



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Alocação de Recursos em um *fronthaul* Óptico com *functional split* Recomendado para o 5G

Murilo Porto Amaral

Orientador: Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Coorientador: Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

VITÓRIA-ES
29 DE MAIO DE 2020

Murilo Porto Amaral

Alocação de Recursos em um *fronthaul* Óptico com
functional split Recomendado para o 5G

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
VITÓRIA-ES
29 DE MAIO DE 2020

Murilo Porto Amaral

**Alocação de Recursos em um *fronthaul* Óptico com
functional split Recomendado para o 5G**

Trabalho aprovado. Vitória-ES, 30 de Fevereiro de 2016

Dr. Jair Adriano Lima Silva
Orientador

Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Coorientador

D. Sc. Anilton Salles Garcia
Membro Externo

D. Sc. Carlos Alberto Dalarmelina
Membro Externo

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
VITÓRIA-ES
29 DE MAIO DE 2020

Dedico essa dissertação à todos os apaixonados pela ciência.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer às pessoas do meu convívio social, amigos e família. Aos meus pais, Virgílio e Margareti, e namorada Crystal, pessoas que amo infinitamente e que, embora não entendessem muito bem o que eu estava fazendo durante esses anos, me apoiaram de forma incondicional. À Débora, eterna fonte de carinho, colo e conselhos, é uma pessoa essencial na minha e que amo fortemente. À Cristina, minha “companheira de aventuras”, sempre presente em todos os momentos através de conversas e carinhos, a quem também amo fortemente e é a força motriz de boa parte dos meus hobbies. Aos meus amigos do “grupo de sexta”, Zé, Isaac e Tiago, sempre prontos para mais uma aventura de RPG e mais conversas sem muito sentido além de simplesmente existirem.

Aos professores do departamento de pós-graduação, apesar de muitos eu já conhecer dos tempos da graduação, a pós e a perspectiva de nos tornarmos colegas é de um panorama completamente diferente. Nominalmente gostaria de me referir aos meus orientadores, Jair, Helder e Jessé: mesmo que não fosse inicialmente intencional, percebo hoje que essa dissertação é fruto de uma mistura do conhecimento aprendido com a ajuda e orientação dos três, sem o investimento de vocês nada disso teria sido construído.

Aos meus amigos do LabTel, funcionários, colegas e professores, que através de sugestões técnicas, de uma boa conversa no meio de uma tarde cansativa ou de uma ida à Rua da Lama foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Em especial meu “irmão” Wesley, “meio irmãos” Ícaro e Higor e à Katiuski que me ajudaram muito, tanto tecnicamente quanto em conversas sobre “o tudo e o nada” e estarem lá pra uma puxada de orelha eventual.

À Arquitetura da Dança, local muitas vezes de minha fuga diária. Entendendo os atrasos devidos à variações nas demandas da pós graduação e sendo um local de completa alegria. Aqui seriam muitos importantes para se referir nominalmente entre alunos, bolsistas, professores e funcionários. Mas ao Marco e à Larissa por construírem o local de uma verdadeira família.

O meu muito obrigado.

“It’s not that there are things that science can’t explain. You look for the rules behind those things. Science is just a name for the steady, pain-in-the-ass effort that goes behind it.”
(Riichiro Inagaki)

Resumo

Apresenta-se nesta dissertação a aplicação da técnica *functional split* em um modelo de seção da rede de acesso, devidamente testado em um simulador dinâmico de um *fronthaul* óptico desenvolvido para a tecnologia 5G. O ajuste feito ao se escolher um dos diversos níveis do *functional split*; os quais impactam vários aspectos importantes das redes de acesso das tecnologias móveis; motivou o estudo relacionado à otimização da utilização dos equipamentos instalados. Observou-se que o nível ótimo deste ajuste é impactado por diversos aspectos físicos da rede, sendo que alguns destes foram testados através do simulador antes de uma avaliação qualitativa de cada um deles. Uma metaheurística aplicada ao endereçamento dos processos das antenas para as unidades de processamento também é apresentada. A proposta foi criada a partir de outra metaheurística tradicional, mas demonstrou resultados superiores em cerca de 60% dos cenários avaliados, em contraste com a original. Também foram analisados, a partir dos testes, quais são as características das redes que a metaheurística proposta seria melhor aplicada.

Além disso, foram verificados a capacidade total de processamento da rede, a quantidade de antenas servidas e a interconectividade entre seus equipamentos. Os resultados de simulação numérica mostraram que, dentre todos no universo de cenários observados, o último, com apenas 5% de variação, tem o impacto de 4 níveis no valor médio do ajuste do *functional split* que melhor otimiza os recursos.

Palavras-chave: 5G, metaheurística, *functional split*, *fronthaul* óptico.

Abstract

It is presented in this dissertation the application of functional split technic applied in an access network section model, tested on a dynamic optical fronthaul simulator developed for the 5G technology. The adjustment made by selecting a level of the fronthaul split; that reflects on several important technical aspects on the mobile radio access networks; motivated the study aim on the equipment usage optimization. It was observed that the optimal level of this adjustment is influenced by several physical aspects of the network, some of these aspects were tested on the simulator and was made a qualitative evaluation on each one of them. A metaheuristic proposition applied on the process management from the antennas to the processing units is presented. The proposition was created based on another traditional metaheuristic but presented superior results in 60% on the simulated scenarios, in contrast with the original one. Further analysis were made, from the tested data, with characteristics should be presented on the networks that the proposal would be better applied.

Besides that, it was verified the network's total processing capacity, the number of antennas served and the hardware interconnectivity among processing resources. The results of the numeric simulation showed that, amongst all the tested architecture, the last one, with a variation of 5%, has an impact of 4 levels on the medium value of the functional split adjustment that better optimize the resources.

Keywords: 5G. Metaheuristic. Functional Split. Optic. Fronthaul.

Lista de Figuras

Figura 1 – Tráfego total de dados por quarto de ano. Traduzido de [Ericsson 2019].	1
Figura 2 – Divisão do espectro e quantidade de antenas nas tecnologias LTE e <i>New Radio</i> .	7
Figura 3 – Exemplo de última milha para redes móveis de acesso.	9
Figura 4 – Arquitetura de rede PON para a última milha. Adaptada de [Nunes 2016].	11
Figura 5 – Exemplo de modelo D-RAN.	12
Figura 6 – Exemplo de modelo de C-RAN.	13
Figura 7 – Arquitetura de uma rede com o artifício SDN.	15
Figura 8 – A topologia C-RAN recomendada para o 5G.	16
Figura 9 – Opções do <i>Functional Split</i> segundo a nomenclatura do 3GPP.	17
Figura 10 – Modelo proposto.	21
Figura 11 – PMF da distribuição de Poisson para $\lambda = 2$.	22
Figura 12 – Distribuição de Poisson para $\lambda = 1$ para a definição do tamanho dos processos de média de 1, 2, 3 e 4, respectivamente.	23
Figura 13 – Exemplo da dinâmica da rede com dispositivos “ociosos” ou “livres” (linha cheia) dispositivos “em uso” (linha pontilhada). a) Instante i e b) instante $i + 1$.	24
Figura 14 – Representação vetorial de alocação dos processos.	25
Figura 15 – Fluxograma do simulador desenvolvido.	27
Figura 16 – Exemplos de ordenação de candidatos.	30
Figura 17 – Delimitação de vizinhança (em vermelho) para um RU (em verde).	32
Figura 18 – Fluxograma do GRASP com delimitação de vizinhanças (GRASPDV).	33
Figura 19 – Convergência típica da função objetivo para ambas as metaheurísticas.	36
Figura 20 – Comparação em a) da função custo média e em b) do tempo de execução médio entre os métodos para cada um dos cenários.	37
Figura 21 – Comparação da função custo médio entre os métodos para cada um dos cenários.	38
Figura 22 – Comparação da função custo médio entre os métodos para cada um dos cenários.	38
Figura 23 – Resultados simulados em um cenário de <i>upload</i> a partir de vários valores de <i>functional splits</i> .	39
Figura 24 – <i>Functional split</i> ótimo para <i>upload</i> nos cenários com 15% de ligação.	41
Figura 25 – <i>Functional split</i> ótimo para <i>upload</i> nos cenários com 10% de ligação.	42
Figura 26 – <i>Functional split</i> ótimo para <i>upload</i> nos cenários com 10% e 15% de ligação.	42

Lista de Quadros

Tabela 1 – Comparação entre os parâmetros da camada física do LTE e NR no <i>downlink</i>	8
Tabela 2 – Variação dos cenários simulados para comparação entre os modelos de geração de solução.	35
Tabela 3 – Variação dos cenários simulados para definir as variáveis significativas para o projeto de arquiteturas.	41
Tabela 4 – Resumo da análise dos impactos das variáveis em <i>upload</i> nos cenários para a escolha de um <i>functional split</i> ótimo no universo observado. . .	43

Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP: *3rd Generation Partnership Project*

5G: *Quinta Geração*

BBU: *Base Band Unit*

C-RAN: *Centralized Radio Access Network*

CN: *Core Network*

CO: *Central Office*

CP: *Custo Percentual*

CPU: *Central Processing Unit*

CTP: *Custo Total de Propriedade*

CU: *Centralized Unit*

D-RAN: *Distributed Radio Access Network*

DU: *Distributed Unit*

EB: *Exabytes*

FTTB: *Fiber To The Building*

FTTC: *Fiber To The Curb*

FTTCell: *Fiber To The Cell*

FTTH: *Fiber To The Home*

FTTO: *Fiber To The Office*

GRASP: *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*

GRASPDV: *GRASP com Delimitação de Vizinhanças*

H-RAN: *Hybrid Radio Access Network*

IoT: *Internet of Things*

LTE-A Pro: *LTE Advanced Pro*

LTE-A: *LTE Advanced*

LTE: Long Term Evolution

M2M: *Machine To Machine*

MIMO: *Massive-Input Massive-Output*

NR: *New Radio*

OFDMA: Acesso Múltiplo por Divisão de Frequências Ortogonais

OLT: *Optical Line Terminal*

OSI: *Open Systems Interconnection*

PMF: *Probability Mass Function*

PON: *Passive Optical Network*

PSC: *Passive Splitter/Combiner*

RAN: *Radio Access Network*

RF: Rádio Frequência

RRH: *Remote Radio Head*

RU: *Remote Unit*

SDN: *Software Defined Network*

UHD: *Ultra-High-Definition*

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Motivação e Definição do Problema	1
1.2 Objetivo Geral e Específicos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Trabalhos Relacionados	4
1.5 Principais Contribuições	5
1.6 Organização da Dissertação	6
2 – Fundamentação Teórica	7
2.1 As Principais Diferenças entre o LTE e o <i>New Radio</i>	7
2.2 A Rede de Acesso RAN	9
2.3 Descrição Básica de Redes Ópticas Passivas	10
2.4 Atuais Arquiteturas do D-RAN e C-RAN	12
2.5 Adoção da C-RAN no Contexto 5G	14
2.6 Aplicação do <i>Functional Split</i> na C-RAN do 5G	16
2.7 Descrição Básica sobre a Metaheurística GRASP	18
3 – Modelagem do <i>Fronthaul</i> Óptico	21
3.1 Modelagem das <i>DUs</i> e dos Processos	21
3.2 O Simulador Dinâmico	24
3.3 Definição de “Eficiência” e a Função Objetivo	25
4 – O Algoritmo Proposto para a Alocação dos Recursos	29
4.1 O Problema a Ser Resolvido	29
4.2 A Solução Proposta	29
4.3 O GRASP com Delimitação de Vizinhanças	31
5 – Análise dos Resultados Obtidos via Simulação Numérica	35
5.1 A Proposta da Delimitação de Vizinhanças	35
5.2 As Variáveis de Interesse do <i>Functional Split</i>	39
6 – Conclusões e Trabalhos Futuros	45
Referências	47

1 Introdução

O aumento do tráfego de dados nas redes de telefonia móvel e o crescimento advindo de quinta geração (5G) compõem a força motriz de várias pesquisas, que têm como um dos principais objetivos propiciar tal aumento. Empresas e pesquisadores na academia têm discutido os próximos passos para a devida implantação do 5G. Dentre as várias linhas de pesquisas estudadas, uma concentra-se em técnicas que propiciam a implementação de uma rede capaz de suportar um tráfego tão superior ao praticado atualmente. A partir de relatórios de empresas do ramo das telecomunicações é mais fácil compreender a motivação e definir o problema aqui levantado.

1.1 Motivação e Definição do Problema

O crescimento da demanda de tráfego nas redes móveis apresenta um padrão exponencial. Segundo o relatório de novembro de 2019 descrito em [Ericsson 2019], a taxa total de dados transmitidos alcançou os 35 EB (Exabytes). Esse aumento significativo impõe um crescimento da largura do espectro disponível, e a quantidade de usuários aumentará proporcionalmente. A Figura 1 ilustra uma tradução direta disponível no relatório. Observa-se na Figura 1 que a quantidade de sinais de voz permanece praticamente estática, enquanto a quantidade de dados trafegados aumenta exponencialmente.

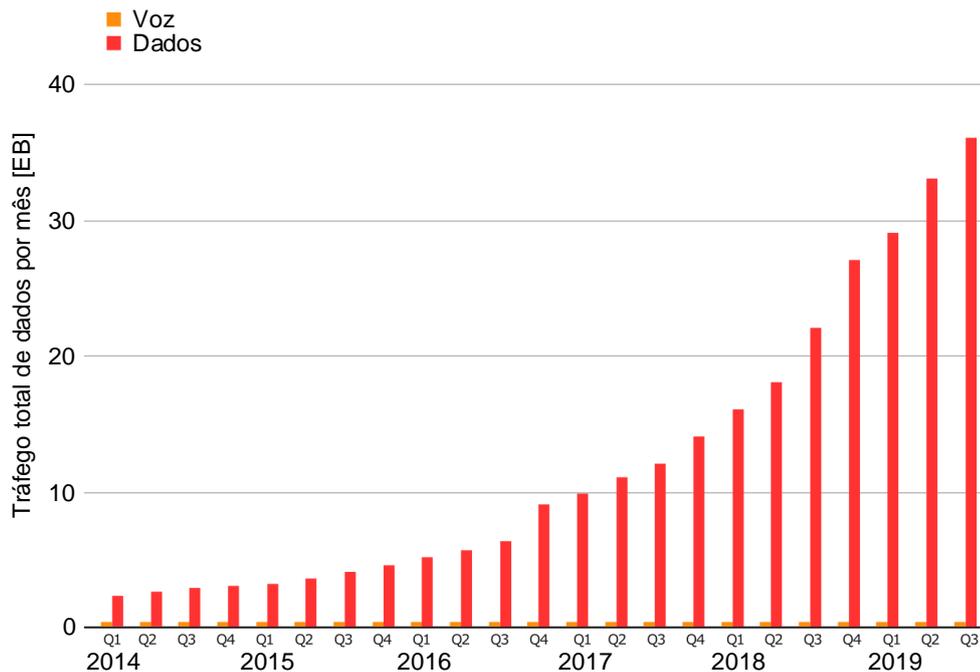


Figura 1 – Tráfego total de dados por quarto de ano. Traduzido de [Ericsson 2019].

Uma resposta a essa demanda está na quinta geração de redes móveis, o 5G. Segundo o relatório da Cisco, a partir de 2021 haverá um aumento global de dispositivos que utilizarão o padrão 5G. O uso ainda está bem modesto e em fases de teste em 2020, mas chegará a representar 10% das conexões mundiais em 2023 [Cisco 2020]. Ainda segundo o mesmo relatório, várias aplicações como televisores 8K, transmissões de vídeos em UHD (*Ultra High Definition*) e realidade virtual em UHD necessitarão de uma largura de banda extremamente superiores às praticadas atualmente. Aplicações como a internet tátil e cirurgias remotas possuem requerimentos de latência na ordem de 1 ms [Cisco 2020].

A implementação e o crescimento da demanda por “internet das coisas” (IoT) é outro assunto desafiante. As indústrias estão cada vez mais operando seus equipamentos utilizando-se de conexões M2M (*machine to machine*), e estima-se que em 2023 haverá um aumento de 65% de dispositivos conectados em relação a 2020, chegando a uma quantidade de 14,7 bilhões [Cisco 2020]. No entanto, os padrões utilizados pelas gerações anteriores não suportariam tais requisitos de demanda, latência e quantidade de conexões, o que motiva a proposição de várias estratégias para tornar tais aplicações possíveis. Algumas dessas estratégias concentram-se no projeto e na arquitetura das redes de acesso RAN (*Radio Access Network*). Neste segmento de rede concentram-se os dados de todos os usuários das redes móveis e, portanto, possuirão um grande problema para lidar com tamanho do fluxo de dados, bem como certos requerimentos que terão que ser respeitados. Uma das estratégias estudadas e mais promissoras a serem utilizadas é o *functional split* [dos Santos 2017]. No entanto, esta técnica não é tão simples de ser implementada, representa uma relação de custo benefício com várias variáveis na rede, e alguns autores como [Wang et al. 2017] defendem que não existe uma solução que seja ótima em termos de custo para todas as arquiteturas.

Um parâmetro pouco tratado na literatura refere-se ao uso eficiente dos equipamentos instalados na rede. É defendido no presente trabalho a capacidade do *functional split* de não só regular os aspectos clássicos da rede como fluxo de dados e requisitos de latência, mas também como um ajuste do quanto da capacidade total dos equipamentos instalados são utilizados.

