

## NFV em Redes 5G: Avaliando o Desempenho de Composição de Funções Virtualizadas via Maestro

Ariel Galante Dalla-Costa<sup>1</sup>, Matias A. K. Schimunek<sup>1</sup>,  
Juliano Araujo Wickboldt<sup>1</sup>, Cristiano Bonato Both<sup>2</sup>,  
Luciano Paschoal Gaspary<sup>1</sup>, Lisandro Zambenedetti Granville<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>2</sup>Departamento de Matemática Aplicada e Ciências Sociais  
Universidade Federal das Ciências da Saúde de Porto Alegre

{agdcosta, makschimunek, jwickboldt}@inf.ufrgs.br

cbboth@ufcspa.edu.br, {paschoal, granville}@inf.ufrgs.br

**Abstract.** *Dynamic Cloud Radio Access Network (Dynamic C-RAN) is an architecture wireless that aims benefits such as flexibility and agility to new five generation (5G) network. In Dynamic C-RAN, the radio functions processing is distributed along of a hierarchical of clouds. Network Functions Virtualization has been investigated the facilities to employ this wireless functions. NFV offers orchestration of split of radio functions into Virtualized Network Functions (VNF). The orchestrator needs to consider strict requirements of C-RAN between distributed components of VNF to get real earnings. In this work, we propose a detailed evaluation of Maestro - an NFV orchestrator for wireless environments aware VNF composition. We evaluate Maestro through of linear model programming, considering the effectiveness and orchestration overhead for deciding the best place to VNF components. In addition, we evaluate the trade-off between network data rate and time to generate the placement of components.*

**Resumo.** *Dynamic Cloud Radio Access Network (Dynamic C-RAN) é uma arquitetura de redes sem fio emergente que objetiva trazer benefícios como flexibilidade e agilidade para redes móveis de quinta geração (5G). Em Dynamic C-RAN, a carga de processamento das funções de rádio é distribuída ao longo de uma hierarquia de nuvens e, para tal, tem-se investigado o uso de Network Function Virtualization (NFV). NFV tem potencial para oferecer a orquestração das funções de rádio, através da sua subdivisão em componentes de Virtualized Network Function (VNF). Neste trabalho propõe-se uma avaliação detalhada do Maestro – um orquestrador de NFV para ambientes sem fio orientado a composição de VNFs, a fim de estimar os potenciais ganhos ao se aplicar os conceitos de NFV em Dynamic C-RAN. Através de um modelo baseado em programação linear, avaliou-se a efetividade e custo de orquestração em termos de aderência aos requisitos de comunicação entre as funções de rádio e os posicionamentos dos componentes das VNFs na rede. Além disso, avaliou-se a relação entre tempo para realizar esses posicionamentos e a taxa de dados transmitida, considerando cenários de ocupação variável em Dynamic C-RAN.*

## 1. Introdução

*Cloud Radio Access Network* (C-RAN) é uma arquitetura de redes sem fio que separa os componentes das *Base Stations* (BS) em *Radio Remote Head* (RRH) e *Baseband Unit* (BBU). Uma RRH é uma unidade de rádio, enquanto uma BBU é uma unidade de processamento de sinais [Checko et al. 2015]. As RRHs estão localizadas na RAN e as amostras de sinais são transportadas através de enlaces de fibra óptica até as BBUs, que são centralizadas em uma infraestrutura de nuvem, também conhecidas como *BBU pool*. *Dynamic C-RAN* é uma evolução do conceito original de C-RAN, que prevê a distribuição das funções de rádio sobre uma infraestrutura de nuvem, como por exemplo, uma nuvem de borda que processa parte das funções de rádio, e uma nuvem regional que realiza o processamento das demais funções [5G-PPP-Working-Group 2016]. Em *Dynamic C-RAN*, o processamento das funções de rádio pode ser dividido de acordo com as suas funcionalidades, sendo distribuídas em diferentes locais da infraestrutura da rede, resultando em benefícios, tais como adaptabilidade, balanceamento de carga, flexibilidade na implantação de serviços e eficiência energética [Bartelt et al. 2015].

Apesar dos benefícios de *Dynamic C-RAN*, coordenar as funções de rádio não é uma tarefa trivial, por exemplo distribuir as funções de rádio ao longo de diferentes níveis da rede necessita de um algoritmo especializado. Esse algoritmo de distribuição deve respeitar requisitos restritos, tais como taxa mínima de dados transmitidos e atraso mínimo. Por esta razão, tanto academia quanto indústria vêm explorando conceitos de *Network Functions Virtualization* (NFV), na coordenação e distribuição das funções de rede. Utilizar NFV em *Dynamic C-RAN*, torna possível mover as funções de rádio para uma nuvem distribuída, virtualizando essas funções, chamadas de *Virtualized Network Functions* (VNF). Desta forma, as características de NFV, como por exemplo, escalabilidade, migração e orquestração, podem ser aproveitadas em cenários dinâmicos, como em *Dynamic C-RAN* [Heideker e Kamienski 2016], [Abdelwahab et al. 2016].

Os conceitos de NFV devem ser adaptados para gerenciar e orquestrar as funcionalidades de rádio virtualizadas na próxima geração de redes sem fio [Mijumbi et al. 2016], permitindo adaptação e dinamicidade ao ambiente 5G. Para tal, faz-se necessário calcular o posicionamento das funções, atendendo aos requisitos restritos do ambiente *Dynamic C-RAN*. Mais especificamente, um orquestrador deve determinar a localização dos componentes de funções virtualizadas, chamados de *Virtualized Network Functions Components* (VNFCs) ao longo das *Virtualized Deployment Units* (VDUs), considerando as restrições temporais das aplicações. Esse processo, conhecido como posicionamento de funções, é de responsabilidade do orquestrador, pois uma mesma função pode ser dividida em VNFs de diferentes formas pré-estabelecidas.

