

Otimização de Recursos no *fronthaul* Óptico com *Split-Funcional* em 5G

Murilo P. Amaral, Jessé G. dos Santos, Helder R. O. Rocha, Marcelo E. V. Segatto e Jair A. L. Silva

Resumo—Metaheurísticas baseadas nos algoritmos *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) e *Variable Neighborhood Descent* (VND) foram propostas neste artigo para garantir confiabilidade no *fronthaul* óptico com *functional split* recomendado para a arquitetura de rede de telefonia móvel de quinta geração (5G). Uma comparação entre soluções geradas a partir do GRASP e outra a partir do GRASP/VND é realizada em cenários com variação da quantidade de recursos, do tamanho da rede e de opções do *functional split*, visando também atender a latência exigida na tecnologia 5G. Os resultados de simulação mostraram que a proposta GRASP/VND gerou soluções melhores em 60% dos 49 cenários avaliados.

Palavras-Chave—5G, *functional split*, metaheurísticas.

Abstract—Metaheuristics based on the Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) and Variable Neighborhood Descent (VND) are proposed in the present article to ensure reliability in the optical fronthaul with the functional split recommended to the fifth generation (5G) cellular network architecture. A comparison between solutions generated from GRASP and from GRASP/VND methods in scenarios of variation of resources quantity, network size and functional split options, aiming also to comply with the latency requirement in the 5G technology. The results indicated that the GRASP/VND created more optimized solutions in 60% of the 49 scenarios.

Keywords—5G, *functional split*, metaheuristics.

I. INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial do número de dispositivos e da respectiva demanda de tráfego de dados nas redes de telefonia móvel impõe aumento significativo não somente da largura do espectro disponível como também da densidade de usuários a serem atendidos em uma célula. Consequentemente, a quantidade de processos demandados na rede e a interferência causada pela densidade aumentarão significativamente. Logo, será necessária uma solução inteligente que possibilite às estações radio-base suportarem múltiplos serviços [1].

Em fase de padronização, a quinta geração de telefonia móvel (5G) deverá atender serviços tais como controle automático de *smart grids*, sistemas de transporte inteligente, cirurgias remotas, internet tátil, entre outros, mediante o cumprimento de requisitos que dizem respeito a taxa de erro de pacote (máximo de 10^{-9}) e latência (máxima de 1 milissegundo) [2].

O implementação do conceito de rede centralizada C-RAN (*Centralized Radio Access Networks*) será de fundamental importância para 5G, pois permitirá atender aos requisitos

confiabilidade, baixa latência, altas taxas e alta densidade [3]. Contendo os segmentos *fronthaul*, *midhaul* e *backhaul* óptico, a Figura 1 ilustra a arquitetura C-RAN sugerida para 5G [4].

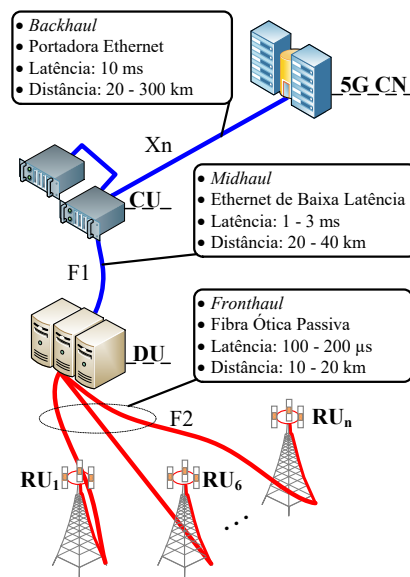


Fig. 1. Arquitetura de rede C-RAN para 5G. Adaptada de [5]

Aliada à flexibilização concebida pela técnica *functional split* [6], a arquitetura mostrada na Figura 1 permite que a unidade remota RU (*Remote Unit*), substituída da unidade de rádio RRH (*Remote Radio Head*), mantenha as funções de rádio frequência presentes nas antigas gerações de telefonia celular, mas também receba outras funções da camada física. O restante das funções da camada física e as da camada de enlace são alocadas em uma nova entidade chamada unidade distribuída DU (*Distributed Unit*), de forma a atender o requisito de baixa latência. As funções da camada de rede, cujas latências variam entre 1 – 3 ms, ficam sob responsabilidade da nova unidade central CU (*Centralized Unit*) [3; 7].

