

Seleção de Rede em HetNets Ultra-densas Utilizando AHP-TOPIS

Albert Santos, Marcos Seruffo e Diego Cardoso

Resumo—A implementação de redes heterogêneas ultra-densas (HetNets) tornou-se crucial para atender às demandas crescentes das redes 5G e além. Essas redes enfrentam desafios complexos devido ao aumento do número de dispositivos móveis, sobreposição de redes e alta mobilidade. Diante disso, é essencial identificar a rede mais apropriada para um determinado usuário, levando em consideração os diversos requisitos específicos deste usuário. Este artigo propõe um método multicritério para a seleção dinâmica e personalizada da rede, mais precisamente entre as opções 4G e 5G, com base no contexto do usuário. O modelo proposto apresentou melhor desempenho para perfis de alto QoS (Quality of Service) e baixo consumo de energia, e promoveu uma distribuição mais eficiente dos recursos da rede considerando o critério de carga da rede. A comparação com outro método atual da literatura destacou a eficiência do modelo proposto.

Palavras-Chave—Hetnets ultra-densas, AHP-TOPSIS, Seleção de RAT

Abstract—The implementation of ultra-dense heterogeneous networks (HetNets) has become crucial to meet the increasing demands of 5G and beyond networks. These networks face complex challenges due to the proliferation of mobile devices, network overlay, and high mobility. In this context, it is essential to identify the most suitable network for a given user, taking into consideration the user's specific requirements. This article proposes a multicriteria method for dynamic and personalized network selection, specifically between the 4G and 5G options, based on the user's context. The proposed model showed better performance for high QoS profiles and low energy consumption, and it facilitated a more efficient distribution of network resources considering the network load criterion. A comparison with another current method in the literature highlighted the efficiency of the proposed model.

Keywords—Ultra Dense Hetnets, AHP-TOPSIS, RAT Selection

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma demanda crescente para a implementação HetNets ultra-densas, a fim de atender às exigências cada vez maiores das redes 5G e além (B5G). Nesse contexto, enfrentar o desafio de oferecer suporte à conexão contínua por meio da mobilidade do usuário é uma questão crítica que precisa ser abordada nas HetNets. Essa situação se torna ainda mais complexa devido a uma série de fatores importantes, tais como o aumento significativo do número de dispositivos móveis conectados, a sobreposição de implantações de redes, a implantação massiva de small cells e a necessidade de oferecer suporte a cenários de alta velocidade de mobilidade.

Albert Santos, UFPA, Belém-PA, e-mail: albert.santos@itec.ufpa.br; Marcos Seruffo, UFPA, Belém-PA, e-mail: seruffo@ufpa.br; Diego Cardoso, UFPA, Belém-PA, e-mail: diego@ufpa.br

As HetNets são caracterizadas pela presença de diferentes RATs (Radio Access Technology) que devem ser integradas e interconectadas. A implementação de HetNets tornou-se cada vez mais importante devido à crescente diversidade de dispositivos de usuário e aos variados requisitos de serviço. Portanto, é fundamental oferecer múltiplas opções de conectividade para atender às necessidades específicas dos dispositivos.

Com o objetivo de fornecer uma experiência de conectividade otimizada, é adotado o conceito de ABC (Always Best-Connected) [4]. Esse conceito busca conectar o dispositivo de usuário à melhor RAT disponível em termos de atendimento aos requisitos do usuário e/ou serviço em um determinado momento.

A seleção de RAT desempenha um papel crucial na realização do VH (Vertical Handover) entre diferentes RATs. O VH permite que um dispositivo de usuário se mova de uma rede para outra, garantindo uma conectividade contínua. O VH pode ser realizado de forma centralizada na rede (network-centric) ou centralizada no usuário (user-centric) [5]. Na abordagem network-centric, a rede é responsável pelo gerenciamento do handover, e na abordagem user-centric, é o próprio usuário que toma a decisão de handover com base em seus critérios.

