

Otimização Bioinspirada para Eficiência Energética em Redes Móveis Heterogêneas

Jéssica Soares, Hugo Kuribayashi, Carlos Francês e Warley Junior

Resumo— Capacidade e eficiência energética são cruciais para as redes sem fio da próxima geração. Devido à densa implantação de BSs em HetNets, o consumo é de 60% à 80% da energia total causando custos acentuados. Portanto, a indústria e os pesquisadores trabalham para reduzir o consumo de energia das HetNets. Com o objetivo de aumentar a eficiência energética, garantindo os requisitos de QoS, propomos o uso de algoritmo genético e algoritmo genético com desligamento de BSs. Os resultados das simulações demonstram que os algoritmos propostos têm melhor desempenho de eficiência energética do que o mecanismo de associação de usuários baseado em máxima potência.

Palavras-Chave— HetNets, algoritmo genético, eficiência energética

Abstract— Both capacity and energy efficiency are crucial for next-generation wireless networks. Hence, due to the dense deployment of BSs in HetNets, consumption is 60% to 80% of the total energy, causing steep costs. Therefore, industry and researchers are working to reduce the energy consumption of HetNets. In order to increase energy efficiency, guaranteeing the QoS requirements, we propose the use of a genetic algorithm with BS suspension mechanisms. The results of the simulations demonstrate that the proposed algorithm has a better performance in terms of energy efficiency compared to the user association mechanism based only on maximum SINR.

Keywords— HetNets, genetic algorithm, energy efficiency.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório *Cisco Visual Network Index* espera-se que o tráfego IP global atinja 396 exabytes por mês até 2022, contra 122 exabytes por mês em 2017. Este volume de tráfego representa 4.8 zettabytes de tráfego por ano até 2022 [1]. Esta demanda tem sido impulsionada por aplicações com requisitos cada vez maiores de QoS (*Quality of Service*), cobertura e eficiência energética. Esta tendência tem pressionado os Operadores de Rede Móvel (Mobile Network Operators - MNO) a implantar e gerenciar serviços de banda larga com capacidades de atendimento e alocação de recursos cada vez maiores.

Para o atendimento desses requisitos de tráfego, o 3GPP propõe a densificação de redes móveis através da adição de estações base de baixa potência ou SBS (*Small Base Stations*), por meio da adoção de uma arquitetura de HetNets

(*Heterogeneous Networks*). Ao implantar SBSs é possível proporcionar a extensão de cobertura ou capacidade de forma escalável e econômica. Além disso, a adoção de um paradigma homogêneo de BSs (*Base Stations*), através da implantação exclusiva de MBS (*Macro Base Station*) tende a não ser atrativa em termos de custos de implantação e operação [2]. Em adição, apesar dos benefícios, a estratégia de seleção de célula, baseada na máxima potência percebida max-SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) tende a desbalancear a concentração de usuários da rede. Equipamentos de Usuário (*User Equipment - UE*) mesmo sob cobertura de SBSs percebem o maior sinal de *downlink* como sendo de MBSs [3]. Desta forma as MBSs permanecem sobrecarregadas, enquanto que as camadas compostas por SBSs tornam-se ociosas, com baixo nível de UEs em atendimento. UEs devem ser reassociados para SBSs menos sobrecarregadas e aproveitar a potencial maior disponibilidade de RRB (*Radio Resource Blocks*). Consequentemente, mecanismos de associação de usuários que busquem um melhor equilíbrio de carga ao longo da rede potencializam os benefícios da arquitetura HetNet.

A técnica de *Cell Range Expansion - CRE* é aplicada para ajustar os mecanismos de associação de UEs em uma HetNet. Através do CRE aplica-se um valor de bias [dB] ao SINR de cada SBS, e as áreas de cobertura de SBSs sofrem virtual expansão ou redução, fazendo com que mais ou menos UEs estejam associados à estas BSs. Consequentemente, os UEs são melhor distribuídos entre as BSs e cada UE passa a ter melhores chances de ter seus requisitos de QoS atendidos. Assim, para atingir um grau satisfatório de balanceamento de carga se faz necessária a utilização de mecanismos inteligentes que considerem a carga de tráfego da rede, como todas as condições de rede relacionadas às BSs [4].