1.2 Objetivo Geral e Específicos

Este trabalho tem como objetivo geral a aplicação da técnica do *functional split* em uma rede, bem como uma investigação de suas consequências diretas e indiretas para com o uso eficiente dos equipamentos instalados. Sabe-se que o ajuste desta técnica depende de vários fatores característicos de uma determinada arquitetura. Por isso, o uso de apenas um modelo não seria suficientemente acurado para tal definição. Logo, por consequência direta deste objetivo, lista-se alguns objetivos específicos que devem ser alcançados:

- a definição do termo “eficiência” que é subjetivo e não facilmente compreendido;
- a criação de um simulador dinâmico para tal segmento da rede, podendo assim ser aplicadas várias arquiteturas com características diferentes;
- a modelagem da própria rede e de seus elementos a fim de ser aplicada ao simulador;
- o uso de uma determinada heurística para criar as soluções possíveis ao se endereçar os processos aos seus nós de processamento;
- a análise dos resultados dos ajustes propostos pelo simulador, e avaliação da variação deste ajuste de acordo com os aspectos físicos das arquiteturas.

1.3 Metodologia

A técnica do *functional split* tem sido investigada por vários grupos de pesquisa ao redor do mundo. Um estudo mais aprofundado da técnica propicia ajustes nas redes de acesso visando melhoria de desempenho e atendimento aos requisitos mínimos da tecnologia 5G. A revisão do estado da arte executado ao longo deste trabalho demonstra a natureza exploratória da pesquisa realizada.

Foi desenvolvido um modelo de um segmento da RAN para gerar os resultados que indicassem os aspectos mais significativos de projeto para a definição do *functional split* ótimo. O segmento modelado compreende as ligações entre as unidades remotas RUs (*Remote Units*) e as unidades distribuídas DUs (*Distributed Units*), também chamado de *fronthaul*. Com o modelo, foi criado um simulador dinâmico para observar o quanto cada equipamento torna-se ocioso ao se computar uma bateria de processos em *upload*. Com os resultados, foi possível desenvolver um método matemático que permitiu definir a eficiência do uso das DUs, a partir de uma operação matemática direta. Como várias arquiteturas foram testadas, foi possível investigar o quanto alguns dos fatores construtivos impactam na definição do melhor ajuste de *functional split* para a eficiência da rede. Nestes quesitos, a pesquisa aqui abordada detém caráter explanatório e quantitativo.

Inerentemente associado ao projeto de um modelo de processamento de pacotes, está a criação de um algoritmo de alocação de recursos. Os pacotes possuem uma variada gama de possibilidades de destinos, proporcionalmente ao tamanho das redes simuladas. Como os modelos desenvolvidos são complexos, foi utilizada uma solução heurística para a geração de soluções. E, a partir da heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), foi proposta uma nova estratégia heurística para a resolução de problemas correlatos. O método, denominado GRASPDV (GRASP com Delimitação de Vizinhanças), foi adotado na resolução dos problemas, reforçando o caráter exploratório da pesquisa. Como consequência dos testes para o contraste entre os métodos, foram investigados os padrões de redes em que o novo método é mais indicado.

1.4 Trabalhos Relacionados

Existe um grande acervo de modelos computacionais na literatura, bem como trabalhos teóricos e práticos nas várias opções de *functional split* e de técnicas correlatas [Larsen et al. 2019]. Uma das técnicas correlatas mais importantes é a de virtualização de rede, com a qual é possível utilizar um mesmo equipamento com sua capacidade repartida em atribuições e com capacidade computacional diferentes. Em [I et al. 2014], em [Pliatsios et al. 2018] e em [Wang et al. 2017] é discutido o uso de virtualização e como este impacta a rede de acesso centralizada C-RAN (*Centralized Radio Access Network*). O último, em especial, trata do uso e ajuste do *functional split* para o menor consumo de energia dos equipamentos.

Um trabalho que visa minimizar o consumo de energia dos equipamentos utilizando o *functional split* está detalhado em [Alabbasi et al. 2018]. No entanto, além de tentar otimizar a largura de banda no segmento do *fronthaul*, é importante ressaltar que é um dos únicos trabalhos onde são feitas simulações com várias ligações e elementos simultaneamente. Já em [Duan et al. 2016], duas novas opções de arquiteturas são propostas entre o RRH (*Remote Radio Head*) e o BBU (*Base Band Unit*) para a comunicação em *uplink*, na tentativa de economizar a largura de banda do segmento. Em [Chang et al. 2016] são discutidos os impactos do *functional split* e as técnicas de *packetization* na latência dos sistemas, mas o modelo utilizado apenas contempla 4 antenas e utiliza os parâmetros do padrão LTE (*Long Term Evolution*). É um certo consenso nos trabalhos que o *functional split* ótimo em *uplink* diferencia-se do em *downlink* devido à diferença de tráfego e demanda entre ambos, conforme explicado em [I et al. 2015]. Em [Pérez et al. 2017] são apresentadas expressões matemáticas que estimam o atraso na transmissão e o processamento para algumas opções de *functional split* em uma técnica de enfileiramento de processos.

Um assunto comum na academia é a proposta de uma flexibilização nos níveis aplicados do *functional split* a partir de vários fatores. Em [Maeder et al. 2014] é discutida essa flexibilização de forma teórica em alguns níveis, mas utilizando os parâmetros e dados do LTE. Já em [Huq e Rodriguez 2017] e em [Pfeiffer 2015] é feita uma discussão direcionada para as redes da tecnologia NR (*New Radio*), assumindo outros valores de tráfego e transmissão, mas puramente teóricas. Em [Sabella et al. 2015] e [Wubben et al. 2014] são discutidos o uso de tal técnica, porém com destaque para os ganhos que a virtualização de rede trariam à sua implementação, sendo o primeiro para o NR e o segundo para o LTE. Em [Mountaser et al. 2017] foram testados apenas alguns *functional splits* para o modo de *download* na arquitetura em uma única ligação *Ethernet*. No entanto, estes possuem um caráter de otimização tentado minimizar o *jitter* e a latência da ligação. Em [Chang et al. 2017] também foram analisados algumas opções do *functional split* em *Ethernet* para o LTE, em que foram analisados vários fatores decorrentes dessas escolhas. Entre estes, vale destacar a análise de uso dos equipamentos, em termos de consumo de

CPU (*Central Processing Unit*) e de memória, preocupações não usuais nesse assunto. No entanto os testes foram realizados com ligações de poucos metros de distância.

Em especial, em [Wang et al. 2017], os autores propuseram uma plataforma para o projeto de redes de acesso utilizando modelos que estimam os requisitos de processamento, largura de banda para cada *functional split* e o custo total de propriedade (CTP), o qual inclui os custos de construção, equipamento, comissionamento e os custos operacionais como manutenção e eletricidade. No entanto, apesar das vantagens referentes ao CTP, os autores indicaram que não existe uma solução única para o problema que atenda à qualquer rede. Neste trabalho é notada uma preocupação com custo de projeto, sendo esta uma abordagem rara na academia. Já em [Mharsi et al. 2018], os autores investigaram heurísticas que possibilitam a adoção do *functional split* em redes geradas randomicamente, com a finalidade de atender tempo de processamento e latência dos serviços. O uso de heurísticas para investigar um problema tão complexo é uma solução inteligente pois, permite que simulações que visam justamente variar o posicionamento geográfico das BBU's de modo a atender os requisitos. Entretanto, a simplicidade do modelo estudado não contempla a dinâmica do processamento no segmento RU-DU.

1.5 Principais Contribuições

O método utilizado para medir a eficiência do uso dos equipamentos apresenta-se como uma das principais contribuições deste trabalho. A maioria dos trabalhos da área não o abordam e é de interesse da indústria a definição do investimento necessário para se implantar uma arquitetura de rede. Outra contribuição foi a criação de um simulador dinâmico para essa estrutura, sendo este essencial para se conseguir otimizar tal aspecto da instalação. Este simulador também é capaz de gerar várias pesquisas correlatas às características das redes de acesso.

Uma grande contribuição é a criação de um método heurístico proposto com a finalidade de ser utilizado para resolver o problema de endereçamento dos processos. Esse novo método pode também ser mais eficiente para resolver uma grande quantidade de problemas correlacionados. Como vários testes foram realizados para a comparação dessa heurística, foi possível prever as características dos sistemas com os quais ela pode ser indicada. Por fim, outra contribuição está na definição de um modelo de várias características de arquiteturas de redes de acesso, assim como medir o quanto cada uma delas pode influenciar na definição do ajuste para o *functional split* que tenha o uso mais eficiente dos equipamentos. Este resultado pode ajudar a prever ajustes em um *functional split* variável, a partir de uma curva de demanda de tráfego típica, ou ainda pode ser importante ao se definir qual é o ajuste que mais se adéqua à maior parte do tempo a uma arquitetura específica.

A análise dos resultados obtidos ao longo deste trabalho pode ser encontrada nas seguintes publicações:

- Amaral, M.; dos Santos, J.; Rocha, H.; Segatto, M.; Silva, J. “**Otimização de Recursos no *fronthaul* Óptico com *Split-Funcional* em 5G.**”. Em: XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2019, Petrópolis-RJ.
- Amaral, M.; dos Santos, J.; Rocha, H.; Silva, J.; Segatto, M. “***Processing Resource Allocation in 5G Fronthaul***”. Em: *International Microwave and Optoelectronics Conference*, 2019, Aveiro-Portugal.

1.6 Organização da Dissertação

O restante deste texto foi organizado de forma que no Capítulo 2 apresenta-se uma abordagem básica de toda teoria necessária para o entendimento dos assuntos abordados na dissertação. As principais diferenças entre o LTE e o *New radio*, a descrição das arquiteturas de redes de acesso, e a definição da metaheurística usada como base para a proposta apresentada nesse trabalho são abordados.

No Capítulo 3 é discutida a modelagem da rede, detalhando-se a maneira que foi modelada, seus componentes, ligações e processos. As principais características do simulador e as capacidades únicas de análise de desempenho são ressaltadas, assim como a definição de eficiência abordada pelo algoritmo e como essa abordagem se reflete na função objetivo do mesmo. A metaheurística proposta é descrita no Capítulo 4 com ênfase no problema do endereçamento dos processos aos nós de processamento e suas peculiaridades quando aplicada ao simulador. O método denominado GRASPDV, os princípios envolvidos e as hipóteses levantadas acerca de seu desempenho são devidamente comentados.

Os resultados de simulações numéricas são discutidos no Capítulo 5, enfatizando-se os aspectos construtivos de capacidade de processamento, quantidade de antenas e interconectividade dos elementos de processamento da arquitetura com *functional split*, nos diferentes cenários analisados. Finalmente, no Capítulo 6 são resumidos as conclusões e reflexões obtidas com os resultados dos experimentos. Também são sugeridas possibilidades de prosseguimento desta pesquisa em trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

2.1 As Principais Diferenças entre o LTE e o *New Radio*

Em 2008 houve uma quebra de paradigma no que diz respeito às transmissões de sinais de voz, devido a uma nova tecnologia que seria a base para a quarta geração de redes móveis (4G), o LTE. Em seu início foi usado apenas para tráfego de dados, com as tecnologias anteriores sendo usadas para a transmissão de voz. O LTE teoricamente permitia uma taxa de transferência efetiva de até 300 Mbps, mas em 2010 o LTE-A (*Long Term Evolution Advanced*) aumentou essa taxa para até 1 Gbps. Na Figura 2 são apresentadas as correlações entre o número de antenas, largura de banda e os padrões do 4G, bem como um contraste com o *New Radio* (NR) [dos Santos 2017].

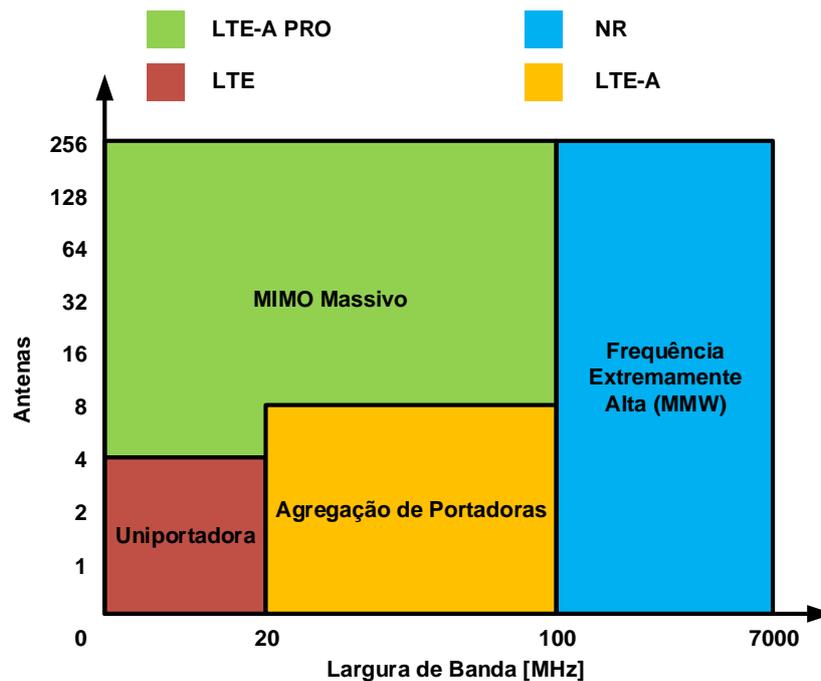


Figura 2 – Divisão do espectro e quantidade de antenas nas tecnologias LTE e *New Radio*.

Observa-se na Figura 2 que o sistema LTE, uniportadora e com um MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) de até 4x4 antenas, evoluiu para o LTE-A multiprtadoras de até 256 antenas no MIMO massivo, com 100 MHz de largura de banda utilizando a técnica de agregação de portadoras. A Figura 2 ainda mostra a capacidade do NR de chegar até uma largura de banda de 7 GHz. Não é do escopo desta dissertação discorrer sobre todos os parâmetros que definem estas tecnologias, mas um compilado pode ser encontrado no Quadro 1 para fins de comparação [dos Santos 2017].

Quadro 1 – Comparação entre os parâmetros da camada física do LTE e NR no *downlink*.

Variável	Significado	4G						5G	Fórmula
S_R	Taxa de Amostragem [MS/s]	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72	122,88	$S_R \times T_S$
C_B	Largura de Banda do Canal [MHz]	1,4	3	5	10	15	20	80	$G_B + M_B$
M_B	Largura de Banda Útil [MHz]	1,08	2,7	4,5	9	13,5	15	72	$S_S \times U_S$
G_B	Banda de Guarda [MHz]	0,32	0,3	0,5	1	1,5	2	8	-
T_S	Total de Subportadoras	128	256	512	1024	1536	2048	2048	$U_S + Z_P$
Z_P	Subportadoras zeradas	56	76	212	424	636	848	848	-
U_S	Subportadoras Úteis	72	180	300	600	900	1200	1200	$\frac{P_{RB} \times S_{PRB}}{S_{PRB}}$
P_{RB}	Tamanho do <i>Resource Block</i>	6	15	25	50	75	100	100	-
C_{FS}	CP do primeiro símbolo	10	20	40	80	120	160	160	-
C_{OS}	CP dos outros símbolos	9	18	36	72	108	144	144	-
S_{SL}	Amostras por <i>slot</i>	960	1920	3840	7680	11520	15360	15360	$\frac{C_{FS} + 6 \times C_{OS} + 7 \times T_S}{T_S}$
S_S	Espaçamento entre subportadoras [kHz]	15						15, 30, 60, 120, 240	-
N_F	Número de subquadros	10							-
S_{PRB}	Subportadoras em cada PRB	12							-
N_B	Quantidade de sub-bandas	1, 2, 3, 4, 5						1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	-
N_{Sym}	Quantidade de símbolos por PRB	7							-
N_{bps}	Quantidade de bits por símbolo	2, 4, 6, 8							-
N_A	Número de elementos SISO/MIMO	1x1, 2x2, 4x4, 8x8							-
T_F	Duração do quadro [ms]	10							$10 \times T_{TTI}$
N_{fps}	Quantidade de quadros por segundo	100							$1/T_F$
T_{TTI}	Duração do subquadro [ms]	1						0,25	$20 \times T_{Slot}$

Quadro 1 – Continuação da página anterior.

Variável	Significado	4G	5G	Fórmula
T_{Slot}	Duração de um <i>slot</i> [ms]	0,5	0,125	$\frac{T_{FS} + 6 \times T_{OS}}{6}$
T_{SoCP}	Duração de um símbolo sem CP [μs]	6,67	16,67	$1/S_S$
T_{SpF}	Quantidade de <i>slots</i> por quadro	20	80	T_F/T_{Slot}
T_{fs}	Duração do primeiro símbolo [μs]	71,87	17,97	$\frac{T_{SoCP} + C_{fs}}{S_S \times T_S}$
C_{fs}	Duração dos outros símbolos [μs]	71,36	17,84	$\frac{T_{SoCP} + C_{OS}}{S_S \times T_S}$

Devido às diferenças entre o LTE e o NR, grandes mudanças ocorrerão no projeto das RANs, pois dispositivos sofrerão modificações em suas funções e novos dispositivos serão inseridos. Uma revisão das arquiteturas utilizadas até então é descrita na Seção 2.2.

2.2 A Rede de Acesso RAN

De um modo geral, uma RAN é uma rede heterogênea, ou seja, pode ter implementações diferentes e simultâneas. Uma RAN compreende o *backend* da última milha, ou seja, tendo a antena rádio-base como elemento limitador, é o que liga a antena à rede de núcleo CN (*Core Network*). Uma divisão típica para redes móveis e suas conexões são ilustradas na Figura 3.

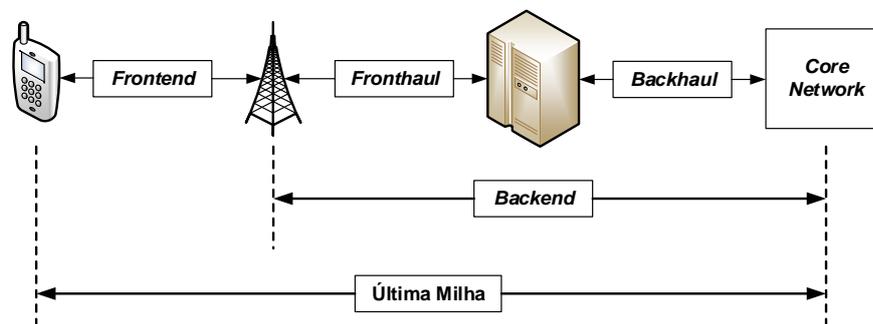


Figura 3 – Exemplo de última milha para redes móveis de acesso.

