

Comparação do Desempenho de Esquemas de Gerenciamento de Localização em Redes 5G

Lidiano A. N. Oliveira, Marcelo S. Alencar e Waslon T. A. Lopes

Resumo—As redes móveis de quinta geração (5G) apresentam uma mudança de paradigma com relação às tecnologias anteriores, em que uma nova estratégia de gerenciamento de localização foi introduzida para permitir que os requisitos das redes 5G sejam atendidos. Este artigo apresenta o custo de sinalização do novo esquema de gerenciamento de localização proposto pelo 3GPP em redes 5G. O desempenho desse esquema é analisado e comparado com os esquemas adotadas em redes predecessoras. Os resultados encontrados confirmam que o novo esquema reduz o custo de sinalização de uma rede 5G quando comparado aos esquemas tradicionais (redes 2G, 3G e LTE).

Palavras-Chave—Sistema Móvel Celular, Gerenciamento de Localização, Redes 5G.

Abstract—Unlike predecessors technologies, the fifth generation (5G) of mobile networks represents a technological paradigm shift. A new location management strategy was introduced to fulfill the new requirements of 5G networks. This article presents the signalling cost of the new location management scheme of proposed by 3GPP. The performance of this scheme is analyzed and compared to the predecessor schemes. The results confirm that the new scheme decreases the signalling cost of a 5G network when compared to the traditional schemes (2G, 3G and LTE networks).

Keywords—Cellular Mobile System, Location Management, 5G Networks.

I. INTRODUÇÃO

As redes de quinta geração (5G) são uma evolução recente da tecnologia de comunicações móveis. Essas redes devem suportar uma maior taxa de transmissão (superior a 10 Gbit/s), menor latência (inferior a 1 ms), alta confiabilidade, maior conectividade e maior mobilidade. Além do crescimento do número de estações móveis (EMs), novos cenários foram incluídos para as redes 5G, tais como comunicação massiva do tipo máquina (massive Machine-Type Communications - mMTC), comunicação entre veículos e dispositivo para dispositivo [1]. As soluções de gerenciamento de localização existentes não foram projetadas para suportar um número tão grande de dispositivos em uma rede com um densa cobertura de estações radiobase (ERB), necessária a fim de suprir a cobertura limitada decorrente a utilização de ondas milimétricas, bem como apresentar as características exigidas pelas redes 5G [2]. Neste contexto, a busca e atualização da localização dos dispositivos, procedimentos que fazem parte do gerenciamento de localização de uma rede móvel, serão

mais onerosos do que os observados nas redes precedentes devido ao número massivo de dispositivos conectados e à densidade de células.

Por esses motivos, foi introduzido nas especificações do sistema 5G um novo estado de conectividade no Controle de Recursos de Rádio (RRC – *Radio Resource Control*), chamado de estado Inativo [3]. Esse estado permite uma abordagem hierárquica do gerenciamento de localização de forma que partes dos procedimentos também sejam executados nos elementos da rede de acesso de rádio em vez de apenas na rede de núcleo. Essa abordagem minimiza o custo de sinalização causado por acessos frequentes à rede, como o observado nos *smartphones* em virtude dos aplicativos que permanecem ativos na memória.

Neste artigo é realizada uma análise comparativa do custo de sinalização em uma rede 5G com as estratégias de gerenciamento já existentes e o novo esquema proposto pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Foi implementado um simulador para modelar o comportamento de usuários de redes móveis, fornecendo informações de tráfego e mobilidade. A partir dessas informações, foi utilizado o algoritmo genético para obter uma rede 5G com um custo de sinalização otimizado e o desempenho de cada esquema de gerenciamento de localização analisado.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II é introduzido o conceito de gerenciamento de localização em uma rede móvel. Na Seção III são apresentadas as características das redes 5G. Na Seção IV é detalhado o novo esquema de gerenciamento de localização para as redes 5G. Na Seção V são apresentados os resultados obtidos e a Seção VI contém as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

II. GERENCIAMENTO DE LOCALIZAÇÃO

O gerenciamento de localização é composto basicamente por dois procedimentos [4]. O primeiro procedimento é a atualização da localização, que é o processo em que a estação móvel informa à rede a sua localização atual. A área de cobertura é dividida em várias regiões, chamadas de área de (AR). A atualização é executada quando a EM atravessa o limite dessa área. A segunda operação é a busca da EM, funcionalidade que permite que a rede procure o usuário por meio de mensagens de radiodifusão na área de rastreamento em que o usuário se registrou pela última vez.