O orquestrador, chamado *Maestro* [Dalla-Costa et al. 2017], foi proposto em um trabalho anterior, que considera a composição de funções virtualizadas na implantação de VNFCs ao longo da rede. Naquele trabalho, conduziu-se uma prova de conceito focando nas características funcionais e na simulação de ambientes *Dynamic C-RAN*. Neste artigo, realiza-se uma avaliação detalhada do *Maestro*, utilizando diferentes composições de VNFs, buscando caracterizar a capacidade deste orquestrador em satisfazer requisitos temporais restritos, impostos pelo ambiente dinâmico de rede de acesso sem fio. Ademais, avalia-se a relação entre o tempo consumido para o cálculo de posicionamento dos VNFCs e a redução da quantidade de dados transmitidos (ganho de até 83,68%) no *fronthaul*. As-

sim, a principal contribuição deste artigo é mostrar o posicionamento dos VNFCs em um ambiente *Dynamic C-RAN*, devido a ocupação das BSs, observando quais cenários e quais características de ocupação influenciam no tempo para realizar tal posicionamento.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2 são discutidos os trabalhos relacionados. Na Seção 3 é descrito e exemplificado um cenário de *Dynamic C-RAN*. Na Seção 4, propõe-se um estudo de caso, descrevendo e discutindo o desempenho do orquestrador. Finalmente, na Seção 5 são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos relacionados

Nessa seção são apresentados os trabalhos relacionados sobre *Dynamic C-RAN* e, posteriormente, discute-se o estado da arte sobre orquestração e posicionamento de funções virtualizadas, através de NFV.

### 2.1. *Dynamic C-RAN*

Diferente de C-RAN, em que o processamento de funções de rádio é movido para a nuvem centralizada, em *Dynamic C-RAN* funções de rádio podem ser distribuídas entre nuvens organizadas hierarquicamente. Essa distribuição possui diversas vantagens potenciais quando comparada a C-RAN, como maior eficiência energética, diminuição da latência, maior escalabilidade, flexibilidade e adaptabilidade de serviços. Por essa razão, redes 5G estão sendo idealizadas em ambientes *Dynamic C-RAN* [5G-PPP-Working-Group 2016]. Trabalhos encontrados na literatura especializada em redes sem fio [Bartelt et al. 2015, Liu et al. 2015] demonstram quais são as possibilidades e as vantagens de dividir as funções de rádio, por exemplo através da divisão do processamento local e remoto em diferentes funções, tais como MAC, Soft-Bit, RX Data, *Subframe* e *In-phase & Quadrature (I/Q)*. Além disso, estudos mostram como essas subdivisões de funções de rádio implicam na taxa de dados transmitida no *fronthaul* [Wubben et al. 2014].

Coordenar *Dynamic C-RAN* por meio de funções de rádio virtualizadas é um tema de pesquisa que está sendo bastante investigado [Abdelwahab et al. 2016, Liu et al. 2015]. Existem trabalhos na literatura que advogam que NFV pode desempenhar um papel importante no gerenciamento e na orquestração de funções de rede sem fio virtualizadas [Mijumbi et al. 2016, Riggio et al. 2015]. Desta forma, *Dynamic C-RAN* pode considerar a virtualização da BBU, utilizando componentes para cada camada de rádio. Entretanto, ao empregar NFV nesse tipo de rede, depara-se com outros dois principais desafios de pesquisa. O primeiro refere-se a como posicionar e orquestrar funções virtualizadas em uma infraestrutura do tipo *Dynamic C-RAN*. O segundo consiste em assegurar desempenho satisfatório para o cálculo do posicionamento de VNFs, de modo a não prejudicar a dinamicidade do ambiente como um todo. Por exemplo, as funções de rádio de retransmissão da camada *Subframe* não suportam latências superiores a 1ms, enquanto na cada MAC o tempo do *Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)* deve ser menor ou igual a 8ms [Ortín et al. 2014]. Outro fator que pode alterar o funcionamento adequado do ambiente *Dynamic C-RAN* é a mobilidade dos *User Equipments (UEs)*, ao longo da infraestrutura, exigindo que o orquestrador gerencie a rede de acordo com as variações das demandas do usuário. Na Subseção 2.2 são apresentados os trabalhos relacionados sobre orquestração em um ambiente *Dynamic C-RAN* utilizando NFV.

## 2.2. Orquestração baseada em NFV

Dando um passo adiante na área de *Dynamic C-RAN*, foi proposta uma arquitetura para NFV em redes 5G [Abdelwahab et al. 2016], discutindo a implantação de funções de rádio virtualizadas. Essa proposta se assemelha a arquitetura *Management and Orchestration* (MANO) do *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) [Quittek et al. 2014]. A arquitetura do ETSI visa padronizar as implementações, fornecer suporte à indústria e prover gerenciamento e orquestração de funções virtualizadas, definindo um *Network Function Virtualization Orchestrator* (NFVO). Segundo a especificação do ETSI, uma VNF é composta por VNFCs, que são os menores elementos da VNF e são implantados em *containers* virtualizados, ou VDUs. Todas essas VNFs são descritas por um *VNF Descriptor* (VNFD), que representa como os VNFCs são distribuídos e implantados ao longo dos VDUs.

Na área de orquestração em NFV, destacam-se, inicialmente, dois trabalhos relacionados a solução de orquestração. O primeiro refere-se a uma plataforma aberta para NFV, baseado em nuvem, que suporta uma API e outros componentes provenientes do *framework* ETSI MANO [Makaya et al. 2015]. O segundo propõe uma arquitetura modular para NFV, que permite o gerenciamento baseado em políticas de VNFs [Giotis et al. 2015]. Além disso, pode-se destacar outros trabalhos que abordam o posicionamento de funções virtualizadas, tais como T-NOVA [Xilouris et al. 2014] e Cloud4NFV [Soares et al. 2014]. Entretanto, nenhum desses trabalhos considera a composição das funções para a tomada de decisão em um ambiente sem fio, sendo assim, não atendem os requisitos necessários para orquestrar ambientes *Dynamic C-RAN*.

Um orquestrador específico para WLAN foi proposto [Riggio et al. 2015], sem considerar a divisão de componentes de funções, ou seja, não sendo adaptável ao cenário de *Dynamic C-RAN*. Além disso, uma avaliação formal de posicionamento de recursos de funções virtualizadas foi proposta [Moens e Turck 2014], focando em cenários híbridos entre VNFs e funções físicas legadas. Em relação as propostas de posicionamento automático dos nós virtuais e alocação de serviços [Clayman et al. 2014], pode-se destacar a abordagem baseada em heurísticas de *Service Function Chaining* (SFC) [Luizelli et al. 2015, Li e Qian 2016]. Essa abordagem, apesar de considerar o posicionamento de VNFs, não leva em consideração os componentes na tomada de decisão, assim, os tempos para efetuar o posicionamento não são diretamente comparáveis. Desta forma, com a finalidade de avaliar a dinamicidade da orquestração em *Dynamic C-RAN*, neste trabalho avalia-se a arquitetura do orquestrador Maestro, proposto anteriormente [Dalla-Costa et al. 2017].

