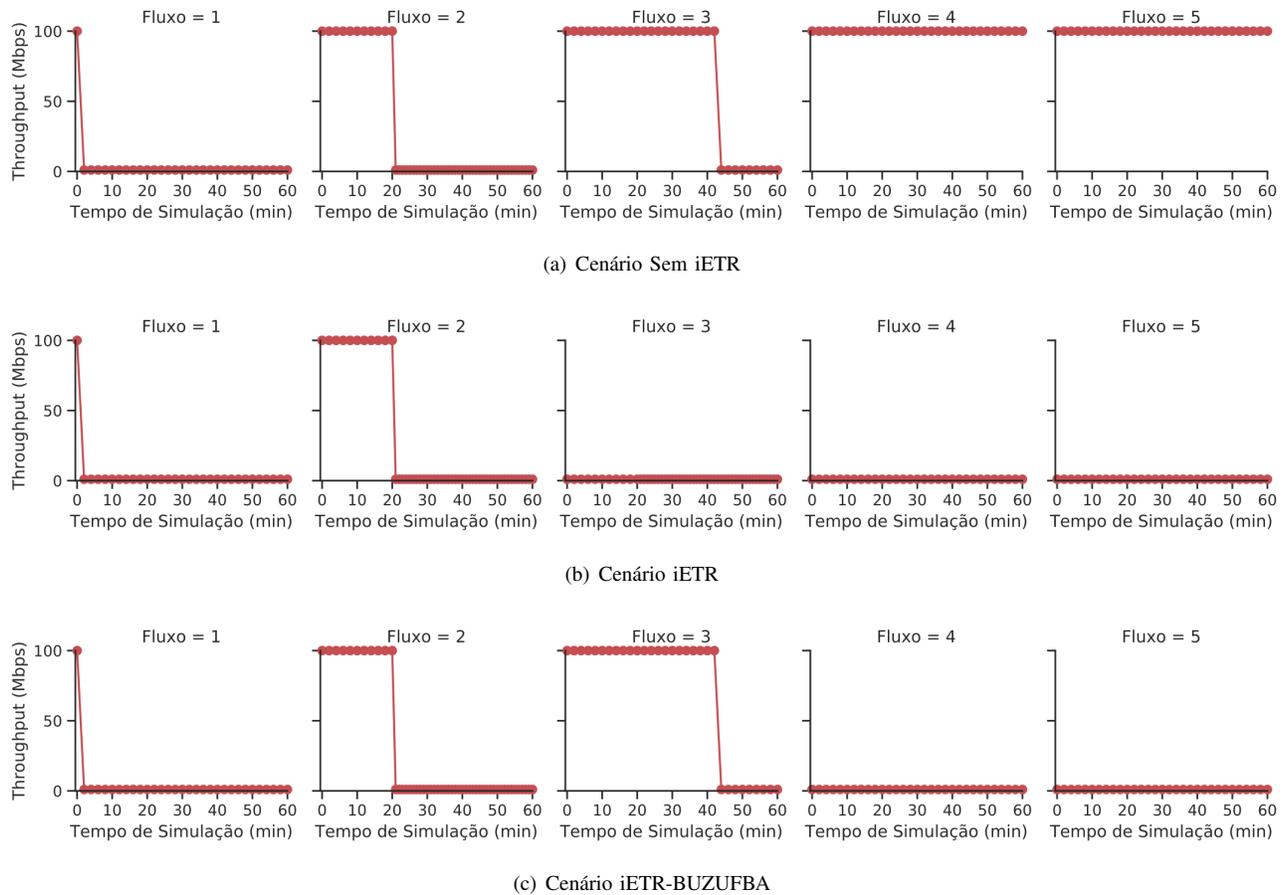
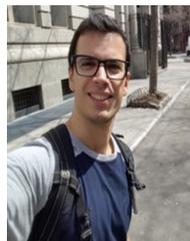


Fig. 7. Vazão (*throughput*) no enlace rede local do repositório de dados de câmeras de segurança.