O impacto de uma rede com alto custo de sinalização é a maior utilização de recursos da rede, podendo gerar congestionamento, queda de conexão, falha na busca de usuários e escassez de recursos para outras atividades, como estabelecimento de chamada e *handover*. A experiência do usuário

também é afetada, com uma maior latência na busca da EM e até no maior consumo da energia da bateria.

III. REDES 5G

Desde a rede GSM (*Global System for Mobile Communication*), cada nova geração busca o aumento da taxa de transmissão para melhorar os serviços móveis para os consumidores. Entretanto, a rede 5G difere das gerações anteriores porque a taxa de transmissão não é o único motivo que impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias. O 3GPP formou um grupo de estudo para investigar casos de uso para novos serviços e tecnologias, identificando funcionalidades e características que as redes 5G precisariam atender [5]. O estudo resultou em mais de 70 casos, agrupados em três categorias de acordo com os atributos de desempenho que cada caso necessitaria, conforme ilustrado na Figura 1 [6]. As três categorias são:

- Banda Larga Móvel aperfeiçoada (*enhanced Mobile Broadband* – eMBB) – Serviços que demandam alta taxa de transmissão para uma grande área de cobertura, como vídeos de alta definição, jogos imersivos, dentre outros;
- Comunicações massivas do Tipo Máquina (*Massive Machine Type Communications* – mMTC) – Serviço utilizados por dispositivos de baixo custo, baixo consumo de energia e um alto número de dispositivos por área, como cidades inteligentes e rede de sensores sem fio para agricultura;
- Comunicações de Baixa Latência Ultra confiáveis (*Ultra-Reliable and Low-Latency Communications* – uRLLC) – Serviços sensíveis à latência, como controle automático de veículos, Internet tátil, cirurgia remota, entre outros.



Fig. 1. Categorias de serviços 5G [6].

A colaboração da indústria, academia e institutos de pesquisa para o entendimento das possíveis utilizações da rede 5G permitiu identificar os principais requisitos necessários para sua implementação [7]. São eles:

- Taxa real de 1 a 10 *Gbit/s* – Aumento de até 10 vezes da taxa de transmissão em relação ao padrão LTE;
- Latência de 1 ms – Redes LTE apresentam uma latência fim a fim em torno de 50 ms e a latência na interface

aérea em torno de 10 ms. As redes 5G propõem diminuir para 5 ms e 1 ms respectivamente;

- Largura de banda por unidade de área – Suporta um número 1000 vezes maior de dispositivos para uma mesma área de cobertura;
- Alto número de dispositivos conectados – Para realizar o IoT massivo, a rede 5G necessita prover conectividade a milhares de dispositivos conectados simultaneamente a uma única célula, tendo assim uma densidade 100 vezes maior do que na rede LTE;
- Percepção de disponibilidade de 99,999% – As redes 5G devem ser percebidas pelos usuários como sempre disponível;
- Cobertura total para 100% de conectividade – Há a necessidade de garantir cobertura irrestrita para os usuários;
- Redução no consumo de energia – Espera-se uma redução de 90% no consumo para dispositivos de baixa potência;
- Baterias de alta duração – Além da redução do consumo, é fundamental que dispositivos tenham uma longa vida útil de bateria.

IV. ESTADOS RRC NAS REDES 5G

O controle de recursos de rádio (*Radio Resource Control* - RRC) oferece solução para o sistema de acesso, economia de energia e mobilidade, que devem suportar eMBB, uRLLC e serviços IoT exigidos para as redes 5G. A operação do RRC é guiada por uma máquina de estados que define recursos para cada estado em que a EM se encontra. Quando EMs saem do modo ocioso para o modo conectado, mensagens de sinalização são enviadas até o elemento da rede de núcleo responsável pela Função de Acesso e Gerenciamento de Mobilidade (*Access and Mobility Management Function* - AMF).