Uma abordagem convencional para a seleção de RATs é baseada exclusivamente no RSS (Radio Received Signal) como critério de decisão [6]. O processo de seleção é iniciado quando o UE (User Equipment) detecta um sinal recebido mais forte em uma outra RAT ou quando o sinal recebido da RAT atual fica abaixo de um limite pré-definido. No entanto, os esquemas baseados unicamente no RSS não são adequados para a seleção de RAT em HetNets ultra-densas, pois consideram apenas um critério para a tomada de decisão. Sendo assim, esquemas multicritérios são mais adequados para realizar o VH. Isso ocorre porque envolve a avaliação e comparação de múltiplas redes (alternativas), sendo que cada uma delas possui seus próprios critérios a serem considerados. Estes critérios constituem a base para o tomador de decisão ranquear as RATs disponíveis e escolher a mais adequada. A seleção de RAT é um problema que requer uma decisão rápida. Neste estudo, é proposta a utilização combinada dos modelos AHP (Analytic Hierarchy Process) [7] e TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [8] para a seleção da melhor RAT, considerando os critérios do usuário e a carga da rede. Essa abordagem visa proporcionar uma tomada de decisão eficiente e precisa no contexto da seleção de RATs.

Dessa forma, as principais contribuições deste trabalho são:

- 1) Propor um modelo de seleção de RAT utilizando uma abordagem MADM (Multi Attribute Decision Making).

O modelo considera critérios da abordagem user-centric para atender aos requisitos do usuário, além de utilizar um critério da abordagem network-centric para balancear a carga da rede. Dessa forma, há uma integração de ambas as abordagens no processo de tomada de decisão, visando otimizar a experiência de conectividade do usuário em um cenário de HetNets ultra-densas.

- 2) Além disso, o modelo desenvolvido utiliza o AHP para adaptar os pesos dos critérios de acordo com o perfil do usuário. Foram estabelecidos quatro perfis de usuários, cada um com prioridades distintas em relação aos atributos como QoS, energia, segurança e custo. Essa abordagem adaptativa permite uma tomada de decisão mais dinâmica, considerando as preferências individuais do usuário.

II. TRABALHOS CORRELATOS

Diversos trabalhos da literatura propuseram métodos para seleção de RAT baseados em decisão multicritério. Em [9], uma abordagem é proposta utilizando o algoritmo Whale Optimization para estabelecer os pesos dos critérios em conjunto com técnicas de MADM, com o objetivo de determinar a melhor RAT de acordo com o tipo de serviço do UE.

Em [10], a escolha da RAT é fundamentada em um processo de MADM que utiliza as técnicas TOPSIS e AHP, combinadas com Aprendizado por Reforço. Esse processo utiliza dados históricos coletados para reforçar o processo de seleção.

Em [11], é alcançada uma solução ótima, que representa uma rede de acesso adequada para o processo de handover, por meio da aplicação de uma abordagem híbrida que combina o processo analítico hierárquico difuso (FAHP) e o TOPSIS.

Em [12], é proposto um novo modelo de otimização fuzzy não linear que permite obter pesos precisos a partir de matrizes de comparação fuzzy para o processo de seleção de rede. São calculadas pontuações exclusivas utilizando três métodos de MADM: Simple Additive Weighting (SAW), TOPSIS e MEW (Multiplicative Exponential Weighting).

Em [13], é proposto o uso de um processo de decisão de Markov baseado na RSS para melhorar o esquema de VH em redes HetNets ultra-densas. A seleção de RAT é baseada na posição do UE, mas, em uma HetNet ultra-densa, o UE pode receber um RRS degradado. Para lidar com isso, é introduzido o modelo de competição de Stackelberg, que tem como objetivo aumentar o número de nós de retransmissão disponíveis para seleção, visando garantir a qualidade da comunicação e o balanceamento de carga no sistema de forma eficaz.

Em [18], é apresentado um indicador global de satisfação do usuário (USI) que quantifica as redes candidatas com base no contexto dos UE. O método utilizado é baseado no AHP. Como resultado, é proposto um algoritmo chamado OCANS (Opportune Context-Aware Network Selection), que é uma abordagem centrada no usuário, considerando o contexto do cliente para decidir a melhor RAT e obter maior satisfação do usuário.

Este artigo tem como objetivo reunir os critérios utilizados em estudos relacionados e adicionar um novo critério da abordagem centrada na rede. Com isso, é gerado um modelo que

considera critérios de ambas as abordagens do VH. A Tabela I apresenta os critérios utilizados nos estudos relacionados, bem como os critérios considerados neste trabalho.