Espera-se que, uma rede C-RAN, onde a estrutura de DUs é compartilhada pelos nós da rede, reduza os custos de investimento e operação, ao mesmo tempo em que precisa garantir processamento em tempo real. Logo, a quantidade e a localização dos DUs e CUs são importantes para a concepção da rede C-RAN [1]. Em [8], 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,

Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, 29075-910, e-mails: muriloportoamaral@gmail.com, jesse.santos@ufes.br, helder.rocha@ufes.br, segatto@ele.ufes.br, jair.silva@ufes.br. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Pronem, Cnpq1, Cnpq2 e Pronex.

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. Em [1], os autores investigaram heurísticas que possibilitam a adoção do *functional split* nas redes geradas randomicamente, com a finalidade de atender tempo de processamento e latência dos serviços. Entretanto, a simplicidade do modelo estudado não contempla a dinâmica do processamento no segmento RU-DU.

Assim, neste artigo, metaheurísticas baseadas nos algoritmos GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), criado por [9], e VND (*Variable Neighborhood Descent*), criado por [10], são propostas para garantir confiabilidade no *fronthaul* óptico com *functional split*. Uma comparação entre a solução com GRASP e uma híbrida GRASP/VND, realizada em cenários com variação da quantidade de recursos, do tamanho da rede e de opções do *functional split*, demonstrou que a proposta GRASP/VND é a mais recomendada em cenários que também atendem a latência exigida na tecnologia 5G. Resultados de simulação numérica mostraram que a metaheurística híbrida gerou melhores soluções em 60% dos 49 cenários avaliados.

II. MODELAGEM DO SISTEMA

A. Arquitetura da Rede

O sistema foi modelado de modo a disponibilizar diversas opções de processadores internos aos DUs para cada RU, onde inúmeros processos de tempos de execução diferentes são solicitados. Foi gerada uma rede de DUs com capacidade de processamento e ligações internas criadas aleatoriamente, e alguns dos nós possuem ligação com a CU. A Figura 2 mostra uma das 49 possíveis arquiteturas/instâncias que forem simuladas em conjunto com as metaheurísticas propostas.

A Figura 2.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 2.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 pelo roteamento dos processos dos outros RUs. É possível observar ainda que os nós 4 e 6 não estão em uso, portanto terão seus valores de processamento penalizados em uma função custo no atual instante de simulação.

A Figura 3 elucida um exemplo da alocação de recursos em uma rede com 3 RUs solicitando recursos ao DU. No instante representado, os nós 2, 6 e n estão ocupados e, os nós 3, 1 e 6 foram requisitados pelos processos dos RUs 1, 2 e 3, respectivamente. Assim, os processos são alocados com exceção do que estava designado para o nó 6, o qual terá que esperar o próximo instante de tempo da simulação.

B. Formulação do Problema

A avaliação do custo de uma solução foi feita considerando o maior uso da rede e o atendimento de todos os processos demandados (confiabilidade). Assim, o problema foi construído de uma forma genérica em relação ao tempo de processamento dos serviços, portanto, a cada constante unitária de tempo é

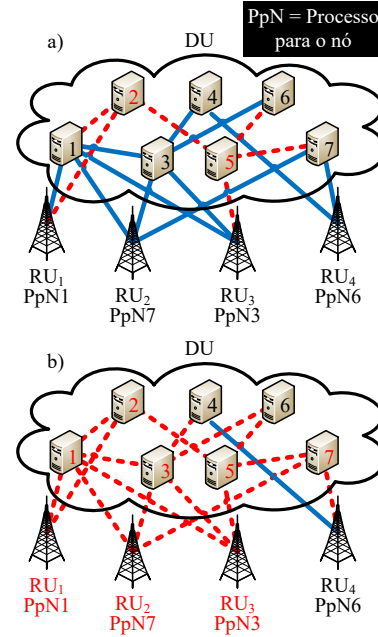


Fig. 2. Exemplo da dinâmica da rede com dispositivos ociosos (linha cheia) e dispositivos em uso (linha pontilhada). a) Instante i e b) instante $i + 1$.