Quando a EM está no estado ocioso (RRC_IDLE), não existe comunicação entre a EM e a rede. Dessa forma a localização da EM não é conhecida. Quando a EM necessita transferir dados, ela inicia uma conexão RRC com a ERB e entra no estado conectado (RRC_CONNECTED) por meio de mensagens de sinalização que são enviadas para o AMF. Nesse estado, a localização da EM é conhecida e a EM está apta para realizar transferência de dados.

Para permitir transições mais eficientes e reduzir a latência na busca para o estado RRC_CONNECTED, um novo estado RRC_INACTIVE foi introduzido [8]. Essa abordagem minimiza o custo de sinalização causado por frequentes acessos a rede, como o observado nos *smartphones* com a utilização de aplicativos que permanecem ativos na memória [9]. Também permite diminuir a latência experimentadas pelas EMs, redução de consumo de energia por dispositivos tais como sensores alimentado por baterias que apenas enviam atualizações aleatórias e utilizando pouca banda [1]. No estado RRC_INACTIVE, a rede de núcleo considera que existe uma conexão persistente com a rede de acesso, mantendo assim o contexto da EM na rede [3]. A Figura 2 apresenta as transições da máquina de estado para o RRC do 5G.

Também foram introduzidos novos estados CN_IDLE e CN_CONNECTED relacionados ao tipo de conexão da EM com o elemento da rede de núcleo [8]. Para o AMF, a EM se



Fig. 2. Transições da máquina de estado [10].

encontra no estado ocioso (CN_IDLE) e é conhecida com a granularidade de lista de área de rastreamento (*Tracking Area List* – TAL). Esse cenário tem comportamento similar à rede LTE. Para o elemento da rede de núcleo que é responsável pela mobilidade na rede 5G (AMF), a EM está no estado conectado (CN_CONNECTED) e conhece a localização da EM com a granularidade de célula.

Para manter a EM localizável, a rede de acesso é particionada em áreas menores que consistem em grupos de células 5G (*NextGen NodeB*) - gNBs) conectadas entre si, que fornecem a interface de rádio 5G e são conectadas pela interface X_n . Essa área é chamada de Área de Notificação baseada em Rede de Acesso (ANRA) [9]. Quando ocorre a transição entre o estado RRC_CONNECTED e RRC_INACTIVE, a última célula em que a EM estava conectada mantém o contexto da EM e a conexão com a rede de núcleo.

Além do procedimento de busca iniciado exclusivamente pelo AMF quando a EM está no estado RRC_IDLE (que é igual à mensagem de busca na rede LTE enviada pelo MME), outra forma de busca foi introduzida pelo 3GPP para as redes 5G. Nesse caso a busca é iniciada pela rede de acesso e é utilizada quando a EM está no estado RRC_INACTIVE.

A. gNB Âncora

O contexto da EM no estado RRC_INACTIVE é armazenado em uma gNB âncora [11], não sendo necessário sinalização adicional com o AMF pois o contexto já é conhecido pela rede de acesso. A EM nesse estado fica no modo de espera de forma similar ao estado RRC_IDLE. Ao chegarem dados endereçados a EM, o AMF encaminha os pacotes para a gNB âncora, que armazena e encaminha a busca para todas as células que fazem parte da ANRA. A EM responde a mensagem de busca e retorna ao estado RRC_CONNECTED para receber os dados. Fazem parte das diversas opções de configuração para a ANRA a associação de uma célula, lista de células, lista de ANRA e um subconjunto da AR [8]. O estado RRC_INACTIVE pode ser considerado um misto do estado ocioso e conectado. Quando ocorre a transição entre o estado RRC_CONNECTED e RRC_INACTIVE, a última gNB que a EM estava conectada (gNB âncora) mantém o contexto da EM e a conexão com o AMF, além de fornecer para a EM uma lista de ANRA que a EM pode se movimentar na sua área de cobertura sem notificar a RAN, conforme ilustrado na Figura 3.

