**Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações - MCTI**

**Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq**

**Chamada CNPq No 04/2021 – Bolsas de Produtividade em Pesquisa**

**IDENTIFICAÇÃO DA PROPOSTA**

**RENOVAÇÃO**

| **Coordenador:**  Prof. Dr. Cristiano Bonato Both, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)  CV Lattes: http://lattes.cnpq.br/2658002010026792  Ano de conclusão do doutorado: 2011, Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS)  Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq Nível 2 |
| --- |
| **Título do Projeto – PT**  Núcleo 5G Inteligente Integrando Múltiplas Redes de Acesso  **Project Title – EN**  Smart 5G Core Integrating Multiple Radio Access Networks |
| **Palavras-chave – PT**  Redes 5G, softwarização, Inteligência Artificial  **Keywords - EN**  5G networks, softwarization, Artificial Intelligence |
| **Resumo Curto – PT**  Redes de quinta geração (5G) atenderão aos diferentes requisitos de novos serviços e aplicações, tais como Internet das Coisas, realidade virtual/aumentada, carros autônomos, agricultura e pecuária de precisão. Para lidar com essa diversidade, múltiplos modos de operação, fornecidos por diferentes tecnologias de acesso sem fio, foram definidos. Além disso, as redes 5G estão sendo desenvolvidas sob um intenso processo de *softwarização*, caracterizado pelo uso de nuvem, virtualização e programabilidade. Esse processo é significativo nas redes de acesso e ainda mais notável no núcleo 5G. Perante os muitos desafios, há diversas questões em aberto, como a integração de tecnologias de redes de acesso IoT não-3GPP a um núcleo 5G. Este projeto, intitulado *Núcleo 5G Inteligente Integrando Múltiplas Redes de Acesso,* propõe pesquisar, implantar e estender sistemas 5G, desenvolvendo o software necessário para demonstrar a integração das tecnologias de acesso sem fio ao núcleo 5G. Adicionalmente, o projeto abordará as questões relacionadas à adoção de Inteligência Artificial (IA) como um componente fundamental na evolução das redes 5G. Apesar das padronização estarem avançando na definição de um arcabouço, ainda há várias lacunas para o uso pleno de IA em 5G. Para superar algumas das lacunas mais relevantes, o projeto determinará algoritmos e técnicas de IA adequados para problemas nas redes de acesso e núcleo, como adaptação do enlace às condições do canal e posicionamento de funcionalidades, além de avançar o estado-da-arte no processo de coleta e uso de dados.  **Short Abstract – EN**  Fifth-generation (5G) networks will meet the different requirements of new services and applications, such as IoT, virtual/augmented reality, autonomous cars, and precision agro-business. Multiple modes of operation, provided by different wireless access technologies, have been defined to deal with this diversity. In addition, 5G networks are being developed under an intense softwarization process, characterized by cloud, virtualization, and programmability. This process is significant in access networks and even more notable in the 5G core. Given the many challenges, there are still several open issues, such as integrating non-3GPP IoT access network technologies to a 5G core. This project, named *Smart 5G Core Integrating Multiple Radio Access Networks*, proposes to research, deploy and extend 5G systems, developing the software needed to demonstrate the integration of wireless access technologies into the 5G core. Additionally, the project will address issues related to the adoption of Artificial Intelligence (AI) as a fundamental component in the evolution of 5G networks. Although standardization is advancing in defining a framework, there are still several gaps for the full use of AI in 5G. The project will determine AI algorithms and techniques suitable for problems in access and core networks to overcome some of the most relevant gaps, such as link adaptation to channel conditions and functionality positioning, in addition to advancing the state-of-the-art in data collection and use. |
| **Área do conhecimento:** Teleinformática |
| **Duração: 36 meses** |

Esta proposta de pesquisa para bolsa de produtividade CNPq nível 2 está dividida em duas partes. Na primeira parte, é apresentada a produção científica do pesquisador nos últimos anos com o mapeamento do perfil do pesquisador nos critérios mínimos adotados pela CA-CC. Na segunda parte da proposta, é apresentado o projeto de pesquisa proposto.

*Para proponente com bolsa em curso, incluir no próprio arquivo do Projeto de Pesquisa, logo no início, um texto de 10 linhas - no máximo - descrevendo as metas atingidas em relação à proposta anterior. Todas as publicações e orientações do período devem estar atualizadas no Currículo Lattes*

**Renovação da bolsa de Produtividade nível 2: projeto 2019 – 2021.**

O atual projeto de produtividade nível 2 teve como objetivo garantir os requisitos de aplicações críticas e não críticas, através da coexistência harmoniosa de múltiplas tecnologias de comunicação em Internet das Coisas. Durante esse projeto foram propostas soluções para habilitar a coexistência através da interoperabilidade em nível de rede de acesso e de controle, para obtenção de um gerenciamento flexível das múltiplas tecnologias. Os resultados foram publicados em 20 artigos em periódicos com alto fator de impacto, seis artigos em conferências e dois capítulos de livros. Em relação à formação de recursos humanos, no período da bolsa de produtividade vigente, o pesquisador proponente orientou/co-orientou duas teses de doutorado, duas dissertações de mestrado e dois trabalhos de conclusão de curso.

