



**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E INFORMÁTICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**  
**INTRODUÇÃO À COMPUTAÇÃO**

Arthur Braga de Campos Tinoco  
Diego Silva Mattos Gomes de Castro  
Henrique Lima da Cunha Pereira  
Luis Philip Lemos Martins  
Marina Veríssimo Almeida Campidelli  
Rafael Oliveira Lima Peixoto  
Rodrigo Machado Ribeiro da Glória

**SEMINÁRIO DAS ÁREAS DA COMPUTAÇÃO: Computação móvel - (redes sem fio)**

Prof. Wagner Cipriano da Silva

**BELO HORIZONTE**  
**2023**

## **Fundações e Evolução dos Paradigmas da Computação Móvel: Cloud, IoT, Edge e Fog**

### **Foundations and Evolution of Modern Computing Paradigms: Cloud, IoT, Edge, and Fog**

Michelle De Donno<sup>1</sup>

Koen Tange<sup>2</sup>

Nicola Dragoni<sup>3</sup>

#### **RESUMO**

Nos últimos anos, termos como IoT, Cloud, Edge e Fog ganharam muita atenção tanto na indústria quanto na pesquisa acadêmica. Uma definição clara desses paradigmas de computação e sua correlação é difícil de encontrar na literatura. Este trabalho aborda a deficiência do estudo da área, representando um recurso útil para aqueles que começarão a seguir. Desta forma, mostra-se a evolução dos paradigmas da computação moderna e o interesse de pesquisa relacionado. Em seguida, aborda-se cada paradigma, delineando nitidamente seus pontos-chave e sua relação com os demais. Posteriormente, aborda-se extensivamente a Fog computing, observando seu papel de destaque como a cola entre IoT, Cloud e computação Edge.

**Palavras-chave:** IoT, Cloud, Edge, Fog.

---

<sup>1</sup> Michele De Donno recebeu o B.Sc. licenciatura em engenharia informática pelo Politecnico di Bari, Bari, Itália, em 2014, e o M.Sc. grau (cum laude) em engenharia da computação pelo Politecnico di Torino, Torino, Itália, em 2017.

<sup>2</sup> Koen Tange recebeu o B.Sc. em Ciência de Software pela Eindhoven University of Technology (TU/e), Eindhoven, Holanda, em 2016, e o M.Sc. graduação em engenharia, segurança e computação móvel pela Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Dinamarca, e Aalto University, Espoo, Finlândia, em 2018, como parte do Programa de Mestrado Nórdico em segurança e computação móvel.

<sup>3</sup> Nicola Dragoni recebeu o M.Sc. graduação (cum laude) e o Ph.D. Graduado em Ciência da Computação pela Universidade de Bolonha, Itália, ele é professor associado em sistemas distribuídos e segurança na DTU Compute, Universidade Técnica da Dinamarca, Dinamarca, e professor de engenharia da computação no Centro de Sistemas de Sensores Autônomos Aplicados, Universidade de Örebro, Suécia.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |  |
|-------|--|
| IoT   | Internet das Coisas  |
| Cloud | Computação baseada em serviços de nuvem                              |
| Edge  | Arquitetura capaz de processar os dados do cliente no limite da rede |
| Fog   | Arquitetura com o objetivo em reduzir a quantidade de dados à Nuvem  |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                            | <b>5</b>  |
| <b>1.1. Estudos Acadêmicos.....</b>                  | <b>5</b>  |
| <b>1.2. Cloud Computing.....</b>                     | <b>6</b>  |
| <b>1.3. Desafios para a computação em nuvem.....</b> | <b>7</b>  |
| <b>1.4. Edge Computing.....</b>                      | <b>9</b>  |
| <b>1.5. Computação em nuvem (fog).....</b>           | <b>10</b> |
| <b>1.6. Problemas de Fog.....</b>                    | <b>15</b> |
| <b>1.7. Exemplos.....</b>                            | <b>17</b> |

## **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, houve uma evolução nos paradigmas da computação. Neste trabalho, foram explorados três deles - Cloud computing, Edge computing e Fog computing. O primeiro, Cloud computing, é o mais conhecido e consolidado entre eles. Nasceu da necessidade de utilizar computação como uma utilidade e tem sido um tópico extremamente popular nas pesquisas acadêmicas até que a disseminação de “smart devices” indicou as limitações desse paradigma.(DE DONNO et al, 2019)