Se durante essa movimentação a EM identificar que a nova gNB possui uma ANRA diferente da gNB anterior, uma atualização de localização da ANRA é enviada. Caso uma gNB diferente da gNB âncora receba esse atualização, ela encaminha a mensagem de sinalização para a gNB âncora, que devolve a lista de ANRA e decide se mantém

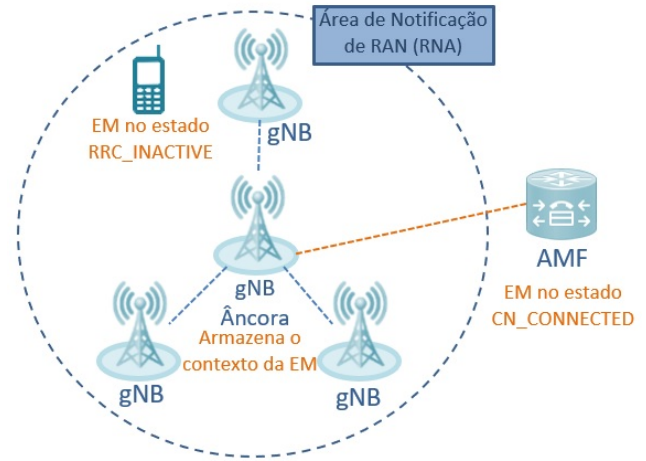


Fig. 3. Área de Notificação de RAN.

a EM no estado RRC_INACTIVE, move a EM para o estado RRC_CONNECTED ou envia a EM para o estado RRC_IDLE. A gNB âncora também solicita que a EM periodicamente envie atualização de ANRA, para notificar a rede que a EM continua ativa.

V. CUSTO DE SINALIZAÇÃO

As métricas utilizadas para o cálculo do custo total (C_T) relativo à mobilidade em uma rede celular são o número de atualizações executadas e o número de buscas enviadas para as células [12]. O custo total (C_T) relativo à mobilidade é dado por [13]

$$C_T = R_1 \times N_L + N_P, \quad (1)$$

em que N_L é o número de atualizações, N_P é o número de mensagens de busca na rede e R_1 é uma constante que representa a razão do custo entre atualização e a busca. O custo de um evento de atualização de localização é maior do que o de busca devido aos procedimentos complexos que são executadas a cada evento.

Para uma rede com n células, o custo de atualização N_L é a soma de eventos de localização que ocorrem entre as áreas de localização (N_A) e entre as ANRAs (N_R). Para auxiliar a representação do custo de atualização, é definida a variável w_{ij} como o número de assinantes que sai da cobertura da célula i e entra na cobertura célula j . A quantidade de atualizações de área de rastreamento pode ser calculada por meio de

$$N_A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot u(i, j), \quad (2)$$

em que $u(i, j)$ é uma função que retorna 0 caso a área de rastreamento da célula i seja a mesma da célula j e retorna 1 caso contrário.

Para o caso de atualização de ANRA, o cálculo é feito por

$$N_R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (1 - u(i, j)) \cdot v(i, j), \quad (3)$$

em que $v(i, j)$ é uma função que retorna 0 caso a área de notificação baseada em rede de acesso da célula i seja a mesma da célula j e retorna 1 caso contrário.