## 3. Orquestração em *Dynamic C-RAN*

O cenário *Dynamic C-RAN* é composto de uma hierarquia em nuvens, aproveitando a distribuição geográfica das RANs como em ambientes FOG [Bonomi et al. 2012]. A nuvem central geralmente possui a maior quantidade de recursos disponíveis, enquanto as nuvens regionais e de borda são posicionadas próximas ao *front-end*, possuindo geralmente menos recursos. Essa organização hierárquica permite a implantação de funções virtualizadas de forma dinâmica, tornando o provisionamento do serviço mais flexível [Peng et al. 2014]. Por exemplo, uma nova unidade de processamento de sinal virtualizado pode ser implantada em uma nuvem regional para suprir uma determinada demanda,

devido ao aumento do número de usuários na RAN. Além disso, algumas técnicas de balanceamento de carga e de economia de energia tornam-se facilmente aplicáveis nesses cenários, uma vez que existe flexibilidade na migração de VNFs entre os diferentes níveis de nuvem. Assim, dividir e posicionar as funções de rádio que demandam maior transmissão de dados, faz-se necessário através de um orquestrador. Desta forma, na Subseção 3.1 apresenta-se um modelo de posicionamento de VNFs e sua implementação, no orquestrador *Maestro* através de programação linear, é discutida na Subseção 3.2.

### 3.1. Modelo de posicionamento de VNFs em *Dynamic C-RAN*

Considerando um ambiente *Dynamic C-RAN*, contendo um conjunto de  $A$  BSs com um total de  $N$  nuvens (borda, regionais e centrais) e capacidade de  $F$  funções de rádios virtualizadas, o total de dados transmitidos no *fronthaul* pode ser escrito como:

$$O_B(d) = \sum_{f=0}^F \sum_{n=0}^N \sum_{a=0}^A d_{f,n,a} D_B(f, n, a) \quad (1)$$

onde,  $f \in \{0, \dots, F\}$  corresponde as funções de rádio virtualizadas,  $n \in \{0, \dots, N\}$  representa as nuvens disponíveis para processamento dessas funções e  $a \in \{0, \dots, A\}$  simboliza as BSs correspondentes a uma *Dynamic C-RAN*. A matriz tridimensional  $d = [d_{f,n,a}]_{F \times N \times A}$  representa um posicionamento factível para as funções de rádio virtualizadas em cada BSs entre as nuvens. A matriz de posicionamento  $d_{f,n,a} \in \{0, 1\}$ , *i.e.*,  $d_{f,n,a} = 1$  indica que  $f$  foi posicionada sobre  $n$  para processar o sinal de  $a$ . Caso contrário, *i.e.*,  $d_{f,n,a} = 0$ , representa que  $f$  da BS  $a$  não está sendo processada em  $n$ . Finalmente,  $D_B(f, n, a)$  determina a taxa de dados necessária para processar  $f$  da BS  $a$  em uma determinada nuvem  $n$ . A equação  $D_B(f, n, a)$  considera o tipo de  $f$  a ser processada, a distância da nuvem  $n$  (*i.e.*, borda, regionais ou centrais) e a demanda de UEs na BS  $a$ , para determinar a quantidade de dados transmitidos no *fronthaul*. Maiores informações sobre o cálculo da quantidade de dados transmitidos, podem ser encontrados em Wubben, et al. [Wubben et al. 2014].

Baseado nas definições acima, o problema de minimização do total de dados transmitidos no *fronthaul*, através do posicionamento dinâmico das funções de rádio virtualizadas e suas restrições pode ser formulada como:

$$\min_{\{d\}} O_B(d) = \min_{\{d\}} \sum_{f,n,a} d_{f,n,a} D_B(f, n, a) \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_n d_{f,n,a} = 1, \quad \forall f, \forall a, \quad (3)$$

$$\sum_{f,a} d_{f,n,a} D_V(f, n, a) \leq C_V^n, \quad \forall n, \quad (4)$$

$$\sum_{f,a} d_{f,n,a} D_B(f, n, a) \leq C_B^n, \quad \forall n, \quad (5)$$

onde,  $D_V(f, n, a)$  determina o consumo dos recursos de nuvem necessários para processar  $f$  da BS  $a$  em uma determinada nuvem  $n$ .  $C_V^n$  e  $C_B^n$  representam os limites de VDUs e de banda do *fronthaul* da nuvem  $n$ , respectivamente.

As restrições (3), (4) e (5) garantem a factibilidade da solução perante o ambiente de uma *Dynamic C-RAN*. A restrição (3) garante que para toda e qualquer BS  $a \in A$  exista obrigatoriamente uma função de rádio virtualizada  $f \in F$ . Além disso, a restrição garante que nenhuma  $f$  de uma mesma  $a$  seja duplicada dentre todas as nuvens possíveis  $n \in N$ . A restrição (4) garante que o posicionamento de uma função de rádio virtualizada  $f$  de uma BS  $a$  seja realizada somente em uma nuvem  $n$ , com capacidade de processamento, *i.e.*, a nuvem deve conter VDUs suficientes para atender todas as funções atribuídas. Por fim, a restrição (5) garante que o posicionamento de uma função  $f$  de uma BS  $a$  ocorra obrigatoriamente em uma nuvem  $n$  com capacidade de transmissão, *i.e.*, uma nuvem só pode receber  $f$  caso o *fronthaul* possua banda suficiente para atender os requisitos de transmissão de todas as funções virtualizadas nessa nuvem.

### 3.2. Programação linear dos recursos em *Dynamic C-RAN* utilizando *Maestro*

O diferencial proposto pelo orquestrador *Maestro* em relação aos trabalhos anteriores é a capacidade de posicionar VNFCs em diferentes VDUs, sobre diferentes nuvens, quando as funções virtualizadas possuem mais que uma opção de divisão. Sendo assim, o *Maestro* pode posicionar os VNFCs de várias maneiras diferentes, possibilitando ganhos na transmissão de dados e na maximização do uso dos recursos computacionais nas nuvens de borda. Desta forma, o orquestrador recebe um conjunto de informações sobre a infraestrutura de rede, definidas pelo operador, e sua utilização, para determinar o posicionamento de cada função virtualizada para todas as BSs dentre as nuvens existentes.