III. MODELO DO SISTEMA

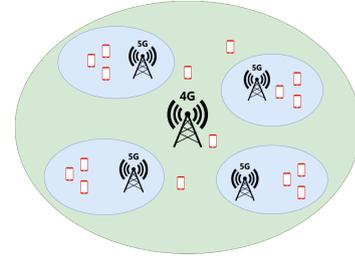


Fig. 1. Cenário multi RAT

Propõe-se a implementação de uma arquitetura com densificação de small cells com o objetivo de garantir uma cobertura contínua nas redes 5G e B5G. Essa arquitetura é composta por diferentes tipos de RAT, cada um com sua área de cobertura específica. Há as pico, femto e small cells, que são estações base de baixa potência configuráveis de acordo com as especificações do 5G. Essas estações base têm a capacidade de melhorar tanto a cobertura quanto a capacidade em ambientes internos, reduzindo a perda de sinal em edifícios e minimizando as tentativas de conexão com a estação base da rede principal. Além disso, elas ajudam a diminuir a carga da rede principal. Por outro lado, as macro cells são estações base centrais que abrangem áreas maiores e estão alinhadas com as especificações do 4G. A Figura 1 ilustra esse cenário entre estações base 4G e 5G.

A seleção dos critérios desempenha um papel crucial no processo de escolha da RAT. Atualmente, é fundamental que esses critérios englobem tanto as necessidades dos usuários quanto os requisitos da rede, a fim de determinar a RAT mais adequada. O contexto das opções de RAT disponíveis é estabelecido pela integração dos critérios dos usuários e da rede durante o processo de tomada de decisão. Portanto, é realizada uma divisão em critérios de rede e critérios de usuário que tem uma relação intrínseca com os requisitos da aplicação utilizada. As aplicações consideradas neste estudo seguem a categorização estabelecida em [15]. Os critérios utilizados na tomada de decisão são: QoS, custo, sustentabilidade do serviço, segurança e LF (Load Factor).

A. Cálculo das métricas intermediárias

1) *Throughput Disponível*: AT (Available Throughput) é determinado pela capacidade máxima de bits alcançável pela RAT, R_{max} , pelo LF que corresponde a proporção de recursos de rede ocupados em relação ao total, e pelo taxa de PL (Packet Loss). Essa taxa representa a taxa de mensagens que pode ser entregue com sucesso por meio do canal de comunicação. A relação entre esses elementos pode ser expressa na Equação 1:

$$AT = R_{max}(1 - LF)(1 - PL) \quad (1)$$

TABELA I
 TRABALHO CORRELATOS E OS CRITÉRIOS UTILIZADOS

Reference	Av. Throughput	Delay	Jitter	Energy	Cost	Acessability	Security	RSS	Load Factor
[9]	x	x	x		x		x	x	
[10]	x	x	x					x	
[11]	x	x	x	x	x		x	x	
[12]	x	x	x	x	x				
[13]						x		x	
[18]	x	x	x	x	x	x	x	x	
AHP-TOPSIS	x	x	x	x	x	x	x	x	x

R_{max} é calculado de acordo com a equação $R_{max} = \alpha C$, em que $0 < \alpha < 1$ é uma constante cujo valor depende do esquema de modulação utilizado pela RAT especificada, e $C = W \log_2(1 + SINR)$ sendo W a largura de banda do sistema e $SINR$ a relação sinal interferência-ruído.

O LF indica o percentual de RBs (Resource Blocks) ocupados em uma determinada BS (Base Station). A quantidade de RB alocados a cada usuário depende da qualidade R_{max} e da URB (User Required Bit Rate). O LF é atualizado em uma BS a cada nova chegada ou saída de um usuário.

2) *Probabilidade de Acessibilidade*: A P_{ac} (Probability of Accessibility) [18] determina a probabilidade do usuário permanecer na área de cobertura da BS durante um determinado intervalo de tempo. A P_{ac} considera a distância do usuário para a BS, a área R de cobertura da BS, e a distância r percorrida pelo usuário com velocidade V em um intervalo de tempo T .

3) *Probabilidade de Energia Suficiente*: A P_{se} (Probability of sufficiency energy) estima a probabilidade do UE ter energia suficiente para manter o serviço de aplicação durante um intervalo de tempo t . A P_{se} considera a tanto o percentual e a capacidade da bateria do UE quanto o consumo de energia PC gerado pela RAT utilizada. P_{se} pode ser considerada como a probabilidade de vida útil de um dispositivo, em que a função de densidade de probabilidade (pdf) é comumente assumida como exponencial [16].