Este processo de densificação tende a melhorar a eficiência espectral pela menor distância física entre UEs e BS, melhorando a reutilização de frequência [5]. Porém, uma implantação densa das HetNets resulta em um aumento significativo no consumo de energia, dado que 80% deste consumo em redes de comunicação móvel é devido à operação de BSs [6]. Uma BS aloca 100% de sua potência de transmissão no estado com carga de tráfego máxima e cerca de 50% a 60% de sua potência no estado com carga de tráfego inexistente. O consumo acumulado de energia de uma BS pode ser reduzido para 40% se esta estiver no estado de suspensão, em momentos de ociosidade de tráfego [7].

Uma maneira eficaz e promissora de aumentar a eficiência energética em HetNets está baseada no processo dinâmico de suspensão de BSs [8]. Assim, BSs sem UEs associados ou com baixa utilização de RRBs podem ser dinamicamente desligadas

Jéssica S. Soares, Hugo P. Kuribayashi, Warley M. V. Junior, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Fl. 17 Qd. 04 LT Especial, Marabá-PA 68505-080, e-mails: {jessica.soares, hugo, wmvj}@unifesspa.edu.br. Carlos R. L. Francês, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, R. Augusto Corrêa 01, Belém-PA 66075-110, e-mails: rfrances@ufpa.br. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

para reduzir o consumo de energia. Este processo de suspensão de BSs enfrenta desafios dado o potencial quantitativo de SBSs que precisam ser avaliadas, o que tende a resultar em um problema combinatório de alta complexidade computacional.

Em [8], os autores utilizam modelos de geometria estocástica para simular a aplicação de técnicas de coordenação de interferência e ampliação da potência de transmissão de SBSs para aplicar uma proposta de desligamento de SBSs. Os autores de [9] propõem um esquema de suspensão de SBSs baseado em medição de canal, adotando interpolação espacial para estimar o desvanecimento do canal em larga escala dos SBSs adormecidos sob a perspectiva dos UEs. Em [10], os autores propõem associação de usuários através de barganha entre HetNets de múltiplas camadas e UEs para atingir um melhor balanceamento de carga entre BSs, buscando o atendimento dos requisitos de QoS dos UEs.

Na literatura, algoritmos evolutivos tem se tornado um tópico de pesquisa emergente para melhorar o desempenho de redes [11]. Estas técnicas têm relativa baixa complexidade computacional, possibilitada pelo aprendizado recursivo baseado em *feedback* e interações locais. A maioria dos trabalhos supracitados tem sua implementação baseada em métodos de otimização combinatória, o que não representa uma solução adequada para problemas de tempo real. Há falta de trabalhos que contemplem o uso de meta-heurísticas ou métodos baseados em inteligência computacional para otimização conjunta dos mecanismos de associação de UEs e suspensão de BSs.

Conseqüentemente, nós propomos o uso de técnica de otimização bioinspirada para implementar mecanismos de associação de usuário em HetNets em conjunto com suspensão de BSs. Através do uso de Algoritmos Genéticos se conduz uma busca estocástica por valores de bias e a determinação de quais BSs devem ser suspensas. Este processo exploratório leva em consideração o atendimento dos requisitos de QoS do UEs como variável de decisão na função de aptidão do AG. Assim, as principais contribuições deste trabalho são: (1) Nós desenvolvemos uma abordagem baseada em CRE e AG como estratégia de otimização ao mecanismo de associação de usuários, de forma a considerar o balanceamento de carga e a suspensão de BSs; (2) Nós formulamos um problema conjunto de associação que busca maximizar o quantitativo de UEs com requisitos de QoS atendidos; (3) Através de simulações e resultados numéricos obtidos a partir de um cenário HetNet, nós avaliamos o desempenho do nosso esquema proposto. Os resultados mostram que o esquema proposto pode ser uma abordagem promissora a ser aplicado nos mecanismos de associação de usuário e suspensão de BSs.