Sendo generalista, uma RAN pode ser dividida nas três partes distintas: *backhaul*, *midhaul* e *fronthaul*. Mas, tradicionalmente também pode ser dividida em apenas *fronthaul* e *backhaul*, como ilustra a Figura 3. Esses segmentos são normalmente divididos e definidos pelas camadas de atribuição de cada segmento da rede.

Em uma definição ampla, o *backhaul* representa a ligação entre a borda da rede (camada de acesso), e o CN. Esta ligação permite o transporte dos pacotes do usuário até às redes móveis, internet e redes de telefonia tradicionais, onde os pacotes são processados da camada de transporte em diante. Já do ponto de vista de seus aspectos construtivos, este pode ser implementado utilizando-se fibra, cobre ou mesmo via rádio [Vaezi e Zhang 2017]. Segundo [Vaezi e Zhang 2017], os principais aspectos a serem considerados em um projeto de um *backhaul* são a escalabilidade, flexibilidade e simplicidade. A escalabilidade é importante para adicionar novas células de capacidades superiores às redes instaladas. Flexibilidade é importante para que as redes possam atender o mais próximo possível aos requisitos de qualidade de serviço e custo, principalmente em redes heterogêneas. E a simplicidade é necessária para reduzir o custo de manutenção e instalação dos equipamentos. Os requisitos e arquiteturas do *backhaul* diferem drasticamente quando comparadas às implementadas nas várias gerações de tecnologias móveis e são fortemente impactadas pelas limitações impostas pela geografia e demanda de cada projeto.

O advento do *fronthaul* é acompanhado por uma configuração específica das redes de acesso, as redes de acesso centralizadas C-RAN (*Centralized - RAN*). A partir da centralização dos elementos de redes que acompanhavam e eram dedicados a apenas uma rádio-base, foi criado um novo segmento de transporte, e a esse segmento é dado o nome de *fronthaul*. A distância máxima praticada entre os elementos é limitada devido aos requisitos de latência da rede neste segmento, onde os pacotes são tratados tradicionalmente até a camada física [Vaezi e Zhang 2017]. Diferentemente do *backhaul* que pode adotar vários meios de transmissão diferentes, a resposta mais indicada para atender o requisito da latência pelos especialistas são as redes ópticas passivas PON (*Passive Optical Networks*) [Vaezi e Zhang 2017]. Assim, um entendimento do *fronthaul* exige uma discussão acerca das redes ópticas passivas.

2.3 Descrição Básica de Redes Ópticas Passivas

Sabe-se que latência, variação do atraso, confiabilidade e alta taxa de transmissão são requisitos demandados no NR. Uma possível solução para atender tal exigência está na adoção de redes ópticas passivas PON (*Passive Optical Network*) na rede de acesso. De fato, o não emprego de amplificadores ópticos em seus enlaces, a torna uma opção de banda larga com custo reduzido. Conforme descrito em [Nunes 2016]:

Com a criação do comitê FSAN (*Full Service Access Network*), as PONs passaram a ser padronizadas sob a forma de recomendações da ITU-T (*International Telecommunication Union*) ou de procedimentos do IEEE (*Institute of Electric and Electronic Engineers*). Outros países, especialmente os asiáticos, têm investido muito em redes ópticas passivas para atender demandas residenciais, já que este tem sido o grande desafio - estender a transmissão óptica até o usuário final mantendo a viabilidade

econômica. [...] Utilizada para prover o acesso de última milha, com capacidade de suprir demandas dos diversos tipos de serviços como voz, vídeo e dados, a PON é composta por um link de fibra óptica interligando um equipamento terminal de linha óptica (*OLT - Optical Line Terminal*), com maior complexidade e responsável pela conexão com redes de backbone, como as redes de transporte SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), a um elemento óptico passivo divisor/combinador (*splitter/combiner*), que, por sua vez, se conecta a vários outros equipamentos chamados unidades de rede óptica ou terminal de rede óptica (*ONU - Optical Network Units* ou *ONT - Optical Network Terminal*) localizados em condomínios, gabinetes nas calçadas, sites e residências.

A arquitetura de rede PON estudada em [Nunes 2016] está ilustrada na Figura 4. É importante ressaltar a capacidade de interconexões entre arquiteturas estruturalmente diversas e a heterogeneidade de tais redes, importantes para serem utilizadas no atendimento de serviços com requisitos diferentes. Uma das alternativas de implementação de redes PON para acesso utiliza a técnica de acesso múltiplo chamada de acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) [Kottkamp et al. 2019]. No OFDMA, o canal é dividido em subportadoras ortogonais, o que significa que esta técnica é capaz de utilizar um único comprimento de onda para várias subportadoras, e assim atender a variados usuários [Nunes 2016].

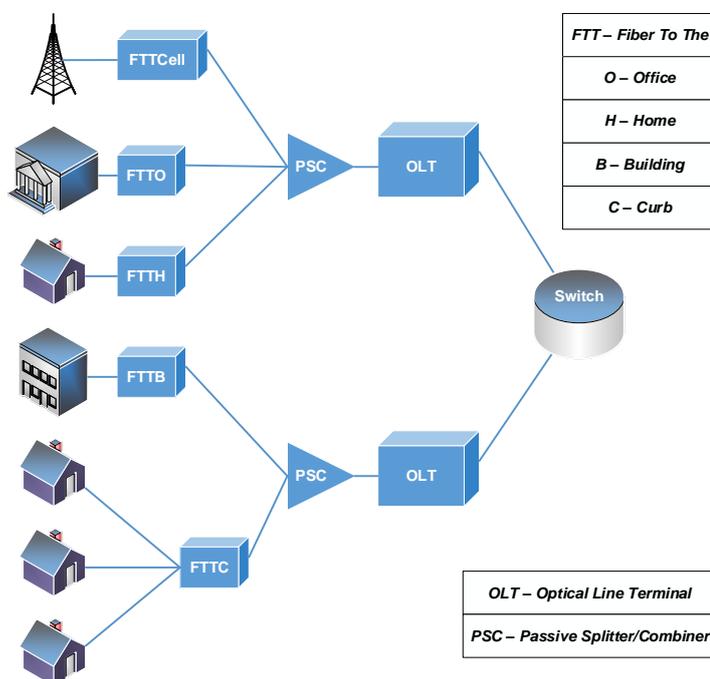


Figura 4 – Arquitetura de rede PON para a última milha. Adaptada de [Nunes 2016].

As redes de acesso podem ser classificadas em distribuídas D-RAN (*Distributed RAN*) ou centralizadas (C-RAN). A seguir descreve-se brevemente os dois modelos, suas principais diferenças e quais decisões de projeto devem ser levadas em consideração para a utilização no 5G.

2.4 Atuais Arquiteturas do D-RAN e C-RAN

Até 2009 todas as RANs eram caracterizadas como sendo D-RANs. A arquitetura de uma D-RAN pode ser definida como mostrado na Figura 5, quando cada antena é provida por uma unidade de processamento específica.

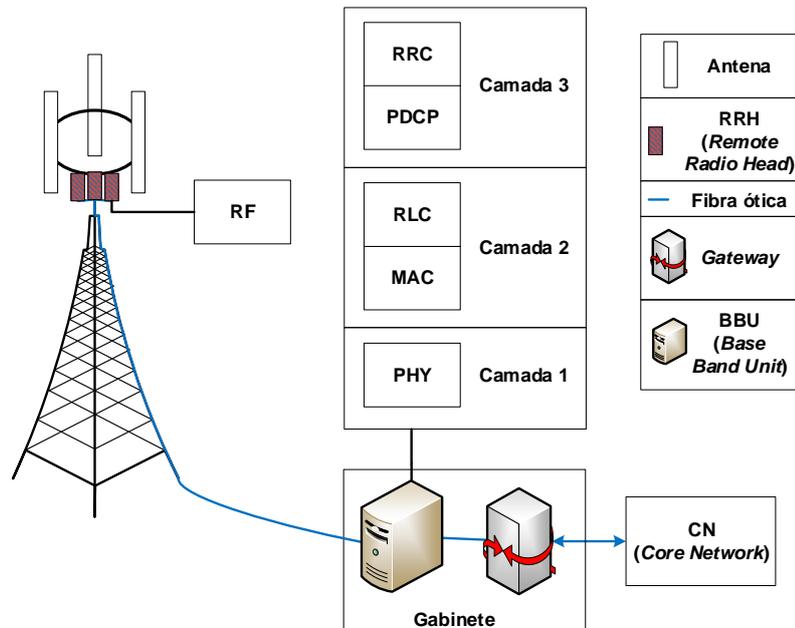


Figura 5 – Exemplo de modelo D-RAN.

Observa-se no modelo mais recente de D-RAN mostrado na Figura 5 que na própria antena existe um dispositivo chamado de RRH (*Remote Radio Head*). Este contém transceptores com conversores digital-analógico e processamentos de super e sub amostragem de sinal, funções estas pertencentes à parte de RF (*Radio Frequência*) da camada física (camada 1). Já o BBU é responsável por todo o processamento dos pacotes da camada 1 até a camada de rede (camada 3). Além disto, este estabelece a comunicação com a rede de núcleo através de um *gateway*.

Esta arquitetura apresenta vantagens aos modelos anteriores de D-RAN, tais como a utilização de cabos de fibra ótica e modularidade dos equipamentos, reduzindo custos de manutenção. No entanto cada BBU é responsável pela sua RRH, escolha esta que faz com que exista margem para uma grande ineficiência de uso do equipamento, uma vez que o serviço está sujeito a grandes flutuações temporais e espaciais na demanda de tráfego [dos Santos 2017]. Esse tipo de projeto também é ineficiente para redes massivas devido à sua falta de escalabilidade, pois antenas adicionais necessitam de um investimento muito grande quando comparado às redes C-RAN. No entanto é o mais indicado para redes rurais ou remotas.

Para sanar os aspectos negativos que o D-RAN ainda possuía, foi proposto pela

China Telecom em 2009 o modelo C-RAN. Este consiste basicamente na transferência das BBUs, que ficavam próximas ao RRH, para uma nova localidade chamada de central CO (*Central Office*). Com a proximidade física dos dispositivos, estes foram ligados entre si, podendo então enviar pacotes uns aos outros [Liu et al.]. Neste modelo, cada BBU faz o gerenciamento de uma ou mais RRHs. A ligação entre as RRHs e a BBUs, assim como no D-RAN, é feito através de fibra ótica e a ligação entre BBUs é chamada de MFH (*Mobile Fronthaul*) [Chanclou et al. 2013]. A representação de uma das possibilidades possíveis para esse modelo está disposta na Figura 6.

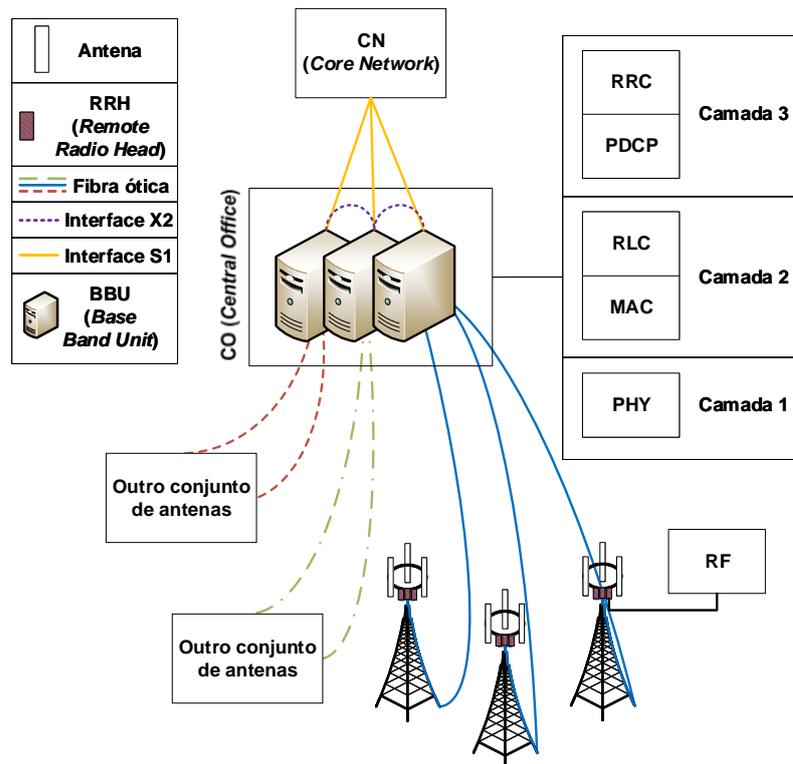


Figura 6 – Exemplo de modelo de C-RAN.

O advento da interconexão das BBUs oferece uma grande vantagem, já que é possível que as trocas de pacotes locais aconteçam independentemente do CN, diminuindo o atraso de comunicação no sistema como um todo. Outra vantagem que esta abordagem acarreta é na realocação de recursos intra BBUs, pois os equipamentos podem ser utilizados e realocados de modo dinâmico, e em resposta à demanda de cada seção do sistema. Existem opções de projeto no que se refere às funções desempenhadas por cada dispositivo. A Figura 6 mostra a opção onde, assim como comentado na Subseção 2.4, o RRH executa as funções de RF e a rede de BBUs as funções restantes até a camada 3, sendo esta configuração denominada *hybrid centralization*. No entanto existem configurações diferentes, já que a RRH pode ser designada a executar todas as funções da camada 1 ou mesmo a não executar nenhuma função. A estas configurações são conferidas os nomes de *partial centralization* e *total centralization*, respectivamente [Bartelt et al. 2015].

Neste contexto, foi definida a seguinte separação na rede: a parte da rede que engloba as ligações das RRHs até o CO, as ligações entre as BBUs chamada de *fronthaul*, e a parte que engloba as ligações dos BBUs até o CN denominada *backhaul* [Bartelt et al. 2015]. Essa separação é importante pois as duas seções possuem gerenciamentos e objetivos distintos do ponto de vista de um plano de controle e, além disso, pode-se definir requisitos de qualidade de serviço em separado. Para o projeto de RANs, com os requisitos tão rígidos como os que são exigidos pelo NR, é necessário uma solução viável economicamente e que conte com uma largura de banda larga, velocidade de transmissão e resistência à interferências. Embora o escopo desta dissertação é voltado ao *fronthaul*, considera-se que na RAN, este é projetado para aplicações no contexto do 5G.

2.5 Adoção da C-RAN no Contexto 5G

A quinta geração de redes móveis exige uma grande revolução na rede, tanto em termos de utilização dos meios físicos, quanto em técnicas de transmissão de sinais. O crescimento exponencial do número de dispositivos e da respectiva demanda de tráfego de dados nas redes de telefonia móvel impõe um aumento significativo, não somente da largura do espectro de frequência disponível, como também da densidade de usuários a serem atendidos. Conseqüentemente, a quantidade de processos demandados na rede e a interferência causada pela densidade aumentarão substancialmente. Logo, se faz necessária uma solução que possibilite às estações rádio base suportarem múltiplos serviços [Wang et al. 2017]. O 5G deverá atender serviços tais como controle automático de *smart grids*, sistemas de transporte inteligente, cirurgias remotas, internet tátil, entre outros. Realizações impossíveis de serem implementadas utilizando a padronização da quarta geração de redes móveis, o LTE. Uma das técnicas utilizadas no 5G para atingir tais objetivos baseia-se no conceito de rede centralizada C-RAN, discutida anteriormente [Mharsi et al. 2018].

O C-RAN permitirá atender aos requisitos mínimos de confiabilidade, baixa latência, altas taxas e alta densidade. Dentre as técnicas utilizadas com esta configuração encontram-se o conceito de SDN (*Software Defined Networks*) e a virtualização de processos. No primeiro, existe um plano de controle independente do plano de dados que “observa” a rede como um todo, faz a comunicação entre a camada de infraestrutura e de aplicação e as gerencia. Esta diferença primordial permite prever o comportamento da rede de forma mais efetiva, bem como reduzir os custos operacionais, adaptando remotamente as técnicas disponíveis e ajustando as taxas de dados e faixas de operação, com as estatísticas de desempenho e estratégias fornecidas pela camada de aplicação.

Na Figura 7 são apresentadas a arquitetura do SDN, suas camadas e elementos presentes em cada uma delas. A primeira camada é a de infraestrutura, que contém os dispositivos (*switches*, roteadores, e pontos de acesso remoto) sem qualquer controle

lógico da rede, como algoritmos de roteamento ou indicadores de qualidade de serviço. Na camada de controle está o controlador em si, que consiste na lógica da rede, provendo uma interface programável, implementando as funcionalidades e gerenciando tarefas. A última camada é a camada de aplicação, onde estão todas as aplicações que utilizam os serviços providos pela camada de controle como roteamento, monitoramento, controle de acesso, virtualização e outros [dos Santos 2017, Nguyen et al. 2016].

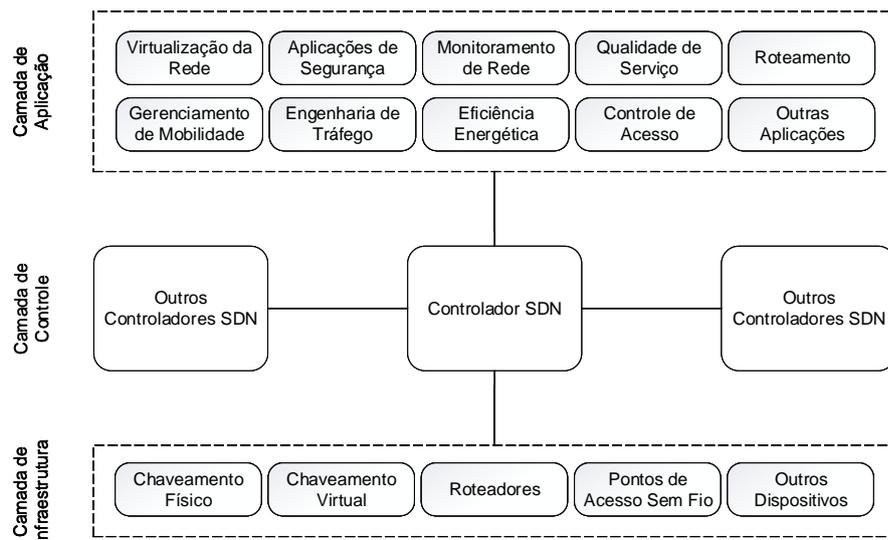


Figura 7 – Arquitetura de uma rede com o artifício SDN.