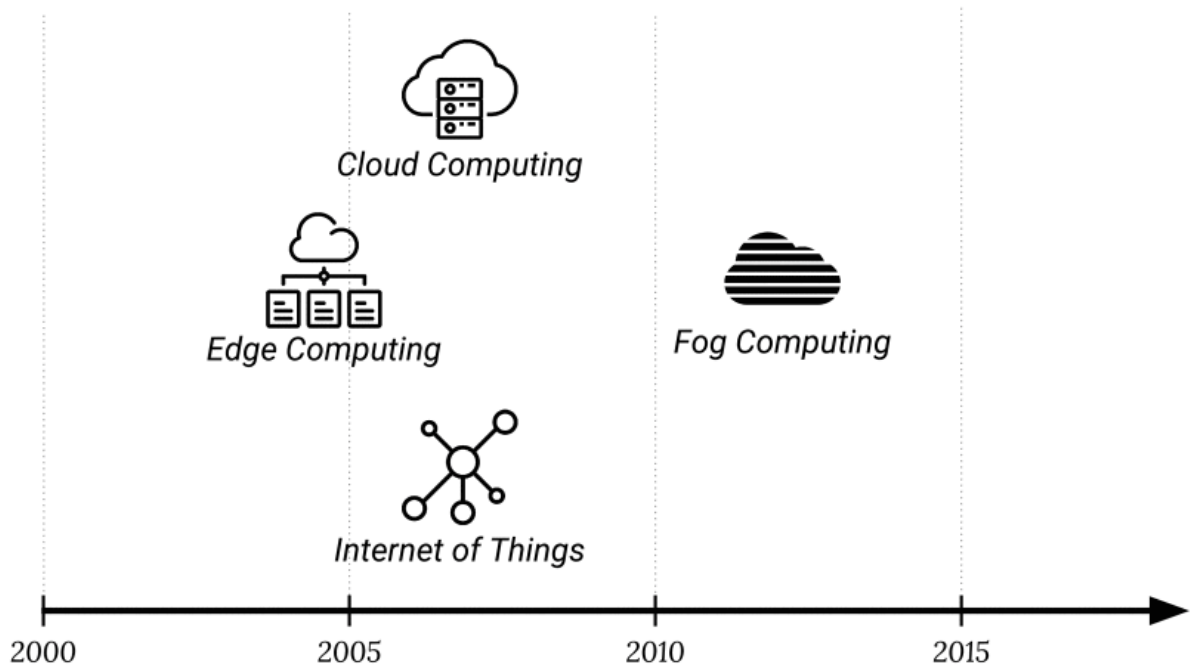
Com a Internet das coisas (IoT), veio a necessidade de expandir a pesquisa para novos paradigmas voltados a descentralização da computação. Dessa forma, Computação de borda ( Edge Computing) veio à tona, com a ideia de proporcionar o poder da computação em nuvem na borda da rede. Ela conseguiu resolver problemas que atingiam a computação em nuvem, como latência, largura de banda e conectividade.(DE DONNO et al, 2019)

Consequentemente, a Fog Computing surgiu como uma evolução da computação em borda. Ela tenta representar uma nova arquitetura que distribui os recursos tanto verticalmente como horizontalmente.

Entretanto, as pesquisas sobre Fog computing e Edge computing ainda estão nos estados iniciais e ainda há muito o que fazer para por esses paradigmas em prática.

### **1.1. Estudos Acadêmicos**

Apesar de ter se difundido apenas recentemente, a computação em borda apareceu na literatura antes mesmo da computação em nuvem. Na figura abaixo vemos quando ocorreu a aparição para cada um dos paradigmas.



## 1.2. Cloud Computing

O NIST define a Computação em Nuvem como "um modelo que permite o acesso ubíquo, conveniente e sob demanda a uma rede compartilhada de recursos computacionais configuráveis (por exemplo, redes, servidores, armazenamento, aplicativos e serviços) que podem ser rapidamente provisionados e liberados com mínimo esforço de gerenciamento ou interação do provedor de serviços".