As atualizações iniciadas pela rede de núcleo demandam uma complexidade maior do que as iniciadas pela rede de acesso. Dessa forma, é considerada um fator R_2 para representar a razão do custo entre os tipos de atualização.

$$N_L = R_2 \cdot N_A + N_R. \quad (4)$$

Assim como as atualizações, as buscas iniciadas pela rede de acesso (modo RRC_INACTIVE) utiliza uma quantidade menor de recursos do que as iniciadas pelo AMF (no modo RRC_IDLE), além de uma latência inferior [9]. O número de buscas b_i iniciadas pela rede de núcleo executadas na célula i é igual ao total de conexões destinadas a esta célula mais todas as conexões destinadas às outras células que pertençam à mesma área de rastreamento. Da mesma forma, as buscas t_i iniciadas pelo acesso na célula i se somam ao número de buscas de outras células pertencentes à mesma ANRA. O número de mensagens de busca total pode ser calculado por meio de

$$N_P = \sum_{i=1}^n b_i \cdot m_i + \sum_{i=1}^n t_i \cdot g_i, \quad (5)$$

em que m_i é o número de células na rede que façam parte da área de rastreamento da célula i e g_i é o número de células que façam parte da mesma ANRA da célula i .

Assim, o custo total da sinalização relativo as atualizações e mensagens de busca é dado por

$$C_T = R_1 \times \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot u(i, j) \right) + R_1 \times R_2 \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (1 - u(i, j)) \cdot v(i, j) + \sum_{i=1}^n p_i \cdot m_i + \sum_{i=1}^n t_i \cdot g_i. \quad (6)$$

VI. RESULTADOS

Para comparar o desempenho do gerenciamento de mobilidade em redes móveis, foi desenvolvido em linguagem C++ um simulador para implementar o comportamento de usuários na rede móvel (tráfego e movimentação). Para levar em consideração uma maior abrangência de cenários, as redes foram implementadas com variados perfis de tráfego, número de usuários e quantidade de elementos de rede. O simulador implementa o fluxo de pessoas que trafegam em células e os usuários que permanecem nas células originais ao longo do período de análise. Se essas informações fossem obtidas de forma estritamente aleatória, os resultados em valores de mensagens de busca e atualizações de área de rastreamento não correlacionados. Os dados obtidos do simulador são formatados de acordo com a Figura 4.

A partir desses dados, é utilizada a Equação 6 como métrica para encontrar uma configuração de áreas de rastreamento, ANRA e células âncoras que minimizem o custo de sinalização da rede 5G. Para identificar a melhor solução possível, não foram utilizadas soluções que limitem as soluções encontradas, tais como algoritmos que utilizam listas de áreas de localização com apenas uma área de rastreamento [14]

Célula	Buscas	Célula Vizinha 1	Célula Vizinha 2	...	Célula Vizinha v
		Transição #Viz_1←Célula	Transição #Viz_2←Célula	...	Transição #Viz_v←Célula
1	#busca ₁	#transição_c ₁ v ₁	#transição_c ₁ v ₂	...	#transição_c ₁ v _v
2	#busca ₂	#transição_c ₂ v ₁	#transição_c ₂ v ₂	...	#transição_c ₂ v _v
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	#busca _n	#transição_c _n v ₁	#transição_c _n v ₂	...	#transição_c _n v _v

Fig. 4. Atributos da Rede Obtidos pelo Simulador.

ou que estabelece uma quantidade máxima de células por área de rastreamento [15]). Por isso, foi utilizado Algoritmo Genético (AG) para encontrar essa rede subótima [12]. A função objetivo é calculada conforme Equação 6, que totaliza o custo de sinalização da rede. Neste trabalho os valores adotados R_1 e R_2 são 10 e 5, respectivamente. Como o desempenho do AG depende da parametrização dos operadores genéticos, modificações nos parâmetros do AG são realizadas para determinar qual a melhor configuração para o problema em questão. Para cada cenário e conjunto de parâmetros do AG, são executados 100 experimentos independentes.

Para investigar o desempenho das redes 5G utilizando o novo estado RRC_INACTIVE introduzido pelo 3GPP, foram adotados esquemas de gerenciamento de localização diferente para redes com a mesma característica. No primeiro caso, foi adotado o esquema apenas com área de rastreamento (solução típica para redes de segunda e terceira geração), em que uma EM é associada a uma única área de rastreamento. Para o segundo caso, foi adotado o esquema com lista de área de rastreamento (solução introduzida para redes LTE), em que uma EM é associada a uma lista de área de rastreamento. No terceiro caso foi utilizada a ANRA, em que a EM está associada a uma ANRA (quando a EM estiver no modo RRC_INACTIVE) e a lista de área de rastreamento (quando a EM estiver no modo RRC_IDLE).