**Sumário**

[Parte I – Perfil do Pesquisador 2](#_gjdgxs)

[1.](#_30j0zll) Produção Científica 4

[1.1](#_1fob9te) Publicações em Periódicos 9

[1.2 Publicações em Conferências 10](#_3znysh7)

[2.](#_2et92p0) Formação de recursos humanos 11

[2.1](#_tyjcwt) Orientações Concluídas 12

[2.2](#_3dy6vkm) Orientações/Supervisão em Andamento 12

[3. Rede de Colaborações 13](#_1t3h5sf)

[4. Projetos 15](#_4d34og8)

[5](#_2s8eyo1) Outras informações 16

[Parte II – Projeto de pesquisa 18](#_17dp8vu)

[Núcleo 5G Inteligente Integrando Múltiplas Redes de Acesso 18](#_3rdcrjn)

[1.](#_26in1rg) Contextualização e caracterização do problema 19

[2.](#_lnxbz9) Objetivos 20

[3.](#_35nkun2) Metodologia 21

[4.](#_1ksv4uv) Resultados e Disseminação 24

[6. Plano de Trabalho e Cronograma 25](#_44sinio)

[Referências 27](#_2jxsxqh)

# Parte I – Perfil do Pesquisador

Cristiano Bonato Both é professor Doutor na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) desde 2019, atuando no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PPGCA) e **bolsista de produtividade do CNPq – nível 2**. Ele recebeu em 2011 o título de Doutor em Ciência da Computação do Instituto de Informática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, tendo trabalhado na área de redes sem fio metropolitanas. Trabalhou um ano no Laboratório de Telecomunicação na Universidade de Pisa, Itália, como parte de seu doutorado sanduíche. Ele recebeu em 2003 o título de Mestre em Ciência da Computação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, tendo trabalhando na área de análise de desempenho para sistemas paralelos e distribuídos.

Cristiano possui uma forte rede de colaboração com professores e alunos de universidades brasileiras, nomeadamente UFRGS, UFPA, UFG, UFMG, UFES, UNICAMP, UFRJ, USP, e internacionais, como *Virginia Polytechnic Institute and State University* (Estados Unidos), *Trinity College Dublin* (Irlânda), *University of Antwerp* (Bélgica) (orientando aluno em cotutela), University of Bern (Suíça), University of Bristol (Inglaterra), Ericsson (Finlândia) e Telefónica, S.A. (Espanha). A rede de colaboração proporciona a elaboração de projetos, orientações e co-orientações, cursos, visitas, organização de eventos, edições de periódicos e, principalmente, a publicações em conjunto de trabalhos científicos com alto fator de impacto. Por exemplo, Cristiano foi coordenador Brasileiro do projeto entre Brasil e Europa chamado **FUTEBOL**, financiado pelo programa H2020 e MCTI/RNP. Atualmente, participa de três projetos de pesquisa financiados pela Fundação de Amparo do Estado de São Paulo (FAPESP) e um projeto pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP):

* **SFI2​​**: Fatiamento de Infraestruturas de Internet do Futuro (MCTIC/CGI - Projeto de Pesquisa Temático, Chamada 2018);
* **PORVIR-5G**: Programabilidade, ORquestração e VIRtualização de Redes em 5G (MCTIC/CGI - Projeto de Pesquisa Temático, Chamada 2019);
* **PROJETO MAYA**: Tecnologias inovadoras e disruptivas para prescrever, incentivar e avaliar a prática de atividade física (MCTIC/CGI - Projeto de Pesquisa Regular, Chamada 2019).
* **PMon-5G**: Monitoramento do Posicionamento de Funções Virtualizadas usando Infraestrutura Nativa de Nuvem para Redes 5G (CT-Mon/RNP – Projeto de Pesquisa em Monitoramento, Chamada 2021).

Esses projetos de pesquisa em vigência totalizando mais de 4.2 milhão de reais, envolvendo dezenas de alunos de diferentes níveis de graduação e pós-graduação colaborando entre várias universidades nacionais e internacionais.

Nos últimos quinquênio, Cristiano publicou 26 artigos em periódicos com alto fator de impacto, 14 artigos em conferências, três capítulos de livros e dois registros de softwares. Além disso, ministrou cursos na esfera nacional, como por exemplo os minicursos no XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC) e XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT), ambos em 2020. Na esfera internacional, apresentou o tutorial na IEEE International Conference on Network Softwarization (IEEE NetSoft) em 2020. Mensurando o impacto da produção em termos do número de citações, segundo o Google acadêmico os trabalhos científicos publicados por Cristiano tiveram um total de mais de 907 citações, sendo quarto artigos com mais de 50 citações. No que diz respeito à formação de recursos humanos, no último quinquênio, formou dois alunos de doutorado, cinco alunos de mestrado e três trabalhos de conclusão de curso em Ciência da Computação ou Engenharia da Computação. Atualmente, está orientando dois alunos de doutorado, sendo um em cotutela com a *University of Antwerp*, dois alunos de mestrado e um aluno de iniciação científica. No último triênio, o pesquisador proponente recebeu premiações fruto do trabalho desenvolvido com a bolsa de produtividade concedida, com o melhor artigo científico na conferência internacional IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON) em 2020 e melhor artigo científico premiado no I Workshop de Redes 6G no XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos em 2021.