Um conceito comumente confundido com o SDN é o de virtualização, sendo que existem dois tipos, quais sejam a virtualização de rede e virtualização das funções de rede. A primeira, assim como o SDN, é uma abstração da rede, separando a topologia em uma camada diferente de sua estrutura física. No entanto, essa abstração é usada para permitir redes virtuais VLAN (*Virtual Local Area Network*), sobre um mesmo equipamento físico, simplificando a topologia da rede física. A virtualização das funções de rede é a migração das funções executadas por *hardware* dedicado para *software*, podendo ser processada em um sistema computacional em nuvem. Esta mudança permite reduzir custos e consumo de energia, provê escalabilidade e confere suporte multiusuário [dos Santos 2017, Nguyen et al. 2016]. Convém ressaltar que estas técnicas são complementares ao SDN ao adicionarem vantagens nas arquiteturas de suas redes.

Apesar de poder classificar a RAN do 5G como C-RAN, a mesma conta com modificações em comparação com o que foi discutido na Sub-seção ???. Nesta, a RRH é chamada de RU (*Remote Unit*) e as funções anteriormente desempenhadas pelo BBU são divididas em dois novos dispositivos: a unidade de distribuição DU (*Distributed Unit*) e a de centralização CU (*Centralized Unit*). A Figura 8 ilustra esta topologia [3GPP 2016].

É detalhado na Figura 8 o seccionamento da arquitetura em *fronthaul*, *midhaul* e

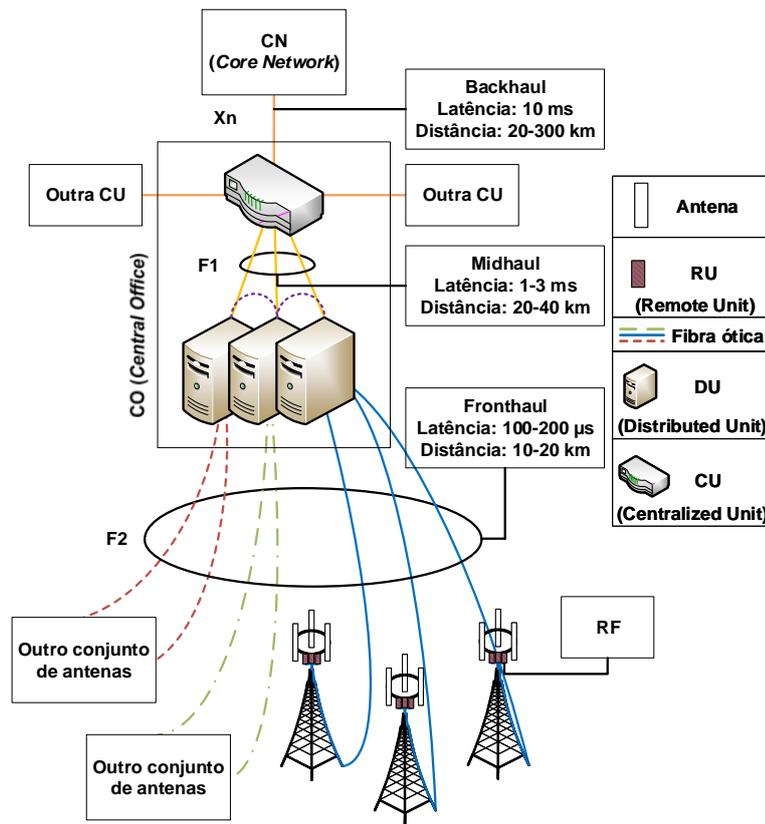


Figura 8 – A topologia C-RAN recomendada para o 5G.

backhaul. Pode-se atribuir a essa divisão, como feito anteriormente, uma analogia com as camadas estabelecidas pelo modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), onde os dados recebidos pelas antenas operam os pacotes a nível de camada 1 e os pacotes enviados para o CN seriam trabalhados na camada 3 [3GPP 2016]. Existem várias técnicas que visam relaxar requisitos tão rigorosos como os que estão sendo requisitados pelos órgãos reguladores, mas o escopo desta dissertação encontra-se no *functional split*, portanto, apenas serão discutidas as suas características e os requisitos.

2.6 Aplicação do *Functional Split* na C-RAN do 5G

Uma vez definido que, no *fronthaul* do 5G, as ligações entre os equipamentos serão feitas com enlaces em fibras óticas passivas PON, o projeto da rede conta com uma largura de banda larga, baixa latência, além de um investimento de baixo custo na implementação. O *fronthaul* conta com os requisitos mais rigorosos, tal como uma latência em mão única de 100-200 μ s, em distâncias típicas de até 20 km [3GPP 2016]. As funções atribuídas às RUs são as menores possíveis, pois o tempo de propagação no enlace ótico (aproximadamente 67 μ s em 20 km) torna-se significativo para um requisito de latência tão baixo. No entanto existe uma alternativa para relaxar esses requisitos: é sabido que quanto mais alta a

camada dos dados a serem transmitidos, menor a quantidade de dados efetiva transmitida pelo meio e menor o requisito de latência para essa parte da rede. Uma técnica que se utiliza dessa relação é exatamente o *Functional Split*.

Proposto pela primeira vez pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), o *Functional Split* consiste em variar a separação de atribuições entre a RU e a DU [3GPP 2016]. Essa troca gera uma relação de custo-benefício entre latência, quantidade de dados transmitidos, cooperação entre os equipamentos, o custo de implementação e a facilidade de implementação. Uma representação dessa divisão, assim como a representação de suas implicações encontra-se a Figura 9.

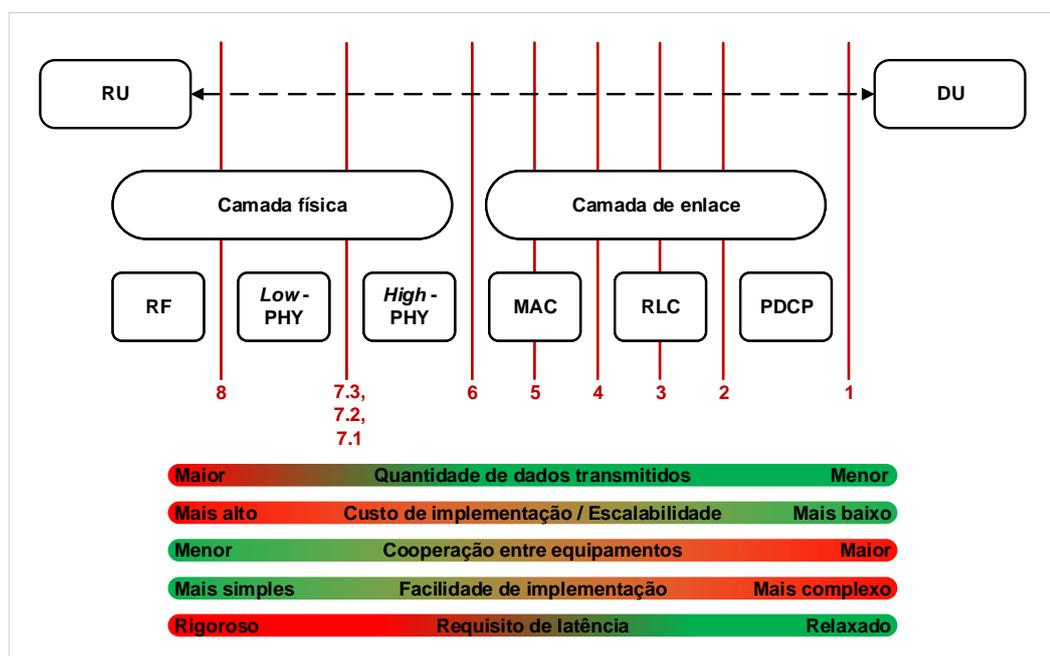


Figura 9 – Opções do *Functional Split* segundo a nomenclatura do 3GPP.

É importante mencionar que nem todas as grandezas influenciadas pelo *Functional Split* variam de forma linear com as opções possíveis. Em especial, a quantidade de dados transmitidos varia rapidamente da opção 8 até a opção 6, mas se mantém mais estável em outras variações. Estima-se que se a opção 7.2 for utilizada, 54.62% dos dados no segmento já não existirão mais. Outra implicação relevante de ser ressaltada é o requisito de latência que é de 200 μs na opção 8, mas que varia de 250 μs para 1 ms da opção 6 para a opção 4, respectivamente, chegando a 10 ms na opção 1 [dos Santos 2017].

É possível estabelecer um paralelo das opções com a organização das RANs em D-RAN ou C-RAN. Quando na opção 1 tem-se todo o processamento realizado pela RU e nenhum realizado pela DU, caracteriza-se uma estrutura muito próxima ao D-RAN. Quando a opção 8 é selecionada, a RU não realiza nenhuma função e todo o processamento é feito na DU, aproximando-se de uma estrutura C-RAN. Por este motivo, alguns autores referem-se à essa estrutura como H-RAN (*Hybrid RAN* ou *Hybrid C-RAN*) [Wang et al.

2017, Alabbasi et al. 2018]. Outros chamam-na de V-RAN ou vRAN (*Virtual RAN*) e quando é utilizada a capacidade de virtualização das funções de rede da DU e da CU [Rost et al. 2015, Ramantas et al. 2018]. Existem muitas vertentes e técnicas dentro dessa mesma estrutura [Larsen et al. 2019], e com tantos ajustes a serem feitos em características concorrentes, observa-se que não é simples encontrar o *functional split* ideal para qualquer rede ou que atenda à qualquer arquitetura. Para a realização de testes com velocidade e sem grande custo de investimento, foi compulsória a criação de um modelo computacional da estrutura da rede. Esse modelo foi realizado e testado tendo em vista um melhor aproveitamento do potencial computacional da rede de DUs, variando e comprovando a significância das variáveis de interesse em um projeto de um sistema nesse formato.

2.7 Descrição Básica sobre a Metaheurística GRASP

O termo “heurística” foi criado a partir da análise da tomada de decisões inerentes ao ser humano, onde uma solução encontrada é satisfatória, mesmo que não seja a melhor solução possível. Na área da computação o termo remete à algoritmos Genéricos que visam procurar soluções, não necessariamente ótimas, que demorariam muito tempo a serem computadas de maneira satisfatória. Esse tipo de algoritmo é muito utilizado em problemas que possuem um número muito grande de soluções possíveis a serem analisadas, quando é necessário otimizar um sistema muito complexo ou desconhecido com algumas variáveis de controle, quando o poder de processamento disponível não é capaz de gerar uma solução ótima em um tempo eficiente, ou todas as alternativas anteriores [Sorensen et al. 2017].

George Pólya, um matemático húngaro, trabalhando na Universidade de Stanford, publicou em 1945 um livro chamado “*How to Solve it*”. Neste livro, ele descreveu uma série de técnicas matemáticas genéricas para a resolução de problemas complexos, e apesar de ser voltado para problemas matemáticos, as técnicas apresentadas são as bases de criação de algoritmos heurísticos. Dada à relativa novidade do estudo da técnica, quando comparada com outros ramos da ciência como a matemática, existe uma infinidade de propostas de abordagens e modelagens, usando as mais variadas inspirações criadas ainda hoje [Sorensen et al. 2017]. A escolha ou criação da heurística correta para cada problema é um problema heurístico em si. Existem algoritmos capazes de selecionar de modo iterativo a heurística mais adequada para o problema. Também existem algoritmos que utilizam duas ou mais heurísticas em conjunto, e que conseguem variar de forma ponderada o quanto cada uma impacta no resultado final de sua otimização. A esses algoritmos é dado o nome de metaheurística. A metaheurística que foi utilizada neste trabalho e a que será abordada neste texto é o GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*).

Assim como qualquer metaheurística, o GRASP trata-se de uma solução genérica para um determinado problema também genérico. Segundo os próprios criadores do método,

“O GRASP é um método iterativo, com cada iteração GRASP consistindo em duas fases, uma fase de construção e uma fase de busca local” [Feo e Resende 1995]. A fase de construção do algoritmo é caracterizada por um ajuste que consiste em criar soluções puramente randômicas ou gulosas. Uma heurística randômica consiste em criar uma solução possível de ser aplicada, mas de uma forma randômica, sem nenhuma análise na criação da solução. Uma heurística gulosa consiste em criar uma solução de modo que, a cada adição de um elemento dessa solução tenha-se o menor impacto negativo (ou o mais positivo) ao gerar a solução.

Para um efeito prático: tenha em mente o problema clássico do caixeiro viajante. A forma mais simples de solucionar este problema consiste em encontrar o menor caminho geográfico ao se transitar necessariamente por todas as cidades de uma determinada região. Dado um ponto de partida, uma solução randômica sortearia a esmo qual a próxima cidade a ser visitada, e criaria uma solução viável. Partindo de uma cidade inicial, uma solução gulosa escolheria como próxima parada a cidade geograficamente mais próxima, repetindo esse passo até que uma solução seja gerada. O GRASP é usado para criar soluções de meio termo entre o randômico e o guloso, através de um sorteio restrito dos melhores candidatos a comporem a solução [Feo e Resende 1995]. Assim, fica claro a seguinte fragilidade desta metaheurística: é necessário uma forma rápida de avaliar os possíveis candidatos à comporem a solução. Essa avaliação nem sempre é trivial, principalmente em sistemas muito complexos que pretende-se caracterizar.

Pseudocódigos do GRASP genérico e da função de geração gulorandômica encontram-se disponíveis nos Algoritmos 1 e 2, respectivamente.

Algoritmo 1 GRASP Genérico

```

1: Saída: MelhorSolucao
2: while Criterio  $\neq$  Satisfeito do
3:   Solucao  $\leftarrow$  GeraSolucaoGuloRandomica(Candidatos);
4:   Solucao  $\leftarrow$  BuscaLocal(Solucao);
5:   MelhorSolucao  $\leftarrow$  AvaliaMelhor(MelhorSolucao, Solucao);
6: end while
7: return MelhorSolucao;

```

Algoritmo 2 Solução Gulorandômica

```

1: Entrada: Candidatos
2: Saída: Solucao
3: while Solucao  $\neq$  Completa do
4:   CandidatosOrdenados  $\leftarrow$  Avalia(Candidatos);
5:   Selecionado  $\leftarrow$  SorteiaCandidato(CandidatosOrdenados);
6:   Candidatos  $\leftarrow$  ExcluiSorteado(Candidatos);
7:   Solucao  $\leftarrow$  AtualizarSolucao(Solucao);
8: end while
9: return Solucao;

```

Através do Algoritmo 1, é possível observar ainda que o GRASP efetua uma busca local. Essa busca geralmente é realizada por um algoritmo capaz de fazer pequenas variações na solução encontrada, afim de eventualmente encontrar alguma melhora. Este passo nem sempre é necessário, dependerá de características intrínsecas ao problema a ser solucionado e das escolhas do projetista do código (vide os casos analisados em [Jiang et al. 2019] e [Hichem et al. 2019]). Apesar de ser um código de lógica simples, a grande vantagem do GRASP reside justamente em gerar soluções iniciais muito boas, além de ser um código muito rápido de ser computacionado.

3 Modelagem do *Fronthaul* Óptico

Como discutido na subseção 2.6, a definição de um *functional split* ótimo depende de muitos fatores concorrentes. E uma das soluções possíveis para investigar um problema tão complexo é o desenvolvimento de um modelo computacional. A partir desse modelo é possível ajustar fatores determinantes e verificar a sua significância nos resultados, esses fatores podem incluir, mas não somente: o nível do *functional split* selecionado, tamanho da rede, demanda de tráfego e capacidade de processamento.

3.1 Modelagem das *DUs* e dos Processos

A avaliação dos impactos desses fatores no resultado final é de grande valor para projetistas e para simulações futuras, já que define as variáveis mais e menos importantes nos ajustes. Nesse caso, é definido o modelo trabalhado a partir de uma representação em escala menor na Figura 10.

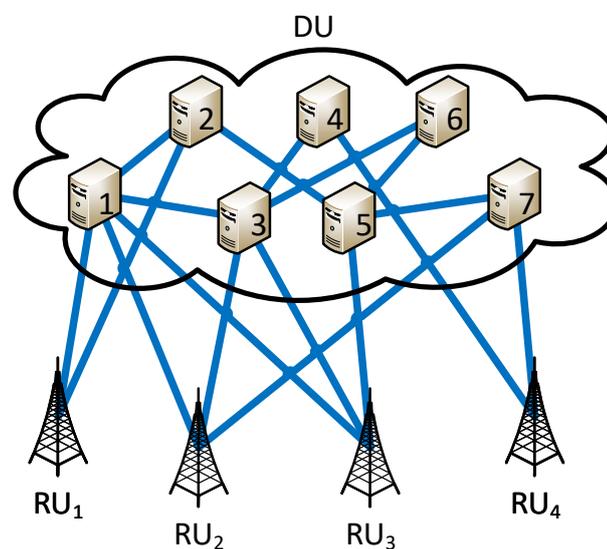


Figura 10 – Modelo proposto.

