

Análise da Predição de Mobilidade na Migração de Aplicações em Computação em Névoa

Diogo M. Gonçalves¹, Luiz F. Bittencourt¹, Edmundo M. R. Madeira¹

¹Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Campinas – São Paulo – Brasil

diogomg@lrc.ic.unicamp.br, {bit, edmundo}@ic.unicamp.br

Abstract. *Fog Computing environments provide low latency access to computational resources in the edge of the network for IoT devices. In the context of IoT in Smart Cities, user's devices with high mobility, such as wearables and vehicles, bring new challenges to the Fog. In this scenario recent related work have presented the advantages of a proactive migration approach, based on user's mobility prediction. Otherwise, choosing the wrong node to place the user's application due an inaccurate mobility prediction can not ensure an environment which serves the application's requirements. This work presents an analysis of the proactive migration approach in the Fog Computing scenario and how much an inaccurate mobility prediction can hinder these advantages. Simulations of a Smart City scenario show that incorporating users' mobility prediction can decrease the number of migrations between the nodes, however, choosing the wrong destination can increase the latency in almost 30%.*

Resumo. *A Computação em Névoa provê a dispositivos IoT acesso com baixa latência a recursos computacionais presentes na borda da rede. Porém, neste ambiente a alta mobilidade de alguns desses dispositivos, como wearables ou dispositivos embarcados em veículos, traz grandes desafios para a alocação e gerência de recursos. Trabalhos recentes têm apresentado os benefícios do uso de predição de mobilidade dos usuários no processo de migração de aplicações neste ambiente. No entanto, uma má escolha do local de execução da aplicação devido a uma imprecisão na localização futura do usuário pode comprometer a qualidade da execução. Este trabalho apresenta uma análise do impacto de uma baixa acurácia na predição de mobilidade do usuário para melhorar o processo de migração de aplicações em ambientes de Névoa. Resultados de simulações indicaram que o uso de predição de mobilidade pode reduzir o número de migrações, mas um erro de cálculo da posição futura do usuário pode aumentar a latência média experimentada por ele em até 30%.*

1. Introdução

A popularização de paradigmas, como o da Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), tem provocado mudanças na maneira de se prover recursos de rede para atender a demanda desse novo cenário. Estes dispositivos, que geralmente possuem pouco poder computacional, frequentemente utilizam recursos da Nuvem para satisfazer sua demanda por armazenamento e processamento. Algumas aplicações, no entanto, possuem demandas, como por exemplo baixa latência, que não são atendidas pela Nuvem de forma adequada.

A Computação em Névoa tem sido incorporada a esse contexto com a proposta de prover recursos computacionais na borda da rede. *Cloudlets* são dispositivos da Névoa,

geograficamente distribuídos mais próximos aos usuários a fim de prover acesso a recursos computacionais com uma latência mais baixa que a oferecida pela Nuvem. As *Cloudlets* geralmente oferecem acesso aos seus recursos através de máquinas virtuais.

Em geral, aplicações interativas em tempo real como jogos online ou aplicações em realidade virtual ou aumentada, executadas em *smartphones* ou *wearables*, são alguns exemplos de aplicações que demandam um baixo tempo de resposta. A atualização das imagens vistas pelo usuário em resposta a suas ações a uma frequência superior a 15 ms pode causar enjoo [Elbamby et al. 2018]. Neste cenário, assistentes cognitivos [Jiang et al. 2018] que auxiliam pessoas com Alzheimer a identificar pessoas ou objetos familiares são exemplos de aplicações que podem obter vantagens ao utilizarem este ambiente em Névoa. O dispositivo envia as imagens capturadas para serem processadas na Névoa e, após o tratamento adequado, são enviadas de volta para o dispositivo e apresentadas para o usuário. A Figura 1 ilustra um exemplo de funcionamento deste cenário.

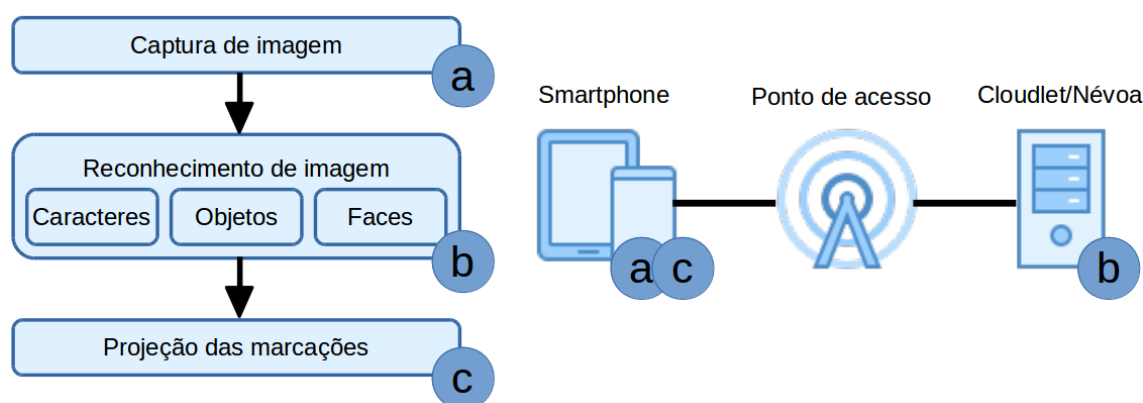


Figura 1. Fluxo de execução de uma aplicação para assistência cognitiva com processamento realizado na Névoa.

No contexto de cidades inteligentes, os dispositivos IoT estão inseridos em variados cenários e, em alguns deles, os dispositivos podem estar associados a um usuário móvel, como por exemplo pedestres ou passageiros de veículos, metrô ou barco, sendo eles pertencentes aos usuários (celulares, relógios ou óculos) ou embarcados nos meio de transporte utilizados (câmeras filmadoras ou sensores de distância). Carros autônomos, por exemplo, poderão usufruir de processamento da Névoa para executar tomadas de decisão de seu sistema [Aissioui et al. 2018]. Neste cenário, um atraso na escolha da ação a ser tomada pode comprometer a segurança dos passageiros e demais usuários da via.

O cenário de usuários móveis introduz mais desafios ao gerenciamento dos recursos da Névoa. Mover a execução de uma aplicação para a *cloudlet* mais próxima do usuário naquele momento não garante que ela continuará atendendo as necessidades desse usuário à medida em que ele realiza seu deslocamento no mapa. O ambiente de Névoa deverá realizar a migração da aplicação do usuário para a *cloudlet* mais adequada à sua localização. Desenvolver mecanismos para prover esse gerenciamento se faz necessário.