Em 2021, Cristiano foi coordenador do Salão de Ferramentas do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Além disso, é membro do Comitês de Assessoramento da FAPERGS desde 2019 e do comitê externo de assessoramento do Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada - Electrical and Computer Engineering, desde 2020. Em 2017, foi coordenador do Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS) e em 2016, coordenou o IFIP/ACM Latin America Networking Conference (LANC). Cristiano é membro de diversos comitês de programas científicos, tais como Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), IEEE Healthcom, Globecom SAC e-Health, Concurso de Teses e Dissertações do SBRC, IEEE International Conference on Communications (ICC), IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), IEEE 5G World Forum, entre outros. Além disso, ele revisa artigos para vários periódicos, como Computer Networks, Ad Hoc Networks, Wireless Networks, Journal of Network and Computer Applications e IEEE Wireless Communications.

Nas próximas seções, desta primeira parte, é apresentada a produção científica no último seis, com o mapeamento do perfil do pesquisador nos critérios mínimos adotados pela CA-CC. O objetivo em analisar os últimos seis anos deve-se ao fato de permitir uma visualização da evolução da produtividade do proponente antes e depois de receber a bolsa de produtividade do CNPq – nível2.

# Produção Científica

A descrição da produção científica do proponente é apresentado considerando o último quinquênio. Além disso, a produção é apresentada considerando os últimos dois triênios, pois, assim, é possível avaliar a evolução do proponente em três anos sem bolsa de produtividade e, posteriormente, como bolsista de produtividade CNPq. Durante o último quinquênio, o proponente concentrou-se na área de telecomunicações, mais especificamente em investigações sobre, redes sem fio heterogêneas de longa distância baseados em conceitos de nuvem, virtualização de redes sem fio e redes definidas por software.

**Redes sem fio heterogêneas de longa distância baseados em conceitos de nuvem:** entre 2016 até 2018, o proponente trabalhou nos problemas referentes a alta interferência intercelular, restrições de latência críticas no processamento de sinal sem fio de longa distância e na má alocação de recursos de processamento em nuvem. Para minimizar esses problemas foi proposto um sistema de decisão capaz de ser modificado para criar decisões que possam diminuir a interferência, atender às restrições de atraso e mitigar a subutilização de processamento para o funcionamento a longo prazo de uma rede de acesso com rádios heterogêneos baseadas em conceito de nuvem. As principais soluções foram publicadas em veículos de divulgação de alto fator de impacto como IEEE Wireless Communications Letters, Elsevier Computer Communications e IEEE Wireless Communications. As soluções propostas são importantes, pois avançaram o estado da arte nas seguintes direções [1, 2, 3, 4, 5, 6]: avaliando a sobrecarga de rede implícita ao adicionar um sistema de decisão dinâmico para rede de acesso com rádios heterogêneos baseados em conceito de nuvem; exploram o compartilhamento de recursos através de um algoritmo de decisão, sobre quais elementos da rede podem ser utilizados para duas operadoras de forma intercambiável para reduzir a interferência e aumentar a eficiência espectral; avaliaram a tomada de decisão de alocação de processamento, considerando a distância entre a nuvem e torres de rádio remotas. Até 2018, esses trabalhos tinham sido citados em 44 artigos científicos segundo o Google Sholar. Já em 2021, alcançaram 146, mostrando que o tema e artigos de pesquisa são pertinente e robustos.

No último triênio, período com a bolsa de produtividade em vigência, o proponente intensificou suas pesquisas nesse tema de pesquisa, investigando sobre otimização de tecnologias em redes de *Long-Range Wide-Area Network*, sobre a utilização de IA na tomada de decisão com diferentes granularidades de tempo, integração entre redes sem fio e redes óticas e alocação de recursos considerando a melhor eficiência energética. As principais contribuições foram publicadas em veículos de alto fator de impacto como IEEE Vehicular Technology Magazine, IEEE Transactions on Vehicular Technology e IEEE Communications Magazine avançando a fronteira da ciência nessa área. Além disso, os trabalhos publicados contribuem para avançar o estado da arte [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]: explorando os principais fatores que devem ser considerados na otimização de redes de longa distância; indicando quais técnicas de IA devem ser utilizadas considerando diferentes grandeza dos tempos, i.e., milissegundos, segundos, minutos, etc.; definição de como deve-se projetar uma plataforma para habilitar a experimentação em redes convergentes entre rádio de acesso e redes óticas com infraestrutura na nuvem. Apesar dessas últimas publicações serem em maior número e terem sido publicadas em veículos com maior fator de impacto do que as publicações do triênio passado, elas ainda são recentes. Dessa forma, até o momento, esses trabalhos foram citados 31 vezes por outros artigos da área. Entretanto, se somarmos os últimos seis anos, os artigos publicados pelo proponente soma 177 citações nesta área de investigação.

**Virtualização de redes sem fio:** entre 2016 até 2018, o proponente pesquisou sobre as futuras redes 5G, mais especificamente no projeto de uma arquitetura centralizada em banda-base. Neste contexto, publicou trabalhos científicos preliminares em workshops do INFOCOM e EuCNC [16, 17, 18] para expandir as fronteiras das redes móveis com virtualização de rádio que habilita múltiplas tecnologias de acesso coexistirem no mesmo *front-end* de rádio. Para essa expansão, trabalhou com técnicas de processamento de sinais avançadas para dividir e abstrair um *front-end* de rádio em múltiplos *front-end* virtuais. As soluções propostas são fundamentais, pois avançaram o estado da arte através de uma solução flexível e adaptável em que cada função de uma unidade de banda-base virtual é movida para containers virtuais, através da criação, por este proponente, de um conceito novo chamado de *fine-grained*. A utilização de *fine-grained* habilita um controle sem precedentes de qualquer aspecto de rede de acesso. As pesquisas realizadas nessa área eram iniciais, i.e., menos de três anos, mas naquela época já era possível perceber o grande potencial dessa área. Já em 2018, os trabalhos publicados estavam sendo citados 15 vezes e os mesmos artigos possuem 33 citados em 2021, segundo o Google Scholar.

