

Coexistência de RATs: Um Estudo Bibliométrico de Algoritmos Dinâmicos para Redes LTE, Wi-Fi e 5G-NR

José Martins de C. Neto, Millena Michely De M. Campos
Vicente A. de Sousa Jr.^{1*}

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) – Natal – RN – Brazil

{martinsee,millenenacampos,vicente.sousa}@ufrn.edu.br

Abstract. *This paper presents a bibliometric survey of publications on coexistence between Radio Access Technologies (RATs), including LTE systems in licensed and unlicensed band, Wi-Fi and 5G-NR. In addition, it is sought to make a survey of techniques by reinforcement learning and game theory applied to the problem of coexistence. For this, the Scopus and Web of Science publications bases were consulted, and the number of publications was organized in order to expose a temporal mapping of the interest of the scientific community by the subject. As the application of machine learning and game theory to the coexistence problem is recent, it was possible to map all techniques used for coexistence solutions.*

Resumo. *Este artigo apresenta um levantamento bibliométrico das publicações sobre coexistência entre Radio Access Technologies (RATs), incluindo os sistemas LTE em banda licenciada e não-licenciada, o Wi-Fi e o 5G-NR. Além disto, procura-se fazer um levantamento de técnicas de Aprendizado por Reforço e de Teoria dos Jogos aplicadas ao problema de coexistência. Para isto, as bases de publicações Scopus e Web of Science foram consultadas, e o número de publicações foi organizado de forma a expor um mapeamento temporal do interesse da comunidade científica pelo assunto. Como a aplicação de aprendizado de máquina e Teoria dos Jogos ao problema de coexistência é recente, foi possível o mapeamento de todas as técnicas utilizadas para soluções de coexistência.*

1. Introdução

Entre duas gerações de sistemas de comunicações móveis existe o apelo pela transição suave entre tecnologias. Isso acaba sendo uma demanda do mercado, principalmente em países com grande extensão territorial, pois a atualização (ou troca) da infraestrutura da rede de comunicação acontece de forma gradual. Mesmo quando a infraestrutura da rede de comunicações já está atualizada, existe um tempo para que os clientes comprem novos aparelhos celulares para acessá-las. Essa característica abre espaço para as redes heterogêneas. Elas são fruto da coexistência entre diferentes *Radio Access Technologies* (RATs). Isso já ocorreu entre o 1G e o 2G, quando os usuários realizavam ligação de voz por meio dos sistemas analógicos 1G onde não tinha cobertura do sistema digital 2G. A coexistência entre RATs foi evoluindo para uma arquitetura *tight-coupling* [Khattab and Alani 2014], chegando a situação que redes 2G, 3G, Wi-Fi e 4G coexistem para oferecer o melhor acesso possível ao usuário do sistema. Isso é feito de forma automática por meio de algoritmos de coexistência, sem a necessidade de intervenção humana. Atualmente, com a procura da maximização do uso do

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

espectro de rádio, a coexistência explora bandas licenciadas e não-licenciadas. Na verdade, a função crucial da estratégia de coexistência é proporcionar com que vários sistemas operem em uma mesma área geográfica, muitas vezes utilizando a mesma porção do espectro de rádio, com a máximo de eficiência possível.

Considerando a banda licenciada, o sistemas do 3GPP dominam o mercado. O *Long Term Evolution* (LTE) ou suas evoluções (4G LTE-Advanced e 4.5G LTE-Advanced Pro) podem ser encontrados em praticamente todas as operadoras do mundo. Um relatório recente da GSMA [GSMA 2019] noticiou que somente as redes LTE têm 4 bilhões de conexões em todo o mundo. E a família de sistemas 3GPP está crescendo com a chegada iminente do 5G-*New Radio* (5G-NR), deixando o mundo mais uma vez com a necessidade de novas soluções e de avaliação dos cenários onde há a integração dessas tecnologias. Contudo, ao invés de coexistência, o termo *Dual Connectivity* está sendo utilizado para designar soluções que envolvam a rede 5G-NR em operação com outras redes. Em [Antonioli et al. 2018] são identificados os principais desafios e perspectivas do *Dual Connectivity* para as redes LTE-NR.