Melhorar os processos relacionados ao gerenciamento de máquinas virtuais neste ambiente, como o processo de migração, tem sido apontado como um dos desafios de pesquisa relacionados ao desenvolvimento da Internet do Futuro para Cidades Inteligentes [Batista et al. 2016], especialmente porque “pode melhorar substancialmente as soluções com suporte a mobilidade, tanto em termos de desempenho quanto aplicabilidade” [Puliafito et al. 2017].

Manter a máquina virtual de um usuário móvel tão próxima quanto possível é um grande desafio neste contexto [Puliafito et al. 2017]. Realizar migrações com uma frequência excessiva pode aumentar a indisponibilidade de acesso, por outro lado, realizar um número insuficiente pode deixar a aplicação muito longe do usuário, aumentando a latência. Ambos os cenários comprometem a execução da aplicação.

Considerando os diversos cenários relacionados a IoT em Cidades Inteligentes, alguns grupos de usuários, como usuários de ônibus urbanos, metrô e trem, apresentam um padrão de mobilidade previsível. Trabalhos recentes [Gonçalves et al. 2018b, Gonçalves et al. 2018a] têm incorporado informações relacionadas a predição de mobilidade desses usuários para apresentar uma abordagem proativa quanto ao processo de migração de máquinas virtuais em um ambiente de Névoa. A política de migração proativa, proposta pelos autores, visa antecipar a migração da aplicação do usuário para uma *Cloudlet* que provavelmente fará parte do seu trajeto em um futuro próximo. Resultados apontaram que a abordagem proposta apresentou benefícios aos usuários ao aumentar a disponibilidade do sistema ao diminuir o número de migrações realizadas.

Os trabalhos citados, no entanto, somente consideram o cenário com alta acurácia na predição de mobilidade dos usuários como escopo de suas avaliações. Apesar do cenário avaliado contemplar um número significativo de usuários, outros cenários presentes no contexto de uma Cidade Inteligente podem não apresentar um padrão de mobilidade tão evidente. Os mecanismos de predição de mobilidade para outros grupos de usuários ainda possuem certo grau de imprecisão e, em alguns casos, já apresentando um limite superior para sua acurácia [Cuttone et al. 2018, Wang et al. 2017].

Tendo em vista este contexto, avaliar a viabilidade dessa abordagem considerando a acurácia da predição dos usuários torna-se necessário, estudo ainda não encontrado na literatura. Baseando-se no uso de predição de mobilidade para melhorar o processo de migração de aplicações em um ambiente de Névoa, este trabalho apresenta uma análise do comportamento do processo de migração de aplicações em diferentes cenários de um ambiente de Computação em Névoa. Diferentes níveis de acurácia na predição de mobilidade do usuário, condições da rede e critérios para escolha do local de execução da aplicação podem apresentar diferentes condições para execução da aplicação do usuário.

Simulações de ambientes compatíveis com o contexto de uma Cidade Inteligente foram desenvolvidas a fim de avaliar os cenários estudados. Utilizando como base padrões reais de mobilidade de ônibus urbanos, este trabalho avaliou o comportamento do processo de migração considerando 5 características: presença ou ausência de migrações, localização futura prevista para o usuário, acurácia no processo de predição, latência entre *Cloudlets* e critério para seleção da *Cloudlet* a receber a aplicação do usuário.

Resultados revelaram que, apesar da política de migração proativa reduzir o número de migrações realizadas durante o trajeto do usuário, a latência experimentada pelo usuário pode ser comprometida em cenários com baixa acurácia na sua predição de mobilidade. Em tais cenários, o uso dessa política de migração pode se tornar inviável.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta o referencial teórico para a compreensão deste trabalho, e a Seção 3, o atual estado da arte sobre o tema. A Seção 4 descreve a relação da predição de mobilidade no funcionamento da política de migração avaliada e a Seção 5, a metodologia de avaliação utilizada. Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados na Seção 6. Por fim, a Seção 7 sumariza o conteúdo apresentado neste artigo e apresenta as conclusões observadas.

2. Conceitos Básicos

Neste seção definimos os seguintes conceitos fundamentais para entendimento do problema estudado: Computação em Névoa, predição de mobilidade, virtualização e migração de máquinas virtuais.

2.1. Computação em Névoa

Um aumento na complexidade das aplicações executadas em diversas plataformas, de computadores pessoais a celulares e dispositivos IoT, acarretou em um aumento no poder computacional necessário para executar tais tarefas. Dispositivos que possuem recursos insuficientes podem recorrer a fontes externas para suprir sua demanda. O modelo de Computação em Nuvem mostrou-se como uma das opções mais populares para atender este cenário. A Computação em Nuvem caracteriza-se por concentrar um grande volume de recursos em *Data Centers*, disponibilizando-os sob demanda, de forma rápida e transparente, ao usuário.

Apesar de suprir de forma eficiente essa demanda por um acesso flexível a recursos externos em diversos cenários, o modelo de Computação em Nuvem não atende alguns requisitos para determinadas aplicações. Por geralmente concentrar-se em grandes volumes de recursos no núcleo da rede, o acesso a esses recursos pode não apresentar níveis de latência necessários para aplicações que demandam uma rápida resposta, como aplicações de tempo real e/ou interativas, como jogos ou análise de dados para tomadas de decisões em sistemas de transporte inteligentes.

Com base nesse cenário, a Computação em Névoa (*Fog Computing*), propõe a utilização de fontes intermediárias de recursos entre os dispositivos e os tradicionais *Data Centers* na Nuvem. Qualquer dispositivo intermediário entre o usuário e a Nuvem que possua recursos ociosos poderia se tornar um nó da Névoa. *Switches*, roteadores ou dispositivos dedicados como *Cloudlets* poderiam prover recursos na borda da rede para os usuários. A Figura 2 ilustra uma arquitetura típica de Computação em Névoa, apresentando também possíveis fluxos de migração de dados de usuários móveis.