A Figura 5 apresenta o custo de sinalização para uma rede 5G com 100.000 usuários e com quantidades diferentes de células. O aumento na densidade de células aumenta a quantidade de passagens de usuários pelas células (ainda que com o mesmo perfil de mobilidade). A atualização de localização adicional justifica o incremento no custos de sinalização conforme o número de células aumentam. O uso do esquema de ANRA permitiu uma diminuição média de 25% no custo de sinalização comparado ao esquema de área de rastreamento e cerca de 12,1% comparado a lista de área de rastreamento.

A Figura 6 ilustra o cenário de uma rede com 50 células em que o custo de sinalização aumenta conforme o número de usuário aumente. Um número maior de usuários realizará mais eventos de atualização de localização e também receberão mais mensagens de buscas. O uso do esquema de ANRA permitiu uma diminuição média de 44,7% no custo de sinalização comparado ao esquema de área de rastreamento e cerca de 27,1% comparado a lista de área de rastreamento.

Para redes com 50 células e 100.000 usuários com diferentes cenários de mobilidade, a Figura 7 ilustra um aumento no custo de sinalização da rede conforme os usuários apresentem uma mobilidade maior. Um usuário que se movimenta tende a realizar mais atualizações de localização. O esquema ANRA apresenta um desempenho 34,1% melhor do que o esquema de área de rastreamento e 15,4% melhor do que o esquema

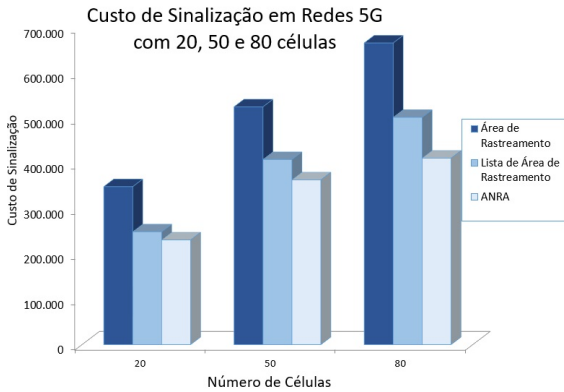


Fig. 5. Efeito do número de células no custo de sinalização.

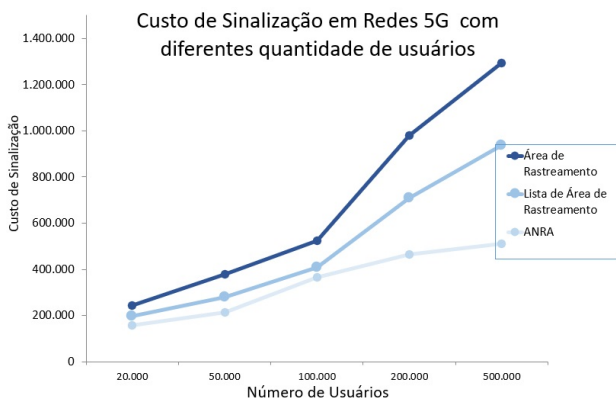


Fig. 6. Efeito do número de usuários no custo de sinalização.

de lista de área de rastreamento.

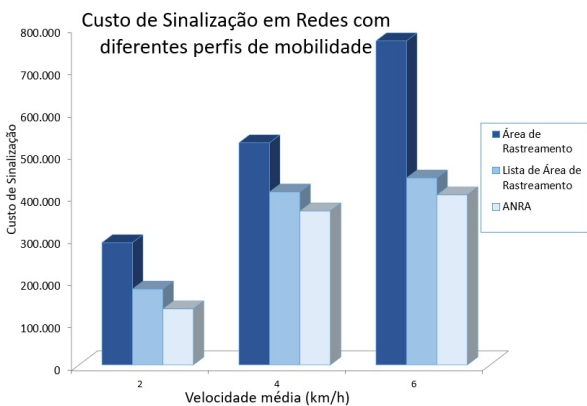


Fig. 7. Efeito da mobilidade de usuários no custo de sinalização.