Dessa forma, computação em nuvem é um grupo de computadores e servidores conectados entre si pela internet para formar uma rede. A computação em nuvem permite o acesso remoto a softwares, armazenamento de arquivos e processamento de dados por meio da internet, como se fossem um serviço. Isso elimina a necessidade de instalar programas no computador ou de possuir uma infraestrutura própria de servidores.

As características essenciais da computação em nuvem são:

- **Serviço sob demanda:** as capacidades de computação podem ser fornecidas automaticamente quando necessário, sem exigir qualquer interação humana entre o consumidor e o provedor de serviços.
- **Acesso amplo à rede:** as capacidades de computação estão disponíveis na rede e acessíveis por meio de vários mecanismos disponíveis para uma ampla gama de plataformas de clientes (por exemplo, estações de trabalho, laptops e dispositivos móveis).
- **Pooling de recursos:** os recursos de computação são agrupados para acomodar vários consumidores, alocando e desalocando dinamicamente de acordo com a demanda do consumidor. Além disso, os recursos do provedor são independentes da localização, ou seja, o consumidor não tem conhecimento ou controle de sua localização exata.
- **Elasticidade rápida:** as capacidades de computação podem ser fornecidas e liberadas de forma flexível para escalar de acordo com a demanda. Assim, o consumidor tem a percepção de capacidades de computação ilimitadas e sempre adequadas.
- **Serviço medido:** o uso de recursos pode ser monitorado e relatado de acordo com o tipo de serviço oferecido. Isso é particularmente relevante em serviços de cobrança por uso ou pagamento por usuário, pois garante grande transparência entre o provedor e o consumidor do serviço.

### 1.3. Desafios para a computação em nuvem

Como dito anteriormente, as interações entre a computação em nuvem e as internet das coisas se fez necessário que alguns desafios sejam superados como:

1. **Baixa latência:** Necessidade de resposta rápida, dentro de milissegundos, para sistemas de controle industrial e aplicações de IoT.
2. **Alta largura de banda da rede:** O número crescente de dispositivos IoT conectados gera grande quantidade de dados. Logo o envio desses dados requer uma largura de banda de rede alta necessitando. Portanto, os dados gerados na borda da rede muitas vezes precisam ser armazenados e processados localmente.

3. **Recursos limitados:** Vários dispositivos IoT (como sensores, drones, carros, etc.) têm recursos muito limitados. Isso significa que eles não são capazes de interagir diretamente com a nuvem, uma vez que essas interações muitas vezes requerem protocolos complexos ou computação intensiva. Como resultado, dispositivos com restrições de recursos têm que confiar em uma camada intermediária de dispositivos.
4. **Convergência de TI e OT:** Recentemente, com o advento da Indústria 4.0, os sistemas industriais estão experimentando a convergência da Tecnologia Operacional (OT) e da Tecnologia da Informação (TI). Esta tendência traz novas prioridades de negócios e requisitos operacionais. A atualização de hardware e software nesses sistemas é um problema. O resultado é a necessidade de uma nova arquitetura que reduza a necessidade de atualizações do sistema ao longo do tempo.
5. **Conectividade intermitente:** Alguns dispositivos IoT (por exemplo, veículos e drones) têm conectividade de rede intermitente. Como resultado, é difícil fornecer serviços ininterruptos de nuvem para tais dispositivos. Portanto, é necessário contar com uma camada intermediária de dispositivos para aliviar ou resolver o problema.
6. **Distribuição geográfica:** O grande número de dispositivos IoT que requerem serviços de computação e armazenamento está distribuído em vastas áreas geográficas. Portanto, é difícil encontrar uma localização para a infraestrutura da nuvem que permita atender a todos os requisitos das aplicações IoT. Uma camada intermediária de dispositivos é útil para preencher essa lacuna.
7. **Consciência de contexto:** Muitas aplicações de IoT, como redes veiculares e realidade aumentada, requerem acesso e processamento de informações de contexto local (por exemplo, localização do usuário, condições de rede, etc.). Este requisito não se encaixa na abordagem centralizada da computação em nuvem devido à distância física entre os dispositivos IoT e a computação central.
8. **Segurança e privacidade:** Os desafios emergentes de segurança e privacidade do IoT são únicos. Hoje, as soluções de cibersegurança visam defender empresas e consumidores, fornecendo proteção baseada em perímetro por meio de firewalls, Sistemas de Prevenção de Intrusões (IPSs) e Sistemas de Detecção de Intrusões (IDSs). Infelizmente, esse paradigma não é o mais adequado para enfrentar os novos desafios de segurança que o IoT traz.