A principal função do *Maestro* é minimizar a taxa de dados transmitidos no *fronthaul*, adotando o modelo descrito na Subseção 3.1. Para acelerar a resolução do problema linear, um novo elemento objetivo é inserido em (2), para maximizar a quantidade de recursos utilizados nas nuvens de borda, uma vez que estas nuvens não transmitem dados no *fronthaul* e devem ser priorizadas pelas soluções. Desta maneira, insere-se uma ponderação na função objetivo, afim de atingir os objetivos propostos. Tal minimização ponderada é descrita como:

$$\begin{aligned} \min_{\{d\}} \quad & \omega \cdot \sum_{f,n,a} d_{f,n,a} D_B(f, n, a) + (\omega - 1) \cdot \sum_{f,a} d_{f,0,a} D_V(f, n, a) \quad (6) \\ \text{s.t.} \quad & (3)(4)(5) \end{aligned}$$

onde,  $0 \leq \omega \leq 1$  realiza a ponderação das funções objetivos para resolução do problema e  $d_{f,0,a} D_V(f, n, a)$  da prioridade das nuvens de borda no posicionamento das funções virtualizadas. A segunda parte de (6) tem por finalidade maximizar a ocupação de recursos nas nuvens de borda e acelerar a convergência para a solução. A maximização das nuvens de borda e a minimização da taxa de dados transmitidos no *fronthaul* fazem com que os algoritmos consigam obter um melhor desempenho quanto ao tempo, através do direcionamento das possibilidades de posicionamento das VNFs, durante sua execução.

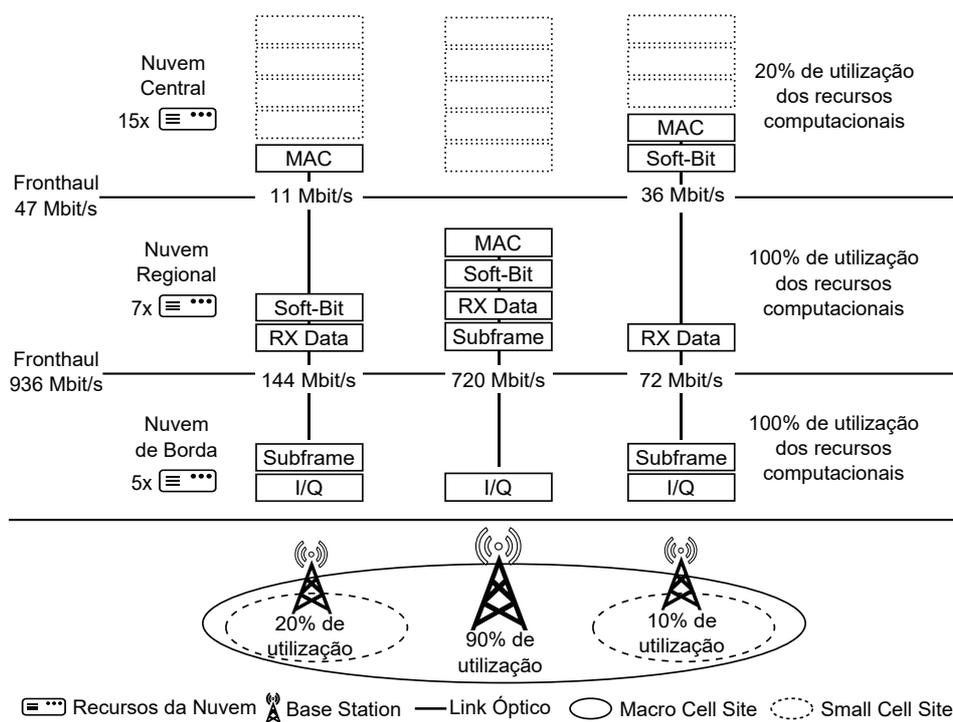
O *Maestro* garante que os componentes de funções de rádio não sejam implantados na mesma nuvem para a mesma BS, que não se exceda a capacidade computacional das nuvens e a capacidade de transmissão disponível no *fronthaul*, respeitando as restrições descritas anteriormente. O *Maestro* foi implementado utilizando o *IBM CPLEX* [IBM Software 2010], com a função objetivo descrita em (6). Na Seção 4 é apresentado o estudo de caso e os experimentos utilizados para avaliação do *Maestro*.

## 4. Estudo de Caso e Experimentos

O estudo de caso e os experimentos apresentados nesta seção visam demonstrar o desempenho do orquestrador *Maestro* em posicionar as composições de funções mais apropriadas para a implantação dos componentes de VNFs. Baseado em uma infraestrutura hierárquica, modelou-se um conjunto de VDUs, juntamente com um conjunto de BSs, que são descritos a seguir.

### 4.1. Estudo de Caso

Este estudo de caso é baseado nas opções de divisão de funções de rádio, descritas por Wubben, et al. [Wubben et al. 2014] e aplicadas no ambiente de *Dynamic C-RAN*. A abordagem proposta por Wubben, et al. prevê a execução distribuída de cinco funções de rádio, a saber: *MAC*, *Soft-Bit*, *RX Data*, *Subframe* e *I/Q*. Essa abordagem objetiva permitir um posicionamento mais flexível dos recursos de computação e de rede necessários para processar o sinal de rádio de forma distribuída, através do uso de virtualização. Maiores detalhes sobre a operação de cada divisão e das próprias funções de rádio são descritas em Wubben, et al. [Wubben et al. 2014]. A decisão acerca da utilização de cada opção de divisão gera uma variabilidade na taxa de dados transmitidos no *fronthaul* e de recursos de computação nas nuvens, o que torna essa abordagem interessante para este estudo de caso. Considerando essa abordagem, é possível mostrar como a orquestração de componentes de VNFs causa impacto no desempenho da rede e na utilização de recursos.