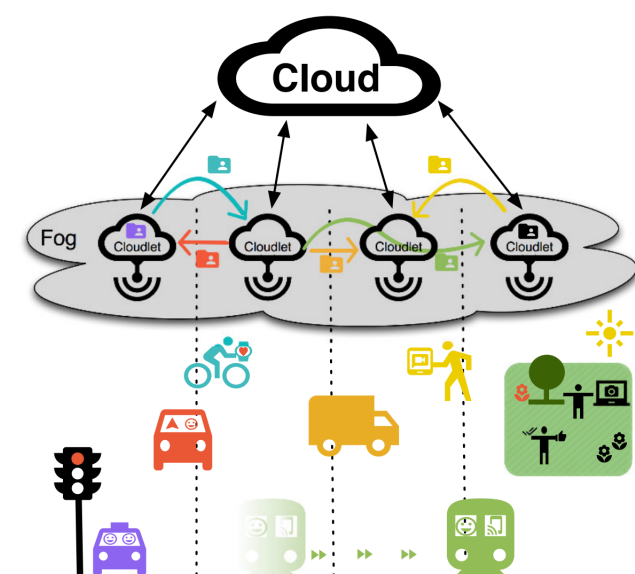


Figura 2. Arquitetura de um ambiente de computação em névoa para atender usuários móveis [Bittencourt et al. 2015]

Ao disponibilizar recursos na borda da rede, a Computação em Névoa oferece ao usuário acesso a uma fonte mais próxima, reduzindo a latência experimentada. Além das vantagens relacionadas à latência, ao ser processado na borda, um grande volume de dados deixa de ser trafegado no núcleo da rede, diminuindo sua sobrecarga.

2.2. Predição de Mobilidade

O aumento no volume de dados produzidos pelos usuários permitiu que se pudesse entender de forma mais acurada a rotina e mobilidade de diversos atores nos mais variados contextos. A utilização da predição de mobilidade de usuários pode contribuir com ações preventivas ou de aperfeiçoamento em várias áreas de aplicação como, monitoramento de saúde, desastres ambientais e gerenciamento de tráfego urbano [Cuttone et al. 2018].

Diversas abordagens para a predição de mobilidade de pessoas, veículos e demais atores móveis estão presentes na literatura. Em geral, essas abordagens podem ser classificadas em 3 grupos, de acordo com seu escopo: dependência temporal, que considera que a mobilidade do usuário é limitada por características físicas, como velocidade e direção; dependência espacial, que considera a mobilidade de outros agentes como tendência para o padrão seguido pelo usuário; e dependências geográficas, que consideram ruas ou trilhos, por exemplo, como limitantes. A acurácia dessas abordagens varia de acordo com a estratégia utilizada e o escopo avaliado no trabalho. Resultados nesses cenários podem variar de menos de 40% a mais de 90% de acurácia [Wang et al. 2017, Cuttone et al. 2018].

Apesar da existência de exemplos de contexto com alto padrão de mobilidade, como usuários de transporte público, permitindo uma predição eficiente, alguns cenários possuem limitações que dificultam a obtenção de bons resultados. Trabalhos recentes [Cuttone et al. 2018] sugerem que, analisando dados históricos de mobilidade de pessoas, a exploração de localidades não visitadas anteriormente, mesmo considerando longos períodos de avaliação, pode representar, em média, de 20% a 25% dos deslocamentos desses atores. Outro fator evidenciado por essa pesquisa indica que 70% das localidades foram visitadas apenas uma vez neste período.

Essas características impõem limitações ao desempenho máximo esperado para modelos de predição de mobilidade, diminuindo sua acurácia e precisão. Com base nesse cenário, essa ineficiência deve ser considerada no desenvolvimento de sistemas computacionais que pretendem incorporar predição de mobilidade em suas abordagens.

2.3. Virtualização e Migração de Máquinas Virtuais

O acesso aos recursos físicos oferecidos pela Nuvem e Névoa é feito principalmente por meio de virtualização. A virtualização é uma tecnologia que abstrai os recursos físicos do hardware e oferece o acesso a eles por meio de máquinas virtuais. A virtualização permite que diferentes sistemas operacionais e processos com características e demandas distintas entre si sejam executados de forma isolada e independente no *hardware* disponível. A aplicação do usuário passa então a ser executada sobre essa plataforma.

A flexibilidade fornecida pela virtualização permite que a aplicação seja migrada entre os dispositivos físicos presentes na arquitetura. A migração de máquinas virtuais consiste na transferência da localização física da máquina virtual entre os servidores da rede, sendo eles presentes na Nuvem ou na Névoa, a fim de realizar um balanceamento de carga, manutenção física no servidor ou ajustar a localização da aplicação de acordo com a posição do usuário.

Nesse sentido, o conceito de *Follow-me Cloud* [Taleb and Ksentini 2013] propõe que, dada uma rede com um conjunto de pequenos servidores geograficamente distribuídos em sua borda, uma vez que o usuário se movimenta, seu conteúdo presente nos servidores deve segui-lo, mantendo a qualidade e a disponibilidade do acesso a ele.

Em uma arquitetura hierárquica de Computação em Névoa, como apresentada na Figura 2, as máquinas virtuais podem ser migradas entre as três camadas da arquitetura. Há também a possibilidade do usuário ter acesso à sua aplicação que está na Nuvem ou Névoa de forma indireta. Um usuário ao sair da área de cobertura da *Cloudlet* que está executando sua aplicação pode ter sua aplicação mantida nesse nó da Névoa ou migrada para um novo nó mais próximo. Caso a aplicação se mantenha neste nó de origem, o usuário utilizará possivelmente a *Cloudlet* mais próxima como nó de ligação entre ele e sua aplicação. Para conectar a *Cloudlet* de origem e o usuário, poderão haver quantos nós intermediários (ou saltos na conexão) forem necessários. Estes saltos porém, podem aumentar a latência na conexão entre esses dispositivos.

3. Trabalhos Relacionados

O estado da arte relativo ao processo de migração de aplicações em um ambiente de Névoa e em outras arquiteturas é descrito com mais detalhes a seguir e sumarizado na Tabela 1. Trabalhos que utilizam informações do futuro trajeto do usuário para melhorar a transferência de dados entre servidores também são abordados.

Tabela 1. Trabalhos relacionados à migração de aplicações em Névoa ou migração de conteúdo baseados no deslocamento futuro do usuário.