Nesse modelo tem-se 4 RUs ligadas a 1 DU, nesse caso o DU conta com 7 núcleos de processamento paralelo internos, também chamados de “nós”. A transmissão de mais de um sinal utilizando a mesma fibra foi representado por mais ligações com outros núcleos de processamento. Cada um desses núcleos possui uma capacidade de processamento diferente, gerado randomicamente para cada um deles através de uma distribuição de Poisson. A

equação da distribuição de Poisson tem uma PMF (*probability mass function*) dada por

$$PMF = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad (1)$$

para λ a média da distribuição e k a quantidade de ocorrências. Na Figura 11 é possível observar a equação 1 de forma gráfica para $\lambda = 2$.

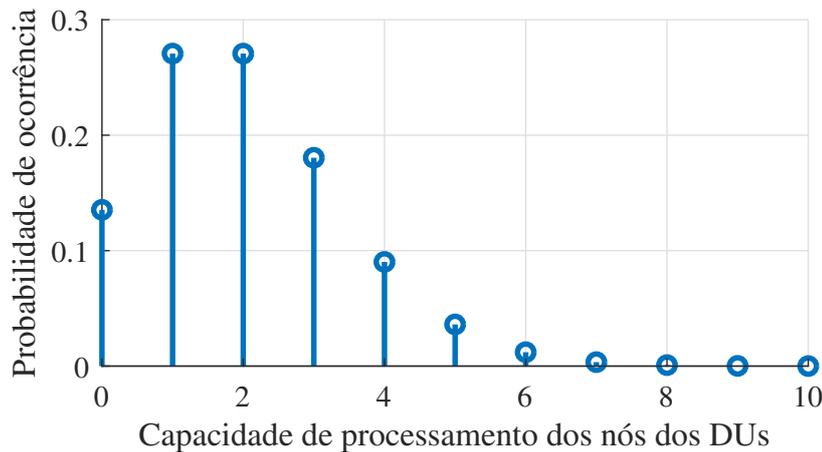


Figura 11 – PMF da distribuição de Poisson para $\lambda = 2$.

Essa distribuição foi escolhida por, além de sua simplicidade, ser uma distribuição de “cauda pesada”, gerando poucos núcleos com capacidade muito maior que os outros. Essa escolha foi tomada para representar como normalmente as empresas prestadoras de serviço trabalham, adicionando equipamentos novos paralelamente a equipamentos mais antigos e gerando esse tipo de configuração interna. O lambda escolhido para todas as redes foi justamente o representado na Figura 11, isso se deve ao fato de ainda não ser tão baixa capacidade de geração de nós com capacidade de processamento nulo. Esses nós são importantes pois representam elementos como *switches*, elementos de ligação entre os nós que evitam que o sistema se estrangule (*lockdown*) facilmente, essa situação será discutida adiante.

Não somente os DUs precisam ser modelados de forma coerente, mas também os próprios pacotes da rede. Foi considerado que, pelo ponto de vista do DU, as opções mais baixas do proposto pelo 3GPP refletem em pacotes menos onerosos em termos de processamento. É possível observar que na opção mais alta, a 8, os DUs fazem todo o processamento, e a rede se transforma em uma C-RAN pura com os DUs sendo os BBUs. Logo, assim como usado para modelar a capacidade de processamento da rede de DUs, os próprios processos também foram modelados como distribuições de Poisson.

Diferentemente do caso anterior no entanto, não existiriam processos com demanda de processamento nulo. Assim, a partir de uma distribuição de Poisson com $\lambda = 1$, foram feitos deslocamentos horizontais para representar processos que demandam, em média, cada vez mais dos nós de processamento. Assim como no caso anterior, é favorável ter

uma PMF de cauda pesada pois reflete o tráfego de uma rede real, com vários pequenos processos e poucos processos grandes. A representação da PMF dos quatro primeiros modelos do *functional split* está ilustrado na Figura 12

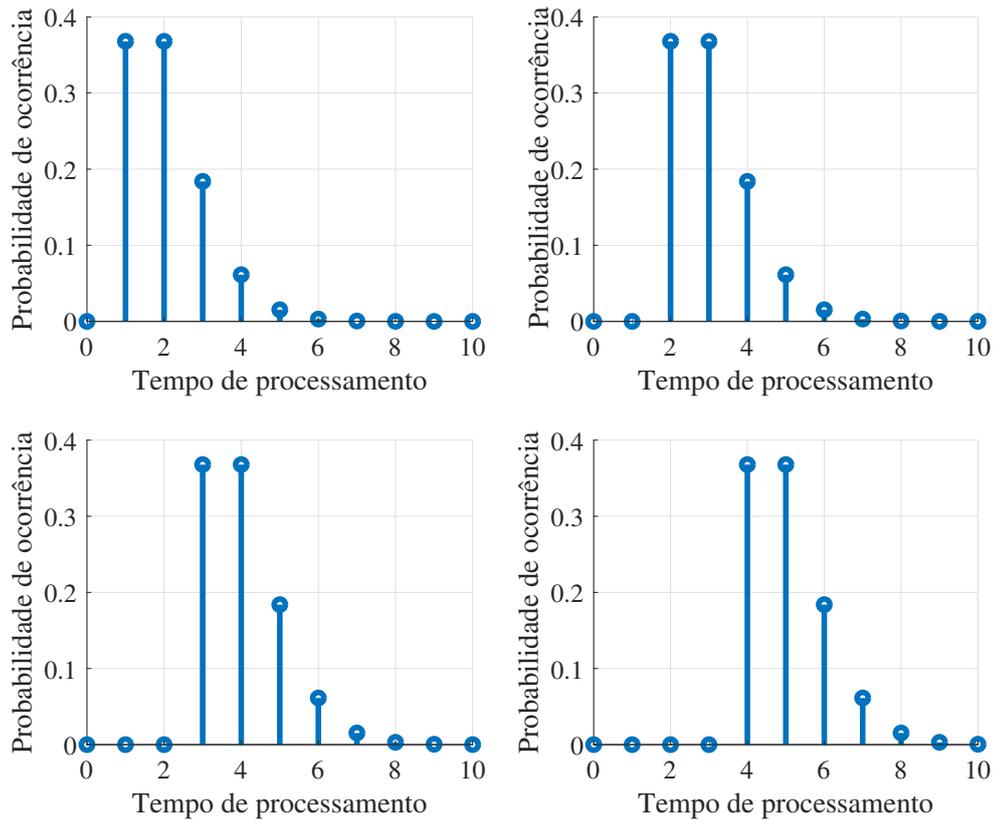


Figura 12 – Distribuição de Poisson para $\lambda = 1$ para a definição do tamanho dos processos de média de 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

O objetivo é verificar o uso da capacidade total dos dispositivos, assim, foi feito um total de 30 deslocamentos. Observa-se que o deslocamento máximo é muito maior que a maior capacidade do núcleo de processamento com mais capacidade, logo, esse processo só poderia ser computacionado durante a simulação em um modelo dinâmico. Tem-se então uma das maiores contribuições do modelo proposto: o seu caráter dinâmico e massivo. Observando alguns trabalhos na literatura como [Wang et al. 2017], [Mharsi et al. 2018], [Alabbasi et al. 2018], [Chang et al. 2016], [Sabella et al. 2015] e entre outros em [Larsen et al. 2019], foi observado uma carência de modelos massivos. Uma causa possível para a falta de modelos grandes seja a predominância de algoritmos exatos nos projetos das simulações, modelos que não são pequenos demorariam muito tempo para se chegar à uma solução.

3.2 O Simulador Dinâmico

Determina-se aqui que simuladores dinâmicos são aqueles onde é simulada a passagem de tempo durante a sua execução. Os que não possuem essa característica, apesar de poderem gerar resultados em algumas grandezas como a latência geral e confiabilidade, não conseguem demonstrar a eficiência ou ineficiência do projeto que se esteja querendo simular. Um exemplo dinâmico é ilustrado na Figura 13.

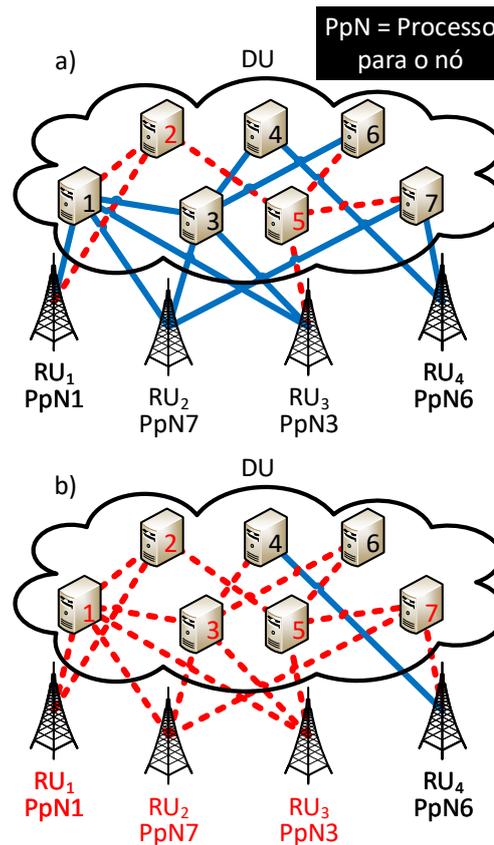


Figura 13 – Exemplo da dinâmica da rede com dispositivos “ociosos” ou “livres” (linha cheia) dispositivos “em uso” (linha pontilhada). a) Instante i e b) instante $i + 1$.

A Figura 13.a) ilustra uma situação onde os nós 2 e 5 estão em uso desde um instante anterior $i - 1$ e cada RU tem um processo já previsto para ser alocado em um nó da rede. Observa-se pela Figura 13.b) a tentativa de alocação de processos em todos os nós com demandas, porém, o último RU não é contemplado pois o mesmo sofreu um estrangulamento (ou *lockdown*) pelo roteamento dos processos dos outros RUs. Em um simulador estático os nós 4 e 6 estariam, até o final da simulação, inutilizados. Diferentemente, em um simulador dinâmico, passariam-se instantes de tempo até que os nós terminassem de ser utilizados e ficassem “livres” novamente. Para uma clareza maior dos pormenores do programa, uma representação em vetores encontra-se na Figura 14.

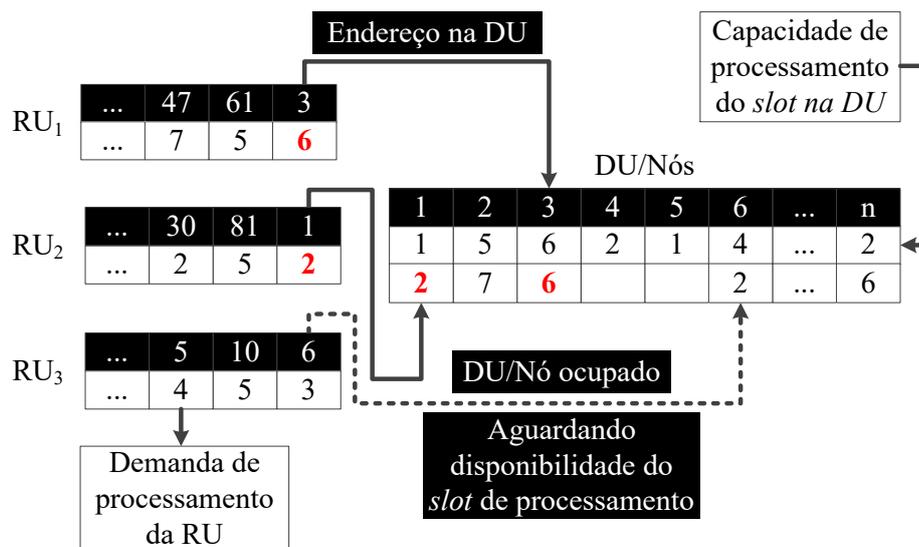


Figura 14 – Representação vetorial de alocação dos processos.

A Figura 14 apresenta uma situação análoga à da Figura 13, mas com mais detalhes frente à concepção do programa. Cada RU possui uma bateria de processos com seus destinos já designados e os DUs são caracterizados por um endereço e pela capacidade de processamento. A cada instante simulado os DUs “resolvem” a quantidade de operações possíveis e os RUs tentam encontrar um caminho livre até o DU para qual seu processo precisa ser enviado. No caso, o RU₁ e o RU₂ conseguem encontrar um caminho livre para seus nós de destino (nós 3 e 1, respectivamente), mas o RU₃ encontra o nó que deveria enviar (nó 6) ocupado. No próximo instante o RU₁ tentará alocar seu processo no nó 61 e o RU₂ no nó 81, o RU₃ continuará tentando encontrar um caminho livre até o nó 6 que estará “livre”, pois já terá terminado o processo que está computando.

3.3 Definição de “Eficiência” e a Função Objetivo

A partir de um modelo com tal capacidade dinâmica, procurou-se atacar a possível ineficiência de projeto de uma rede de DUs. Define-se ineficiência de projeto um modelo superdimensionado, um modelo que consegue atender às expectativas e requisitos, mas que é tão caro que se torna irrealizável ou simplesmente ineficiente do ponto de vista do investimento. Assim, o objetivo do simulador é minimizar a quantidade de elementos ociosos por unidade de tempo, adicionando penalidades relativas às capacidades de processamento de cada nó inutilizado. A fórmula que o simulador aplica à cada cenário simulado é dada

por

$$F_{custo} = \sum_{k=0}^t \sum_{n=1}^m P_{o_{n,t}}, \quad (2)$$

onde a função custo (também chamada de função objetivo) de cada solução é calculada de forma iterativa, sendo que a cada instante de tempo é somada toda a capacidade de processamento P_o de todos os m elementos ociosos na rede. Isso ocorre a cada k unidade de tempo, até o instante final t , o qual representa o tempo total para atender a todos os processos.

A avaliação do custo de uma solução foi feita considerando o maior uso da rede e o atendimento de todos os processos demandados. Como já é possível de ser observado, o problema foi construído de uma forma genérica em relação ao tempo de processamento dos serviços, portanto, a cada constante unitária de tempo é multiplicada a soma da capacidade de processamento ociosa. Dessa forma, para cada cenário simulado é obtida uma curva de aproveitamento dos recursos pela variação do nível de *functional split* aplicado. Para uma visualização mais clara do projeto é apresentado o fluxograma do simulador na Figura 15.

No fluxograma da Figura 15 são apresentados os principais passos e recursões do algoritmo desenvolvido. No bloco denominado “Gera solução para cada RU” é feito o processamento que será apresentado do Capítulo 4, que será um fluxograma e uma contribuição por si só. Existem também o laço que demonstra os vários valores de *functional split* sendo testados para cada arquitetura, e o laço que é responsável por verificar se todos os processos foram atendidos pelo algoritmo.

Nessa versão do modelo não são simulados o tempo e taxa de erro relativo à transmissão dos dados entre DUs e entre RUs e DUs. Como o objetivo é averiguar as variáveis de interesse a fim de otimizar o uso dos equipamentos, a complexidade trazida por uma taxa de possíveis erros de transmissão torna-se irrelevante. Os tempos de processamento são, em média, centenas de vezes superiores às latências originárias das transmissões, portanto, tendo pouquíssimo impacto na resultado final. É importante ressaltar também que o simulador trabalha apenas com *upload* de pacotes, ou seja, a simulação apenas usa a rede para transmitir dados no sentido dos RUs para os DUs.

Outra questão que precisa ser discutida é o processo utilizado para endereçar cada processo de cada RU ao seu nó de processamento de interesse. Como ordenar e propor uma solução que seja interessante de ser testada para um problema com essas características? A resposta para essa pergunta é abordada no Capítulo 4.

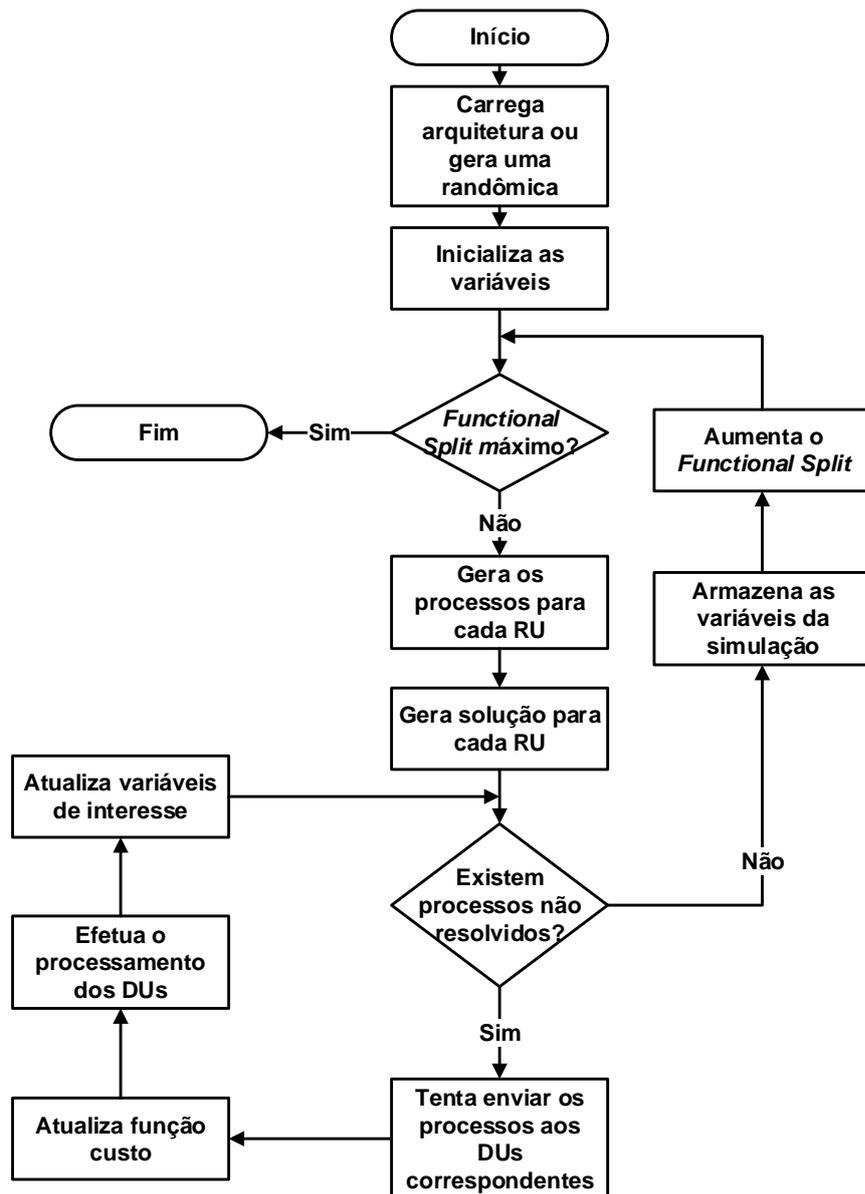


Figura 15 – Fluxograma do simulador desenvolvido.