**Figura 1. Exemplo de divisões de funções de rádio implantadas como VNFs**

Na Figura 1 pode-se observar um exemplo de posicionamento das funções de rádio em componentes de VNFs e as suas respectivas distribuições ao longo dos níveis de nuvens disponíveis (*i.e.*, borda, regional e central). No exemplo, cada VNF implementa uma BS, sendo que cada uma das cinco funções de rádio são encapsuladas em um VNFC,

que por sua vez são implantados em até 3 VDUs. As BSs podem ser visualizadas na parte inferior da Figura 1, onde cada uma delas possui uma porcentagem de ocupação diferente em função da capacidade total de transmissão. Essa variação de ocupação influencia o impacto das opções de divisão selecionadas em termos de dados transmitidos no *fronthaul*. No exemplo, a *macro cell* na parte inferior central, tendo ocupados 90% de sua capacidade, foi implantada com 2 VDUs posicionados na borda e na nuvem regional, consumindo uma taxa fixa de 720Mbit/s para comunicação entre as funções de rádio I/Q e *Subframe*. Já para as *small cells*, tendo ocupações de apenas 10% e 20%, optou-se por utilizar 3 VDUs posicionando as funções acima do RX Data – que têm seus requisitos de banda minimizados pelas baixas taxa de ocupação – nas nuvens regional e central.

A lógica por trás do exemplo da Figura 1 é de tentar posicionar os VDUs de forma a minimizar o total de dados transmitidos no *fronthaul*. Consequentemente, a nuvem de borda, que fica mais próxima da RAN, é prioritariamente ocupada com funções de rádio de nível mais baixo que são aquelas que apresentam requisitos mais estritos de comunicação. A nuvem regional, por sua vez, possui maior quantidade de recursos computacionais em relação a nuvem de borda, porém encontra-se mais distante da RAN. Sendo assim, as funções de rádio implantadas na nuvem regional enfrentam atrasos de comunicação para transporte dos dados até esse local. Finalmente, a nuvem central é a nuvem que possui maior quantidade de recursos disponíveis, porém é também aquela que está mais distante da RAN. Essa nuvem se torna mais atraente para o processamento de funções de nível mais alto (e.g., Soft-Bit ou MAC), principalmente para BSs com menor ocupação. Vale salientar que, por medida de simplificação, nesse exemplo considera-se que cada função de rádio encapsulada em um VNFC consome uma unidade de processamento de uma nuvem onde é posicionada. Em um ambiente real, a demanda de processamento potencialmente seria variável em função de fatores como a ocupação das BSs, por exemplo.

Sabendo que os dados transmitidos no *fronthaul* variam de acordo com a ocupação das BSs, para realizar os experimentos foi necessário estimar os percentuais de ocupação com base em uma simulação utilizando as recomendações do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), do documento *Further advancements for E-UTRA physical layer aspects* [3GPP 2010]. Esse percentual de ocupação foi calculado através do método de *Monte Carlo*, em uma simulação do tráfego gerado por UEs associados a uma infraestrutura com 7 *macro cells* e 15 *small cells* distribuídas dentro da área de cobertura de cada *macro cell*, totalizando 112 BSs. Em média, 60 usuários foram distribuídos aleatoriamente dentro da área de cobertura de cada *macro cell* e associados a BS mais próxima de cada usuário (seja uma *macro* ou *small cell*). A distribuição das BSs e UEs foi realizada em uma área de 2000x2000 metros, seguindo as normas para simulação definidas no documento *Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN - Physical layer aspects* do 3GPP [3GPP 2013] para uma rede celular, considerando a existência de áreas com diferentes densidades de BS e UEs *i.e.*, zonas rurais e urbanas.

Na Tabela 1 pode-se encontrar a ocupação das BSs utilizadas na simulação, expressa através de uma distribuição discreta de probabilidades, servindo como entrada para o modelo linear detalhado na Seção 3. A ocupação das BSs influencia a taxa de dados transmitidos para as funções de *MAC*, *Soft-Bit*, *RX Data*, tal como é descrito por Wubben et al. [Wubben et al. 2014]. A quantidade de *macro cells* consideradas na simulação cor-

**Tabela 1. Distribuição da Ocupação das *macro* e *small cells***

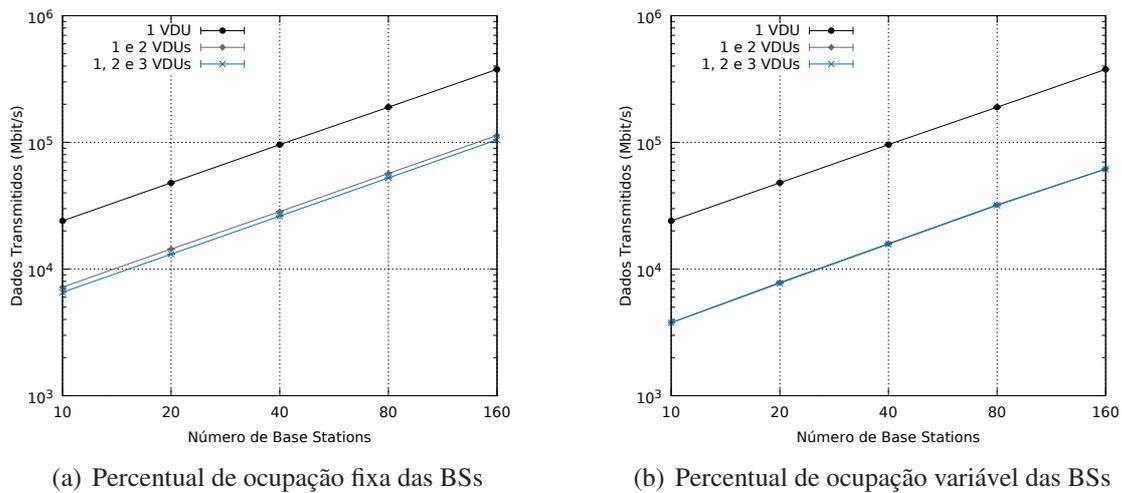
| Índice de Ocupação | <i>Macro cells</i> |                           | <i>Small cells</i> |                           |
|--------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|
|                    | Carga de Ocupação  | Probabilidade de Ocupação | Carga de Ocupação  | Probabilidade de Ocupação |
| 0                  | 15%                | 0,42%                     | 2,5%               | 56,97%                    |
| 1                  | 25%                | 1,42%                     | 12,5%              | 31,59%                    |
| 2                  | 35%                | 5,14%                     | 22,5%              | 9,28%                     |
| 3                  | 45%                | 10,28%                    | 37,5%              | 1,88%                     |
| 4                  | 65%                | 15,71%                    | 47,5%              | 0,28%                     |
| 5                  | 75%                | 19,17%                    | -                  | -                         |
| 6                  | 85%                | 17,29%                    | -                  | -                         |
| 7                  | 95%                | 30,57%                    | -                  | -                         |
|                    | Total              | 100%                      | -                  | 100%                      |