B. Cálculo dos Atributos Principais

1) *Sustentabilidade de Serviço*: A P_{sus} (Probability of Sustainability) determina a probabilidade do usuário manter a conexão e aplicação do ponto de vista de cobertura e de energia. Dessa forma, a P_{sus} é calculada pelo produto da P_{ac} e P_{se} descritas anteriormente [18]:

$$P_{sus} = P_{ac}P_{se} \quad (2)$$

2) *Custo*: Um atributo importante para o UE é custo. Neste trabalho o custo foi considerado como o custo de operação definido pela RAT em \$/GB utilizados.

3) *Segurança*: A segurança representa um desafio complexo, caracterizado por múltiplas camadas e aspectos distintos, dificultando a comparação direta entre tecnologias de acesso por rádio. No entanto, uma avaliação abrangente da segurança é estabelecida através da atribuição heurística de um valor entre 1 e 5 para cada tecnologia de acesso por rádio. Essa atribuição é embasada em outros trabalhos da literatura.

4) *QoS*: O cálculo do QoS é realizado de acordo com [17] onde os valores dos atributos são normalizado por uma função sigmoide. O valor médio e o ajuste de inclinação da sigmoide para cada tipo de serviço seguem os valores em [19]

Os pesos dos atributos do QoS para cada tipo de serviço são determinados por meio do AHP. A Tabela II corresponde a tabela de Saaty do método AHP que estima o grau de importância de um atributo em relação ao outro. O valor dos pesos obtidos é explicitado na Tabela III. Mediante esses pesos, é possível efetuar o cálculo do QoS do usuário com base no tipo de serviço.

 TABELA II
 TABELA DE SAATY PARA OS TIPOS DE SERVIÇOS

FTP Download	AT	Delay	Jitter	VoIP	AT	Delay	Jitter
AT	1	7	9	AT	1	1/7	1/5
Delay	1/7	1	3	Delay	7	1	3
Jitter	1/9	1/3	1	Jitter	5	1/3	1
4K VOD	AT	Delay	Jitter	Cloud Gaming	AT	Delay	Jitter
AT	1	7	9	AT	1	1/7	1/5
Delay	1/7	1	2	Delay	7	1	3
Jitter	1/9	1/2	1	Jitter	5	1/3	1

 TABELA III
 PESOS DOS ATRIBUTOS DE QOS PARA CADA SERVIÇO DO USUÁRIO

Serviço	W_{AT}	W_{delay}	W_{jitter}
FTP Download	0.78	0.15	0.07
VoIP	0.07	0.65	0.28
4K VOD	0.78	0.15	0.07
Cloud Gaming	0.07	0.65	0.28

5) *Carga da Rede*: A carga da rede desempenha um papel crucial no equilíbrio dos recursos da rede, garantindo que uma BS não fique sobrecarregada enquanto outra próxima permaneça ociosa. O objetivo é utilizar os recursos da rede de forma eficiente. Para avaliar o equilíbrio das BS, foi proposta uma função que calcula a diferença de LF entre elas. No cenário ideal em que todas as BS possuem o mesmo LF, a diferença será igual a zero. Portanto, quanto menor o valor da função de diferença, melhor será o equilíbrio da rede.

IV. PERFIL DO USUÁRIO

Para avaliar a adaptabilidade do modelo gerado foram criados quatro perfis de usuários. Cada perfil prioriza um determinado atributo principal. Sendo assim, os quatro perfis criados priorizam um alto QoS, baixo custo, alta sustentabilidade do serviço e alta segurança, respectivamente. Para

TABELA IV

GRAU DE PREFERÊNCIA DO ATRIBUTOS PARA DIFERENTES PERFS DE USUÁRIOS

High QoS	QoS	Sus	Cst	Sec	LF	Low_batt	QoS	Sus	Cst	Sec	LF
QoS	1	5	9	7	9	QoS	1	1/5	5	3	1/5
Sus	1/5	1	3	3	5	Sus	5	1	9	7	9
Cst	1/9	1/3	1	1/3	1/5	Cst	1/5	1/9	1	1/3	1/7
Sec	1/7	1/3	3	1	1/3	Sec	1/3	1/7	3	1	1/7
LF	1/9	1/5	5	3	1	LF	5	1/9	7	7	1
Economy	QoS	Sus	Cst	Sec	LF	Secure	QoS	Sus	Cst	Sec	LF
QoS	1	1	1/5	3	2	QoS	1	1	5	1/5	1
Sus	1	1	1/5	3	1/2	Sus	1	1	5	1/5	1
Cst	5	5	1	7	5	Cst	1/5	1/5	1	1/9	1/5
Sec	1/3	1/3	1/7	1	1/3	Sec	5	5	9	11	5
LF	1/2	2	1/5	3	1	LF	1	1	5	1/5	1