Já com relação a banda não-licenciada, o Wi-Fi é a tecnologia dominante. Entretanto, o *Release 13* do 3GPP lançou a versão do LTE em banda não-licenciada. Concebida para operar na faixa de 5 GHz da banda ISM¹, essa versão do LTE foi denominada *Licensed Assisted Access* ou LTE-LAA [3GPP 2015]. Ela também é chamada de LTE-LBT, devido a estratégia de *Listen-Before-Talk* (LBT), similar ao Wi-Fi, que foi empregada na camada de acesso ao meio do LTE-LAA. Já o LTE-U é outra tecnologia LTE para banda não-licenciada criada por um conjunto de empresas da área de telecomunicações [Qualcomm 2014, Almeida et al. 2013]. Ela se baseia na estratégia de silenciamento de transmissão em períodos pré-definidos, chamados de *Duty Cycles*. Por isso o LTE-U é chamado também de LTE-DC [de Santana et al. 2016]. Estas duas tecnologias, juntamente com o próprio NR-5G e o Wi-Fi, podem operar em conjunto, cooperando ou competindo [Antonioli et al. 2018, Rupasinghe and Guvenc 2014, kwan et al. 2015].

Devido ao caráter dinâmico e multivariável do problema de coexistência, a aplicação de técnicas de Aprendizado por Reforço e de Teoria dos Jogos tem potencial de promover soluções de baixo custo e alto desempenho. Como exemplos, em [Castane et al. 2017, Rupasinghe and Guvenc 2015], o algoritmo *Q-Learning* é aplicado para a coexistência LTE/Wi-Fi. Já em [Saad 2010, Ashidani and Guardieiro 2014], são aplicadas abordagens baseadas em Teoria dos Jogos no problema de alocação de recursos e seleção de canais no LTE.

A primeira etapa deste trabalho se materializou na proposta de uma taxonomia que envolvesse o problema de coexistência entre RATs, as técnicas de Aprendizado por Reforço e Teoria dos Jogos. A taxonomia nasceu da experiência dos autores sobre os assuntos, aliada a análise de buscas preliminares de publicações nas bases *Scopus* e *Web of Science*. Assim, a seguinte classificação de termos guiam o escopo deste trabalho²:

- **RATs:** 5G-NR, LTE, LTE-LAA, LTE-LBT, LTE-U, Wi-Fi;
- **Coexistência:** *Dynamic Resource Allocation, Spectrum Sharing, Dual Connectivity*;
- **Técnica - Reinforcement Learning:** *Q-Learning, Multi-Armed bandit*;
- **Técnica - Game Theory:** *two-zero-sum game, Cooperative Games, Nash bargaining game*;

Por tudo supracitado, este trabalho tem como objetivo fazer um estudo panorâmico sobre as publicações na área de coexistência de RATs, abrangendo banda licenciada e

¹*The industrial, scientific and medical* [Loy et al. 2005].

²Decidiu-se manter os termos em língua Inglesa, pois as bases de dados colecionam artigos nesse idioma.

não-licenciada, além do levantamento de tendências em técnicas baseadas em Aprendizado por Reforço e Teoria do Jogos aplicadas neste contexto. Os autores deste artigo não encontraram literatura com esse escopo, podendo ser uma contribuição relevante para pesquisadores que estão começando a pesquisa na área.

O trabalho está organizado com a seguir. A Seção 2 traz a metodologia de pesquisa e de geração dos resultados do trabalho. Em seguida, os resultados são apresentados e discutidos na Seção 3. Por fim, as conclusões finalizam o artigo na Seção 4.

2. Metodologia

Visando fazer um levantamento o mais abrangente possível, mas que só incluísse trabalhos do assunto alvo deste artigo, foram realizadas pesquisas iniciais para definir um conjunto de estratégias de buscas. As bases de pesquisa utilizadas foram a *Web of Science* (WoS) e *Scopus*. O primeiro preceito definido foi devido à limitação temporal das publicações, visto que as tecnologias tratadas neste trabalho são recentes. O artigo mais antigo é datado de 2012, compreendendo assim, uma escala temporal de sete anos (2012-2019). Já para estratégias envolvendo a tecnologia 5G-NR, os primeiros trabalhos foram publicados em 2014³.