REFERENCES

- [1] D. O. Rodrigues, F. A. Santos, G. P. R. Filho, A. T. Akabane, R. Cabral, R. Immich, W. L. Junior, F. D. Cunha, D. L. Guidoni, T. H. Silva, D. Rosário, E. Cerqueira, A. A. F. Loureiro, and L. A. Villas, "Computação urbana da teoria à prática: Fundamentos, aplicações e desafios," *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2019.
- [2] H. Zhou, H. Wang, X. Li, and V. C. M. Leung, "A survey on mobile data offloading technologies," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 5101–5111, 2018.
- [3] H. Zhou, H. Wang, X. Chen, X. Li, and S. Xu, "Data offloading techniques through vehicular ad hoc networks: A survey," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 65 250–65 259, 2018.
- [4] P. Cruz, R. S. Couto, L. H. M. Costa, A. Fladenmuller, and M. Dias de Amorim, "A delay-aware coverage metric for bus-based sensor networks," *Computer Communications*, vol. 156, pp. 192 – 200, 2020.
- [5] D. S. Dias, L. H. M. Costa, and M. D. de Amorim, "Data offloading capacity in a megalopolis using taxis and buses as data carriers," *Vehicular Communications*, vol. 14, pp. 80–96, Oct. 2018.
- [6] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data mules: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," in *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, 2003.*, 2003, pp. 30–41.
- [7] D. Kim, R. N. Uma, B. H. Abay, W. Wu, W. Wang, and A. O. Tokuta, "Minimum latency multiple data mule trajectory planning in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 4, pp. 838–851, 2014.
- [8] R. Sugihara and R. K. Gupta, "Speed control and scheduling of data mules in sensor networks," *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 7, no. 1, pp. 1–29, Aug. 2010.
- [9] —, "Path planning of data mules in sensor networks," *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 1–27, Aug. 2011.
- [10] V. Vukadinovic, K. Bakowski, P. Marsch, I. D. Garcia, H. Xu, M. Sybis, P. Sroka, K. Wesolowski, D. Lister, and I. Thibault, "3gpp c-v2x and IEEE 802.11p for vehicle-to-vehicle communications in highway platooning scenarios," *Ad Hoc Networks*, vol. 74, pp. 17–29, May 2018.
- [11] M. Margalho, A. Efrat, and T. Johnson, "Improving robustness in dtn networks that carries large medical files in amazonia," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 1, pp. 349–355, 2016.
- [12] L. Wang, R. Wakikawa, R. Kuntz, R. Vuyyuru, and L. Zhang, "Data naming in vehicle-to-vehicle communications," in *2012 Proceedings IEEE INFOCOM Workshops*, 2012, pp. 328–333.
- [13] M. Amadeo, C. Campolo, G. Ruggeri, G. Lia, and A. Molinaro, "Caching transient contents in vehicular named data networking: A performance analysis," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1985, Apr. 2020.
- [14] G. Mao, Z. Zhang, and B. D. O. Anderson, "Cooperative content dissemination and offloading in heterogeneous mobile networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, pp. 6573–6587, 2016.
- [15] D. L. L. Moura, A. L. L. Aquino, and A. A. F. Loureiro, "Towards data VSN offloading in VANETs integrated into the cellular network," in *Proceedings of the 22nd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems - MSWIM '19*. ACM Press, 2019.



MSc. Guilherme B. Araújo is a Professor at Federal University of Recôncavo da Bahia (UFRB) and PhD Student at the Federal University of Bahia (UFBA). MSc. in Computer Science (2014) and bachelor in Informatics (2011), both at Pontifical Catholic University of Minas Gerais (PUC-Minas). His current research interests include Vehicular Networks, Internet of Things (IoT), Cloud Computing, Smart Cities and Future Internet Architectures. Contact him at guilherme.araujo@ufrb.edu.br.



Prof. Dr. Leobino N. Sampaio is an Associate Professor of Computer Science at the Federal University of Bahia (UFBA). He holds a Ph.D. degree in Computer Science from the Federal University of Pernambuco (UFPE), awarded in 2011, and B.Sc. and M.Sc. degrees in Computer Science, awarded by Salvador University (UNIFACS) in 1996 and 2002, respectively. Currently, he is a visiting researcher at Computer Science Department of University of California, Los Angeles (UCLA) in United States, member of SBC (the Brazilian Computer Society),

and member and assistant coordinator of the RNP Technical Committee on Network Monitoring (CT-Mon). His research interests include future Internet architectures and network performance evaluation. Contact him at leobino@ufba.br