É importante destacar que os trabalhos desenvolvidos no primeiro triênio (2016-2018) eram preliminares e foram consolidados neste últimos três anos (2019-2021). Isso torna-se evidente, pois as versões originais publicadas em workshops, foram aprimoradas e publicadas em periódicos renomados como IEEE Journal on Selected Areas in Communications, IEEE Transactions on Mobile Computing e Computer Networks. Além disso, o proponente avançou a área de conhecimento, introduzindo novos conceitos para a área de virtualização de redes sem fio, por exemplo [19, 20, 21, 22, 23, 24]: utilização de alocação dinâmica de micro serviços para suportar qualidade de serviço e experiência em redes virtualizadas; investigação dos custos envolvidos em processos de migração de funções de redes virtuais; orquestração de fatiamento de funções de rádio em redes de acesso; introdução do conceito de rede de acesso como serviço (RAN *as a Service*). Apesar dos artigos terem sido publicados recentemente, até o momento, esses trabalhos foram citados 11 vezes por outros autores da área. A soma das citações nos últimos seis anos alcança 44 citações nesta área de investigação. Como a área de pesquisa está crescendo, acredita-se que esses artigos serão citados em maior número, nos próximos anos.

**Redes definidas por software:** essa área de pesquisa é a mais antiga que o proponente atual, i.e., desde 2015. Por exemplo, o proponente publicou dois artigos na IEEE Communications Magazine. Esses dois trabalhos marcaram o estado da arte nessa área de pesquisa. O primeiro artigo apresentou, pela primeira vez, o projeto de uma arquitetura conceitual para redes definidas por software, considerando o plano de gerenciamento. O segundo artigo foi o precursor na introdução do conceito de redes definidas por software na área militar, mais especificamente em redes de campo de batalha, historicamente conhecidas pelos seus projetos ossificados e baseados em hardware. Além disso, publicou importantes artigos científicos que avançaram o estado da arte nas seguintes direções [25, 26, 27, 28, 29]: o projeto de uma rede sem fio definida por software para redes de acesso heterogêneas; uma solução interativa para monitoração, visualização e configuração para redes definidas por software baseadas em Open Flow; uma arquitetura para utilização de limiares adaptativos para sensoriamento espectral em canais de rádio. As principais soluções foram publicadas em veículos de divulgação com alto fator de impacto como IEEE Communications Magazine e Springer Journal of Internet Services and Applications. Até 2018, os trabalhos nessa área de pesquisa já tinham sido citados em 130 vezes. Já em 2021, a quantidade de citações desses mesmos artigos passou para 280, demonstrando a grande relevância dos trabalhos publicados pelo proponente.

No último triênio, o proponente continuou avançando o estado da arte sobre redes definidas por software no contexto de redes sem fio, por exemplo, aplicando os conceitos para fatiamento de redes, orquestração de redes experimentais e para garantir qualidade de serviço e experiência para o usuário final. As principais contribuições foram publicadas em veículos como Mobile Networks & Applications, IEEE Access e conferências renomadas como Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). O avanço do estado da arte está relacionado a investigações como [30, 31, 32, 33]: gerenciamento de fatiamento de redes usando redes definidas por software e blockchains em um ambiente E-Health; orquestração de *containers* para um ambiente experimental utilizando conceitos de programabilidade; garantia de qualidade de experiência e serviço para transmissão de vídeo ciente de *handover* em redes heterogêneas sem fio; orquestração de transmissão de vídeos baseado na qualidade de experiência dos usuários em rede móvel de quarta geração. Essas últimas publicações são recentes, por isso esses trabalhos foram citados apenas sete vezes por outros artigos da área. Entretanto, as publicações do proponente nessa área ao longo dos anos, alcança 287 citações, mostrando a relevância das suas pesquisas.

A Tabela 1 resume a produção científica do proponente no último quinquênio (destacado em azul) e também nos últimos dois triênios. Optou-se por também demostrar as publicações nos últimos seis anos, pois dessa forma, é possível observar a evolução das pesquisas em um triênio sem a bolsa de produtividade (2016-2018) e, posteriormente, com a bolsa (2019-2021). A evolução na quantidade de publicações é evidente, por exemplo, de sete periódicos no primeiro triênio, o proponente já obteve 20 publicações, sendo que o ano de 2021 ainda não foi finalizado. A média de publicações aumento de seis artigos no primeiro triênio para 8.6 artigos no último triênio. Além disso, houve um aumento na produção de capítulos de livro, de um para dois. No último quinquênio, o proponente teve 26 publicações em periódicos e 14 publicações em conferências, totalizando 40 publicações com média de 8 artigos por ano. Pode-se perceber uma redução na publicação de artigos em conferências. Essa redução é justificada, pois o proponente está priorizando publicações em periódicos com alto fator de impacto, como por exemplo *transactions* e *maganizes*. Além disso, devido a pandemia do COVID-19, o proponente teve um interesse menor em publicar artigos em conferências, uma vez que a grande vantagem das conferências é fortalecer a rede de colaborações, o que é minimizado em conferências virtuais.