A Tabela 1 apresenta as **palavras-chave** e o **campo de pesquisa** das estratégias de busca. As tecnologias foram buscadas no título da publicação, a fim de selecionar apenas os trabalhos vinculados as **RATs** selecionadas. As palavras-chave referentes à **coexistência** ou **técnica** foram destinadas nas pesquisas em título, resumo ou palavras-chave, visto que nem sempre o título do trabalho menciona as estratégias utilizadas.

Tabela 1: Estratégias de busca definidas na pré-prospecção.

Estratégia	Palavras-chave no título	Palavras-chave no título, resumo ou palavras-chave
1	(LTE OR long term evolution) AND (WIFI OR WI-FI)	coexistence OR spectrum shar* OR dynamic resource allocation OR dual connectivity
2	(LTE OR long term evolution) AND (WIFI OR WI-FI)	(coexistence OR spectrum shar* OR dynamic resource allocation OR dual connectivity) AND (Learning OR game theory)
3	(LTE OR long term evolution) AND (NR OR 5G)	coexistence OR spectrum shar* OR dynamic resource allocation OR dual connectivity
4	(LTE OR long term evolution) AND (NR OR 5G)	(coexistence OR spectrum shar* OR dynamic resource allocation OR dual connectivity) AND (learning OR game theory)
5	(WIFI OR WI-FI) AND (NR OR 5G)	coexistence OR spectrum shar* OR dynamic resource allocation OR dual connectivity
6	(LTE OR long term evolution) AND (NR OR 5G)	(coexistence OR spectrum shar* OR dynamic resource allocation OR dual connectivity) AND (learning OR game theory)
7	((LTE OR long term evolution) AND (WIFI OR WI-FI)) OR ((LTE OR long term evolution) AND (NR OR 5G)) OR ((WIFI OR WI-FI) AND (NR OR 5G))	coexistence OR spectrum shar* OR dynamic resource allocation OR dual connectivity
8	((LTE OR long term evolution) AND (WIFI OR WI-FI)) OR ((LTE OR long term evolution) AND (NR OR 5G)) OR (WIFI OR WI-FI) AND (NR OR 5G))	(coexistence OR spectrum shar* OR dynamic resource allocation OR dual connectivity) AND (Learning OR game theory)

³O termo *Multiaccess* é usado para designar coexistência de sistemas 3G com outras redes, mas está fora do escopo deste trabalho, que tem escopo em redes pós-4G e Wi-Fi.

Para o conjunto de estratégias escolhidas foram obtidas estatísticas quantitativas de publicações por país, publicações por ano, publicações por área de conhecimento, artigos mais citados por área de aplicação e técnica, e métricas de áreas de conhecimento por ano. Uma breve apresentação dessas métricas está disposta na Figura 1, representando em forma de diagrama a quantidade de publicações na base WoS para coexistência de diferentes RATs, duas a duas.

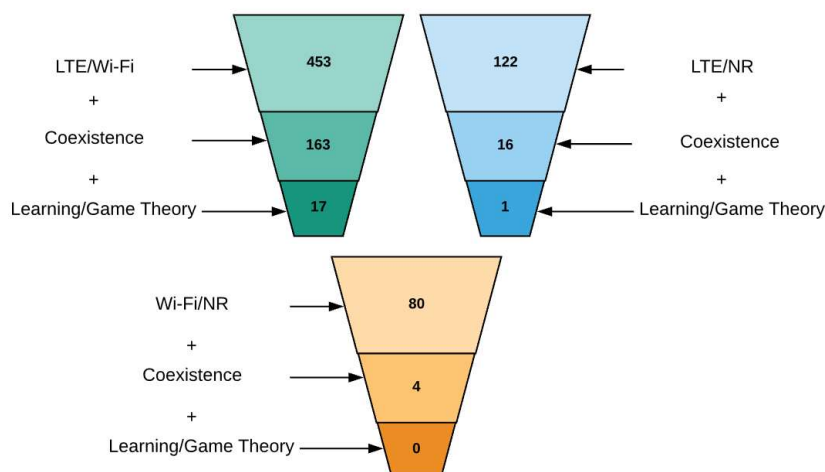


Figura 1: Filtro de quantidade de publicações por conjunto de palavras-chave.

Este gráfico da Figura 1 mostra o quantitativo do resultado somando de todas as estratégias de busca. Nota-se um subconjunto pequeno de trabalhos em coexistência, e um número muito menor envolvendo técnicas de aprendizado ou teoria dos jogos.