4 O Algoritmo Proposto para a Alocação dos Recursos

Num cenário onde pretende-se otimizar o uso dos recursos, a lógica de alocação destes torna-se extremamente importante. Neste capítulo serão discutidas as minúcias do algoritmo utilizado para tal feito, bem como uma proposta apresentada visando melhorar o resultado de algoritmos de objetivos similares. Inicialmente será apresentado o problema a ser resolvido e posteriormente as discussões decorrentes da solução proposta.

4.1 O Problema a Ser Resolvido

O problema apresentado é relativamente simples:

Dada uma bateria “x” de processos de custo variável e tendo disponível uma quantidade “y” de núcleos de processamento com ligados randomicamente entre si, qual o melhor núcleo para ser enviado cada um dos processos?

Considerando apenas a pergunta, é possível observar o caráter combinacional do problema a ser enfrentado. Apesar de serem problemas simples, quando se está trabalhando com variáveis grandes, é recomendado o uso de heurísticas para atacar o problema, principalmente se o cálculo das função objetivo for demorado de ser resolvido. Quando é adicionada a complexidade relativa às mudanças temporais dos estados dos núcleos de processamento, o problema em questão se torna distante de um problema puramente combinacional: a reutilização dos recursos passa a ser imperativo para um resultado eficiente.

4.2 A Solução Proposta

Como já dito na Subseção ??, o algoritmo escolhido para para gerar soluções para o problema é o GRASP. Mas essa escolha gera outra questão: como num algoritmo guloso qualquer, no método GRASP é feita uma avaliação e classificação prévia dos candidatos à solução. Em outras palavras, como é possível classificar um nó de processamento como “melhor” ou “pior” para computar um determinado processo? Sem a possibilidade de uma avaliação prévia de como estará a dinâmica da rede no momento que esta será utilizada, optou-se por fazer uma classificação através da razão entre o tempo de processamento dos processos e a capacidade de processamento dos nós. Um diagrama exemplificando algumas

ordenações está disposto na Figura 16, são feitas ordenações para dois exemplos: para o processo “c” e para o processo “a”.

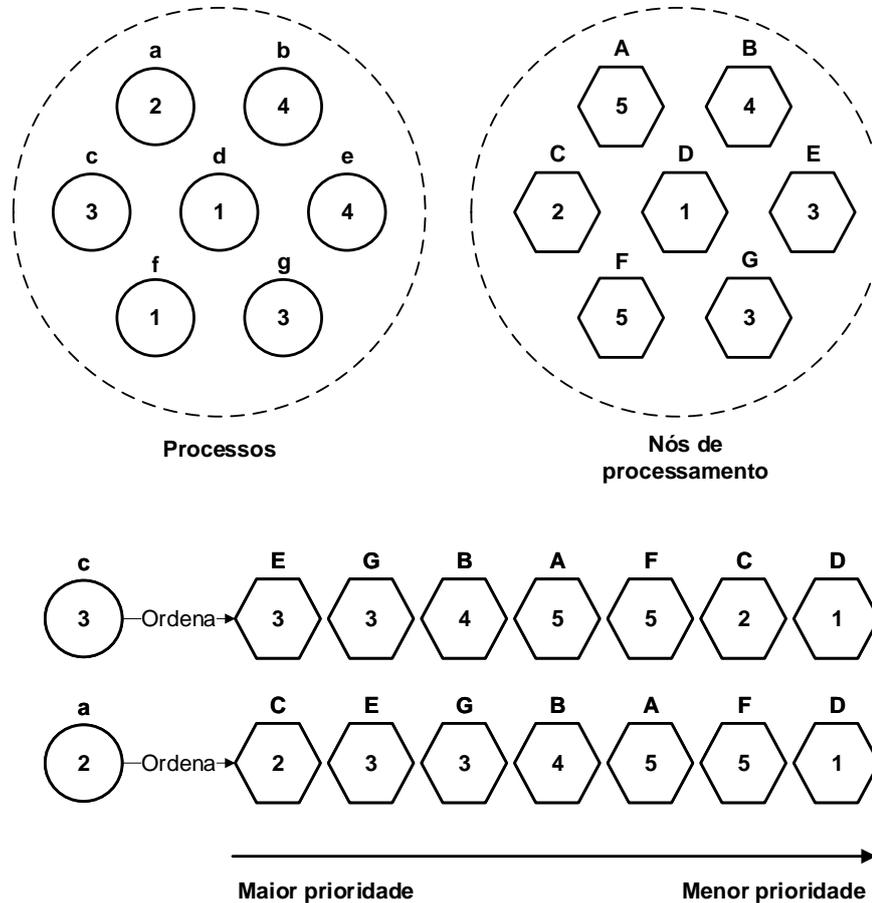


Figura 16 – Exemplos de ordenação de candidatos.

Na Figura 16 é possível observar dois conjuntos distintos: um grupo de processos a serem resolvidos e um grupo de nós de processamento para resolvê-los, bem como seus custos e capacidades, respectivamente. A partir de um processo é possível avaliar, pela capacidade dos nós disponíveis, quais seriam os mais indicados a receberem tais processos. Os nós de maior prioridade são os que possuem uma custo de processamento igual à capacidade de processamento do nó, porque estes conseguiriam resolver os processos em um único passo temporal sem superdimensionamento. Posteriormente, os nós com capacidade superior ao custo do processo são ordenados de forma crescente, estes também demorariam apenas um intervalo de tempo para completar o trabalho mas são superdimensionados, seriam mais indicados para processos mais onerosos. Por último são ordenados os nós com capacidade inferior de forma decrescente, estes demoram mais que um instante de tempo para realizar o processamento, assim ficam em estado de “em uso” durante mais tempo e potencialmente obstruindo certos caminhos.

A partir de tal ordenação é possível aplicar uma política gulosa ou, como aplicado no algoritmo desenvolvido, uma política gulorandômica. O algoritmo faz uma seleção randômica dos 4 primeiros colocados da ordenação. Essa característica randômica confere um certo grau de liberdade, gerando um pouco de diversidade toda vez que é gerado um conjunto de possíveis soluções. Quando um dos candidatos é selecionado este é retirado do conjunto de candidatos pois estará, mesmo que apenas por um instante, sendo ocupado pelo processo que será entregue.

Essa retirada do candidato do conjunto gera um problema já discutido: em um algoritmo dinâmico os nós ficam em estado “ocioso” novamente após um determinado tempo, qual estratégia é possível de ser implementada sem que seja feita a própria simulação do sistema? Uma outra questão possível de ser atacada é o uso dos equipamentos durante a ligação entre os RUs e os DUs finais, é possível que o sistema torne-se inutilizável dependendo do ponto de origem e final dessa ligação, todos os recursos que compõem o caminho ficam em estado de “em uso”. A solução adotada foi outra contribuição deste trabalho: a proposta da “delimitação de vizinhanças”.

A partir de um determinado ponto de origem é delimitada uma “vizinhança”, ou “horizonte de observação”, a partir dos elementos ligados diretamente ou indiretamente ao ponto de origem. A partir de um exemplo onde o sistema é representado em um grafo, a geração de soluções é aplicada em um subgrafo que pode ser ordenado de forma mais rápida e é potencialmente menos danoso à saúde da interconexão do sistema. No entanto, esses grafos menores podem não possuir elementos suficientes para o endereçamento de todos os processos.

4.3 O GRASP com Delimitação de Vizinhanças

Esse problema é resolvido justamente pela inserção do aproveitamento de recursos da solução. A partir do momento que o horizonte de observação encontra-se completamente utilizado, o tamanho da vizinhança aumenta e os candidatos anteriormente excluídos da lista de seleção são reinseridos para, possivelmente, serem reeleitos. Esse aumento de vizinhança é realizado apenas quando todos os candidatos estão ocupados e ainda existem processos a serem computados, dependendo da arquitetura do sistema em questão é possível que não aconteça. Um exemplo gráfico pequeno da delimitação de vizinhanças é mostrado na Figura 17 e o exemplo de sua integração com o código do Algoritmo 2 em pseudocódigo no Algoritmo 3.

Na Figura 17 é observado um gráfico representativo de uma arquitetura genérica, onde o nó 1 (em verde) é o único RU e os outros 14 pontos são nós de processamento. A partir do ponto 1 em a) é mostrado em vermelho os nós que são vizinhos de “grau 1” com o mesmo, ou seja, vizinhos diretos. Para demonstrar a variação da vizinhança são mostrados

(a) Grafo com estrutura de vizinhança 1 (b) Grafo com estrutura de vizinhança 2

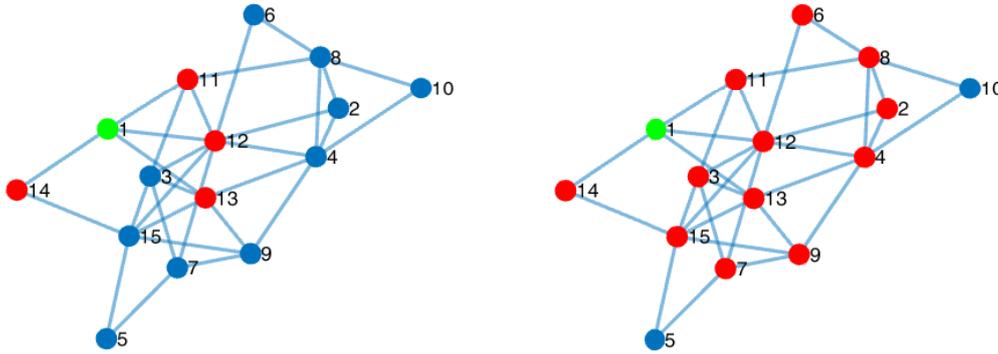


Figura 17 – Delimitação de vizinhança (em vermelho) para um RU (em verde).

Algoritmo 3 Delimitação de vizinhanças na geração de soluções

```

1: Entrada: Candidatos
2: Saída: Solucao
3: GrauDaVizinhanca  $\leftarrow$  1;
4: while Solucao  $\neq$  Completa do
5:   SubCandidatos  $\leftarrow$  DelimitaVizinhanca(Candidatos, GrauDaVizinhanca);
6:   while SubCandidatos  $\neq$  NULL do
7:     CandidatosOrdenados  $\leftarrow$  Avalia(SubCandidatos);
8:     Selecionado  $\leftarrow$  SorteiaCandidato(CandidatosOrdenados);
9:     SubCandidatos  $\leftarrow$  ExcluiSorteado(SubCandidatos);
10:    Solucao  $\leftarrow$  AtualizarSolucao(Solucao);
11:   end while
12:   GrauDaVizinhanca ++;
13: end while
14: return Solucao;

```

em vermelho os vizinhos de “grau 2” em b), estes são os nós que se conectam com o RU em até duas ligações de distância. No Algoritmo 3 é possível observar a integração do método com o Algoritmo 2, o método é aplicado como explicado anteriormente, mas apenas em um subconjunto do total possível. Para uma melhor visualização, é apresentado o fluxograma do algoritmo proposto na Figura 18.

A partir da Figura 18 é possível observar o ciclo interno de gerenciamento dos DUs e o gerenciamento das vizinhanças, esse último somente acontece no GRASPDV. É importante ressaltar que esse fluxograma é o que acontece internamente no bloco “Gera solução para cada RU” apresentado na Figura 15. No caso do GRASP puro existe uma conexão direta entre quando todos os DUs estão ocupados com o ato de resetar o estado de todos os DUs e não existem os blocos para inicializar as vizinhanças. Para um contraste e validação da proposta da estratégia da delimitação de vizinhanças foram feitas simulações nos mesmos cenários utilizando-se a proposta apresentada e o GRASP “puro”. Além disso,

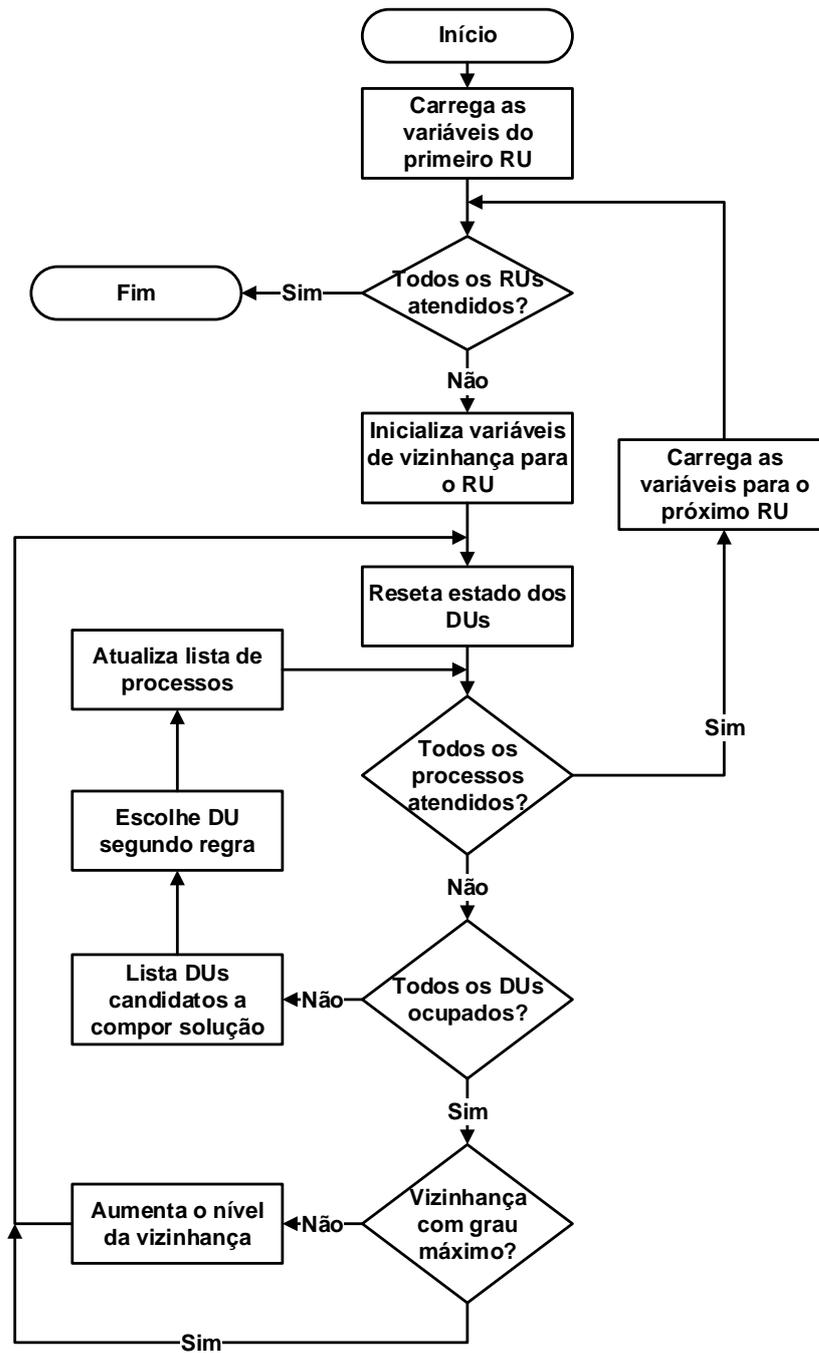


Figura 18 – Fluxograma do GRASP com delimitação de vizinhanças (GRASPDV).

foram variados os parâmetros construtores dos cenários e observou-se qual o *funcional split* que utiliza os recursos com maior eficiência. A apresentação dos cenários e suas variações, bem como os resultados obtidos, são tratados no Capítulo 5.

5 Análise dos Resultados Obtidos via Simulação Numérica

Os massivos modelos implementados demandam muito tempo de simulação, o que retarda a análise de variadas opções. Assim, o uso de heurísticas para investigar as soluções e testar os modelos torna-se imperativo. A análise dos resultados foi dividida em duas partes: uma para os resultados que foram gerados para um contraste para a proposta da delimitação de vizinhanças, e outra para a análise dos fatores determinantes na definição de um *functional split* ótimo, no que diz respeito ao uso eficiente da rede de DUs.

5.1 A Proposta da Delimitação de Vizinhanças

Inicialmente foram feitas comparações para a validação da proposta de geração de soluções. Assim, foram preparados alguns cenários para a comparação dos resultados entre os métodos. Esses cenários variaram a capacidade de processamento da rede de DUs (variando a quantidade de núcleos de processamento do sistema) e variando a quantidade de processos demandados (variando a quantidade de RUs na arquitetura). As variações nas características construtivas das arquiteturas estão dispostas no Quadro 2.

Quadro 2 – Variação dos cenários simulados para comparação entre os modelos de geração de solução.

Variável	Mínimo	Máximo	Intervalo
Quantidade de nós de processamento	150	210	10
Quantidade de RUs	15	45	5
Probabilidade de ligação entre elementos	15%	15%	–
Tamanho da lista de processos por RU	75	75	–
Média de custo de cada processo (<i>Functional Split</i>)	1	60	1

Observa-se na última linha do Quadro 2 que o custo de cada processo, que no modelo está associado com as opções *functional split*, varia de um valor unitário até 60. Esta variação foi adotada no modelo pois assim é garantido um estresse do sistema, observado uma utilização praticamente total de todos os dispositivos.