O restante deste trabalho está estruturado da seguinte forma: A modelagem de sistema é apresentada na seção II. A seção III apresenta as variáveis de decisão e função de objetivo propostas e uma discussão dos métodos bioinspirados utilizados. A seção IV apresenta o cenário de simulação e os principais parâmetros utilizados, a seção V apresenta os resultados numéricos obtidos e a seção VI apresenta as considerações finais.

II. MODELAGEM DO SISTEMA

Nesta seção, descrevemos a modelagem de sistema para o cálculo dos valores de bias por SBS, a fim de considerar os re-

quisitos de QoS dos UEs. Consideramos uma HetNet, formada por K camadas independentes de BSs com $K = 1, 2, \dots, k$. As localizações de UEs e BSs são amostradas através de distribuições independentes de *Homogeneous Poisson Point Process* - HPPP. De forma geral, a k -ésima camada possui densidade λ_k e suas BSs são geradas aleatoriamente por uma HPPP $\phi(\lambda_k)$, enquanto o posicionamento dos UEs é gerado por um HPPP $\phi(\lambda_u)$, com densidade λ_u . O conjunto de MBSs é representado por $\delta = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_m\}$, e o conjunto de SBSs é indicado por $\gamma = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_s\}$. Definimos por φ , o conjunto de todas as BSs, onde $\varphi = (\delta \cup \gamma)$. O conjunto de UEs é indicado por $\pi = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_u\}$, e $\psi = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_s\}$ representa o conjunto de valores de bias para SBSs. O i -ésimo UE requisita um serviço de dados, conforme a tupla $\rho_i = (\eta_i, \tau_i)$, onde η_i e τ_i representam a taxa de média de dados (Mbps) e o fator de compressão, respectivamente. Portanto, a taxa de dados exigida pelo i -ésimo UE pode ser definida pela expressão $(\eta_i \cdot \tau_i)$.

Pelo critério de associação baseado na maior potência de sinal recebida (Max-SINR), onde o i -ésimo UE se associa com a j -ésima BS, de tal forma que $j = \arg \max(\zeta_{ij}), \forall j \in \varphi$, fazendo com que os UEs associem-se principalmente com MBSs. Ao se aplicar um bias CRE ao SINR de cada SBS, as áreas de cobertura de SBSs sofrem expansão ou redução, fazendo com que mais ou menos usuário estejam associados com estas SBSs. Conseqüentemente, o SINR (ζ_{ij}) percebido pelo i -ésimo UE a partir da j -ésima BS, é expresso por:

$$\zeta_{ij} = \frac{P_j h_{ij}}{\sum_{k \in \varphi, k \neq j} P_k h_{ik} + P_N}, \forall i \in \pi, \quad (1)$$

onde h_{ij} é o ganho de canal efetivo entre o i -ésimo UE e a j -ésima BS, P_N representa a potência de ruído térmico. Quando a j -ésima BS é uma SBS (i.e, $j \in \gamma$), o SINR percebido pelo i -ésimo UE é somado ao termo θ_j , que representa o valor bias para a j -ésima BS. Assim é importante destacar que o valor de bias θ_j é utilizado apenas para influenciar o mecanismo de associação de UEs, em direção às SBSs. O cálculo da taxa de dados alcançável por canal, do i -ésimo UE a partir da j -ésima BS é expresso por $R_i = e_\ell \cdot \frac{n_{sc} \cdot n_{sym}}{T_{subframe}}$, onde e_ℓ representa a eficiência por subportadora em termos de bits por símbolo OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para um determinado *threshold* SINR (ζ_{ij}) sem considerar o valor de bias θ_j . Os termos n_{sc} , n_{sym} e $T_{subframe}$ representam o número de sub-portadoras por canal, número de símbolos OFDM e a duração de um subframe. Nós assumimos que o mecanismo de alocação de RRBs adota uma estratégia justa, alocando os recursos igualmente entre os UEs associados. O quantitativo de RRBs alocados ao i -ésimo UE a partir da j -ésima BS é expressa por $n_i^{RB} = \left\lfloor \frac{n_j^{RB}}{L_j} \right\rfloor$, onde n_j^{RB} denota o total de RRBs disponíveis na j -ésima BS, onde $L_j = \sum_{\pi} x_{ij}$. O termo x_{ij} representa uma variável binária, que denota o estado de associação entre BSs e UEs. Caso $x_{ij} = 1$, há associação entre o i -ésimo UE e a j -ésima BS, enquanto que o caso contrário é denotado por $x_{ij} = 0$. Além disso, o número de RRBs alocados a um único UE deve ser maior ou igual à um *threshold* mínimo T_B . Por fim, a notação $\lfloor \cdot \rfloor$ representa a parte inteira de $\frac{n_j^{RB}}{L_j}$.