1. **Baixa latência:** Necessidade de resposta rápida, dentro de milissegundos, para sistemas de controle industrial e aplicações de IoT.
2. **Alta largura de banda da rede:** Aumento do volume de dados gerados por dispositivos IoT, exigindo armazenamento e processamento local.
3. **Recursos limitados:** Dispositivos IoT com recursos limitados precisam de uma camada intermediária para se conectar à nuvem.
4. **Convergência de TI e OT:** A convergência da Tecnologia Operacional (OT) e da Tecnologia da Informação (TI) traz novas prioridades e requisitos operacionais.
5. **Conectividade intermitente:** Dispositivos IoT com conectividade de rede intermitente precisam de serviços ininterruptos.
6. **Distribuição geográfica:** A vasta distribuição geográfica de dispositivos IoT exige uma nova localização para a infraestrutura da nuvem.
7. **Consciência de contexto:** Aplicações de IoT exigem acesso e processamento de informações de contexto local.
8. **Segurança e privacidade:** Novos desafios de segurança e privacidade surgem com o IoT, exigindo mudanças nos paradigmas de cibersegurança existentes.

#### 1.4. Edge Computing

Segundo Zhi et al (2016), "Edge computing" refere-se às tecnologias que permitem a computação ser realizada na borda da rede, em dados downstream em nome dos serviços de nuvem e dados upstream em nome dos serviços de IoT. Basicamente, a ideia é estender a computação em nuvem para a borda da rede com o objetivo de ter a computação na proximidade das fontes de dados, ou seja, dispositivos IoT."

Dessa forma, a computação de borda é uma arquitetura de tecnologia da informação distribuída na qual os dados do cliente são processados na "borda" da rede, seja pelo dispositivo ou por um servidor local. Isso permite que dispositivos em locais remotos processem dados.

As principais implementações da computação em borda são:

1. **Computação em Nuvem Móvel & Computação em Cloudlet:** A Computação em Nuvem Móvel (MCC) é baseada na ideia de offloading móvel: os dispositivos móveis devem delegar o armazenamento e a computação para entidades remotas para reduzir a carga de trabalho e otimizar objetivos como consumo de energia, vida útil e custo. A visão mais comum de MCC é a Computação em Cloudlet (CC). Basicamente, CC consiste em usar cloudlets para realizar o processamento de dados e armazenamento próximo aos dispositivos finais. Um cloudlet é uma infraestrutura de nuvem pequena e confiável, localizada na borda da rede e disponível para dispositivos móveis próximos.
2. **Computação de Borda Móvel:** A Computação de Borda Móvel (MEC) é uma implementação do paradigma de computação de borda que traz capacidades de computação em nuvem (por exemplo, computação e armazenamento) para a borda da rede móvel, dentro da Rede de Acesso Rádio (RAN). Os nós MEC geralmente estão localizados com o Controlador de Rede de Rádio ou com uma grande estação de rádio base.