3. Resultados e Análises

Após a fase de pré-prospecção, as Estratégias 7 e 8 apresentadas na Tabela 1 foram escolhidas para análise geral da coexistência. A escolha por essas estratégias se justifica pelo número de publicações encontradas, a maior diversidade e o número de técnicas aplicadas ao problema, bem como a maior variedade de países por publicação, possibilitando uma análise mais completa nesses quesitos. Para a estratégia 8, a mais restrita em termos de pesquisa, foram registrados 17 resultados tanto na base *Scopus* como na *WoS*.

3.1. Regiões de Investimento

A Figura 2a representa a quantidade de publicações por país para as Estratégias de buscas 7 e 8 na base *WoS*. Os EUA e a China lideram nas duas estratégias de buscas, justificado pela Figura 2b, que contém as instituições afiliadas com mais publicações, destacando-se as chinesas *Southeast University* e *Beijing University*, além de universidades em diversos estados dos EUA, como também a empresa *Nokia Bell Labs*.

Países como Inglaterra, Canadá, Alemanha, Brasil e Finlândia tiveram maiores publicações na Estratégia de busca 7 comparando com a 8. Isso indica pouca produção científica envolvendo técnicas de aprendizado e Teoria dos Jogos em tais países. A Coreia do Sul, por outro lado, obteve próximo da metade do valor para a Estratégia 8, confirmando que boa parte dos trabalhos envolvem técnicas de aprendizado.

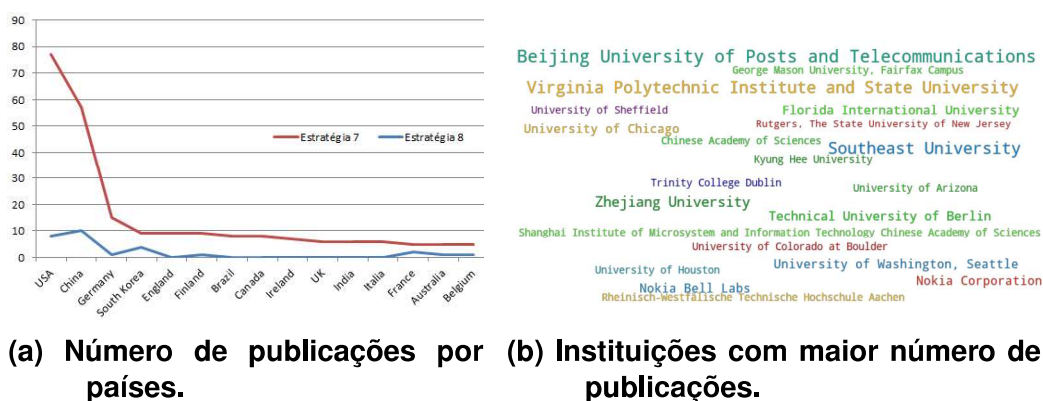


Figura 2: Comparativo por países e empresas entre as estratégias.

3.2. Análise Temporal

A Figura 3 apresenta o número de publicações por ano, levantados nas bases *Scopus* e *Web of Science*, para as Estratègias 7 e 8.

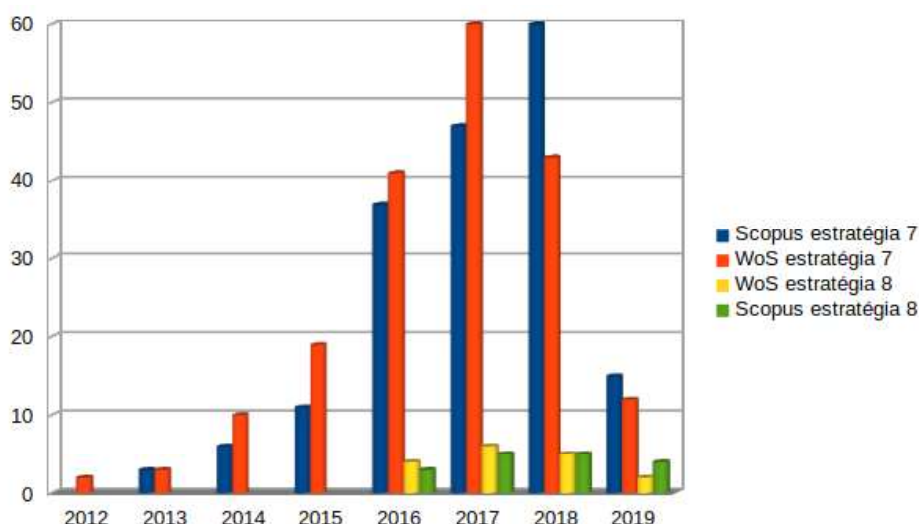


Figura 3: Número de publicações por ano para coexistência e técnicas de aprendizado.