III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção, nós apresentamos a formulação do problema, os critérios de avaliação de desempenho utilizados e a definição das variáveis de decisão consideradas. Então a função objetivo e as restrições do problema são detalhadas. Assim, apresentamos a notação das variáveis de decisão e um problema de otimização modelado pela função objetivo descrita pela Eq. (2). Assim, temos:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in \pi} y_i + \sum_{j \in \varphi} z_j \quad (2)$$

A Eq. (2) está sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_{j \in \varphi} x_{ij} = 1, \forall i \in \pi, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \pi} n_i^{RRB} \leq \sum_{j \in \varphi} n_j^{RRB} \cdot m_j \quad (4)$$

$$n_i^{RRB} \geq T_B, \forall i \in \pi \quad (5)$$

- $y_i = 1$ denota que o i -ésimo UE possui seus requisitos de QoS atendidos, caso contrário é representado por $y_i = 0$;
- $z_j = 1$ demonstra que a j -ésima BS está servindo pelo menos um UE, caso contrário $z_j = 0$;
- n_i^{RRB} denota o total de RBs alocadas para o i -ésimo UE;
- n_j^{RRB} denota o total de RBs disponíveis na j -ésima BS;
- $m_j = 1$ sinaliza que a j -ésima BS está ligada e $m_j = 0$ representa o caso contrário.

O objetivo da Eq. (2) é maximizar o quantitativo de UEs com requisitos de QoS atendidos, e também maximizar o número de BSs com UEs associados. Ao se buscar maximizar o segundo termo da Eq. (2) por meio da variável (z_j), busca-se aumentar a disponibilidade de RRBs de rádio para os dispositivos móveis. O objetivo de maximização é baseada no cálculo dos valores de bias para o conjunto $\psi = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_s\}$, que influenciam diretamente nos valores obtidos de y_i and z_j .

A restrição (3) garante que cada UE está associado a no máximo uma BS. A restrição (4) busca assegurar que o número de RBs alocados para os UEs é menor ou igual ao total de RBs disponíveis por todas BSs ligadas. A restrição (5) garante que o número de RRBs recebidas por um único UE deve ser maior que um *threshold* mínimo T_B , de forma a emular o conceito de *transport block*.

A. Otimização bioinspirada

Abordagens evolutivas podem incluir métodos multidisciplinares de aprendizado de máquina, algoritmos bioinspirados e redes neurais. Estes abordagens tem sido aplicadas para otimizar sistemas de comunicação em cenários diversos e complexos. Dentre os métodos de abordagens evolutivas que tem sido aplicadas para otimizar sistemas de comunicação em cenários complexos, destacam-se os algoritmos genéticos, que são uma família de modelos computacionais inspirados na evolução biológica, que incorporam uma solução potencial para um problema específico numa estrutura semelhante a de um cromossomo e aplicam operadores genéticos a essas

estruturas de forma a preservar as melhores soluções no processo evolutivo.