Para o efeito de comparação entre a proposta do GRASP com delimitação de vizinhanças e a do GRASP “puro”, para cada cenário os algoritmos foram simulados 60 vezes. O armazenamento da melhor solução encontrada em cada cenário tende a uma curva de convergência, conforme ilustra a Figura 19 que apresenta comparação destas curvas de ambos os métodos em cenário típico. O GRASP refere-se à curva do método puro e a GRASPVD refere-se ao GRASP com “Delimitação de Vizinhanças”.

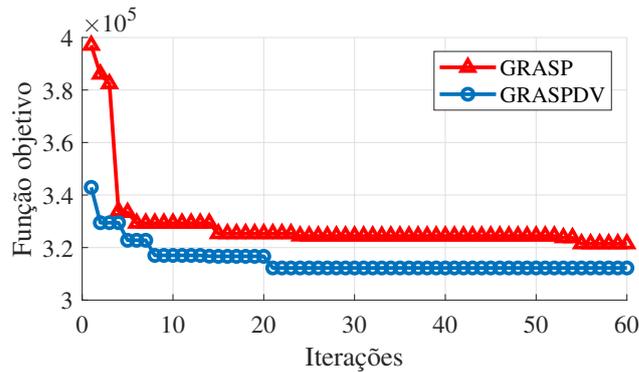


Figura 19 – Convergência típica da função objetivo para ambas as metaheurísticas.

Observa-se na Figura 19 que a proposta é capaz de gerar soluções mais eficientes, que possuem convergência mais acentuada que o método tradicional. A hipótese do método ser mais eficiente mostrou-se verdadeira para mais da metade das arquiteturas testadas. Pelo Quadro 2 é possível observar que existe um total de 49 cenários diferentes.

A comparação de desempenho média percentual entre os algoritmos é mostrada na Figura 20.a), enquanto que a Figura 20.b) mostra a diferença percentual do tempo médio de geração de soluções. Consegue-se constatar na Figura 20 uma melhora modesta na média dos resultados quando comparadas as duas técnicas. Cerca de 60% dos cenários (30 de 49) obtiveram resultados superiores pela técnica proposta. Este resultado é esperado pois, estima-se que a preferência dada aos elementos mais próximos melhore o desempenho do sistema, quando sujeito à grandes cargas de processamento. No entanto, também é possível notar uma perda no que se diz respeito à tempo de execução.

A técnica deveria, em tese, diminuir o tempo de geração das execuções pois utiliza uma heurística clássica que divide um problema complexo em uma versão reduzida mais simples [Sorensen et al. 2017]. Uma explicação possível para este fato é que as arquiteturas testadas não são as mais recomendadas para se beneficiar deste efeito. Apesar das arquiteturas serem muito maiores que a maioria testada, os grafos que as representavam são muito coesos, possuem muitas ligações entre seus elementos. Em alguns testes observou-se que na maioria dos cenários, todo o sistema era contemplado em, no máximo, vizinhanças de nível 4. Imagina-se que o ideal para demonstrar esse efeito prevê grafos maiores que as simuladas, ou onde a variação do nível das vizinhanças impactasse menos fortemente a quantidade de elementos contemplados.

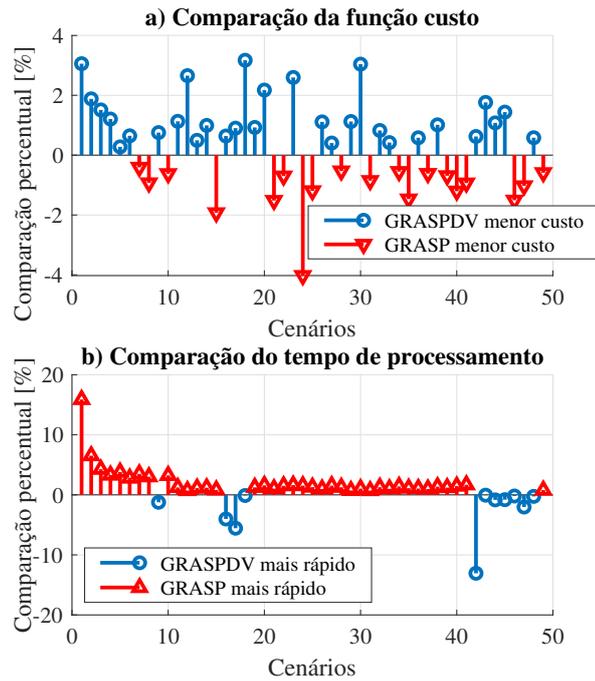


Figura 20 – Comparação em a) da função custo média e em b) do tempo de execução médio entre os métodos para cada um dos cenários.

No entanto, é difícil visualizar o impacto das características construtivas geradoras nos resultados obtidos durante as simulações. Portanto, quando esses mesmos conjuntos de valores são observados em um gráfico 3D, é possível analisar a relação dos resultados com as variações nas arquiteturas. Na Figura 21 são apresentados os resultados comparativos da função custo média entre as técnicas, enquanto que a Figura 22 ilustra comparativos entre os tempos de execução médio entre os métodos, as quais representam outras formas de visualizar os resultados da Figura 20. Portanto, assim como na Figura 20, os resultados negativos são consequência da comparação percentual entre os métodos, e obtidos fazendo

$$CP_k = \frac{GRASPDV_k - GRASP_k}{GRASP_k}, \quad (3)$$

sendo CP a comparação percentual e k a variável custo ou tempo de processamento.

Pela inspeção da Figura 21, observa-se que não há um padrão muito definido a ser observado. Apesar das arquiteturas menores em termos de núcleos de processamento, em geral apresentarem um resultado mais satisfatório ao método GRASPDV, a curva apresenta uma tendência de subida nos seus últimos resultados. Assim, entende-se pelo padrão caótico obtido que, não é possível afirmar que o número de nós de processamento ou o número de antenas possui qualquer influência significativa no resultado comparativo entre as técnicas dentro do universo observado. Apesar disso, ao observar a Figura 22 percebe-se um padrão no que se diz respeito ao número de nós de processamento. Como na hipótese levantada anteriormente, o padrão leva a crer que o GRASPDV apresentará melhores resultados que o GRASP em termos de tempo de processamento, quanto maiores

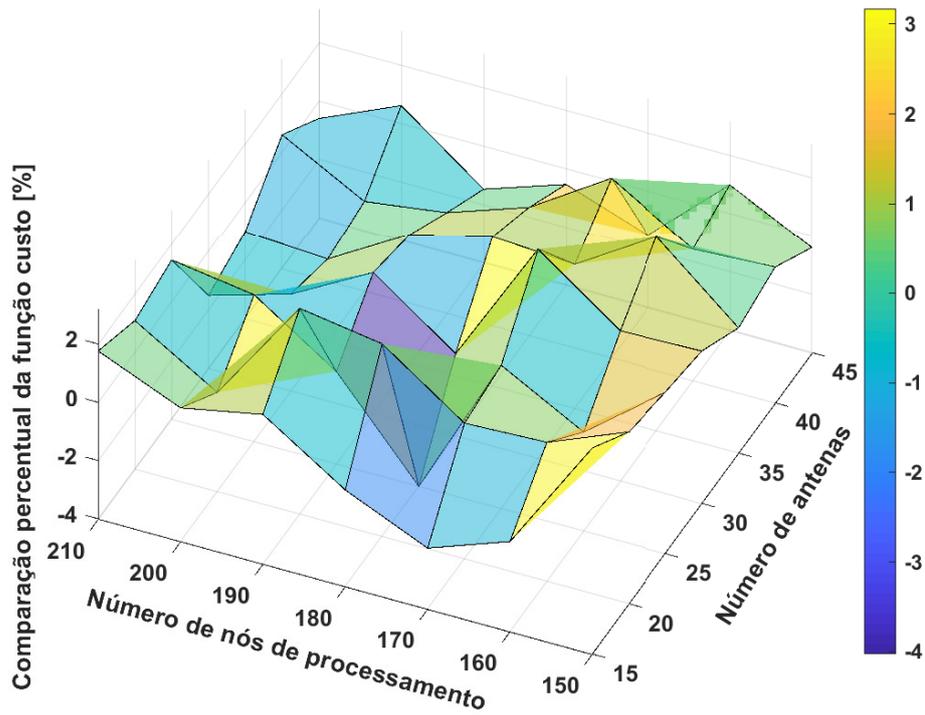


Figura 21 – Comparação da função custo médio entre os métodos para cada um dos cenários.

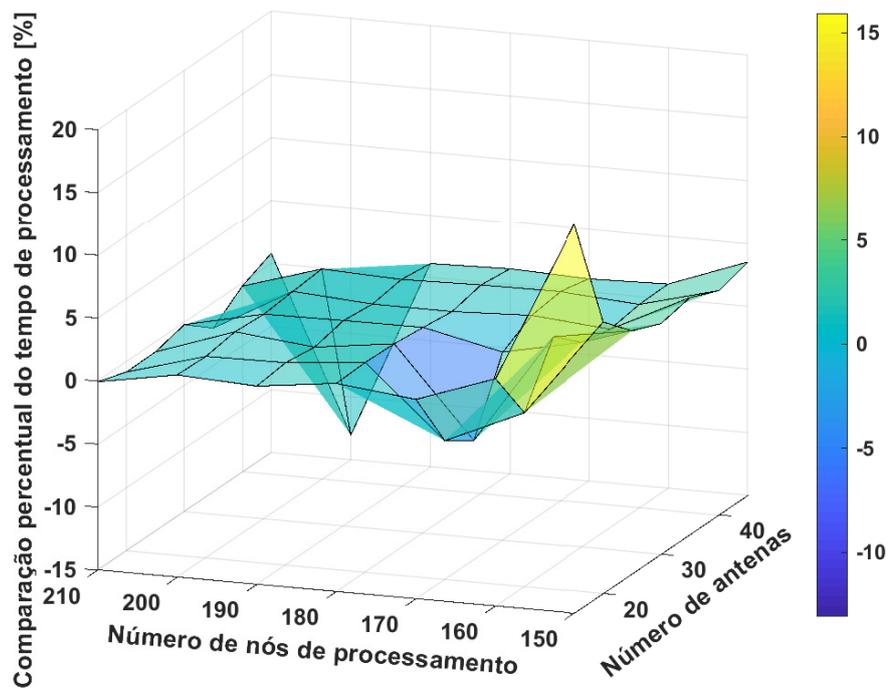


Figura 22 – Comparação da função custo médio entre os métodos para cada um dos cenários.

forem as arquiteturas em que for aplicado. No entanto, excetuando-se alguns resultados anômalos, o padrão demonstra-se praticamente estável à frente da variação do número de antenas dentro dos cenários simulados.

5.2 As Variáveis de Interesse do *Functional Split*

O intuito da construção do simulador foi também o de observar e verificar o comportamento de uma rede de DUs, e a relação de suas características construtivas com seu *functional split* ótimo em *upload*. Por si só esta afirmativa já gera algumas dúvidas, pois o sentido da palavra “ótimo” é muito amplo e pode significar várias coisas diferentes. Nesta dissertação este termo remete ao uso mais eficiente possível dos equipamentos.

Eficiência neste contexto, por sua vez, significa a utilização do equipamento em sua capacidade máxima, independentemente de qual ela seja. Para ilustrar isto, foi utilizado um resultado típico obtido de uma das arquiteturas avaliadas. O perfeito entendimento dessa imagem é de extrema importância para a concepção das conclusões tomadas a partir deste momento. Para tanto, considere o resultado mostrado na Figura 23.

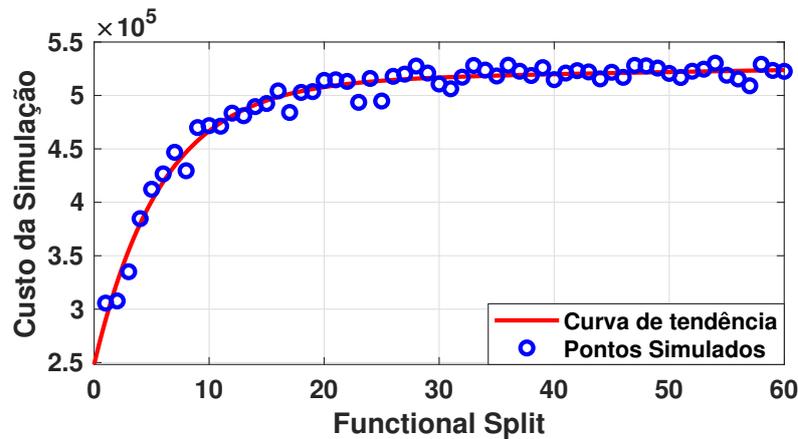


Figura 23 – Resultados simulados em um cenário de *upload* a partir de vários valores de *functional splits*.

A curva apresentada na Figura 23 possui um comportamento exponencial, com sua região linear em até um valor 6 do *functional split*, e entra na região de estabilidade quando próximo do valor 20. Para identificar o resultado ótimo encontrado, é necessário recordar a natureza da função objetivo em questão. Durante a simulação é somada, a cada instante de tempo, a quantidade de elementos ociosos na rede a fim de diminuir esse parâmetro. Convém ressaltar que o melhor valor não encontra-se próximo a um valor nulo de *functional split*, apesar de realmente ser a situação onde têm-se menos elementos ociosos. Isto acontece pois é a situação onde o sistema gasta menos tempo de processamento. É óbvio concluir que o menor tempo possível de processamento é encontrado quando não há nada a ser processado. Observando-se a região de estabilidade da curva constata-se que, se

a função custo fosse apenas por tempo de processamento, é de se esperar que a mesma tivesse um comportamento aproximadamente linear em toda a sua extensão. Logo, é no mínimo curioso a mesma não apresentar um comportamento próximo a este. A função custo utilizada faz um somatório do tempo de processamento ponderado pela quantidade de elementos ociosos.

Assim, a região de estabilidade na curva representa uma região onde, apesar do tempo de execução mais elevado (justamente o propósito do aumento do valor do *funcitonal split*), o custo não aumenta de forma linear pois foram encontrados poucos instantes de tempo com muitos elementos ociosos. Portanto, a região onde tem-se a utilização da maior quantidade de elementos da rede por instante de tempo é justamente a região de estabilidade. Apesar disso, é necessário eleger um valor como ótimo de forma consistente e com uma análise correta do que foi apresentado pelos resultados numéricos.

Entende-se que quando o sistema encontra-se completamente utilizado, há pouco espaço para flutuações possíveis no tráfego da rede, e os valores de mais altos de *functional split* deixam o sistema sem uma bem-vinda capacidade de expansão. Estimou-se assim, que o melhor valor possível está na iminência entre as duas regiões de linearidade e estabilidade, onde a rede de DUs estaria sendo utilizada de forma ampla mas que ainda haveria espaço para tais flutuações. A decisão definida consistiu em encontrar o ponto mais próximo onde uma curva de tendência traçada a partir dos pontos simulados chegasse a um valor de derivada unitária. Para o resultado da Figura 23 este valor é o de *functional split* igual a 9.

Dito isto, apesar da modelagem utilizada para as simulações do *functional split* não necessariamente ser uma transposição em código dos comandos executados pelo equipamento real, será possível observar a variação de uma resposta ótima pela alteração das variáveis de interesse. Será possível verificar quais elementos impactam de forma significativa nessa escolha, logo, esse resultado é muito importante para a definição do ajuste da técnica quando uma arquitetura em questão estiver sendo projetada ou atualizada. Observou-se que quando utilizada esta forma de definir um resultado ótimo de *functional split* para a simulações, os valores não alcançavam números muito elevados. Portanto, o valor máximo simulado foi reduzido para 30, conforme verificado nos valores apresentados no Quadro 3.

Os aspectos abordados incluem todos os analisados para o método da delimitação de vizinhanças, mas no caso atual os valores representativos das características do sistema são muito importantes. Logo, reiterando, a quantidade de nós de processamento representam ao mesmo tempo uma maior capacidade de processamento da rede de DUs e sua capacidade de processamento paralelo. A quantidade de RUs representa a quantidade de tráfego de dados demandados, o que é traduzido pela quantidade de processos que as DUs terão que processar. A probabilidade de ligação entre os elementos significa uma maior quantidade de ligações entre os nós de processamento, que representam equipamentos com uma maior

Quadro 3 – Variação dos cenários simulados para definir as variáveis significativas para o projeto de arquiteturas.

Variável	Mínimo	Máximo	Intervalo
Quantidade de nós de processamento	150	240	10
Quantidade de RUs	15	45	5
Probabilidade de ligação entre elementos	10%	15%	5%
Tamanho da lista de processos por RU	75	75	–
Média de custo de cada processo (<i>Functional Split</i>)	1	30	1

capacidade de ligações em seus barramentos internos. Por fim, o *functional split* representa a média do custo de cada processo, e impactará diretamente na quantidade de tempo que o sistema será utilizado para computar todos os processos.

Após a realização das simulações em todos os cenários apresentados no Quadro 3, foi aplicado o método descrito para a seleção do melhor *functional split* em cada um deles. Com a variação dos parâmetros gerando um total de 140 cenários diferentes, a Figura 24 ilustra o impacto dos aspectos construtivos em uma arquitetura com 15% de ligações entre seus nós. A Figura 25 facilita a observação do impacto dos aspectos construtivos em uma arquitetura com 10% de ligações.