estabelecer o grau de importância de cada atributo, o AHP foi utilizado novamente de acordo com a Tabela IV. Os pesos gerados para os critérios principais são apresentados na tabela V sendo W_{qos} , W_{sus} , W_{cst} , W_{sec} e W_{lf} o peso atribuído ao QoS, P_{sus} , custo, grau de segurança e LF , respectivamente. Além disso, a Tabela V apresenta outros parâmetros que foram posteriormente utilizados na simulação, tais como o tipo de serviço, a capacidade da bateria e a velocidade do usuário.

TABELA V

PERFIL DOS USUÁRIOS COM DIFERENTES PREFERÊNCIAS

Perfil do Usuário	W_{qos}	W_{sus}	W_{cst}	W_{sec}	W_{lf}	Serviço	Bateria (mAh)	V (m/s)
Alto QoS	0.569	0.205	0.036	0.072	0.118	4K VOD	200	20
Pouca bateria	0.12	0.535	0.032	0.061	0.252	4K VOD	200	20
Economia	0.151	0.117	0.545	0.051	0.137	4K VOD	200	20
Segurança	0.137	0.137	0.035	0.555	0.137	4K VOD	200	20

V. PROCESSO DE SELEÇÃO DA RAT

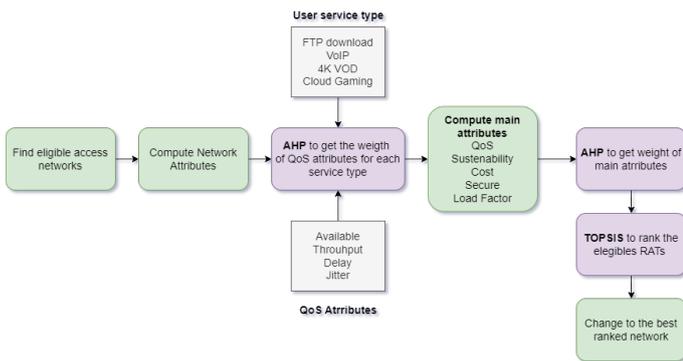


Fig. 2. Processo de seleção de RAT utilizando AHP-TOPSIS

A Figura 2 ilustra o processo de seleção da RAT implementado, que consiste nas seguintes etapas:

- Estabelecimento das redes elegíveis: São consideradas as redes em que a potência do sinal recebido pelo usuário é superior a -90 dBm.
- Coleta de informações das redes elegíveis: São obtidas as informações relevantes das redes elegíveis para análise.
- Utilização do método AHP: O AHP é utilizado para determinar os pesos dos atributos de AT, delay e jitter de

acordo com o tipo de serviço do usuário. Esses atributos são utilizados posteriormente para o cálculo do QoS do usuário.

- Cálculo dos atributos principais: Com base nas equações apresentadas anteriormente, são calculados os atributos principais relacionados ao QoS, sustentabilidade de serviço, custo, segurança e carga da rede.
- Utilização do AHP novamente: O método AHP é utilizado novamente para atribuir pesos a cada um dos atributos principais, levando em consideração o perfil do usuário.
- Aplicação do método TOPSIS: O método TOPSIS é utilizado para realizar a classificação e ranqueamento das RATs elegíveis. O usuário é então conectado à RAT que obteve a melhor classificação.

VI. ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com a Figura 1 foram considerados dois tipos de RAT, 4G e 5G, para avaliar o método de seleção. O cenário de simulação possui uma área de 4km², onde estão localizadas duas BS do tipo 5G e duas BS 4G. Além disso, foram distribuídos 100 usuários que se movimentam de forma aleatória [20]. A fim de calcular a potência recebida pelos usuários, empregou-se o modelo de perda de propagação log-normal [21]. Os parâmetros e atributos das redes empregadas são descritos na Tabela VI.

A simulação foi repetida 200 vezes para cada perfil de usuário de forma separada. Através dessas iterações, foram coletadas informações sobre o desempenho do processo de seleção de RAT. O modelo proposto neste estudo foi comparado a um outro modelo da literatura denominado OCANS [18], o qual emprega critérios semelhantes, exceto pelo LF. Além disso, o modelo OCANS também utiliza o método AHP para atribuir pesos a esses critérios, porém o USI para determinar a melhor RAT.