VII. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisado o desempenho do novo esquema de gerenciamento de localização em uma rede 5G. Os esquemas empregados em redes de gerações anteriores não foram projetados para suportar um número tão grande de dispositivos em uma rede com uma densa cobertura de células. Para atender os requisitos do 5G, o 3GPP introduziu uma nova arquitetura com objetivo de minimizar o custo de sinalização

relativo as atualizações de localização e as mensagens buscas, além de reduzir a latência.

Foram apresentadas novas características do gerenciamento de mobilidade em redes 5G, bem como a equação para o cálculo do custo sinalização em termos de atualização de localização e mensagens de busca. Para investigar o ganho desse novo esquema, redes móveis, com custo de sinalização otimizado para cada esquema de gerenciamento de localização, foram obtidas por meio de um AG alimentado com dados gerados por um simulador.

Foi mostrado neste trabalho que os custos do gerenciamento de localização são reduzidos quando o esquema de ANRA é utilizado, principalmente em cenários que utilizam mais recursos das redes 5G (maior número de usuário, maior densidade de células e maior mobilidade). Com o novo esquema adotado no 5G foi possível diminuir o custo da rede em todos os cenários investigados.

O próximo passo dessa pesquisa consiste em desenvolver uma metodologia para o cálculo da latência.

REFERÊNCIAS

- [1] L. A. N. Oliveira, M. S. Alencar, and W. T. A. Lopes, "Evolução da Arquitetura de Redes Móveis Rumo ao 5G," *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 8, no. 2, pp. 43–50, 2018.
- [2] A. Osseiran, J. F. Monserrat, and P. Marsch, *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1st ed., 2016.
- [3] S. Hailu and M. Säily, "Hybrid Paging and Location Tracking Scheme for Inactive 5G UEs," in *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, pp. 1–6, June 2017.
- [4] Y. W. Chung, "Adaptive Design of Tracking Area List in LTE," in *8th IEEE and IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, WOCN2011*, pp. 1–5, 2011.
- [5] 3GPP, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies. TR 38.913, Rel. 14." Technical Report, October 2016.
- [6] I. T. Union, "Recommendation ITU-R M.2083-0 – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond." Technical Report, September 2015.
- [7] S. Sharma and B. Singh, "5G Networks: The Next Gen Evolution," *2016 International Conference on Signal Processing and Communication, ICSC 2016*, pp. 55–60, 2016.
- [8] 3GPP, "NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2," Technical Specification (TS) 38.300, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), October 2018. Version 15.3.1.
- [9] A. Alsaedy and E. Chong, "Tracking Area Update and Paging in 5G Networks: a Survey of Problems and Solutions," *Mobile Networks and Applications*, October 2018.
- [10] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; Study on New Radio Access Technology; Radio Interface Protocol Aspects," Technical Specification (TS) 38.804, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), March 2017. Version 14.0.0.
- [11] A. Alsaedy and E. Chong, "Mobility Management for 5G IoT Devices: Improving Power Consumption With Lightweight Signaling Overhead," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8237–8247, 2019.
- [12] L. A. N. Oliveira, M. S. Alencar, and W. T. A. Lopes, "Utilização de Algoritmo Genético no Gerenciamento de Localização para Otimização de Redes LTE," in *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT 2018*, pp. 789–793, Setembro 2018.
- [13] J. Taheri and A. Y. Zomaya, "A Genetic Algorithm for Finding Optimal Location Area Configurations for Mobility Management," *The IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary (LCN'05)*, pp. 577–585, 2005.
- [14] S. M. Razavi, D. Yuan, F. Gunnarsson, and J. Moe, "Exploiting Tracking Area List for Improving Signaling Overhead in LTE," *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 1–5, 2010.
- [15] S. M. Razavi and D. Yuan, "Reducing Signaling Overhead by Overlapping Tracking Area List in LTE," in *2014 7th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference, WMNC 2014*, pp. 1–7, 2014.