Tabela 1 – Produção científica no último seis anos

| **Produção científica** | **2016-2018** | **2019-2021** | **Quinquênio** |
| --- | --- | --- | --- |
| Artigos em periódicos internacionais | 7 | 20 | 26 |
| Artigos completos em anais de conferências | 11 | 6 | 14 |
| Total de publicações | 18 | 26 | 40 |
| Média anual de publicações | 6 | 8.6 | 8 |
| Capítulo de livro | 1 | 2 | 3 |

Na Figura 1, pode-se observar a distribuição das publicações ao longo dos últimos seis anos, para considerar dois triênios. Entretanto, considerando o quinquênio, é possível perceber que existe um crescimento na quantidade de artigos publicados, principalmente em periódicos. Os resultados obtidos mostram o aumento na capacidade do proponente em produzir trabalhos científicos. É importante destacar que a previsão deste ano de 2021 é ainda maior que a de 2020, pois artigos com alto fator de impacto já foram submetidos (3) e alguns em processos de ajustes sugeridos pelos revisores (2). Além disso, os trabalhos científicos possuem um crescimento na internacionalização do proponente com outros grupos de pesquisa. A cada ano, pode se perceber que o proponente apresenta trabalhos com diferentes grupos de pesquisa, por exemplo pesquisadores Americanos e Europeus.

![](data:None;base64,iVBORw0KGgoAAAANSUhEUgAAAAEAAAABCAYAAAAfFcSJAAAAAXNSR0IArs4c6QAAAARzQklUCAgICHwIZIgAAAALSURBVAiZY2AAAgAABQABYlUyiAAAAABJRU5ErkJggg==)

Figure 1: Publicações ao longo dos últimos seis anos

Mais importante que a quantidade de artigos publicados é a qualidade apresentada desses artigos. Na Tabela 2, pode-se observar a porcentagem das publicações do proponente no último quinquênio, de acordo com a classificação do sistema Qualis da CAPES para a Ciência da Computação, considerando o documento Relatório do Qualis Periódicos e Eventos Científicos[[1]](#footnote-0). Pode-se perceber que 96,3% os periódicos estão classificados no extrato superior da CAPES, isto é, classificação A, sendo que 42,5% desses artigos estão na classe A1. Em relação as conferências, o percentual de artigos com alta qualidade comprova que a qualidade também é prioridade para o proponente, onde 78,7% das publicações estão classificadas no extrato superior da CAPES, ou seja, considerados como publicações de alta qualidade. Infelizmente, as conferências nacionais possuem uma qualificação inferior, mas este proponente continua publicando nessas conferências, pois entende que a comunidade Brasileira é altamente qualificada e os pesquisadores precisam apoiar a comunidade científica nacional.

Tabela 2 – Porcentagem da produção científica de acordo com o sistema Qualis

| **Produção científica** | **A1** | **A2** | **A3** | **A4** | **B1** | **B2** | **B3** | **B4** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Artigos em periódicos (%) | 42,5 | 34,6 | 7.7 | 11,5 | - | - | - | 3,7 |
| Artigos em conferências (%) | 28,6 | 14.4 | 7.1 | 28.6 | 7,1 | 7,1 | 7,1 | - |

Figura 2 apresenta os valores quantitativos em relação ao produção científica de acordo com o sistema Qualis. Pode-se observar que no último quinquênio foram publicados 11 artigos periódicos A1, ou seja, uma média superior a dois artigos por ano. Somando os artigos periódicos na qualificação A, obtêm-se 25 artigos, isto é, cinco periódicos de alta qualidade publicados por ano, nos últimos cinco anos.

![](data:None;base64,iVBORw0KGgoAAAANSUhEUgAAAAEAAAABCAYAAAAfFcSJAAAAAXNSR0IArs4c6QAAAARzQklUCAgICHwIZIgAAAALSURBVAiZY2AAAgAABQABYlUyiAAAAABJRU5ErkJggg==)

Figure 2: Qualis ao longo do último quinquênio

A cada ano o proponente está melhorando a sua produção científica em periódicos com alto fator de impacto. A Tabela 3 apresenta alguns veículos que o proponente publicou pelo menos um artigo no último triênio, com *Journal Citation Reports* (JCR) superior a quatro. Pode-se perceber a preocupação do proponente em publicar seus trabalhos científicos em revistas com grande impacto. Além disso, é possível perceber uma quantidade crescente de publicações em *transactions* e *magazines* no último triênio.