Trabalho	Domínio	Utiliza Predição de Mobilidade	Avalia acurácia da predição	Demanda do usuário	
				Dados	Processamento
[Gomes et al. 2017]	Nuvem Móvel	✓	✓	✓	-
[Mustafa et al. 2017]	Nuvem Veicular	✓	✓	✓	✓
[Liu et al. 2018]	Nuvem e Névoa	-	-	✓	✓
[Gonçalves et al. 2018b]	Névoa	✓	-	✓	✓
[Gonçalves et al. 2018a]	Névoa	✓	-	✓	✓
Este trabalho	Névoa	✓	✓	✓	✓

Os autores [Gomes et al. 2017] apresentam uma proposta de arquitetura hierárquica para melhorar a experiência do usuário ao acessar dados localizados na Nuvem. A proposta visa aperfeiçoar o processo de migração de dados de interesse do usuário, como vídeos para *cache*. Apesar de também incorporar e avaliar o impacto da predição de mobilidade no processo de migração de dados do usuário na Névoa, o trabalho citado possui como foco apenas o acesso a dados, e não considera o acesso a uma aplicação com demanda de processamento. O trabalho citado utiliza outras métricas para avaliar o desempenho do cenário como, por exemplo, porcentagem de arquivos corretamente selecionados para *cache* e tempo de *download* dos dados requeridos pelos usuários.

O trabalho desenvolvido por [Mustafa et al. 2017] também incorpora a predição de mobilidade dos usuários para melhorar a escolha do destino de suas aplicações, porém aplicado ao contexto de Nuvem veicular, na qual os veículos disponibilizam seus recursos ociosos para os demais usuários. O trabalho citado utiliza a infraestrutura presente na borda da rede apenas como intermediária no processo de migração das aplicações entre os veículos, não utilizando-a para processamento da aplicação do usuário. No contexto

do trabalho, a predição de mobilidade também proporcionou melhorias ao processo de migração, apesar dos autores utilizarem outras métricas para avaliarem o cenário.

Os autores [Liu et al. 2018] realizam uma avaliação de desempenho da execução de aplicações no contexto de Névoa e Nuvem. O trabalho avalia o desempenho da aplicação do usuário de acordo com seu local de execução e propõe um modelo de otimização multiobjetivo para solucionar este problema. Os autores, no entanto, não consideram a predição de mobilidade dos usuários no escopo de sua avaliação.

Alguns trabalhos propuseram o uso de informações relacionadas a predição de mobilidade desses usuários para desenvolver uma abordagem proativa quanto ao processo de migração de máquinas virtuais em um ambiente de Névoa. O trabalho apresentado em [Gonçalves et al. 2018b] realiza uma avaliação deste cenário tendo como escopo um grupo de usuários que apresentam um padrão de mobilidade facilmente identificável. Os autores utilizam como premissa o uso de uma predição de mobilidade com uma alta acurácia para avaliar o desempenho do processo de migração.

Considerando os diversos cenários e demandas relacionados a IoT no contexto de Cidades Inteligentes, outros usuários, como pessoas se locomovendo a pé, bicicleta ou em carros particulares, podem não apresentar uma acurácia elevada [Cuttone et al. 2018]. A viabilidade da abordagem proposta neste cenário de menor imprecisão está fora do escopo do trabalho apresentado pelos autores em [Gonçalves et al. 2018b]. Os autores complementam a avaliação deste cenário em [Gonçalves et al. 2018a] considerando um cenário de escassez de recursos. Entretanto, em ambos os trabalhos, o impacto da precisão do processo de predição não foi avaliado.

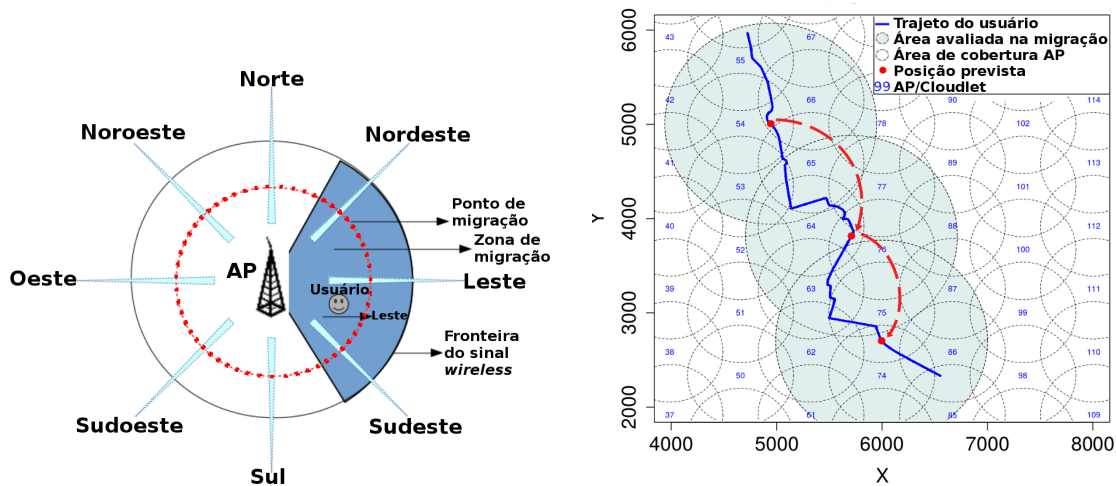
Baseado no atual estado da arte, há trabalhos que incorporam a predição de mobilidade para melhorar a migração de aplicações entre os nós da Névoa, entretanto esses trabalhos não avaliam o impacto da imprecisão dos mecanismos de predição nesse processo. A contribuição deste trabalho se dá pela avaliação deste cenário, apontando a viabilidade dessa abordagem em variados cenários encontrados no contexto de computação em Névoa para usuários móveis.

4. Abordagem de migração avaliada

Trabalhos recentes [Gonçalves et al. 2018b, Gonçalves et al. 2018a] introduziram a abordagem de migração proativa de aplicações ao contexto de gerenciamento de recursos em infraestruturas de Computação em Névoa. As abordagens para migração, até então, posicionavam a aplicação do usuário baseadas em sua atual localização. A partir da posição do usuário no mapa, a *Cloudlet* que apresentasse a menor distância, a menor latência ou outra métrica utilizada, era selecionada. A abordagem de migração proativa, no entanto, inclui a localização futura do usuário ao processo de definição do próximo local a executar a sua aplicação. O tempo necessário para o deslocamento do usuário de sua localização atual para a prevista é definida neste trabalho como janela de predição. O Algoritmo 1 apresenta a sequência de passos realizados durante a avaliação e realização do processo de migração.