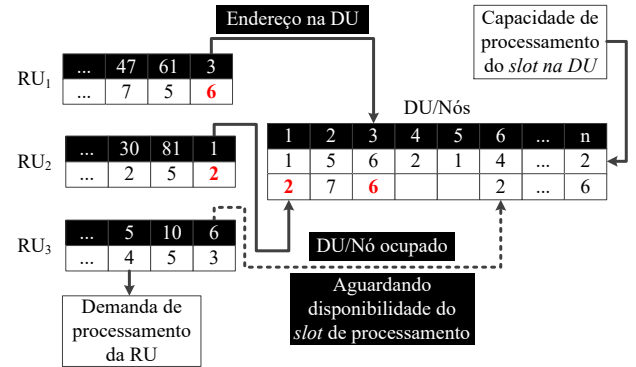


Fig. 3. Representação vetorial de alocação dos processos.

somada a capacidade de processamento ociosa [1]. A função custo de cada solução é calculada de forma iterativa, sendo que a cada instante de tempo é somada toda a capacidade de processamento Po 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. Posteriormente, é aplicada uma penalidade para todos os j processos que a rede não consegue processar, dada pela variável binária Pcu . Portanto, a função custo usada para a avaliação das soluções pode ser descrita como

$$F_{custo} = \sum_{k=0}^t \sum_{n=1}^m Po_n + 1000 * \sum_{i=1}^j Pcu_i \quad (1)$$

O Algoritmo 1 descreve o procedimento computacional utilizado na avaliação. Não existe a necessidade de impor

restrições às soluções pela natureza do GRASP [9]. Todas as soluções geradas são viáveis pois o mesmo tem usa o critério de parada apenas quando todos os processos são atendidos por uma DU. É importante ressaltar a iteratividade no cálculo de F_{custo} , pois os elementos de rede variam de estado enquanto o mesmo acontece.

Algoritmo 1 Função Custo

```

1: Entrada:  $Graf, Solu, Proce$ . {Grafo que representa o
   sistema, Solução, Processos de todas as RUs}
2: Saída:  $F_{custo}$ 
3:  $Po \leftarrow 0$ ;
4:  $Pcu \leftarrow 0$ ;
5:  $Graf2 \leftarrow Graf$ ;
6: while  $Proce \neq NULL$  do
7:    $(Graf2, Solu, Proce) \leftarrow \text{aplic}(Graf2, Solu, Proce)$ ;
   {Retorna o grafo excluindo os nós que foram utilizados
   para aplicar a solução e o vetor da solução e de
   processos para o próximo instante de tempo}
8:    $Po \leftarrow Po + \text{somaocioso}(Graf2)$ ; {Soma toda a capa-
   cidade de processamento ociosa da rede}
9:    $Pcu \leftarrow Pcu + \text{proceCU}(Graf2)$ ; {Soma a quantidade
   de todos os processos que foram enviados diretamente
   às CUs}
10:   $Graf2 \leftarrow \text{processa}(Graf2, Graf)$ ; {Faz o processa-
   mento de um instante de tempo}
11: end while
12:  $F_{custo} \leftarrow Po + Pcu * 1000$ ;
13: return  $F_{custo}$ ;

```

A ligação entre cada RU com o DU que vai computar seu processo, quando é necessária a ligação por mais de um elemento de rede, faz com que todos os elementos necessários para tal se tornem "em uso". Isso significa que, dependendo da localidade do DU, outras RUs ficam impossibilitadas de transmitir seus processos, tendo que esperar por um caminho livre, até o completo descarregamento de todas as filas de todos os RUs, conforme ilustrado na Figura 2.

C. As Metaheurísticas Propostas

A estratégia escolhida para a geração das soluções foi baseada no GRASP, já que o mesmo possui a capacidade de geração de soluções iniciais muito boas em pouco tempo. O GRASP produz soluções gulio-randômicas, como descrito no pseudocódigo disponível no Algoritmo 2.

Na linha 5 do Algoritmo 2 é mencionada uma função **lista**, que organiza os DUs com base na demanda do processo em questão. Isto, em comparação com a capacidade de processamento dos DUs, em que sempre prioriza-se os que menos unidades de tempo gastariam com o processo, formando-se assim a lista de candidatos. Na linha 6, a função **sorteia** designa uma escolha randômica simples entre os 4 primeiros da lista de candidatos.