responde a 33,3% da infraestrutura, enquanto que as *small cells* representam 66,7%. Essa medida se deve à quantidade de UEs distribuídos ao longo da região geográfica, sendo maior para as *macro cells* e menor para as *small cells*. Os cenários de avaliação possuem 10, 20, 40, 80 e 160 BSs ao longo da infraestrutura. Para esse trabalho, considerou-se que cada um dos três níveis hierárquicos de nuvem possui respectivamente 5, 7 e 15 unidades de processamento, como pode ser observado na Figura 1, aumentando essas unidades proporcionalmente à quantidade de BSs em cada cenário. Baseado os cenários de simulação apresentados, na Subseção 4.2 os resultados obtidos são descritos e analisados.

#### 4.2. Resultados

O modelo de programação linear foi implementado com *IBM CPLEX Optimizer* [IBM Software 2010], utilizando 8 *threads* e o mesmo algoritmo *Dual Simplex* para todos os cenários. A simulação foi executada em um computador com um processador Intel i7 de 3.1 GHz, com 16 GB de memória RAM, executando sobre um sistema operacional Linux de 64 *bits*. Para todos os cenários, considerou-se três nuvens (*i.e.*, de borda, regional e central), com capacidade proporcional para acomodar a carga de trabalho nos diferentes cenários, tal como descrito na Subseção 4.1. Todos os experimentos foram repetidos 50 vezes e o tempo para posicionar os VNFCs ao longo dos VDUs, foi medido pelo *IBM CPLEX*. Neste artigo, considerou-se tanto a ocupação fixa das BSs no posicionamento das funções de rádio, quanto ocupação variável (conforme a Tabela 1), diferentemente da avaliação realizada no trabalho anterior [Dalla-Costa et al. 2017]. Desta forma, é possível comparar a quantidade de tempo necessária para efetuar o posicionamento das funções de rádio em ambos os casos.

Pode-se observar na Figura 2(a) a variação total de dados transmitidos no *fronthaul* para diferentes opções de divisão de funções de rádio, considerando que as BSs tenham ocupação percentual fixa em 50%. A Figura 2(b) apresenta o mesmo resultado, porém considerando ocupação variável das BSs (aleatoriamente atribuídos conforme a Tabela 1). O eixo x denota a quantidade de BSs em cada experimento, enquanto o eixo y (em escala logarítmica) denota os dados transmitidos no *fronthaul* em Mbit/s ocasionado pelas opções de divisão selecionadas pela função de posicionamento. A curva *1 VDU* representa a transmissão dos dados considerando uma VNF atômica, utilizando apenas um VDU contendo todos os VNFCs. Já a curva *1 e 2 VDUs* expressa a transmissão dos dados



**Figura 2. Transmissão de dados no *fronthaul***

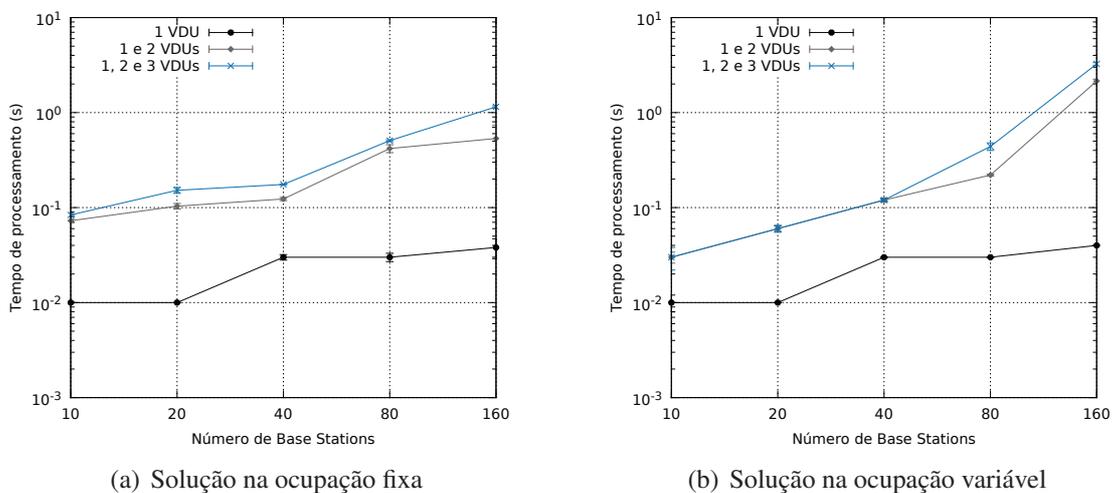
quando VNFs são posicionadas em um ou dois VDUs (*i.e.*, podendo se utilizar uma opção de divisão para separar VNFCs em até dois VDUs). Por fim, a curva *1, 2 e 3 VDUs* representa os dados transmitidos de uma VNF implantada em até 3 VDUs, similar ao que é demonstrado na Figura 1 (*i.e.*, podendo usar simultaneamente até duas opções de divisão para separar os VNFCs de uma mesma VNF).

Observando o gráfico de dados transmitidos com ocupação fixa, para 10 BSs a quantidade de dados transmitido utilizando apenas 1 VDU foi de 24 Gbit/s, enquanto que até 2 e até 3 VDUs esse valor é reduzido para 7,2 Gbit/s e 6,5 Gbit/s, respectivamente. Percentualmente, houve uma redução de 70% entre os cenários utilizando 1 VDU versus 2 VDUs e de 72,7% comparando 1 e 3 VDUs. Entre os cenários de até 2 e até 3 VDUs a diferença foi apenas de 9%. Já no caso mais extremo, considerando 160 BSs, a banda consumida utilizando 1 VDU atingiu 376,8 Gbit/s, enquanto que para até 2 VDUs foi de 113,4 Gbit/s e para até 3 VDUs foi de 104,83 Gbit/s. Assim, manteve-se aproximadamente os mesmos percentuais de redução entre as curvas, enfatizando a importância da composição de VNFs no uso racional dos recursos do *fronthaul*.