A migração é avaliada a cada *handoff* (troca de ponto de acesso) realizada pelo usuário, visto que o ponto de acesso utilizado altera a latência entre ele e a *Cloudlet* que está executando sua aplicação. A Figura 3 (a) ilustra a avaliação do processo de migração a partir da cobertura do ponto de acesso do usuário. Enquanto o usuário estiver presente na *zona de migração*, a viabilidade de realizar o processo de migração será avaliada (linha 1 do Algoritmo 1).

A Figura 3 (b) ilustra a sequência de migrações, a posição futura do usuário e as *Cloudlets* avaliadas no processo de migração proativa. A localização prevista para o usuário (linha 2 do Algoritmo 1 e ilustrada pela linha tracejada na Figura 3 (b)), passa a servir como base para a seleção do conjunto de *Cloudlets* candidatas a receber a aplicação do usuário (linha 3 do Algoritmo 1 e ilustrada pela área acinzentada na Figura 3 (b)). Caso uma *Cloudlet*, dentre as selecionadas, apresente um desempenho melhor, a depender da métrica utilizada (Menor latência ou menor distância física entre ela e o usuário), que a atual *Cloudlet* utilizada pelo usuário (linhas 4 e 5 do Algoritmo 1), o processo de migração se faz necessário. A migração será iniciada no momento em que usuário se localizar no *ponto de migração*, realizada nas linhas 6 a 8 do Algoritmo 1 e ilustrada na Figura 3 (a).



(a) Processo de migração a partir da área de cobertura do ponto de acesso. Adaptado de [Lopes et al. 2017]

(b) Ilustração do processo de migração entre os nós da Névoa. Fonte: [Gonçalves et al. 2018b]

Figura 3. Migração de aplicações baseada na predição de mobilidade do usuário

Algoritmo 1: Processo de migração proativa

```

input : cloudlets, usuario, janela_de_predicao, criterio_migracao
1 while usuário estiver na zona de migração do
2   localizacao_futura_usuario = preve_localizacao(usuario,
3     janela_de_predicao);
4   cloudlets_candidatas = seleciona_cloudlets_candidatas(cloudlets,
5     localizacao_futura_usuario);
6   melhor_cloudlet = seleciona_melhor_cloudlet(cloudlets_candidatas,
7     usuario, criterio_migracao);
8   if metrica_avalizada(criterio_migracao, cloudlet_candidata) <
9     metrica_avalizada(criterio_migracao, cloudlet_atual) then
10    while usuario nao estiver no ponto de migração do
11      espere;
12    inicia_migracao(usuario, melhor_cloudlet);

```

5. Metodologia

A validação do trabalho desenvolvido neste artigo foi realizada através de simulações de cenários compatíveis com o contexto de uma Cidade Inteligente. O conjunto de fer-

ramentas utilizadas consiste no simulador de mobilidade urbana SUMO (Simulator for UrbanMObility)¹ e o simulador de rede MyIFogSim [Lopes et al. 2017]. O simulador MyIFogSim disponibiliza um ambiente para avaliar o gerenciamento de recursos computacionais da Computação na Névoa. Baseado no Simulador IFogSim [Gupta et al. 2017], o simulador MyIFogSim estende o simulador anterior suportando usuários móveis no contexto de migração de máquinas virtuais e alocação de recursos nos nós da Névoa.

Baseado no ambiente disponibilizado pelo simulador MyIFogSim, foram desenvolvidas as modificações necessárias no simulador a fim de providenciar uma compatibilidade com os resultados do simulador SUMO. O SUMO é o simulador responsável pelo gerenciamento da mobilidade dos usuários a serem utilizados no cenário de estudo.

A partir de dados de mobilidade disponibilizados na literatura, o simulador SUMO interpreta-os e constrói uma nova base de dados compatível com o simulador de rede MyIFogSim utilizando os parâmetros: posição no mapa, velocidade, direção e o tempo de simulação em que esses dados foram coletados. O padrão de mobilidade utilizado neste estudo baseia-se em mobilidades reais de 500 ônibus urbanos da cidade de Luxemburgo² ao longo de 24 horas. O ambiente construído, bem como as modificações incorporadas ao simulador, estão disponíveis para uso da comunidade³.

Para a avaliação dos cenários propostos, os parâmetros de simulação referentes aos recursos disponíveis na Névoa e a demanda dos usuários foram definidos baseados em trabalhos relacionados presentes na literatura [Yao et al. 2015, Lopes et al. 2017]. Cada *Cloudlet* utilizada possui uma capacidade de processamento de 2800 milhões de instruções por segundo, 8 GB de memória RAM, 80 GB de armazenamento, e uma conexão de 100 Mbps de largura de banda e latência de 4 milissegundos para seu ponto de acesso. Uma conexão uniformemente distribuída entre 1 e 10 Gbps conecta cada par de *Cloudlets*. Cada *Cloudlet* é associada a um ponto de acesso que possui um raio de cobertura de 500 metros. A máquina virtual utilizada nas simulações possui 200 MB.

Os cenários para avaliação do processo de migração baseiam-se em 5 características: (1) Latência entre os nós da Névoa, (2) Janela de predição, (3) Imprecisão na localização futura prevista para o usuário, (4) Critério de escolha da *Cloudlet* de destino na migração e ainda (5) o impacto na execução da aplicação caso, intencionalmente, não se realize nenhuma migração durante o trajeto do usuário.

Em um cenário em que duas *Cloudlets* pertencem a um mesmo provedor, a conexão de rede provida por ele poderá permitir uma baixa latência entre elas. Este cenário pertence à avaliação da Característica (1) que, neste trabalho, avalia o comportamento da migração de aplicações em arquiteturas com latências variando de 2 a 100 ms.

As demais características estão diretamente relacionadas ao processo de migração. A Característica (2) refere-se ao tempo de deslocamento do usuário entre a posição atual e a localização calculada pela predição de mobilidade. Neste trabalho o intervalo avaliado varia de 0 a 600 segundos. A janela de predição 0 não utiliza quaisquer informações sobre o trajeto futuro do usuário no processo de migração.

O principal foco de avaliação deste trabalho, no entanto, refere-se à Característica (3), relacionada à imprecisão da predição de mobilidade do usuário. A partir da localização futura preliminarmente correta, baseada na janela de predição citada an-

¹<http://sumo.dlr.de>

²<https://github.com/lcodeca/LuSTScenario>

³<https://github.com/diogomg/MyIFogSim>

teriormente, um segundo ponto aleatório a alguns metros do ponto inicialmente previsto é definido como a localização base para o processo de migração. O intervalo de valores utilizados para acrescentar o erro na predição da localidade varia entre 0 e 1000 metros.