O resultado mais antigo é de 2012 e o crescimento tem um caráter exponencial até 2017. Já em 2018, o número de publicações praticamente se mantém com relação ao ano anterior, indicando o começo de uma exaustão na exploração do problema de coexistência pela academia, ou apenas um ponto de estagnação temporária, que pode ter seu aumento retomado em 2019. Isso também pode ser reflexo da proximidade do fechamento das especificações do 5G, possibilitando a transferência de tecnologia de coexistência da academia para indústria⁴.

Em 2016 tem-se o maior aumento com relação ao ano anterior e este comportamento pode ser explicado devido à chegada do LTE-LAA e LTE-U em 2016, ano que o Release 13 foi finalizado [5G Americas 2017]. Assim, tanto na base *Scopus* como na *WoS*, reflete-se em número de publicações o anseio pelas análises de como essas novas tecnologias coexistem com as legadas (Wi-Fi) ou com elas próprias. Analisando os resultados em relação a tecnologia 5G-NR, observa-se um número baixo de publicações em comparação com os resultados das demais RATs, e que essas publicações se resumem a *surveys* explorando o *dual connectivity*.

⁴ Isso pode ser comprovado ao verificar a submissões de patentes nesse período, ficando para perspectiva de trabalhos futuros.

A aplicação de técnicas de aprendizagem no problema de coexistência tem em 2016 seu ano de partida com as primeiras publicações, coincidindo com o próprio aumento do número de publicações em geral. Comparando com os resultados entre as Estratégias de busca 7 e 8, embora os resultados para coexistência em geral tenham aumentado, as aplicações das técnicas não seguem esta evolução numérica. Assim, pode-se inferir que, ou as aplicações ainda são pouco estudadas, ou que as soluções podem estar sendo classificadas como segredo industrial (e não são publicadas), existindo uma oportunidade de criação de soluções que sejam públicas.

3.3. Áreas de Aplicação e Técnicas

A Tabela 2 apresenta a quantidade de publicações na Estratégia de busca 8, classificadas em função da técnica. No geral, técnicas baseadas em Teoria dos Jogos são as mais frequentes quando soma-se *Multi-game framework*, *Coalition game*, NBS, *Allocation game* e mistas. Individualmente, a técnica mais utilizada é o *Q-Learning*.

Analisando as técnicas por área, há uma variedade de técnicas quando se escolhe aplicar a Teoria dos Jogos, porém a única escolha é o *Q-Learning* ao se aplicar Aprendizado por Reforço. Isso se justifica pela crescente ascensão da aplicação dessa técnica em diversas áreas do conhecimento nos últimos anos, bem como seu caráter dinâmico, que se encaixa perfeitamente no problema de coexistência.

Como são diversas técnicas baseadas em Teoria dos Jogos, resolveu-se fazer um comparativo entre a técnica mais utilizada e as demais. A Figura 4, criada a partir dos resultados do *Web of Science*, mostra o número de publicações por ano comparando as técnicas⁵. De 2017 em diante, o *Q-Learning* começa a ser aplicado e chega a igualar em número de publicações com Teoria dos Jogos. Comparando os resultados com os da Figura 3, conclui-se que todas as publicações em 2019 (até o momento da escrita deste artigo), quatro resultados, são com *Q-Learning* ou com alguma técnica de Teoria dos Jogos. Além disto, fazendo-se uma síntese dos resultados gerais conclui-se que estas são também as técnicas preferidas quando se deseja escolher um técnica de aprendizado para aplicar no problema de coexistência.

Tabela 2: Quantidade de publicações por técnicas (Estratégia de busca 2).