No esquema proposto neste trabalho, cada indivíduo da população possui uma estrutura genética de cadeia dupla de cromossomos, de forma que cada indivíduo da população carrega uma potencial solução para o problema conjunto de otimização conjunto estabelecido. A primeira cadeia de cromossomos é responsável por potenciais soluções para os valores de bias do conjunto ψ , e assim cada gene desta cadeia carrega um valor de bias (dB) que está associado à uma SBS em particular. Assim, este cromossomo apresenta uma solução para o problema de associação de UEs, e seu tamanho é igual ao quantitativo de SBSs do conjunto γ . Cada gene da segunda cadeia de cromossomos também está associada à uma SBS, representa o estado de suspensão de cada SBS, modelada por valores reais no intervalo $[0, 1]$. O esquema proposto utiliza um mecanismo de degrau linear. Caso o gene possua valores abaixo de 0,5 assumimos que a respectiva SBS associada ao gene está suspensa, e ligada em caso contrários ($> 0,5$).

A Fig. 1 apresenta um fluxograma que descreve o funcionamento do esquema proposto. Uma população inicial e de tamanho fixo é gerada de forma aleatória, i.e., o número de indivíduos da população se mantém constante ao longo das gerações. Cada indivíduo é submetido ao cálculo da função de aptidão apresentado pela Eq. (2). Neste contexto, a primeira cadeia de cromossomos determina os valores do conjunto ψ , enquanto que a segunda cadeia de cromossomos determina os valores da variável de decisão m_j para cada SBS, de forma a demonstrar a suspensão ou não das SBSs.

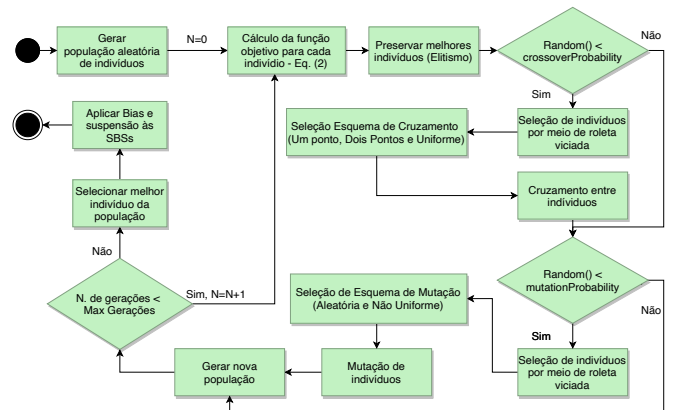


Fig. 1. Representação do funcionamento do AG proposto.

A partir da Eq. (2) são selecionados os melhores indivíduos da população da geração corrente. O esquema proposto adota uma taxa de elitismo, para automaticamente preservar parte dos indivíduos melhor avaliados para a geração seguinte. Formada a população inicial, esta é submetida aos operadores genéticos de cruzamento e mutação. A ocorrência de cada uma dessas operações, para cada indivíduo, é definida por sorteio, com base em valores de probabilidades associados para cada uma das operações. Estes valores de probabilidade são variados ao longo das gerações utilizando um abordagem de interpolação linear. Nas primeiras gerações da população, operações de cruzamento possuem maior probabilidade de

TABELA I
 RELAÇÃO DE EFICIÊNCIA LTE. FONTE: [12]

SINR ($\zeta_{ij} - \theta_j$)	-6,5	-4,0	-2,6	-1,0	1,0	3,0	6,6	10,0	11,4	11,8	13	13,8	15,6	16,8	17,6
e_ℓ	0,15	0,23	0,38	0,6	0,88	1,18	1,48	1,91	2,41	2,73	3,32	3,9	4,52	5,12	5,55

ocorrência do que operações de mutação. A medida que o número de gerações aumenta, a probabilidade de mutação se amplia, enquanto que a probabilidade de cruzamento se reduz, de forma a balancear o funcionamento do algoritmo entre as fases de exploração e melhoramento de soluções.