Outra característica avaliada refere-se ao critério utilizado para a escolha da *Cloudlet* a receber a aplicação do usuário no processo de migração. A característica (4) utiliza dois critérios para seleção do destino da aplicação: a menor latência e a menor distância entre o usuário e a *Cloudlet*. Por fim, a Característica (5) foi utilizada como base de comparação para as Características (2) e (3). A característica (5) visa avaliar o desempenho da aplicação do usuário em um cenário em que, intencionalmente, nenhuma migração ocorre durante o trajeto do usuário. Neste cenário, a aplicação é enviada para a *Cloudlet* mais próxima ao usuário no início de seu trajeto e por lá permanece até o usuário chegar ao seu destino. A Tabela 2 sumariza os cenários avaliados no escopo deste trabalho.

Tabela 2. Cenários avaliados

Característica	Escopo
(1) Latência entre <i>Cloudlets</i>	2, 15, 30 e 100 ms
(2) Janela de predição	0, 150, 300, 450 e 600 s
(3) Imprecisão na localização prevista	0, 500 e 1000 m
(4) Critério de migração	Menor latência e Menor distância
(5) Presença ou ausência de migrações	Nenhuma migração realizada

A avaliação desses cenários deu-se pela análise dos resultados das simulações baseada nas métricas: Número de migrações, latência média e latência máxima. Os resultados são apresentados a seguir considerando um intervalo de confiança de 95%.

6. Resultados

A partir das simulações realizadas pôde-se obter alguns resultados referentes ao comportamento do processo de migração em diferentes cenários. A Figura 4 apresenta o número de migrações realizadas de acordo com a janela de predição utilizada e a imprecisão na identificação da posição futura do usuário.

O aumento no conhecimento do trajeto futuro do usuário contribui com uma diminuição no número de migrações realizadas ao longo de sua viagem. Ter conhecimento sobre o trajeto do usuário para os próximos 600 segundos resulta em uma diminuição de até 60% no número de migrações.

Pode-se observar também que a imprecisão na predição de localização futura do usuário não interfere no número de migrações. Devido a imprecisão, a *Cloudlet* ótima possivelmente não será escolhida, o que teoricamente resultaria em uma antecipação do próximo processo de migração. Esta migração só será iniciada caso o algoritmo identifique uma *Cloudlet* melhor posicionada. Entretanto, o conjunto de *Cloudlets* candidatas a receber a migração também será definido a partir de uma má predição de mobilidade, dificultando e adiando a identificação de uma *Cloudlet* que ofereça melhores condições ao usuário. Apesar da imprecisão na escolha da *Cloudlet* de destino da migração da máquina virtual não possuir interferência significativa no número de migração realizadas, outras métricas foram avaliadas para complementar a avaliação deste cenário.

A Figura 5 apresenta a latência média experimentada pelos usuários nos diferentes cenários avaliados, considerando os critérios para escolha da *Cloudlet* no processo de migração, menor latência Figura 5 (a), e menor distância, Figura 5 (b). O critério de

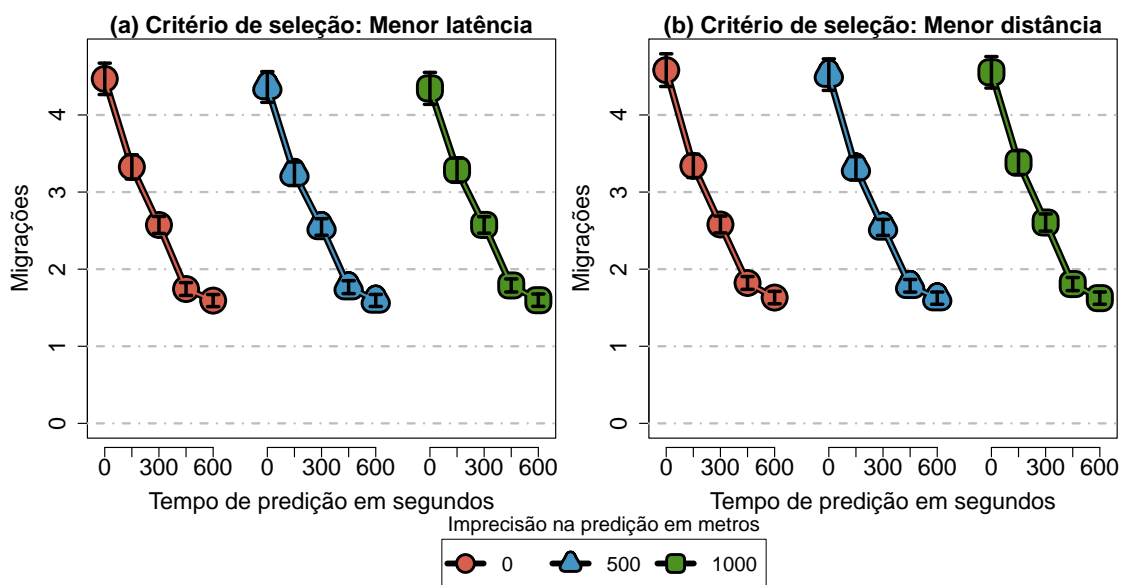


Figura 4. Número de migrações realizadas, em média, por usuário nos cenários avaliados

seleção, apesar de apresentar desempenhos pontualmente diferentes, em geral, apresenta comportamentos semelhantes nos cenários avaliados.

Em um ambiente em que a latência entre cada par de *Cloudlets* é de 2 ms, caso pertençam a um mesmo provedor, por exemplo, a localização da máquina virtual é irrelevante para a latência experimentada pelo usuário. Nota-se também a similaridade entre os resultados nos cenários com a presença e ausência de migrações em uma infraestrutura com esta configuração de rede. Pode-se concluir que neste cenário a realização da migração da aplicação se torna dispensável, pois não realizar nenhuma migração não altera a latência experimentada pelo usuário e não acrescenta períodos de indisponibilidade de acesso causados pelo processo de migração.

Nos demais cenários, no entanto, a latência entre as *Cloudlets* impactou no desempenho do processo de migração. Em geral, as migrações resultaram em menores latências para o usuário. Para arquiteturas que apresentam uma latência entre *Cloudlets* de 15, 30 e 100 ms, realizar migrações sem erros na predição de mobilidade e com o critério de escolha da *Cloudlet* pela menor latência, apresentam níveis de latência, respectivamente, de até 20%, 30% e 40% inferiores ao cenário base que não realiza nenhuma migração.