Para melhorar a solução obtida pela fase de construção do GRASP, é feita uma busca local utilizando o algoritmo VND. Um dos objetivos da pesquisa foi averiguar se o uso de DUs vizinhos à RU de origem do serviço deixaria a rede mais

Algoritmo 2 GRASP

```

1: Entrada:  $Ini, S, Grafo$ . {Ponto de partida, Solução até
   então, Grafo da arquitetura}
2: Saída:  $Solu$ 
3:  $Solu \leftarrow S$ ; {Atribui o valor inicial da solução até então.}
4: while  $Grafo \neq NULL$  do
5:    $Cand \leftarrow \text{lista}(Grafo, Ini)$ ; {Faz a lista de candidatos
   por ordem de menor custo a partir do ponto inicial.}
6:    $Solu \leftarrow \text{sorteia}(Cand)$ ; {Sorteia um candidato da lista
   de forma randômica e compõe a solução.}
7:    $Grafo \leftarrow \text{exclui}(Grafo, Solu)$ ; {Exclui do grafo o
   valor sorteado.}
8: end while
9: return  $Solu$ ;

```

disponível para o processamento de outros serviços ao mesmo tempo. Com isto, é possível averiguar o comportamento com o crescimento da rede e da quantidade de RUs, e consequentemente, o aumento da quantidade de processos demandados. O pseudocódigo da busca VND é descrito no Algoritmo 3, e sua representação gráfica em duas estruturas de vizinhança está mostrada na Figura 4.

Algoritmo 3 VND

```

1: Entrada:  $Grafo, Origem, GrauVND$ . {Grafo da arqui-
   tetura, Antena de origem, Grau VND}
2: Saída:  $S$ 
3:  $GrauVND \leftarrow 1$ ;
4: while  $S \neq FULL$  do
5:    $NovoGrafo \leftarrow \text{viz}(Grafo, Origem, GrauVND)$ ;
   {Retorna a vizinhança englobada no grau em questão a
   partir do nó de origem.}
6:    $(S, Processos) \leftarrow \text{gerasol}(Origem, S, NovoGrafo)$ ;
   {Gera uma solução para a vizinhança em questão e
   atualiza a saída.}
7:    $GrauVND \leftarrow GrauVND + 1$ ; {Aumenta a vizi-
   nhança para o caso da solução não estar completa.}
8: end while
9: return  $S$ ;

```

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

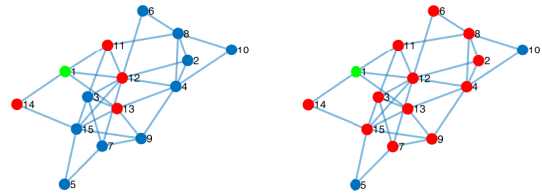


Fig. 4. Estruturas de Vizinhança para VND (em vermelho) para uma Antena (em verde).

Observa-se pela Figura 4 que, a metaheurística de busca local VND gera vizinhanças para cada RU, aumentando seu tamanho caso a vizinhança anterior não tenha sido capaz de completar a formação de uma solução para cada processo

demandado. Vale ressaltar ainda que os nós utilizados na vizinhança anterior são remarcados como "livres" quando há a variação no nível da mesma. O algoritmo que calcula o custo da solução simula o desempenho da rede passo a passo, portanto os recursos da rede variam de "em uso" para "livre" enquanto o processamento acontece.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

As 49 arquiteturas avaliadas neste trabalho foram simuladas usando os parâmetros descritos na Tabela I. A quantidade total de nós (RUs+DUs) e de RUs são variáveis e a quantidade de processos por RU foi mantida constante.

TABELA I
PARÂMETROS DA ARQUITETURA DE REDE.

Variável	Mínimo	Máximo	Intervalo
Quantidade total de nós	150	210	10
Quantidade de RUs	15	45	5
Probabilidade de ligação entre DUs/nós	15%	15%	-
Quantidade de processos em cada RU	75	75	-

As redes foram concebidas desde uma situação de total capacidade de absorção dos serviços até uma situação de congestionamento. O objetivo das simulações é averiguar esse ponto de quiescência de uso total da rede sem detrimento da latência do sistema e os fatores determinantes para o mesmo. A capacidade de processamento dos nós DUs e tamanho dos serviços solicitados foram gerados de forma estocástica, respeitando uma distribuição de Poisson com função massa de probabilidade PMF dada por

$$PMF = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad (2)$$

para λ a média da distribuição e k a quantidade de ocorrências.

Neste trabalho optou-se por uma distribuição com $\lambda = 2$ para a criação da capacidade de processamento de cada nó da rede de DUs. A Figura 5 ilustra a probabilidade de ocorrência das unidades de capacidade de processamento dos nós de cada DU. A distribuição da capacidade de processamento foi escolhida dessa forma para gerar elementos de rede desprovidos de capacidade de processamento, ou seja, dispositivos que funcionam apenas como *switches*.