Tabela 3 – Fator de impacto dos veículos

| **Periódicos** | **Fator de impacto (JCR)** |
| --- | --- |
| IEEE Vehicular Technology Magazine | 10.384 |
| IEEE Communications Magazine | 9.619 |
| IEEE Journal on Selected Areas in Communications | 9.144 |
| Elsevier Future Generation Computer Systems | 7.187 |
| IEEE Transactions on Vehicular Technology | 5.978 |
| IEEE Transactions on Mobile Computing | 5.577 |
| Elsevier Computer Networks | 4.474 |
| IEEE Transactions on Network and Service Management | 4.195 |

Ao considerar o número de citações e fator H como métricas de qualidade dos artigos publicados, pode-se observar que o proponente possui bons índices de citações. Na Tabela 4, é possível analisar os índices de citações do proponente nas bases Google Scholar, Scopus e Web of Science. Em relação ao último triênio, com a bolsa de produtividade do CNPq em vigência, pode-se perceber um crescimento significativo, destacado em azul, tanto em relação ao fator H, quanto em relação ao aumento de citações. Em todas as bases o fator H aumento quatro unidades e a quantidade de citações mais que duplicou em três anos.

Tabela 4 – Índices de citações

| **Base** | **H-index 2018** | **Citações**  **2018** | **H-index**  **2021** | **Citações 2021** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Google Scholar | 12 | 425 | 16 | 907 |
| SCOPUS | 9 | 235 | 13 | 559 |
| Web of Science | 6 | 130 | 10 | 310 |

Nas seguintes subseções são apresentadas as publicações em periódicos e conferências classificados no extrato superior da CAPES, durante o último quinquênio.

# Publicações em Periódicos

As publicações em periódicos nos últimos três anos (2019 até 2021) estão apresentadas de acordo com o extrato superior, i.e., classificação A, da CAPES para a área da Ciência da Computação, de acordo com o documento Relatório do Qualis Periódicos e Eventos Científicos1.

* **Qualis A1 (oito artigos)**
  + DEALMEIDA, J.; DASILVA, L.; **BOTH, C.**; RALHA, C.; MAROTTA, M. Artificial Intelligence-Driven Fog Radio Access Networks: Integrating Decision Making Considering Different. IEEE Vehicular Technology Magazine, v. 1, p. 2-13, 2021.
  + ALENCAR, D.; **BOTH, C.**; ANTUNES, R.; OLIVEIRA, H.; CERQUEIRA, E.; ROSARIO, D. Dynamic Microservice Allocation for Virtual Reality Distribution with QoE support. IEEE Transactions on Network and Service Management, v. 1, p. 1-1, 2021.
  + MORAIS, F.; DA COSTA, C.; ALBERTI, A.; **BOTH, C.**; RIGHI, R. When SDN meets C-RAN: A survey exploring multi-point coordination, interference, and performance. Journal of Network and Computer Applications, v. 1, p. 102655-1, 2020.
  + DALLA-COSTA, A.; BONDAN, L.; WICKBOLDT, J.; **BOTH, C.**; GRANVILLE, L. Orchestra: A Customizable Split-Aware NFV Orchestrator for Dynamic C-RAN. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, v. 1, p. 1-1, 2020.
  + KIST, M.; SANTOS, J.; COLLINS, D.; ROCHOL, J.; DASILVA, L.; **BOTH, C**. AIRTIME: End-to-end Virtualization Layer for RAN-as-a-Service in Future Multi-Service Mobile Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, v. 1, p. 1-1, 2020.
  + D'ORO, S.; MAROTTA, M.; **BOTH, C.**; DASILVA, L.; PALAZZO, S. Power-Efficient Resource Allocation in C-RANs with SINR Constraints and Deadlines. IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 68, p. 1-1, 2019.
  + **BOTH, C.**; GUIMARAES, R.; SLYNE, F.; WICKBOLDT, J.; MARTINELLO, M.; DOMINICINI, C.; MARTINS, R.; ZHANG, Y.; CARDOSO, D.; VILLACA, R.; CERAVOLO, I.; NEJABATI, R.; MARQUEZ-BARJA, J.; RUFFINI, M.; DASILVA, L. FUTEBOL Control Framework: Enabling Experimentation in Convergent Optical, Wireless, and Cloud Infrastructures. IEEE Communictions Magazine, v. 57, p. 56-62, 2019.
  + COSTA, F.; RIGHI, R.; COSTA, C.; **BOTH, C**. Nuoxus: A proactive caching model to manage multimedia content distribution on fog radio access networks. Future Generation Computer Systems, v. 93, p. 143-155, 2019.
* **Qualis A2 (sete artigos)**
  + GONÇALVES, J.; DE RESENDE, H.; VILLACA, R.; MUNICIO, E; **BOTH, C.**; MARQUEZ-BARJA, J. Distributed Network Slicing Management Using Blockchains in E-Health Environments. Mobile Networks & Applicatios, v. 1, p. 1-12, 2021.
  + DANTAS, F.; NETO, E.; OLIVEIRA, H.; ROSARIO, D.; CERQUEIRA, E.; **BOTH, C.**; ZEADALLY, S.; NETO, A. A Survey on Long-Range Wide-Area Network Technology Optimizations. IEEE Access, v. 1, p. 1-1, 2021.
  + LINS, S.; CARDOSO, K.; **BOTH, C.**; MENDES, L.; DE REZENDE, J.; SILVEIRA, A.; LINDER, N.; KLAUTAU, A. Artificial Intelligence for Enhanced Mobility and 5G Connectivity in UAV-Based Critical Missions. IEEE Access, v. 1, p. 1-1, 2021.
  + DE RESENDE, H.; SCHIMUNECK, M.; **BOTH, C.**; WICKBOLDT, J.; MARQUEZ-BARJA, J. COPA: Experimenter-level Container Orchestration for Networking Testbeds. IEEE Access, v. 8, p. 1-1, 2020.
  + SANTOS, H.; ALENCAR, D.; MENEGUETTE, R.; ROSÁRIO, D.; NOBRE, J.; **BOTH, C.**; CERQUEIRA, E.; BRAUN, T. A Multi-Tier Fog Content Orchestrator Mechanism with Quality of Experience Support. Computer Networks, v. S1389, p. 107288-107318, 2020.
  + DE JESUS, R.; **BOTH, C.**; WICKBOLDT, J.; GRANVILLE, L. Virtual Network Functions Migration Cost: from Identification to Prediction. Computer Networks, v. 1, p. 107429-1, 2020.
  + KIST, M.; WICKBOLDT, J.; GRANVILLE, L.; ROCHOL, J.; DASILVA, L.; **BOTH, C**. Flexible Fine-Grained Baseband Processing with Network Functions Virtualization: Benefits and Impacts. Computer Networks, v. 151, p. 158-165, 2019.
* **Qualis A3 (dois artigos)**
  + FRASCOLLA, V.; DOMINICINI, C.; PAIVA, M.; CAPOROSSI, G.; MAROTTA, M.; RIBEIRO, M.; SEGATTO, M.; MARTINELLO, M.; MONTEIRO, M.; **BOTH, C**. Optimizing C-RAN Backhaul Topologies: A Resilience-Oriented Approach Using Graph Invariants. Applied Sciences-Basel, v. 9, p. 136-153, 2019.
  + MEDEIROS, I.; PACHECO, L.; ROSÁRIO, D.; **BOTH, C.**; NOBRE, J.; CERQUEIRA, E.; GRANVILLE, L. Quality of experience and quality of service-aware handover for video transmission in heterogeneous networks. International Journal of Network Management, v. 1, p. e2064-18, 2019.
* **Qualis A4 (dois artigos)**
  + MORAES, J.; OLIVEIRA, H.; CERQUEIRA, E.; **BOTH, C.**; ZEADALLY, S.; ROSÁRIO, D. Evaluation of an Adaptive Resource Allocation for LoRaWAN. Journal of Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology, v. 1, p. 1-15, 2021.
  + PRADE, L.; UBERTI, V.; ABAIDE, A.; SILVA, P.; FIGUEIREDO, R.; **BOTH, C.** LoRa Mesh Architecture for Automation of Rural Electricity Distribution Networks. Eletronics Letters (ONLINE), v. 1, p. 1-3, 2020.