Técnicas de Aprendizagem	Quantidade de Publicações
<i>Q-learning</i>	5
<i>Multi-game framework</i>	2
<i>Coalition game</i>	2
<i>Cooperative Nash bargaining game</i> (NBG)	2
<i>Genetic Algorithm</i>	1
<i>Markov Game</i>	1
<i>Survey on game theory approaches</i>	1
<i>Repeated game</i>	1
<i>Non-cooperative game</i>	1
<i>Evolutionary game</i>	1

Para investigar quais as áreas científicas que estão envolvidas no estudo de coexistência de RATs e das técnicas de aprendizado, utilizou-se a análise de categorias do WoS. O resultado é mostrado na Figura 5, em que se destacam áreas complementares, como telecomunicações, engenharia, ciência da computação e matemática.

Finalmente, foi feito um levantamento na base *Scopus* para as Estratégias de busca 7 e 8 sobre a ocorrência de palavras-chave no artigos. Esse mapeamento é mostrado na Tabela 3. As palavras-chave mais citadas nos dois casos são as mesmas, pois são os termos mais gerais

⁵O * refere-se a soma das técnicas baseadas em Teoria dos Jogos que foram apresentadas na Tabela 2.

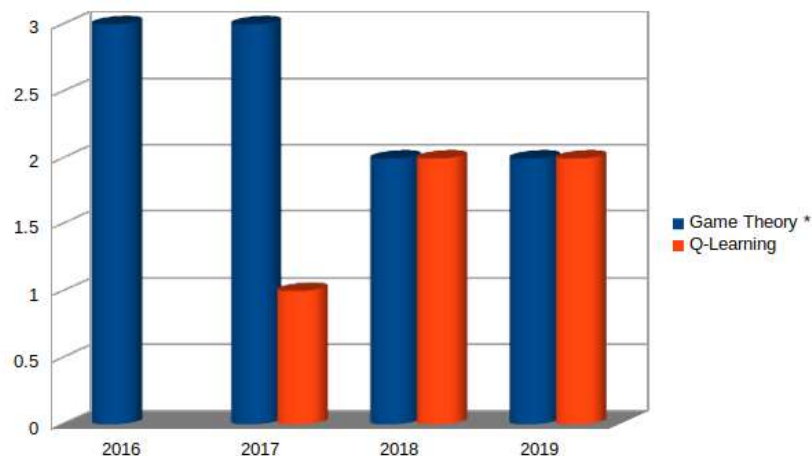


Figura 4: Publicações com as técnicas mais usadas por ano.

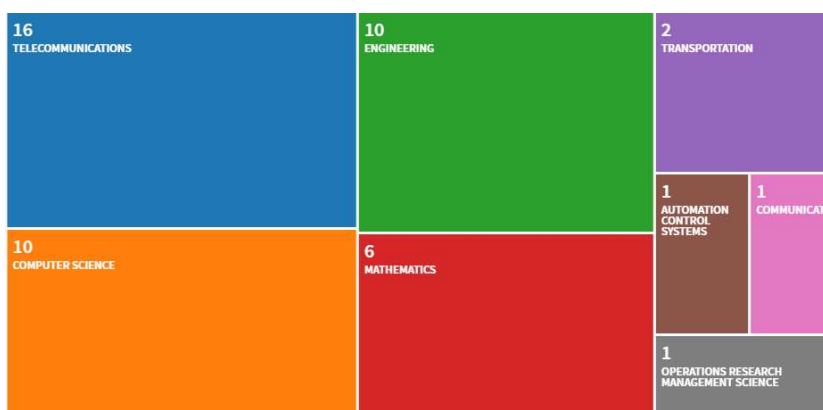


Figura 5: Análise de categorias do WoS.

envolvendo o tema coexistência. Na Estratégia de busca 8 obteve-se palavras mais específicas para as técnicas de aprendizado, como *Game Theory*, e palavras envolvendo a coexistência em banda não-licenciada, como *LTE-U*.

Tabela 3: Palavras-chave mais frequentes por estratégia de busca.