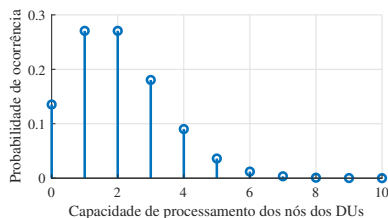


Fig. 5. Probabilidade de ocorrência em função da capacidade de processamento dos nós de cada DU, para $\lambda = 2$.

Para a simulação dos tamanhos dos processos utilizou-se a distribuição da equação (2) com um $\lambda = 1$, onde a média da distribuição é dada pelo próprio deslocamento no eixo das

abscissas, conforme representado na Figura 6, em que foram considerados um total de 60 deslocamentos.

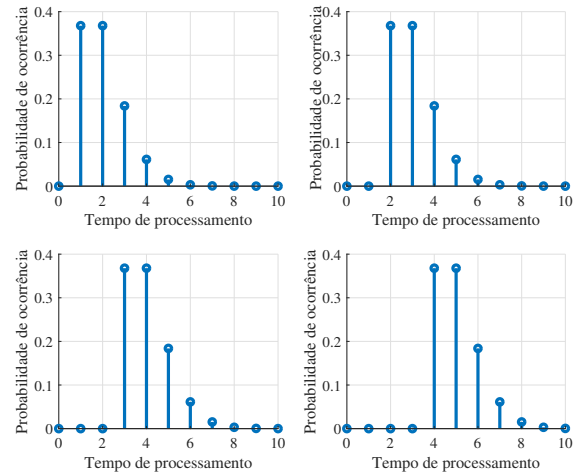


Fig. 6. Distribuição de Poisson para $\lambda = 1$ para a definição do tamanho dos processos de média de 1, 2, 3 e 4 do total de 60, respectivamente.

A Figura 7 mostra a convergência da Função custo para ambas as metaheurísticas propostas em uma das instâncias resolvidas. Observa-se pela Figura 7 que nas 60 iterações feitas, conforme esperado, a solução híbrida apresenta uma convergência com menor número de iterações e melhor qualidade [10]. Isso é perfeitamente explicado pela eficácia da busca local que caracteriza o VND.

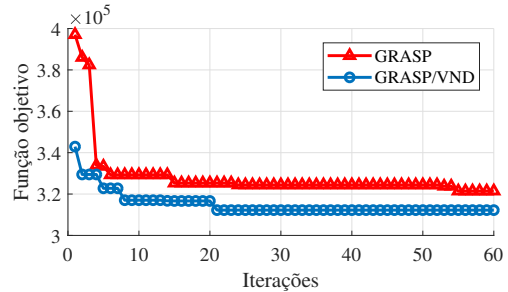


Fig. 7. Convergência da Função custo para ambas as metaheurísticas.

A Figura 8 mostra comparações entre as metaheurísticas em todo o universo simulado (Tabela I), tanto entre seus resultados finais a) quanto entre seus tempos médios de execução b).

Constata-se pela Figura 8.a) que, conforme esperado, a solução híbrida GRASP/VND obteve melhores resultados em 60% dos casos avaliados. Já na Figura 8.b) observa-se uma tendência dos cenários com redes menores gerarem soluções mais rápidas com a solução baseada em GRASP. Isso pode ser explicado pelo fato do VND proposto gerar ganhos em tempos de processamento diretamente proporcionais ao tamanho das redes analisadas.

O outro objetivo das simulações foi averiguar em qual ponto teria-se o melhor desempenho e uso da rede através da curva de tendência da média de tempo dos pontos ótimos, onde estima-se que seja o ponto que executa com mais rapidez os processos e usa a rede em toda a sua capacidade. A Figura

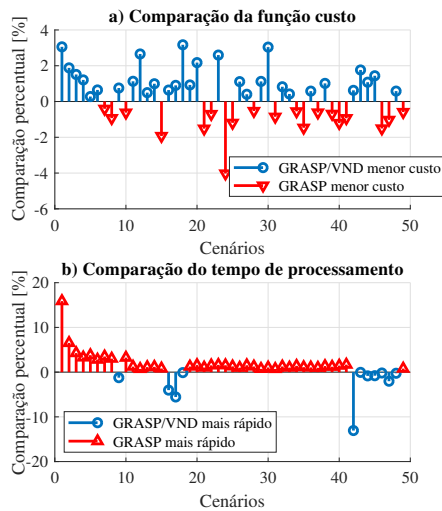


Fig. 8. Comparação de tempo de execução entre os métodos.