# 1.2 Publicações em Conferências

As publicações em conferências nos últimos três anos (2019 até 2021) estão apresentadas de acordo com o extrato superior da CAPES para a área da Ciência da Computação, de acordo com o documento Relatório do Qualis Periódicos e Eventos Científicos1.

* **Qualis A1 (um artigo)**
  + DE ALMEIDA, J.; DASILVA, L.; **BOTH, C.**; RALHA, C.; MAROTTA, M. Optimal Allocation of vBBUs Considering Distance Between MDC and RRH in F-RANs. In: IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, p. 1-6, 2020.
* **Qualis A2 (um artigo)**
  + CARVALHO, M.; SILVA, V.; DE BRITTO, E.; MACEDO, D.; DE RESENDE, H.; MARQUEZ-BARJA, J.; **BOTH, C.**; BARDINI, A.; WICKBOLDT, J. QoE-Based Video Orchestration for 4G Networks. In: IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Istanbul, p. 1-6, 2019.
* **Qualis A3 (um artigo)**
  + MORAES, J.; MATNI, N.; RIKER, A.; OLIVEIRA, H.; CERQUEIRA, E.; **BOTH, C.**; ROSÁRIO, D. An Efficient Heuristic LoRaWAN Adaptive Resource Allocation for IoT Applications. In: IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Rennes, p. 1-6, 2020.
* **Qualis A4 (um artigo)**
  + ALENCAR, D.; ROSÁRIO, D. ; CERQUEIRA, E. ; **BOTH, C.**; ANTUNES, R. Distribuição de Conteúdo Sob Demanda Através da Alocação de Microserviços Dinâmicos na Borda e Núcleo da Rede. In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Rio de Janeiro, p. 1-14, 2020.

# Formação de recursos humanos

No último triênio, o proponente esteve envolvido com 12 trabalhos acadêmicos de formação profissional, entre teses de doutorado, dissertações de mestrado, trabalhos de conclusão de cursos e orientações de iniciação científica, como apresentado na Tabela 5. No início de 2019, o proponente trocou de local de trabalho, iniciando suas atividades na Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Dessa forma, é natural ocorrer uma redução do número de orientações, em um primeiro momento. Além disso, entre 2016 e 2018, o proponente coordenou o projeto internacional FUTEBOL, que proporcionou recursos financeiros para bolsas de vários alunos. Em 2021, o proponente iniciou a participação de projetos como bons recursos financeiros (SFI2, PORVIR-5G e MAYA), que proporcionará um aumento gradual na quantidade de orientações. Além disso, é importante destacar que o proponente orienta um aluno de doutorado em cotutela com a *University of Antwerp.*