Palavras-chave	Qt. Estratégia 7	Palavras-chave	Qt. Estratégia 8
Wireless Local Area Networks (WLAN)	126	Wireless Local Area Networks (WLAN)	15
Wi-Fi	122	Wi-Fi	14
Wireless Telecommunication Systems	125	Wireless Telecommunication Systems	13
Long Term Evolution (LTE)	63	Long Term Evolution (LTE)	10
Unlicensed Spectrum	69	Game Theory	9
Mobile Telecommunication Systems	66	LTE-U	8
Coexistence	47	Coexistence	8

4. Comentários Finais

Este trabalho consistiu em uma análise bibliométrica da coexistência de RATs e aplicações de algoritmos de aprendizagem, de forma a avaliar o estado da arte e tendências dessas técnicas para servir de ponto de partida para pesquisadores quem estejam começando os estudos nesta área. Como conclusão pode-se destacar a concordância entre os países com maior número de publicações e as instituições afiliadas, mostrando-se uma dominância forte

de países como China e os EUA, e universidades destas nacionalidades. A análise temporal mostra o surgimento de novas técnicas, como os trabalhos envolvendo algoritmos dinâmicos, além de apresentar as tendências das técnicas mais utilizadas. Por ser um assunto recente e com poucos trabalhos publicados, foi possível o mapeamento de todas as técnicas utilizadas. Por fim, como perspectiva para trabalhos futuros, pode-se apontar uma pesquisa em banco de patentes para levantamento da maturidade tecnológica e de transferência de tecnologia entre academia e mercado.

Referências

- 3GPP (2015). Release 13. http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases.
- 5G Americas (2017). Wireless technology evolution towards 5G. Technical report.
- Almeida, E., Cavalcante, A. M., Paiva, R. C. D., Chaves, F. S., Abinader, F. M., Vieira, R. D., Choudhury, S., Tuomaala, E., and Doppler, K. (2013). Enabling LTE/WiFi coexistence by LTE blank subframe allocation. In *IEEE ICC 2013*.
- Antonioli, R. A., Parente, G. C., e Silva, C. F. M., Sousa, D. A., Rodrigues, E. B., Maciel, T. F., and Cavalcanti, F. R. P. (2018). Dual Connectivity for LTE-NR Cellular Networks: Challenges and Open Issues. *Journal of Communication and Information Systems*, 33.
- Ashidani, P. J. and Guardieiro, P. R. (2014). Two-level downlink resource allocation scheme based on cooperative game theory in lte networks. *IFIP Wireless Day*.
- Castane, A., Perez-Romero, and Sallent, O. (2017). On the Implementation of Channel Selection for LTE in Unlicensed Bands using Q-learning and Game Theory algorithms. *Wireless Comm. and Mobile Computing Conf*.
- de Santana, P. M., de Lima Melo, V. D., and Jr., V. A. D. S. (2016). Performance of License Assisted Access solutions using ns-3. *CSCI*.
- GSMA (2019). LTE achieves 4 billion connections worldwide at end of 2018 — 47% of all cellular connections.
- Khattab, O. and Alani, O. (2014). An overview of interworking architectures in heterogeneous wireless networks: Objectives, features and challenges. In *Tenth International Network Conference, INC 2014, Plymouth, UK, July 8-10, 2014. Proceedings*.
- kwan, R., Pazhyannur, R., and Chandrasekhar, V. (2015). Fair co-existence of Licensed Assisted Access LTE (LAA-LTE) and Wi-Fi in unlicensed spectrum. *7th CEEC*.
- Loy, M., Karingattil, R., and Williams, L. (2005). Application report: Ism-band and short range device regulatory - compliance overview. Technical report, Texas Instruments .
- Qualcomm (2014). Qualcomm research LTE in unlicensed spectrum: Harmonious coexistence with Wi-Fi. Technical report, Alcatel-Lucent, Ericsson, Qualcomm Technologies.
- Rupasinghe, N. and Guvenc, I. (2014). Licensed-Assisted Access for WiFi-LTE coexistence in the unlicensed spectrum. *Globecom Workshops Emerging Technologies for 5G Wireless Cellular Networks*.
- Rupasinghe, N. and Guvenc, I. (2015). Reinforcement learning for Licensed-Assisted Access of LTE in the Unlicensed Spectrum. *Wireless Comm. and Networking Conf*.
- Saad, W. (2010). Coalitional game theory for distributed cooperation in next generation wireless networks. *Department of Informatics - Faculty of Mathematics and Natural Sciences - University of Oslo*.