Ao observar o gráfico de dados transmitidos com ocupação variável para 10 BSs, a quantidade de dados transmitidos para 1 VDU foi dos mesmos 24 Gbit/s obtidos com ocupação fixa. Isso se deve ao fato de que no posicionamento de 1 VDU pode-se utilizar apenas a opção de divisão da função de rádio I/Q, que requer uma taxa de transferência fixa independente da ocupação da BS. Ainda considerando 10 BSs, as curvas de até 2 VDUs e até 3 VDUs obtiveram taxas de transmissão de dados na ordem de 3,8 Gbit/s e 3,7 Gbit/s, respectivamente, atingindo reduções de aproximadamente 83% em comparação com a curva de 1 VDU. Na comparação dos resultados entre as curvas de 2 VDUs e 3 VDUS, os valores se mantiveram sempre muito similares para todas as quantidade de BSs simuladas com diferenças sempre abaixo de 1%.

Neste trabalho, diferentemente dos trabalhos anteriores, compara-se o desempenho do posicionamento de BSs considerando ocupação fixa e variável em ambientes de *Dynamic C-RAN*. Pode-se observar que tanto na ocupação fixa como na variável, o orquestrador é capaz de minimizar a transmissão de dados no *fronthaul*, quando existir a

possibilidade de selecionar as divisões de funções de rádio com 2 ou 3 VDUs. Essa redução é ainda mais evidente quando há demanda variável nas BSs, o que se deve principalmente a dois fatores: (i) existe uma diferença de ocupação média significativa entre *macro* e *small cells*, o que fornece ao orquestrador uma gama de opções de VDUs com transmissão de dados diferentes para posicionar; e (ii) apesar da alta ocupação nas *macro cells* (em média 75%), há um grande número de *small cells* com baixa ocupação (em média 8%), o que reduz a ocupação média por BS para a casa dos 30%. A utilização de até 3 VDUs, ainda que acarrete ganhos em relação a até 2 VDUs, traz vantagens muito tímidas no cenário de ocupação variável, o que coloca em dúvida se de fato o vale esforço extra para calcular posicionamentos mais complexos para obter ganhos pouco significativos.



**Figura 3. Tempo necessário para encontrar uma solução**

As Figuras 3(a) e 3(b) ilustram o tempo médio para computar o posicionamento de todos os VNFCs sobre a infraestrutura de nuvens disponível, considerando as BSs com ocupação fixa e variável. As barras de erro representam um intervalo de confiança de 99%, obtido por meio de 50 repetições para cada experimento. O eixo x expressa o número de BSs no cenário, enquanto o eixo y denota o tempo médio em segundos necessário para calcular o posicionamento dos VNFCs.

Os gráficos de tempo demonstram que para até 80 BSs, o tempo necessário para realizar o posicionamento com ocupação fixa é superior ao tempo de ocupação variável. Isso se justifica pois no cenário de ocupação fixa os recursos se esgotam mais rapidamente, de forma que o orquestrador testa mais possibilidades para alocar os VDUs de forma eficiente. Entretanto, para 160 BSs o cenário de ocupação variável consome mais tempo (3,19s para até 3 VDUs, contra 1,12s da ocupação fixa) do que a ocupação fixa. Fato este que pode ser explicado pela grande quantidade de combinações de VDUs com demandas de banda diferentes disponíveis para posicionamento pelo orquestrador.

No cenário de ocupação variável, para realizar o posicionamento de até 40 BSs utilizando 2 ou 3 VDUs, os tempos de cálculo são extremamente similares. Isso torna viável a utilização de divisões de funções de rádio em até 3 VDUs, uma vez que isso leva a uma redução, ainda que pequena, no consumo de recursos do *fronthaul*. Já para 80 e 160

BSs, o tempo necessário para realizar o posicionamento utilizando até 3 VDUs, ocasiona um aumento de mais de aproximadamente 40% no tempo médio de cálculo em relação a até 2 VDUs. Desta forma, pode-se concluir que em um ambiente com uma grande quantidade de BSs, onde a variação da ocupação for frequente, a utilização de até 2 VDUs pode ser mais adequada para permitir que o orquestrador responda mais rapidamente às mudanças do ambiente sem prejudicar significativamente o consumo de recursos.

Finalmente, vale ressaltar que não está sendo considerado neste trabalho o tempo necessário para a implantação/migração dos componentes de VNFs entre as nuvens, o que, em uma infraestrutura real, deverá influenciar no tempo total necessário para que a nova configuração calculada pelo orquestrador entre em vigor. Ademais, os tempos de resposta da modelagem linear sempre são dados até a execução total do posicionamento dos VDUs, de acordo com a função objetivo definida na Seção 3.2. Nesse caso, se essa função for modificada, os tempos de posicionamento serão diferentes.

## 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foi realizada uma avaliação do *Maestro*, um orquestrador para ambientes *Dynamic C-RAN*, que baseia-se nos componentes de funções virtualizadas para realizar o posicionamento das VNFs. Seu mecanismo de decisão foi baseado na modelagem de posicionamento de VNFs e em programação linear dos recursos em *Dynamic C-RAN*. A avaliação foi realizada baseada em simulação de um caso de uso, considerando as especificações de uma rede celular do 3GPP. O *Maestro* cumpre com o objetivo proposto, reduzindo a taxa de dados transmitida no *fronthaul* e maximizando a quantidade de recursos utilizados nas nuvens de borda e regionais, tentando maximizar o uso dos recursos computacionais nas nuvens de borda. Ademais, o *Maestro* fornece uma visão geral dos ganhos que podem ser adquiridos através da divisão de funções de rádio em diferentes nuvens e VDUs.

Além disso, pode-se concluir que se o mecanismo de decisão necessita ser executado a cada 3,19 segundos (pior tempo para 160 BSs), consegue-se atender os requisitos do ambiente de uma rede *Dynamic C-RAN*, encontrando uma solução de posicionamento de todos os componentes. Vale ressaltar que quando implantado em uma rede física, faz-se necessário considerar outros parâmetros, tal como a quantidade de tempo para a migração de uma VNF de um VDU para outro, e desta forma, o mecanismo de decisão pode ter seu tempo para calcular o posicionamento, alterado.