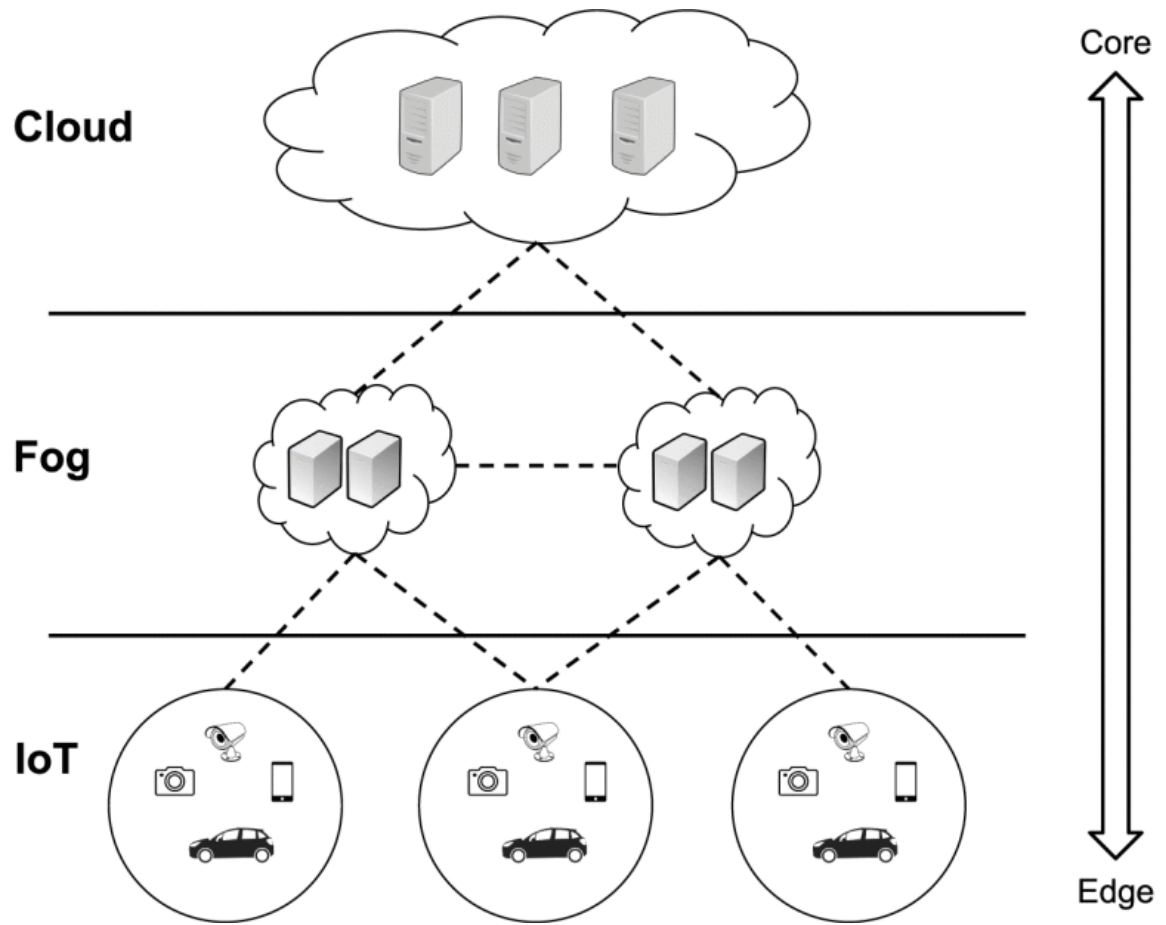
### 1.5.Computação em nuvem (fog)