No esquema proposto, ambos os operadores genéticos são concebidos para a manipulação de valores reais (valores de bias e suspensão de BSs) e utilizam o método da roleta viciada para a seleção de indivíduos que serão utilizados nos operadores. Em particular ao operador de cruzamento genético, aborda-se o uso de três esquemas de cruzamento, de um ponto, dois pontos e uniforme sendo selecionados aleatoriamente entre si com iguais probabilidades de ocorrência, a cada execução do operador. Para o operador de mutação utilizam-se dois esquemas de mutação: aleatória e não uniforme. Os esquemas utilizados também possuem iguais probabilidades de ocorrência, a cada execução do operador. Após a execução dos operadores genéticos, uma nova geração de indivíduos é formada, ciclo este que se repete até que o algoritmo atinja o número máximo de gerações. Ao final do processo evolutivo, o melhor indivíduo carrega a solução para o conjunto ψ .

IV. CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

Para o cenário de simulação, consideramos o modelo de *pathloss* e parâmetros de simulação recomendados pelo 3GPP [13]. Consideramos um modelo de HetNet de duas camadas onde $K = 2$ com $\lambda_2 = 10\lambda_1$, $\lambda_u = 150\lambda_1$, e $\lambda_1 = 2$. Consideramos SBSs como implantadas de forma aleatória pelos usuários finais. A potência de transmissão configurada no sistema é de 46.0 dBm para MBSs, 33.01 dBm para SBSs e -174.0 dBm/Hz para o ruído térmico. A localização de UEs e BSs são geradas usando as respectivas distribuições HPPP em uma área de $1,0 \text{ km}^2$, enquanto a altura de UEs, MBSs e SBSs são 1.5, 30.0, e 10.0m, respectivamente. Posteriormente, calculamos o SINR dos possíveis links de associação entre UEs e BSs, juntamente com o cálculo de bias e de quais BSs estão suspensas, por meio do AG. Então, associamos os UEs ao maior SINR de BS recebido, considerando o valor de bias, caso a BS seja uma SBS. Em seguida, computamos a taxa de *downlink* a partir do quantitativo de RRBs disponibilizados pela BS associada, sem considerar o parâmetro de bias.

Consideramos o esquema de codificação e modulação disponível no LTE (*Long Term Evolution*), conforme apresentado na Tabela I, para parametrizar a função $\mu(\zeta_{ij})$. Além disso, adotamos o uso de simulação de Monte Carlo para validar o comportamento do cenário a longo prazo, e os demais parâmetros de camada física são resumidos na Tabela II. O requisito de tráfego de cada UE, definido pela tupla $\rho_i = (\eta_i, \tau_i)$, conforme valores de [14]. Por fim, para todas as simulações executadas, comparamos o mecanismo proposto com a abordagem proposta em [15], definida como SCF (Small

Cell First), que objetiva forçar os UEs a se associarem às SBSs mais próximas. O SINR de uma SBS deve ser maior ou igual à um *threshold* mínimo pré-determinado. Caso contrário, os UEs tendem a se associar às MBS. Além disso, também comparamos o mecanismo proposto com o uso de um bias CRE unificado, de forma a adotar um mesmo valor pré-determinado de bias para todas as SBSs do cenário.

Em relação aos parâmetros utilizados pelo AG, adotamos configurações de 100 e 200 indivíduos, selecionados através de 100 gerações. A taxa de elitismo adotada foi de 2% dos indivíduos. Nós assumimos que a probabilidade inicial da operação de cruzamento é de 90%, enquanto que a final foi estabelecida como 70%. As probabilidades iniciais e finais da operação de mutação adotadas são 60% e 90%, respectivamente. Cada gene da cadeia de cromossomos responsável pelos valores de bias possui valor inicial aleatório definido através de uma distribuição real uniforme definida no intervalo $[-10.0, 50.0]$ dB, enquanto que a cadeia de cromossomos responsável pela suspensão das SBS possui seus genes inicializado com uma distribuição real uniforme no intervalo $[0, 1]$.