Apesar da realização de migrações diminuir a latência média experimentada pelo usuário, há a necessidade de posicionar a aplicação do usuário o mais próximo possível do usuário para obter esses benefícios. Em geral, a utilização da predição de mobilidade, apesar de reduzir o número de migrações, aumenta a latência experimentada pelo usuário em arquiteturas com uma latência entre *Cloudlets* superior a 2 ms. Há então um *tradeoff* entre a manutenção da latência e a diminuição no número de migrações.

Complementarmente, realizar de forma imprecisa a predição de mobilidade pode potencializar o aumento na latência experimentada pelo usuário. Cenários em que a predição de mobilidade do usuário possui cerca de 1000 metros de imprecisão, a latência média experimentada pelo usuário é equivalente ao cenário em que não é permitido a realização de migrações. Esse comportamento é resultado da distância entre o usuário

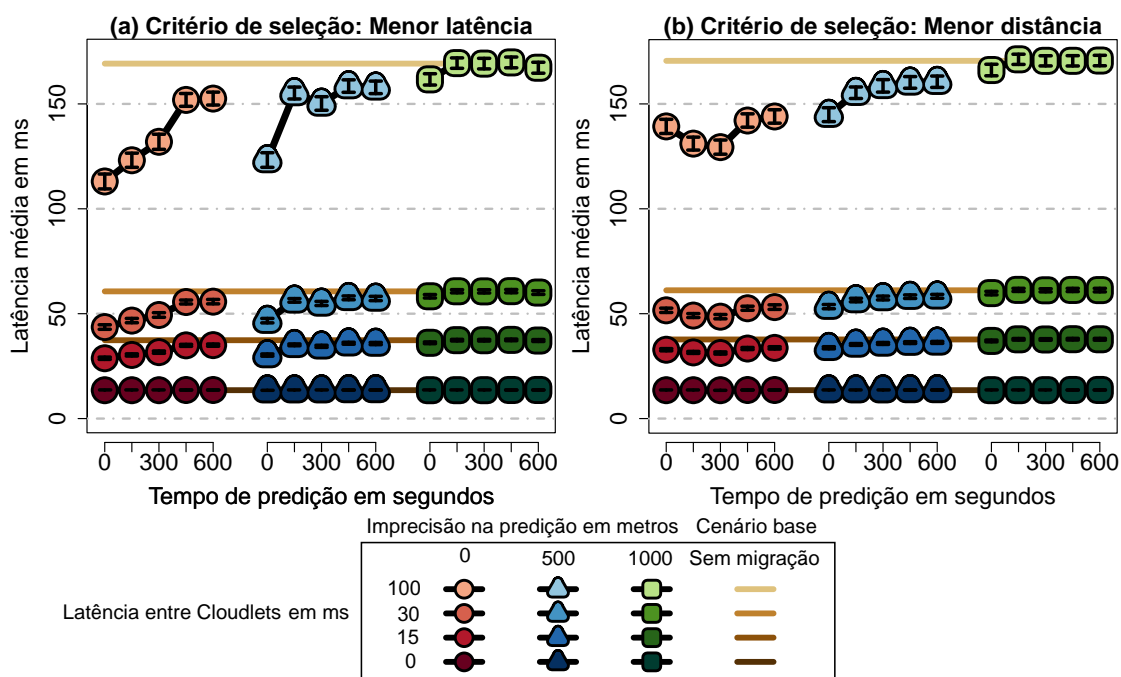


Figura 5. Latência média experimentalada pelos usuários nos cenários avaliados

e a sua aplicação. A tendência da latência se aproximar do cenário base de ausência de migrações também é identificada com o aumento na janela de predição.

A latência máxima experimentalada pelo usuário se manteve estável em todos os cenários em que o processo de migração ocorria, tanto para o critério de menor latência (Figura 6 (a)) quanto para menor distância (Figura 6 (b)). Isso deve-se ao fato de que o processo de migração ocorre somente quando a *Cloudlet* que está atendendo o usuário deixa de oferecer o critério de migração estabelecido, menor latência ou menor distância. Caso não haja *Cloudlets* atendendo essa demanda, a aplicação continua sendo executada na *Cloudlet* de origem, caso contrário, o processo de migração é iniciado. Nota-se que a conexão de rede entre as *Cloudlets* apresenta um papel determinante na latência máxima oferecida ao usuário, podendo alcançar latências de até 250 ms.

7. Conclusão

A computação em Névoa provê ao usuário o acesso à sua aplicação com uma latência reduzida, se comparada à Nuvem. Definir a melhor localização para executar esta aplicação, no entanto, é fundamental para garantir tais benefícios.

Simulações de cenários compatíveis com usuários móveis em uma Cidade Inteligente ratificaram que incorporar informações sobre o trajeto futuro do usuário contribui para a diminuição no número de migrações de sua aplicação entre as *Cloudlets* na Névoa. A imprecisão nesse cálculo, no entanto, não impacta no número de migrações realizadas.

Resultados apresentados neste trabalho indicam que uma imprecisão de 1000 metros na identificação da posição futura do usuário pode resultar em um aumento na latência em até 30%. Neste cenário, a utilização de predição de mobilidade se torna irrelevante, assim como em um ambiente com uma baixa latência entre as *Cloudlets*. Entretanto, em uma arquitetura que apresenta uma latência entre *Cloudlets* a partir de 15 ms, a realização de migrações apresenta bons resultados quanto à latência proporcionada aos usuários.