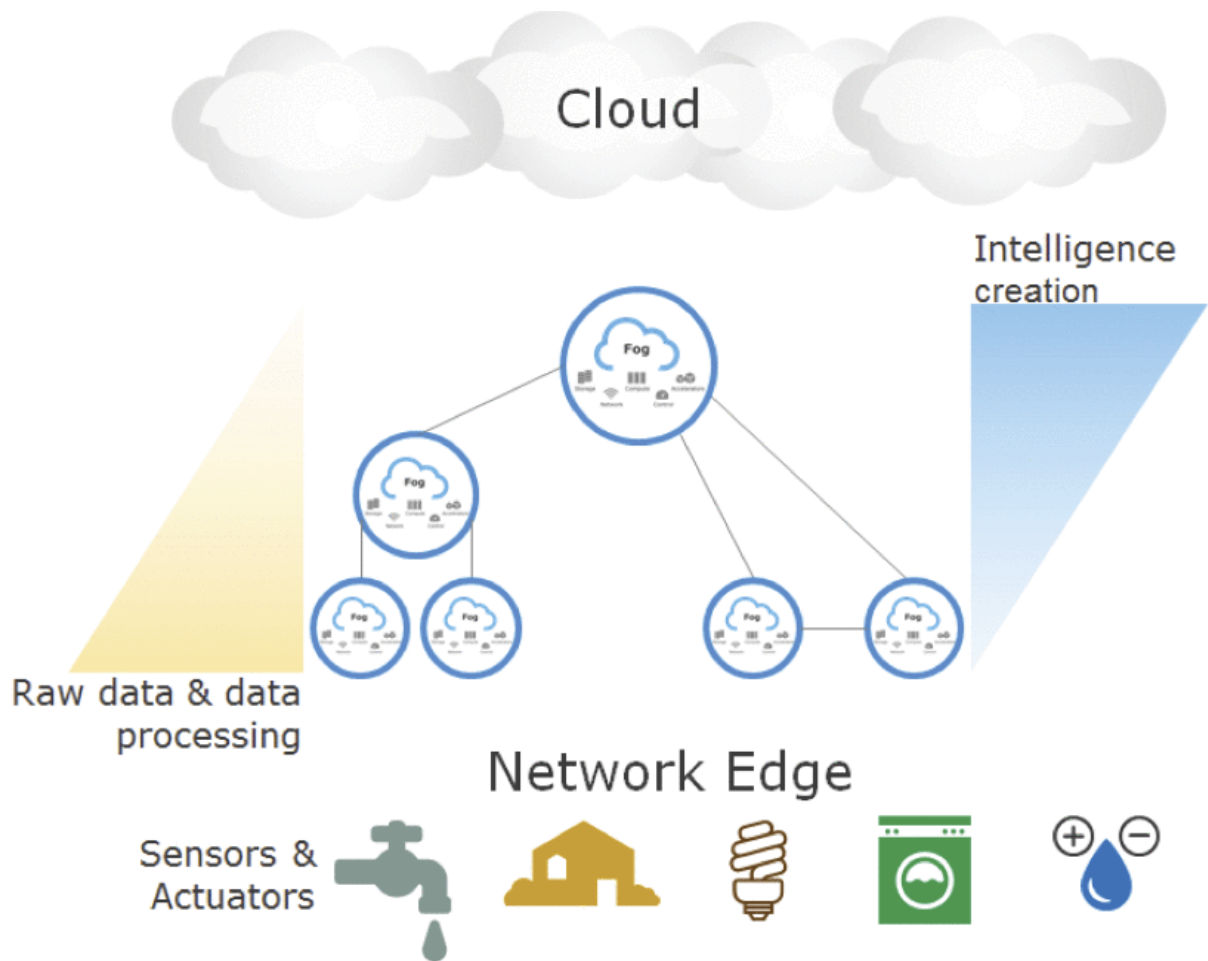
A CISCO definiu em 2012 que "Uma plataforma altamente virtualizada que fornece serviços de computação, armazenamento e rede entre dispositivos finais e Centros de Dados de computação em Nuvem tradicionais, geralmente, mas não exclusivamente, localizados na borda da rede."

Dessa forma, a computação em névoa é uma arquitetura que estende os serviços de nuvem para a borda da rede numa escala maior. Ela é composta por uma grande quantidade de nós de névoa que são capazes de computar, transmitir e armazenar temporariamente dados. Eles podem estar localizados em qualquer lugar entre a nuvem e os dispositivos finais.

A arquitetura da Computação em Névoa é composta por três camadas principais que derivam da sua ideia principal que a computação em névoa é a ponte entre a borda da rede e a nuvem.

1. **Camada IoT:** Esta camada é composta por dispositivos IoT, como sensores, veículos inteligentes, drones, smartphones, tablets, etc. Normalmente, eles estão amplamente distribuídos geograficamente e têm como objetivo principal a coleta de dados e o envio desses dados para a camada superior para armazenamento ou processamento. No entanto, dispositivos com capacidades computacionais consideráveis (por exemplo, smartphones) também podem realizar algum processamento local antes de envolver as camadas superiores.
2. **Camada de Névoa:** Esta camada é o núcleo da arquitetura de Computação em Névoa. É composta por um grande número de nós de névoa. De acordo com o OpenFog Consortium, um nó de névoa é "o elemento de rede físico e lógico que implementa os serviços de Computação em Névoa". Os nós de névoa são capazes de computar, transmitir e armazenar temporariamente dados e podem ser localizados em qualquer lugar entre a nuvem e os dispositivos finais. Como resultado, por um lado, os nós de névoa estão diretamente conectados aos dispositivos finais para oferecer serviços. Por outro lado, eles estão conectados à infraestrutura da nuvem para fornecer e obter serviços.
3. **Camada de Nuvem:** Esta camada é composta principalmente pela infraestrutura de nuvem centralizada. É composta por vários servidores com altas capacidades computacionais e de armazenamento e fornece diferentes serviços. Diferentemente da arquitetura de computação em nuvem tradicional, na arquitetura de névoa, alguns cálculos ou serviços podem ser movidos eficientemente da nuvem para a camada de névoa para reduzir a carga nos recursos da nuvem e aumentar a eficiência.