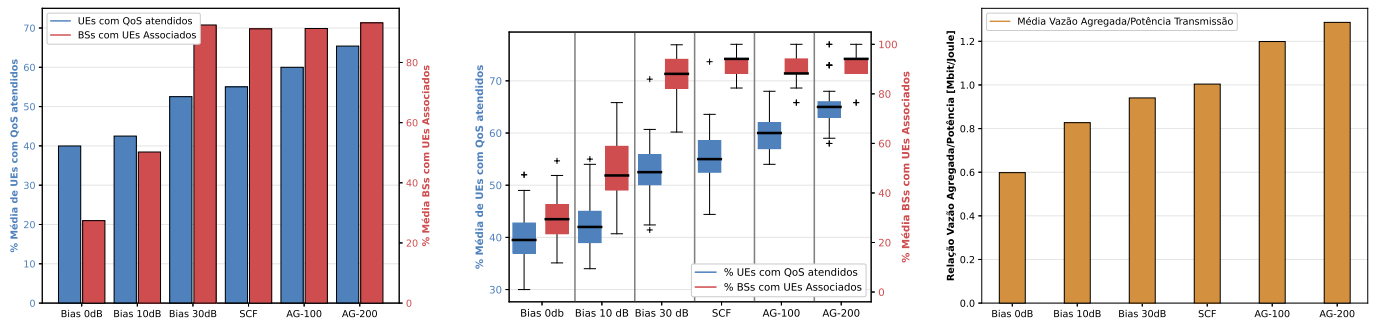
TABELA II
 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO E CAMADA FÍSICA [13]

Parâmetro	Valor
Freq./Largura de Banda/Sub-Canal	2,0 GHz/20 MHz/180 KHz
$T_{subframe}$, n_{sc} , n_{sym} e T_B	1,0 ms/12/14/5
Ganho antena UE/SBS/MBS	0,0/5,0/15,0 dBi
Pathloss MBS-UE	$128,0 + 37,6 \log_{10}(\max(d, 35))$
Pathloss SBS-UE	$140,7 + 36,7 \log_{10}(\max(d, 10))$

V. RESULTADOS

Para avaliar a eficácia do esquema proposto, os resultados numéricos obtidos são comparados com a abordagem unificada de CRE e com a técnica de SCF [15]. Nós assumimos os valores de 0.0 dB (sem CRE), 10.0 dB e 30.0 dB para a abordagem unificada de CRE, e o valor de 15.6 dB para o Threshold SCF. A Fig. 2a, apresenta os resultados em relação ao percentual médio de UEs com requisitos de QoS atendidos e ao percentual médio de BSs com UEs associados. A partir dos resultados sugere-se primeiramente que a técnica de CRE é um abordagem promissora e efetiva para melhorar o balanceamento de carga em uma HetNet, dado que a abordagem sem o uso de CRE (bias 0.0 dB) foi a que apresentou os piores resultados, sugerindo que os UEs estejam associados principalmente com as MBSs do cenário de simulação.

Além disso, observa-se um comportamento crescente no percentual de BSs com UEs associados, à medida que os valores de bias aumentam. Entretanto, o esquema proposto obteve os melhores resultados, com especial destaque à configuração com 200 indivíduos (AG-200). Em particular, ao se considerar o percentual de UEs com requisitos de QoS atendidos, o



(a) Comparativo UEs com QoS e BSs com UEs. (b) Comparativo entre dispersão de dados obtidos. (c) Relação média entre vazão agregada e potência.
 Fig. 2. Resultados relacionados aos cenários de simulação.

esquema proposto atinge uma taxa média de 65,40% dos UEs, enquanto o esquema baseado em bias unificado atinge o patamar de 52,51% dos UEs. Em adição, evidencia-se que como o esquema proposto atinge o mesmo patamar de BSs com UEs associados, o esquema proposto tende a atingir um melhor balanceamento de carga na HetNet, utilizado um menor quantitativo de BSs em serviço.

A Fig. 2b apresenta um comparativo por meio de diagramas de caixa para representar a dispersão dos dados de simulação obtidos. A diferença entre primeiro quartil e o limite inferior da configuração AG-200 é superior à mediana das outras abordagens, e seu limite inferior possui valor próximo da mediana do diagrama da configuração AG-100, sugerindo que o aumento do quantitativo de indivíduos do AG resultou em uma melhor coesão dos resultados obtidos, indicando uma melhoria no processo exploratório do AG.