TABELA VI

OS VALORES DOS ATRIBUTOS DAS RAT CONSIDERADAS NA SIMULAÇÃO

Parâmetros RAT	F	P _t (dBm)	R (m)	R _{max} (Mbps)	PC (mW)	J (ms)	D (ms)	C _d (\$/GB)	S (1-5)
5G	3.5	15	1469	1000	300	3	10	7	3
4G-LTE	2.1	37	7846	100	1450	20	50	4.5	5

As figuras a seguir demonstram o comportamento do modelo proposto neste trabalho de acordo com o perfil dos usuários.

A Figura 3A) ilustra a distribuição dos valores de AT obtidos pelos usuários. É importante ressaltar que o perfil de usuários que demanda maior QoS (em azul) obteve uma maior taxa de AT no modelo AHP-TOPSIS.

A Figura 3B) exibe o consumo médio de potência obtido pelos usuários. É possível observar que o perfil de baixo consumo de energia (em verde) apresentou valores menores ao utilizar o método AHP-TOPSIS. Isso indica que o AHP-TOPSIS foi capaz de personalizar a seleção de forma mais eficiente, levando em consideração o perfil específico de energia do usuário.

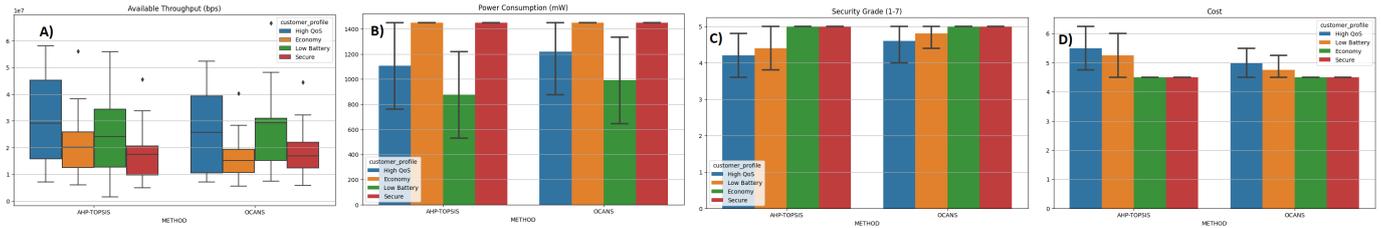


Fig. 3. AT dos usuários

Com base nas Figuras 3C) e 3D), é possível constatar que ambos os modelos apresentaram desempenho semelhante na determinação da rede com o maior grau de segurança e da rede com o menor custo.

Por fim, o método AHP-TOPSIS demonstrou maior eficiência em relação ao balanceamento da rede, resultando em um valor 7% menor ao considerar a função de balanceamento apresentada.

Portanto, pode-se observar que o modelo AHP-TOPSIS demonstrou uma capacidade superior de adaptação na seleção da rede para os perfis de alto QoS e baixo consumo de energia. No entanto, para os perfis relacionados à economia no custo de download e segurança, ambos os métodos, AHP-TOPSIS e OCANS, apresentaram desempenho semelhante. Além disso, o AHP-TOPSIS se destacou ao promover uma distribuição mais eficiente dos recursos da rede, uma vez que considera o critério de LF durante o processo de tomada de decisão, ao contrário do OCANS que não o leva em consideração.

VII. CONCLUSÃO

Em ambientes de HetNets ultra-densas previstos para 5G e B5G é fundamental adaptar a escolha de RAT de acordo com os serviços e preferências do usuário para oferecer a melhor experiência de rede. Dessa forma, este trabalho propôs um método baseado em MADM, utilizando especificamente o AHP para estabelecer o grau de importância dos atributos de acordo com o contexto do usuário e o TOPSIS para ranquear e consequentemente encontrar a rede mais adequada. Dessa forma, é selecionada a melhor RAT para o usuário de maneira dinâmica e personalizada. O modelo proposto conseguiu escolher de maneira mais eficiente para cada perfil de usuário. A avaliação foi feita por meio da comparação com outro trabalho que utilizou MADM, chamado OCANS. Em futuras pesquisas, pretende-se incluir o modelo em um ambiente simulado de rede, visando obter resultados que sejam mais fiéis à realidade. Além disso, pretende-se analisar o desempenho de outra abordagem de suporte à tomada de decisão com múltiplos critérios conhecida como Electre IV.