### 1.6 Desafios em aberto

Os desafios em aberto para cada paradigma, conforme Donno et al, são:

#### **Computação em Nuvem:**

- **Segurança:** A segurança na nuvem é vista como um desafio, com a confiabilidade dos serviços fornecidos pela nuvem sendo um problema significativo.
- **Sustentabilidade:** Os centros de dados em nuvem requerem grandes quantidades de energia para funcionar, e a pesquisa está sendo feita para minimizar o uso de energia.
- **Infraestrutura de rede em nuvem:** Existem várias questões em aberto relacionadas à utilização da rede, congestionamento de dados, federação de nuvem e hipervisores habilitados para rede.

#### **IoT:**

- Consumo de energia: Aumentar a vida útil da bateria e otimizar o uso de energia dos dispositivos conectados é visto como um dos principais desafios.
- Segurança: A segurança dos dispositivos IoT é identificada por muitos como um campo crítico que está cheio de desafios abertos.
- Privacidade: A privacidade desempenha um grande papel para os dispositivos IoT que os usuários podem interagir diretamente.

### **Computação de Borda (Edge Computing):**

- Programabilidade: Atualmente, existe uma grande lacuna na flexibilidade entre a programabilidade dos serviços em nuvem e os dispositivos de borda, que precisa ser abordada.
- Segurança e privacidade: Desafios relacionados à segurança e privacidade, abstração de dados, gerenciamento de serviços e problemas de otimização.

### **Computação em Neblina (Fog Computing):**

- Programabilidade: A programabilidade e a capacidade de lidar com sistemas heterogêneos são vistos como desafios em aberto no domínio da computação em neblina.
- Segurança, interoperabilidade e eficiência de energia/recurso: Esses são considerados desafios importantes para aplicações industriais de computação em neblina.
- Heterogeneidade, gerenciamento de QoS, escalabilidade, mobilidade, federação e interoperabilidade: Esses são os desafios mais presentes na computação em neblina.

## **1.6. Problemas de Fog**

A computação em nuvem, edge e fog tem revolucionado a forma como gerenciamos dados e prestamos serviços de TI, oferecendo uma série de benefícios, como maior eficiência, escalabilidade e flexibilidade. No entanto, a adoção dessas tecnologias não está isenta de desafios. À medida que avançamos na era digital, é importante entender e abordar essas questões para aproveitar ao máximo o potencial dessas tecnologias emergentes. Neste texto, iremos discutir cinco desafios principais associados à computação em nuvem, edge e fog: Autenticação e Confiança, Privacidade, Segurança, Posicionamento dos Servidores de Fog e Consumo de Energia.

### **1. Autenticação e Confiança:**

A vasta escala da computação fog faz da autenticação uma tarefa desafiadora. Com um amplo espectro de provedores de serviços fog, que vão desde provedores de serviços em nuvem até provedores de serviços de internet e usuários finais, o cenário de confiabilidade torna-se complexo. Existe um risco real de um nó fog mal-intencionado se passar por autêntico e enganar um usuário final para estabelecer uma conexão, abrindo assim caminho para potenciais ataques. Para mitigar este risco, é necessário um forte sistema de autenticação, com protocolos robustos de verificação de identidade para garantir que apenas entidades legítimas possam se conectar à rede.

### **2. Privacidade:**

A natureza sem fio da computação fog gera preocupações significativas com a privacidade da rede. O grande número de nós fog e o acesso de cada usuário final a esses nós resulta em um grande volume de informações sensíveis em trânsito. Proteger a privacidade desses dados requer uma criptografia eficiente, políticas de gerenciamento de dados e tecnologias de proteção de privacidade de ponta.