Estes resultados são complementares ao apresentados pela Fig. 2c, que apresenta a relação entre taxa média de dados agregada obtidas pelos UEs [Mbit/s] e potência de transmissão das BSs [J/s]. É importante destacar que com exceção do mecanismo proposto neste trabalho, todos os demais cenários não utilizam a técnica de suspensão de BSs. Além disso, nós assumimos que todas as BSs que possuem UEs associados estão operando com o máximo de potência de transmissão. Desta forma, os resultados obtidos sugerem que o esquema proposto apresenta uma melhor relação de eficiência energética que os demais cenários, aos servir um quantitativo maior de bits por unidade de potência.

Além disso, os resultados sugerem que nos cenários de bias unificado, uma proporção menor de UEs concentra a maior parte da taxa de dados disponibilizada, o que indica um melhor grau de balanceamento de carga nos esquemas baseados em AG. Em adição, como o esquema proposto (AG-100 e AG-200) aborda a adoção de técnica de suspensão de BSs, nestes casos, as BSs sem UEs associadas estão suspensas (9,2% das BSs) conforme escolha do AG. Este processo de suspensão reduz a interferência de canal e proporciona melhoria de eficiência espectral e energética, resultando em maiores taxas de dados, conforme os resultados apresentados pela Fig. 2c.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, consideramos uma arquitetura HetNet, propondo esquemas conjuntos de associação de usuários e efi-

ciência energética por meio de otimização bioinspirada. Ao propor um esquema de associação de UEs baseados em AG, os resultados obtidos sugerem um maior grau de balanceamento de carga e melhor relação de eficiência energética na HetNet, sem a resolução de problemas de otimização combinatória clássico ou o uso de sinalização excessiva e não padronizada. Essa abordagem baseada em AG proporciona promissores índices de atendimento de requisitos de QoS dos UEs.

REFERÊNCIAS

- [1] Cisco, “IP Traffic Forecast 2017–2022,” *Visual Network Index*, 2017.
- [2] F. Tonini *et al.*, “Minimum cost deployment of radio and transport resources in centralized radio architectures,” in *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Feb 2016, pp. 1–5.
- [3] D. Liu *et al.*, “User association in 5g networks: A survey and an outlook,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1018–1044, Secondquarter 2016.
- [4] B. Kumar, L. Sharma, and S. Wu, “Online distributed user association for heterogeneous radio access network,” *Sensors*, vol. 19, no. 6, 2019.
- [5] L. Chen and H. Li, “Joint shareable resource allocation and user association for heterogeneous cellular networks,” in *2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI)*, 2016, pp. 41–46.
- [6] J. Yang *et al.*, “Hysteretic base station sleeping control for energy saving in 5g cellular network,” in *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2017, pp. 1–5.
- [7] S. Liang, X. Jianchun, and Z. Xun, “An algorithm for concrete crack extraction and identification based on machine vision,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28 993–29 002, 2018.
- [8] R. Tao *et al.*, “An Energy Saving Small Cell Sleeping Mechanism With Cell Range Expansion in Heterogeneous Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 5, pp. 2451–2463, 2019.
- [9] X. Zhang *et al.*, “Energy efficient sleep mode activation scheme for small cell networks,” in *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*, 2015.
- [10] H. Cui, “Virtual pricing-based user association for heterogeneous small cell networks,” in *IEEE MTT-S International Wireless Symposium*, 2019.
- [11] H. P. Kuribayashi *et al.*, “Particle swarm-based cell range expansion for heterogeneous mobile networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 37 021–37 034, 2020.
- [12] A. Shaverdian *et al.*, “Simple and efficient network-aware user association rules for heterogeneous networks,” *Computer Networks*, vol. 156, pp. 20–32, 2019.
- [13] 3GPP TR 36.814 V9.0.0, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9),” *3GPP*, 2010.
- [14] E. Sturzinger *et al.*, “Application-aware resource provisioning in a heterogeneous Internet of Things,” in *2017 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, 2017, pp. 1–6.
- [15] D. Fooladivanda and C. Rosenberg, “Joint resource allocation and user association for heterogeneous wireless cellular networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 248–257, 2013.