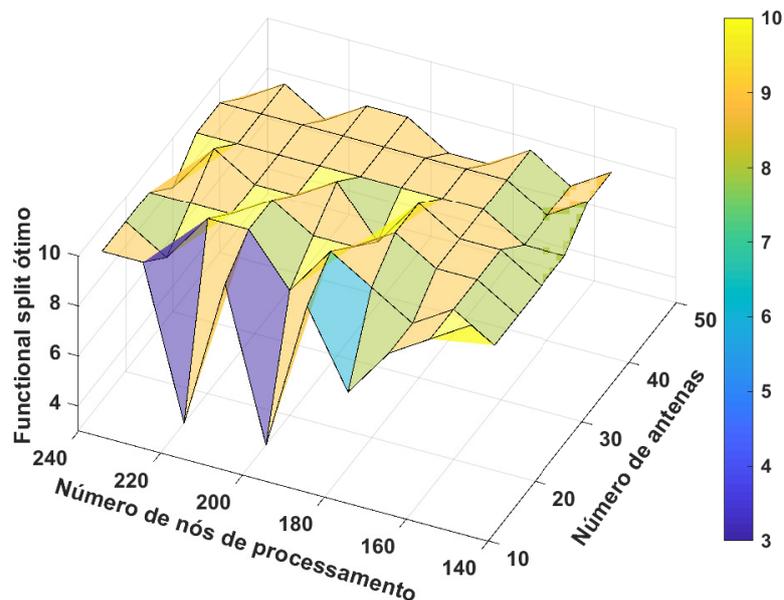


Figura 24 – *Functional split* ótimo para *upload* nos cenários com 15% de ligação.

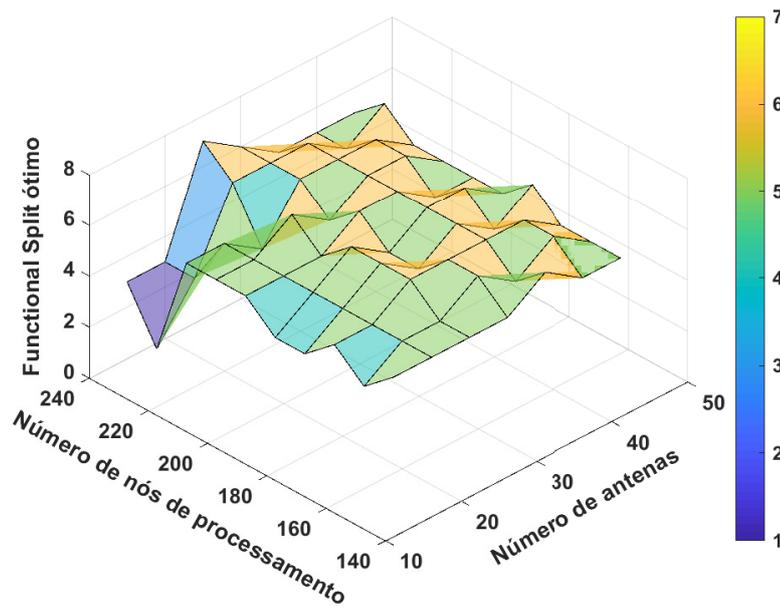


Figura 25 – *Functional split* ótimo para *upload* nos cenários com 10% de ligação.

Observando as Figuras 24 e 25 em conjunto, é possível visualizar certas tendências nos resultados que seriam difíceis de serem notados separadamente. Distingui-se uma leve queda no ajuste do *functional split* nas situações em que são utilizados os valores mínimos de antenas simulados. No entanto, quando observado os efeitos da capacidade de processamento de DUs, não é possível notar grandes alterações nos ajustes ótimos dentro das proporções simuladas.

A Figura 26 apresenta a comparação dos resultados entre arquiteturas de 15 e 10 % de ligação de seus nós. O grande impacto proporcionado pelo aumento ou diminuição de interconectividade dos sistemas é evidente na Figura 26. Dentro das especificações testadas, aparentemente a densidade de interconexões é o fator determinante na definição de uma tendência no *functional split* ótimo dos sistemas. Resume-se no Quadro 4 as principais conclusões qualitativas retiradas mediante observação dos testes realizados.

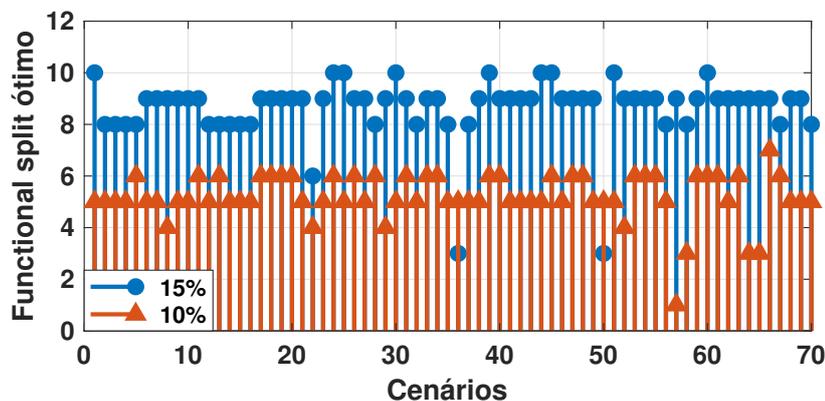


Figura 26 – *Functional split* ótimo para *upload* nos cenários com 10% e 15% de ligação.

Quadro 4 – Resumo da análise dos impactos das variáveis em *upload* nos cenários para a escolha de um *functional split* ótimo no universo observado.

Variável	Impacto na escolha do <i>functional split</i> ótimo
Quantidade de nós de processamento	Não significativo
Quantidade de RUs	Pouco significativo
Ligação entre elementos	Muito significativo

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

A quinta geração de tecnologias móveis, o 5G, está no momento sendo implementado experimentalmente para uma futura expansão em larga escala. A utilização da tecnologia sem fio aumenta a passos exponenciais, e as previsões prometem para o 5G uma taxa de transferência média por usuário de 575 Mbps no ano de 2023. Assim, torna-se imperativo a mudança de estratégias e criação de novos procedimentos para lidar com um aumento tão abrupto de demanda. Uma das tecnologias propostas concentra-se no fim da última milha, na rede de acesso RAN. Estas redes móveis são responsáveis por levar os pacotes transmitidos ou requisitados pelos usuários das antenas para as partes mais internas e dispositivos de borda. Neste segmento de rede, os elementos e meios de transmissão precisam resolver e encaminhar um fluxo muito grande de dados. Assim, tem-se a necessidade de técnicas que visam melhorar o uso dos dispositivos e dos meios de transmissão.

Uma das técnicas que foram sugeridas para a resolução de alguns desses problemas foi o *functional split*. De uma forma simplificada, esta técnica consiste em fracionar atribuições classicamente atreladas ao elemento de rede BBU até uma unidade DU e a unidade remota RU. Esta divisão pode ser feita em vários níveis, com cada um trazendo uma relação de custo e benefício para diversos aspectos da rede em si. Neste trabalho foi proposto uma outra forma de avaliar os equipamentos instalados em uma determinada arquitetura. Foi desenvolvido um simulador dinâmico capaz de observar essa característica em um sistema, com o objetivo foi simular várias arquiteturas e, variando o valor do *functional split* aplicado, definir qual nível traria os melhores resultados para essa característica.

Aspectos construtivos dessas arquiteturas foram variados com o intuito de observar seus impactos nas definições nos ajustes dos melhores níveis do *functional split*. Este conhecimento pode ser utilizado por projetistas ao se definir equipamentos, tamanho e ajustes de funções nas redes visando a eficiência e também agilizar investigações em testes futuros. As características simuladas foram capacidade de processamento da rede de DUs, quantidade de antenas da rede e interconectividade entre os equipamentos. As características foram de nenhum impacto, pouco impacto e muito impacto, respectivamente. A de maior impacto, com uma variação de apenas 5%, resultou em uma alteração de 4 níveis no valor ótimo do *functional split* ótimo do modelo.

Intrinsecamente associado ao se fazer um simulador para essa região, é responder qual a melhor forma de distribuir os pacotes para os elementos que irão processá-los. Portanto, tem-se um problema que, para proporções massivas, torna-se praticamente impossível de ser resolvido de forma exata. Como foi o objetivo simular tais redes, fez-se necessária a utilização de heurísticas para resolver tal problema de atribuição. Uma

metaheurística foi proposta para resolver esta questão, em que foi utilizado um sistema de definição de vizinhanças para cada antena distribuidora. A estratégia foi aplicada em conjunto com o método construtor do GRASP, sendo então chamado de GRASPDV (GRASP com Delimitação de Vizinhanças). Este novo método foi testado em termos de qualidade de soluções e tempo de execução. Os resultados foram contrastados com aspectos das redes as quais foram aplicados, e o intuito foi o de observação de indícios das características favoráveis ou desfavoráveis para a utilização do GRASPDV nas mesmas. O GRASPDV mostrou-se mais favorável que o GRASP para a qualidade das soluções em 60% dos casos, mas o seu tempo de processamento foi maior. No entanto, pela observação dos resultados, foi constatado que o GRASPDV torna-se mais vantajoso em tempo de processamento quanto maiores forem as arquiteturas simuladas.

A acuidade do simulador pode ser melhorado, assim como a modelagem do *functional split* adotada, já que esta não é capaz de dar resultados específicos para a definição em projeto. Para o prosseguimento da pesquisa sugere-se uma diretriz que permite realizar um método de geração de soluções para o *download*, e, conseqüentemente, verificar como os aspectos construtivos afetam essa opção e transmissão. Ainda nas opções de outros usos para o mesmo simulador, existe a possibilidade de testar-se outros aspectos, como a quantidade de processos por antena.

Referências

3GPP 2016 3GPP. *Technical Specification Group Radio Access Network; Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (Release 14)*. 3GPP, 2016. Acessado: 2019-02-20. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/DynaReport/38801.htm>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.

Alabbasi et al. 2018 Alabbasi, A.; Wang, X.; Cavdar, C. Optimal processing allocation to minimize energy and bandwidth consumption in hybrid cran. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, v. 2, n. 2, p. 545–555, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 4, 17 e 23.

Bartelt et al. 2015 Bartelt, J.; Rost, P.; Wubben, D.; Lessmann, J.; Melis, B.; Fettweis, G. Fronthaul and backhaul requirements of flexibly centralized radio access networks. **IEEE Wireless Communications**, v. 22, n. 5, p. 105–111, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

Chanclou et al. 2013 Chanclou, P.; Pizzinat, A.; Le Clech, F.; Reedeker, T.; Lagadec, Y.; Saliou, F.; Le Guyader, B.; Guillo, L.; Deniel, Q.; Gosselin, S.; Le, S. D.; Diallo, T.; Brenot, R.; Lelarge, F.; Marazzi, L.; Parolari, P.; Martinelli, M.; O’Dull, S.; Gebrewold, S. A.; Hillerkuss, D.; Leuthold, J.; Gavioli, G.; Galli, P. Optical fiber solution for mobile fronthaul to achieve cloud radio access network. In: **2013 Future Network Mobile Summit**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–11. Citado na página 13.

Chang et al. 2017 Chang, C.; Nikaein, N.; Knopp, R.; Spyropoulos, T.; Kumar, S. S. Flexcran: A flexible functional split framework over ethernet fronthaul in cloud-ran. In: **2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7. Citado na página 4.

Chang et al. 2016 Chang, C.; Schiavi, R.; Nikaein, N.; Spyropoulos, T.; Bonnet, C. Impact of packetization and functional split on c-ran fronthaul performance. In: **2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 23.

Cisco 2020 CISCO. **Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper**. Cisco, 2020. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>>. Citado na página 2.

dos Santos 2017 dos Santos, J. G. **Radio over fibre techniques for backhaul and fronthaul**. 238 p. Tese (Doutorado) — Technical University of Berlin, 2017. <<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6521>>. Citado 5 vezes nas páginas 2, 7, 12, 15 e 17.

Duan et al. 2016 Duan, J.; Lagrange, X.; Guilloud, F. Performance analysis of several functional splits in c-ran. In: **2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. Citado na página 4.

Ericsson 2019 ERICSSON. Ericsson mobility report. **Ericsson Mobility Report**, Nov 2019. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/4acd7e/assets/local/mobility-report/documents/2019/emr-november-2019.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas xiii e 1.

- Feo e Resende 1995 FEO, T.; RESENDE, M. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, v. 6, p. 109–133, 03 1995. Citado na página 19.
- Hichem et al. 2019 Hichem, K.; Sliman, L.; Nabli, L. Grasp-based approach for minimum initial marking estimation in labeled petri nets. In: **2019 15th International Conference on Semantics, Knowledge and Grids (SKG)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 75–80. Citado na página 20.
- Huq e Rodriguez 2017 HUQ, K. M. S.; RODRIGUEZ, J. **Backhauling/Fronthauling for Future Wireless Systems**. [S.l.]: Wiley, 2017. Citado na página 4.
- I et al. 2014 I, C.; Huang, J.; Duan, R.; Cui, C.; Jiang, J.; Li, L. Recent progress on c-ran centralization and cloudification. **IEEE Access**, v. 2, p. 1030–1039, 2014. Citado na página 4.
- I et al. 2015 I, C.; Huang, J.; Yuan, Y.; Ma, S.; Duan, R. Ngfi, the xhaul. In: **2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado na página 4.
- Jiang et al. 2019 Jiang, Z.; Sahasrabudhe, V.; Grebel, H.; Mohamed, A.; Rojas-Cessa, R. Greedy algorithm for routing power and source assignment on a digital microgrid. In: **2019 International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 761–767. Citado na página 20.
- Kottkamp et al. 2019 KOTTKAMP, M.; PANDEY, A.; ROESSLER, A.; STUHLFAUTH, R.; RADDINO, D. **5G new radio: fundamentals, procedures, testing aspects**. [S.l.]: Rohde amp; Schwarz, 2019. Citado na página 11.
- Larsen et al. 2019 Larsen, L. M. P.; Checko, A.; Christiansen, H. L. A survey of the functional splits proposed for 5g mobile crosshaul networks. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 21, n. 1, p. 146–172, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 4, 18 e 23.
- Liu et al. Sheng Liu, Shaoyun Ruan e Baijun Zhao. **Centralized base station system based on advanced telecommunication computer architecture platform**. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US20090149221A1/en>>. Citado na página 13.
- Maeder et al. 2014 Maeder, A.; Lalam, M.; De Domenico, A.; Pateromichelakis, E.; Wübben, D.; Bartelt, J.; Fritzsche, R.; Rost, P. Towards a flexible functional split for cloud-ran networks. In: **2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. Citado na página 4.
- Mharsi et al. 2018 Mharsi, N.; Hadji, M.; Niyato, D.; Diego, W.; Krishnaswamy, R. Scalable and cost-efficient algorithms for baseband unit (bbu) function split placement. In: **2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 5, 14 e 23.
- Mountaser et al. 2017 Mountaser, G.; Rosas, M. L.; Mahmoodi, T.; Dohler, M. On the feasibility of mac and phy split in cloud ran. In: **2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado na página 4.

- Nguyen et al. 2016 Nguyen, V.; Do, T.; Kim, K. Sdn and virtualization-based lte mobile network architectures: A comprehensive survey. **Wireless Personal Communications**, v. 86, n. 3, p. 1401–1438, Jan 2016. Citado na página 15.
- Nunes 2016 NUNES, R. B. **OFDMA PON - Arquitetura Para Redes Ópticas Passivas com Acesso Múltiplo por Divisão de Frequências Ortogonais**. Tese (Doutorado), 2016. Citado 3 vezes nas páginas xiii, 10 e 11.
- Pfeiffer 2015 Pfeiffer, T. Next generation mobile fronthaul and midhaul architectures [invited]. **J. Opt. Commun. Netw.**, OSA, v. 7, n. 11, p. B38–B45, Nov 2015. Disponível em: <<http://jocn.osa.org/abstract.cfm?URI=jocn-7-11-B38>>. Citado na página 4.
- Pliatsios et al. 2018 Pliatsios, D.; Sarigiannidis, P.; Goudos, S.; Karagiannidis, G. Realizing 5g vision through cloud ran: technologies, challenges, and trends. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2018, 05 2018. Citado na página 4.
- Pérez et al. 2017 Pérez, G. O.; Hernández, J. A.; López, D. L. Delay analysis of fronthaul traffic in 5g transport networks. In: **2017 IEEE 17th International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5. Citado na página 4.
- Ramantas et al. 2018 Ramantas, K.; Antonopoulos, A.; Kartsakli, E.; Mekikis, P.; Vardakas, J.; Verikoukis, C. A c-ran based 5g platform with a fully virtualized, sdn controlled optical/wireless fronthaul. In: **2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4. Citado na página 18.
- Rost et al. 2015 Rost, P.; Berberana, I.; Maeder, A.; Paul, H.; Suryaprakash, V.; Valenti, M.; Wübben, D.; Dekorsy, A.; Fettweis, G. Benefits and challenges of virtualization in 5g radio access networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 53, n. 12, p. 75–82, Dec 2015. ISSN 0163-6804. Citado na página 18.
- Sabella et al. 2015 Sabella, D.; Rost, P.; Banchs, A.; Savin, V.; Consonni, M.; Di Girolamo, M.; Lalam, M.; Maeder, A.; Berberana, I. Benefits and challenges of cloud technologies for 5g architecture. In: **2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 23.
- Sorensen et al. 2017 Sorensen, K.; Sevaux, M.; Glover, F. **A History of Metaheuristics**. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 36.
- Vaezi e Zhang 2017 VAEZI, M.; ZHANG, Y. Radio access network evolution. In: _____. [S.l.: s.n.], 2017. p. 67–86. ISBN 978-3-319-54495-3. Citado na página 10.
- Wang et al. 2017 Wang, H.; Aftab Hossain, M. M.; Cavdar, C. Cloud ran architectures with optical and mm-wave transport technologies. In: **2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4. Citado na página 4.
- Wang et al. 2017 Wang, X.; Wang, L.; Elayoubi, S. E.; Conte, A.; Mukherjee, B.; Cavdar, C. Centralize or distribute? a techno-economic study to design a low-cost cloud radio access network. In: **2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7. ISSN 1938-1883. Citado 5 vezes nas páginas 2, 5, 14, 17 e 23.

Wubben et al. 2014 Wubben, D.; Rost, P.; Bartelt, J. S.; Lalam, M.; Savin, V.; Gorgoglione, M.; Dekorsy, A.; Fettweis, G. Benefits and impact of cloud computing on 5g signal processing: Flexible centralization through cloud-ran. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 31, n. 6, p. 35–44, 2014. Citado na página [4](#).