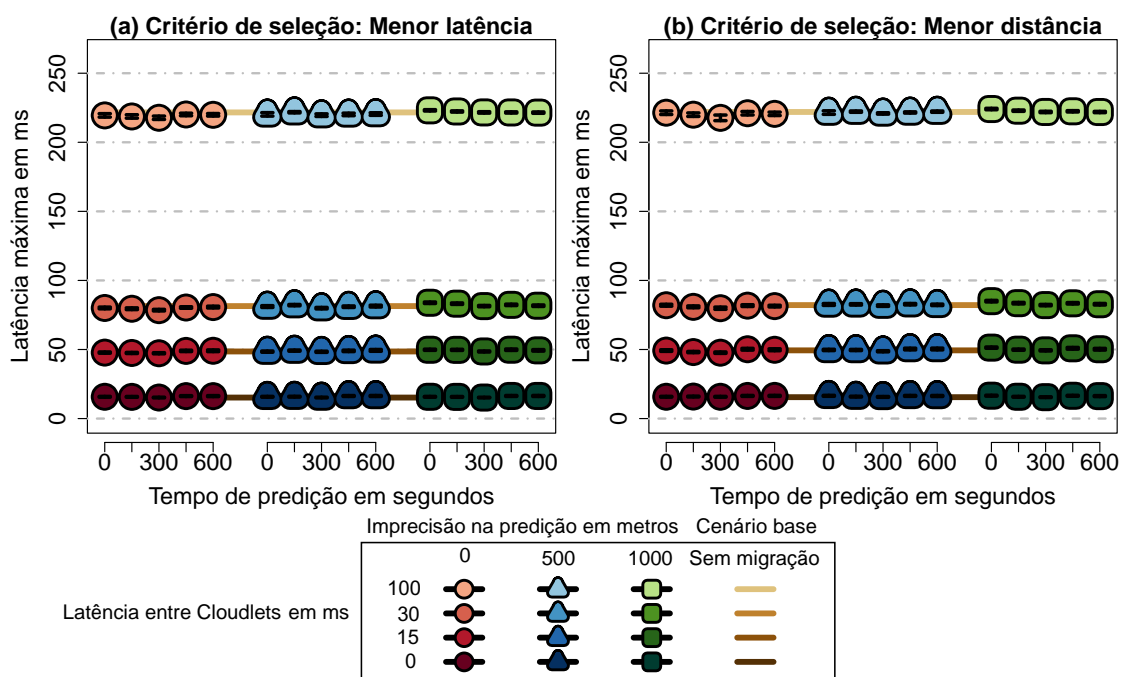


Figura 6. Latência máxima experimentada pelos usuários nos cenários avaliados

Baseado nos resultados deste trabalho, nota-se que há um *tradeoff* entre a escolha de uma abordagem que resulte em um baixo número de migrações, diminuindo a indisponibilidade de acesso, e uma que resulte em uma baixa latência. No contexto de Computação em Névoa para usuários móveis, caberá ao desenvolvedor da aplicação ou ao provedor da infraestrutura escolher, dentre esses parâmetros, a prioridade da aplicação.

A partir das conclusões obtidas neste trabalho, alguns tópicos de pesquisa ainda se encontram em aberto e outros cenários poderiam ser avaliados para complementar este trabalho. Algoritmos de predição presentes na literatura e outras métricas, como dados transmitidos e tempo de indisponibilidade de acesso também poderiam ser avaliados.

Agradecimentos

Este trabalho é parte do INCT sobre Internet do Futuro para Cidades Inteligentes (CNPq 465446/2014-0, CAPES 88887.136422/2017-00 e FAPESP 2014/50937-1). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Aissioui, A., Ksentini, A., Gueroui, A. M., and Taleb, T. (2018). On enabling 5g automotive systems using follow me edge-cloud concept. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(6):5302–5316.
- Batista, D. M., Goldman, A., Hirata, R., Kon, F., Costa, F. M., and Endler, M. (2016). Interscity: Addressing future internet research challenges for smart cities. In *Network of the Future (NOF), 2016 7th International Conference on the*, pages 1–6. IEEE.
- Bittencourt, L. F., Lopes, M. M., Petri, I., and Rana, O. F. (2015). Towards virtual machine migration in fog computing. In *P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC), 2015 10th International Conference on*, pages 1–8. IEEE.

- Cuttone, A., Lehmann, S., and González, M. C. (2018). Understanding predictability and exploration in human mobility. *EPJ Data Science*, 7(1):2.
- Elbamby, M. S., Perfecto, C., Bennis, M., and Doppler, K. (2018). Toward low-latency and ultra-reliable virtual reality. *IEEE Network*, 32(2):78–84.
- Gomes, A. S., Sousa, B., Palma, D., Fonseca, V., Zhao, Z., Monteiro, E., Braun, T., Simoes, P., and Cordeiro, L. (2017). Edge caching with mobility prediction in virtualized lte mobile networks. *Future Generation Computer Systems*, 70:148–162.
- Gonçalves, D., Velasquez, K., Curado, M., Bittencourt, L., and Madeira, E. (2018a). Proactive virtual machine migration in fog environments. In *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 00742–00745. IEEE.
- Gonçalves, D. M., Bittencourt, L. F., and Madeira, E. R. M. (2018b). Migração proativa de máquinas virtuais para aplicações móveis na computação em névoa. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, volume 36.
- Gupta, H., Vahid Dastjerdi, A., Ghosh, S. K., and Buyya, R. (2017). ifogsim: A toolkit for modeling and simulation of resource management techniques in the internet of things, edge and fog computing environments. *Software: Practice and Experience*, 47(9):1275–1296.
- Jiang, Y., Huang, Z., and Tsang, D. H. (2018). Challenges and solutions in fog computing orchestration. *IEEE Network*, 32(3):122–129.
- Liu, L., Chang, Z., Guo, X., Mao, S., and Ristaniemi, T. (2018). Multiobjective optimization for computation offloading in fog computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(1):283–294.
- Lopes, M. M., Higashino, W. A., Capretz, M. A., and Bittencourt, L. F. (2017). Myifogsim: A simulator for virtual machine migration in fog computing. In *Companion Proceedings of the 10th International Conference on Utility and Cloud Computing, UCC '17 Companion*, pages 47–52, New York, NY, USA. ACM.
- Mustafa, A. M., Abubakr, O. M., Ahmadien, O., Ahmedin, A., and Mokhtar, B. (2017). Mobility prediction for efficient resources management in vehicular cloud computing. In *Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering, 5th IEEE International Conference on*, pages 53–59. IEEE.
- Puliafito, C., Mingozzi, E., and Anastasi, G. (2017). Fog computing for the internet of mobile things: issues and challenges. In *Smart Computing (SMARTCOMP), 2017 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- Taleb, T. and Ksentini, A. (2013). Follow me cloud: interworking federated clouds and distributed mobile networks. *IEEE Network*, 27(5):12–19.
- Wang, M., Yang, S., Sun, Y., and Gao, J. (2017). Human mobility prediction from region functions with taxi trajectories. *PloS one*, 12(11):e0188735.
- Yao, H., Bai, C., Zeng, D., Liang, Q., and Fan, Y. (2015). Migrate or not? exploring virtual machine migration in roadside cloudlet-based vehicular cloud. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 27(18):5780–5792.