Como trabalho futuro pretende-se implantar o *Maestro* em uma infraestrutura real, conduzindo experimentação de forma real, utilizando elementos do *Maestro* para realizar o posicionamento dos componentes ao longo da rede. Além disso, pretende-se adaptar o orquestrador *Maestro* para outros tipos de rede, como por exemplo, para redes ópticas. Outro caminho a seguir, é que o *Maestro* possa considerar fatores (*i.e.* políticas) durante o processo de decisão, de acordo com regras pré-definidas por operadores de rede.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo programa Horizon 2020 da União Europeia para pesquisa, desenvolvimento tecnológico e demonstração no âmbito do acordo n°. 688941 (FUTEBOL), bem como pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC) através da RNP/CTIC.

## Referências

- 3GPP (2010). Further advancements for E-UTRA physical layer aspects; Evolved Universal Terrestrial Radio Access - TR 36.814. Technical report. Disponível em: [www.3gpp.org/ftp/Specs/36814-900.pdf](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/36814-900.pdf).
- 3GPP (2013). Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN - Physical layer aspects; Technical Specification Group Radio Access Network - TR 36.872. Technical report. Disponível em: [www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.872/36872-c10.zip](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.872/36872-c10.zip).
- 5G-PPP-Working-Group (2016). View on 5G Architecture. Technical report, 5G PPP.
- Abdelwahab, S., Hamdaoui, B., Guizani, M., e Znati, T. (2016). Network function virtualization in 5G. *IEEE Communications Magazine*, 54(4):84–91.
- Bartelt, J., Rost, P., Wubben, D., Lessmann, J., Melis, B., e Fettweis, G. (2015). Fronthaul and backhaul requirements of flexibly centralized radio access networks. *IEEE Wireless Communications*, 22(5):105–111.
- Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., e Addepalli, S. (2012). Fog Computing and Its Role in the Internet of Things. In *SIGCOMM Workshop on Mobile Cloud Computing (MCC)*, MCC '12, pages 13–16, New York. ACM.
- Checko, A., Christiansen, H. L., Yan, Y., Scolari, L., Kardaras, G., Berger, M. S., e Dittmann, L. (2015). Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(1):405–426.
- Clayman, S., Maini, E., Galis, A., Manzalini, A., e Mazzocca, N. (2014). The dynamic placement of virtual network functions. In *IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, pages 1–9.
- Dalla-Costa, A. G., Bondan, L., Wickboldt, J. A., Both, C. B., e Granville, L. Z. (2017). Maestro: An nfv orchestrator for wireless environments aware of vnf internal compositions (to appear). *IEEE International Conference on. Advanced Information Networking and Applications*.
- Giotis, K., Kryftis, Y., e Maglaris, V. (2015). Policy-based orchestration of NFV services in Software-Defined Networks. In *Network Softwarization (NetSoft), 2015 1st IEEE Conference on*, pages 1–5.
- Heideker, A. e Kamienski, C. (2016). Gerenciamento flexível de infraestrutura de acesso público à internet com nfv. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*.
- IBM Software (2010). Efficient modeling with the IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Technical Report WSW14059-USEN-02, ILOG Optimization and Analytical Decision Support Solutions, Somers, NY. White Paper.
- Li, X. e Qian, C. (2016). A survey of network function placement. In *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, pages 948–953.
- Liu, J., Zhou, S., Gong, J., Niu, Z., e Xu, S. (2015). Graph-based framework for flexible baseband function splitting and placement in C-RAN. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1958–1963.

- Luizelli, M. C., Bays, L. R., Buriol, L. S., Barcellos, M. P., e Gaspary, L. P. (2015). Piecing together the NFV provisioning puzzle: Efficient placement and chaining of virtual network functions. In *2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, pages 98–106.
- Makaya, C., Freimuth, D., Wood, D., e Calo, S. (2015). Policy-based NFV management and orchestration. In *Network Function Virtualization and Software Defined Network (NFV-SDN), 2015 IEEE Conference on*, pages 128–134.
- Mijumbi, R., Serrat, J., I. Gorricho, J., Latre, S., Charalambides, M., e Lopez, D. (2016). Management and orchestration challenges in network functions virtualization. *IEEE Communications Magazine*, 54(1):98–105.
- Moens, H. e Turck, F. D. (2014). VNF-P: A model for efficient placement of virtualized network functions. In *10th International Conference on Network and Service Management (CNSM) and Workshop*, pages 418–423.
- Ortín, J., Caballero, P., IMDEA, Rost, P., e NEC (2014). D5.2 final definition of ijoin requirements and scenarios. Technical report, INFISO-ICT-317941 iJOIN, <http://www.ict-ijoin.eu/wp-content/uploads/2012/10/D5.2.pdf>.
- Peng, M., Li, Y., Jiang, J., Li, J., e Wang, C. (2014). Heterogeneous cloud radio access networks: a new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies. *IEEE Wireless Communications*, 21(6):126–135.
- Quittek, J. et al. (2014). Network Functions Virtualisation (NFV) - Management and Orchestration. White paper, ETSI NFV ISG.
- Riggio, R., Rasheed, T., e Narayanan, R. (2015). Virtual network functions orchestration in enterprise WLANs. In *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, pages 1220–1225.
- Soares, J., Dias, M., Carapinha, J., Parreira, B., e Sargento, S. (2014). Cloud4NFV: A platform for Virtual Network Functions. In *IEEE International Conference on Cloud Networking (CloudNet)*, pages 288–293.
- Wubben, D., Rost, P., Bartelt, J. S., Lalam, M., Savin, V., Gorgoglione, M., Dekorsy, A., e Fettweis, G. (2014). Benefits and Impact of Cloud Computing on 5G Signal Processing: Flexible centralization through cloud-RAN. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(6):35–44.
- Xilouris, G., Trouva, E., Lobillo, F., Soares, J. M., Carapinha, J., McGrath, M. J., Gardikis, G., Paglierani, P., Pallis, E., Zuccaro, L., Rebahi, Y., e Kourtis, A. (2014). T-NOVA: A marketplace for virtualized network functions. In *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, pages 1–5.