9.a) mostra a curva de tendência (que foi traçada para uma arquitetura de 150 pontos, 15 antenas e 75 processos por RU) dos melhores custos para cada média de tempo processamento, usando a metaheurística GRASP/VND. Pode-se observar que os pontos mantiveram-se constante a partir do tempo médio de processamento de 20 unidades.

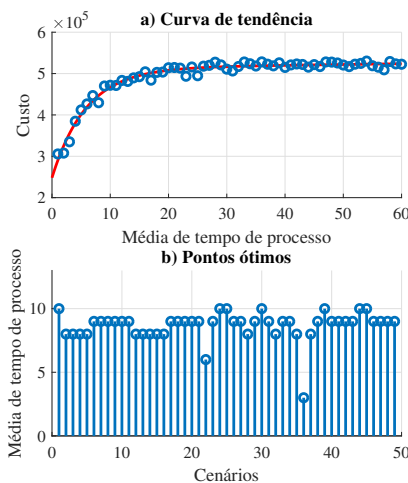


Fig. 9. Estimativa da curva de tendência para GRASP/VND.

A Figura 9.b) mostra o ponto de quiescência das médias de tempo de processamento em função dos vários cenários idealizados. Observar-se na Figura 9.b) uma pequena variação no tempo médio de processamento para os vários cenários analisados. Pode-se concluir a partir das Figuras 9.a) e 9.b) que o ponto ótimo de maior utilização dos recursos disponíveis da rede de DUs não é alterada pelo tamanho da rede e nem pelo número de RUs na mesma, esse último, ligado à quantidade de processos demandados.

IV. CONCLUSÃO

Uma metaheurística GRASP e uma híbrida GRASP/VND foram propostas neste artigo para garantir confiabilidade no

fronthaul óptico com *functional split* recomendado para a arquitetura de rede de telefonia móvel de quinta geração (5G). Uma comparação entre os métodos foi realizada para vários cenários de quantidade de recursos, tamanho da rede, visando também atender a latência exigida na tecnologia 5G.

Os resultados de simulação mostraram que o GRASP/VND gerou soluções melhores em 60% dos 49 cenários e que variações de tamanho de rede e de quantidade de processos demandados não interferem no tamanho de processo que otimiza a utilização da rede. Assim, infere-se que ambas variáveis não precisam ser levadas em conta ao se definir o *functional split*. Como trabalhos futuros sugere-se a variação das capacidades de processamentos dos nós da rede, para averiguar a sua correlação com os pontos de melhor otimização.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Mharsi, M. Hadji, D. Niyato, W. Diego, and R. Krishnaswamy, "Scalable and cost-efficient algorithms for baseband unit (bbu) function split placement," *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1–6, 2018.
- [2] E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, J. Peisa, J. Sachs, Y. Selén, and J. Sköld, "5g wireless access: requirements and realization," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 12, pp. 42–47, December 2014.
- [3] 3GPP, "Technical specification group radio access network; study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (release 14)," www.3gpp.org/DynaReport/38801.htm, 2016, acessado: 2019-02-20.
- [4] E. AB, H. Technologies, N. Corporation, A. Lucent, and N. S. Networks, "Common public radio interface: ecpi interface specification," 06 2018. [Online]. Available: [\url{www.cpri.info/index.html}](http://www.cpri.info/index.html)
- [5] J. G. dos Santos, "Radio over fibre techniques for backhaul and fronthaul," PhD Thesis, Technical University of Berlin, 2017. [Online]. Available: [\url{http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6521}](http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6521)
- [6] C. Mobile, "C-ran: the road towards green ran," *White Paper*, ver. 2, pp. 1–10, 2011.
- [7] ITU-T, "Transport network support of imt-2020/5g," https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/tut/T-TUT-HOME-2018-PDF-E.pdf, 2018, acessado: 2019-02-21.
- [8] X. Wang, L. Wang, S. E. Elayoubi, A. Conte, B. Mukherjee, and C. Cavdar, "Centralize or distribute? a techno-economic study to design a low-cost cloud radio access network," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2017, pp. 1–7.
- [9] T. A. Feo and M. G. C. Resende, "Greedy randomized adaptive search procedures," *Journal of Global Optimization*, vol. 6, no. 2, pp. 109–133, Mar 1995. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/BF01096763>
- [10] N. Mladenović and P. Hansen, "Variable neighborhood search," *Computers & operations research*, vol. 24, no. 11, pp. 1097–1100, 1997.