### **3. Segurança:**

A segurança torna-se um desafio devido ao número de dispositivos conectados aos nós fog através de vários gateways. Cada dispositivo com um endereço IP único pode ser alvo de hackers, que podem imitar esses endereços para acessar informações pessoais armazenadas em nós fog específicos. As medidas de

segurança devem ser rigorosas e em várias camadas, incluindo firewalls, sistemas de detecção de intrusão, análise de comportamento de rede e outras técnicas avançadas de segurança cibernética.

#### **4. Posicionamento dos Servidores de Fog:**

A decisão sobre o posicionamento dos servidores de fog é de vital importância. Dada a natureza descentralizada e a proximidade com os usuários finais da computação fog, o local onde os servidores são posicionados pode ter um impacto significativo no desempenho do serviço. Um posicionamento inadequado pode resultar em latência elevada, congestionamento de rede e degradação geral do desempenho. No entanto, encontrar o posicionamento ideal é um desafio devido à variabilidade da demanda, à dinâmica das redes e às restrições geográficas.

Além disso, o posicionamento dos servidores também deve levar em conta fatores como a disponibilidade de infraestrutura de rede, a disponibilidade de energia e a segurança física do local. Em locais onde esses recursos não são facilmente acessíveis, o custo e a complexidade do posicionamento dos servidores fog podem aumentar significativamente.

#### **5. Consumo de Energia:**

O alto consumo de energia é uma característica inerente da computação fog, devido ao grande número de nós fog presentes no ambiente. As empresas devem buscar maneiras de tornar os nós fog mais eficientes do ponto de vista energético. Isso pode envolver o uso de hardware de baixo consumo de energia, a otimização do uso de recursos através do gerenciamento de carga e a implementação de técnicas de virtualização para reduzir a necessidade de hardware físico.

#### **6. Custo de manutenção dos servidores:**

Os custos de manutenção dos servidores fog são outra preocupação significativa. Dado o grande número de nós necessários para uma rede fog eficaz, os custos de



manutenção podem acumular-se rapidamente. Isso inclui não apenas os custos diretos, como o hardware e o software necessários para manter os servidores em funcionamento, mas também custos indiretos, como energia, resfriamento, segurança física e pessoal de suporte técnico.

Além disso, a manutenção dos servidores fog pode ser mais complexa do que a manutenção de um centro de dados centralizado. Por exemplo, a detecção e solução de problemas pode ser mais difícil devido à natureza distribuída da computação fog. Isso pode levar a períodos de inatividade mais longos e a um impacto maior no desempenho do serviço.

### 1.7. Exemplos

- **Serviços de armazenamento:** Um serviço de armazenamento refere-se a uma solução fornecida por empresas ou provedores que permite aos usuários armazenar, gerenciar e acessar dados, arquivos, documentos ou outros tipos de informações em um ambiente remoto. Esse serviço geralmente é oferecido por meio da computação em nuvem, onde os dados são armazenados em servidores remotos e acessados pela Internet.
- **Carros Autônomos:** Carros demandam uma alta velocidade de processamento, precisando tomar decisões em frações de segundos.

A edge computing permite esse processamento rápido e local reduzindo a latência. Isso é fundamental para funções de condução autônoma que requerem respostas imediatas, como detectar obstáculos.

- **Monitoramento de Tráfego de cidades inteligentes:** A computação em névoa é perfeita para situações onde você tem muitos dispositivos IoT (Internet das Coisas) produzindo uma quantidade massiva de dados. Por exemplo, imagine uma cidade inteligente com milhares de câmeras e sensores de tráfego. Usar a computação em nuvem para processar todos esses dados em tempo real poderia ser ineficiente e caro. Em vez disso, a computação em névoa permite que esses dados sejam processados mais perto da fonte. Então o "fog layer" realiza o processamento de dados essenciais e depois disso, a camada de névoa decide quais dados são úteis para enviar para a nuvem. Isso permite que as cidades inteligentes lidem com

grandes volumes de dados gerados por inúmeros dispositivos IoT de uma maneira mais eficiente, mantendo a latência baixa e economizando largura de banda.

## REFERÊNCIAS

DONNO, Michelle De. TANGE, Koen. DRAGONI, Nicola. Foundations and Evolution of Modern Computing Paradigms: Cloud, IoT, Edge, and Fog. **IEEE Xplore**, 2019.