REFERÊNCIAS

- [1] D. E. Knuth, *The TeX Book*, Addison-Wesley, 15th edition, 1984.
- [2] R. Boulic and O. Renault, "3D Hierarchies for Animation," in *New Trends in Animation and Visualization*, N. Magnenat-Thalmann and D. Thalmann (eds.), John Wiley & Sons Ltd., 1991.
- [3] A. Smith and B. Jones, "On the Complexity of Computing," in *Advances in Computer Science*, A. B. Smith-Jones (ed.), Publishing Press, 1999, pp. 555–566.
- [4] E. Gustafsson and A. Jonsson, "Always best connected," *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 1, pp. 49–55, 2003.
- [5] M. Kassar, B. Kervella, and G. Pujolle, "An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks," *Computer Communications*, vol. 31, no. 10, pp. 2607–2620, 2008.
- [6] M. N. Halgamuge, H. Le Vu, K. Rarnamohanarao, and M. Zukerman, "Signal-based evaluation of handoff algorithms," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 790–792, 2005.
- [7] KANGAS, Jyrki. The Analytic Hierachy Process (AHP): standard version, forestry application and advances. Multiple Use of Forests and Other Natural Resources: Aspects of Theory and Application, p. 96–105, 1999.
- [8] BEHZADIAN, Majid et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. Expert Systems with applications, v. 39, n. 17, p. 13051–13069, 2012.
- [9] B. Mefgouda and H. Idoudi, "New network interface selection based on MADM and multi-objective whale optimization algorithm in heterogeneous wireless networks," *The Journal of Supercomputing*, vol. 79, no. 4, pp. 3580–3615, 2023.
- [10] I. Cinemre and T. Mahmoodi, "Learning-Based Multi Attribute Network Selection in Heterogeneous Wireless Access," *Wireless Personal Communications*, vol. 125, no. 1, pp. 351–366, 2022.
- [11] P. Satapathy and J. Mahapatro, "An efficient multicriteria-based vertical handover decision-making algorithm for heterogeneous networks," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 33, no. 4, article e4409, 2022.
- [12] R. K. Goyal, S. Kaushal, and A. K. Sangaiah, "The utility based non-linear fuzzy AHP optimization model for network selection in heterogeneous wireless networks," *Applied Soft Computing*, vol. 67, pp. 800–811, 2018.
- [13] A. Khodmi, S. B. Rejeb, N. Nasser, and Z. Choukair, "MDP-based handover in heterogeneous ultra-dense networks," in *2021 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 349–352, 2021, IEEE.
- [14] R. Honarvar, A. Zolghadrasli, and M. Monemi, "Context-oriented performance evaluation of network selection algorithms in 5G heterogeneous networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 202, article 103358, 2022.
- [15] ETSI 2019, *Speech and multimedia Transmission Quality STQ; Reference benchmarking, background traffic profiles and KPIs; Part 2: Reference benchmarking and KPIs for High speed internet ETSI TR 103 222-2 V1.1.1*.
- [16] A. Papoulis and S. Unnikrishna Pillai, *Probability, random variables and stochastic processes*, 2002.
- [17] Q. T. Nguyen-Vuong, Y. Ghamri-Doudane, and N. Agoulmine, "On utility models for access network selection in wireless heterogeneous networks," in *NOMS 2008-2008 IEEE Network Operations and Management Symposium*, IEEE, 2008, pp. 144–151.
- [18] R. Honarvar, A. Zolghadrasli, M. Monemi, "Context-oriented performance evaluation of network selection algorithms in 5G heterogeneous networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 202, pp. 103358, 2022. Elsevier. Q.-T. Nguyen-Vuong, Y. Ghamri-Doudane, and N. Agoulmine, "On utility models for access network selection in wireless heterogeneous networks," in *NOMS 2008-2008 IEEE Network Operations and Management Symposium*, pp. 144–151, 2008, IEEE.
- [19] ETSI 2020, *Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS parameters and test scenarios for assessing network capabilities in 5G performance measurements ETSI TR 103 702 V1.1.1*.
- [20] K.-H. Chiang and N. Shenoy, "A 2-D random-walk mobility model for location-management studies in wireless networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 413–424, 2004.
- [21] T. S. Rappaport, "Wireless Communications—Principles and Practice, (The Book End)," *Microwave Journal*, vol. 45, no. 12, pp. 128–129, 2002.