Tabela 5 – Formação e orientação de alunos

| **Formação** | **2016-2018** | **2019-2021** | **Quinquênio** |
| --- | --- | --- | --- |
| Tese de doutorado concluída | - | 2 | 2 |
| Dissertação de mestrado concluída | 5 | 2 | 5 |
| Trabalhos de conclusão de curso | 1 | 2 | 3 |
| Orientação de iniciação científica | 9 | 2 | 5 |
| Tese de doutorado em andamento | 2 | 2 | 2 |
| Dissertação de mestrado em andamento | 4 | 2 | 2 |
| TOTAL | 21 | 12 | 19 |

# Orientações Concluídas

**Doutorado:**

* Maicon Kist defendeu a tese de doutorado intitulada “Radio and Baseband Unit Virtualization: Pushing the Boundaries of Future Mobile Networks” em 2020. As principais contribuições dessa tese foram publicados em periódicos com alto fator de impacto, tais como: IEEE Transactions on Mobile Computing e Elsevier Computer Networks.
* Marcelo Antônio Marotta defendeu a tese de doutorado intitulada “Resource Sharing in Heterogeneous Cloud Radio Access Networks” em 2019. As principais contribuições dessa tese foram publicados em periódicos, tais como: IEEE Transactions on Vehicular Technology e Applied Sciences-Basel.

**Mestrado:**

* Fernando Zanferrari Morais defendeu a dissertação de mestrado intitulada “PlaceRAN: Uma Solução de Posicionamento das Funções de Rádio de Acesso Móveis Virtualizadas de Quinta Geração” em 2021. O levantamento bibliográficos dessa dissertação foi publicado no periódico Journal of Network and Computer Applications. Além disso, a solução final foi submetida para o periódico IEEE Transactions on Mobile Computing - https://arxiv.org/pdf/2102.13192.pdf
* Luiz Felipe da Silva Cunha defendeu a dissertação de mestrado intitulada “ELASTIC5GC - Elasticidade Proativa no Core 5G para Melhorar a Utilização de Recursos e Capacidade de Atendimento” em 2021. O resultado dessa dissertação está sendo submetida para o periódico IEEE Transactions on Network and Service Management.

**Trabalhos de Conclusão de Curso:**

* Júlio Renner defendeu seu trabalho de conclusão de curso intitulado “Uma arquitetura de Orquestração de Funções de Rede de Acesso de Rádio Desagregadas” em 2020. O resultado desse trabalho faz parte de uma submissão para o o periódico IEEE Transactions on Network and Service Management.
* Diogo Yuri Prates Sarmento defendeu seu trabalho de conclusão de curso intitulado “Segurança da Informação na Comunicação de Dispositivos em Redes LoRa: Análise de Vulnerabilidades na Comunicação de ponta a ponta” em 2019.

# Orientações/Supervisão em Andamento

Atualmente, o proponente está orientando seis alunos, entre doutorandos, mestrandos e iniciação científica, como pode ser observada na Tabela 6. É importante destacar que estão sendo contratados vários bolsistas, devido ao início dos projetos junto a FAPESP (SFI2, PORVIR-5G e MAYA). Esses projetos incluem bolsas de pós-doutorado, desenvolvimento técnico e iniciação científica.

Tabela 5 – Orientações/Supervisões em Andamento

| **Aluno** | **Curso** | **Bolsa** | **Início** | **Previsão de Defesa** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Gustavo Zanatta Bruno | Doutorado | RNP | 01/2020 | 02/2023 |
| Henrique de Resende | Doutorado | University of Antwerp | 02/2019 | 02/2022 |
| Leandro Gustavo Alves | Mestrado | - | 01/2020 | 02/2021 |
| Eliel de Albuquerque | Mestrado | - | 01/2020 | 02/2021 |
| Gustavo Eismann Souza | IC | CNPq | 02/2020 | 02/2021 |
| Natan Junges Müller | IC | FAPESP | 02/2021 | 02/2021 |

# 3. Rede de Colaborações

No Brasil, o proponente possui colaborações com pesquisadores de todas as regiões do país. A seguir, os principais colaboradores são listados. É importante destacar que essa lista não é exaustiva.

* **Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior**: professor titular da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde coordena o LASSE - Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, Automação e Eletrônica. Bolsista de produtividade CNPq nível 1D.
* **Antônio Marcos Alberti:** professor titular do Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), em Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais.
* **Augusto José Venâncio Neto:** professor associado do Departamento de Informática e Matemática Aplicada da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Bolsista de produtividade CNPq nível 2.
* **Daniel Fernandes Macedo:** professor adjunto no Departamento de Computação da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Bolsista de produtividade CNPq nível 2.
* **Denis Lima do Rosário:** Professor Adjunto da Faculdade de Computação do Instituto de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal do Pará (UFPA). Bolsista de produtividade CNPq nível 2.
* **Edmundo Roberto Madeira:** professor do Instituto de Computação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Bolsista de produtividade CNPq nível 1D.
* **Eduardo Coelho Cerqueira:** Professor Adjunto da Faculdade de Computação do Instituto de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal do Pará (UFPA). Bolsista de produtividade CNPq nível 1D.
* **Flávio de Oliveira Silva:** professor adjunto em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU).
* **Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti**: Professor Associado da Universidade Federal do Ceará (UFC). Bolsista de produtividade CNPq nível 1D.
* **Jéferson Campos Nobre:** professor associado do Instituto de Informática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
* **José Marcos Silva Nogueira:** professor titular no Departamento de Computação da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Bolsista de produtividade CNPq nível 1D.
* **José Marcos Câmara Brito:** professor titular do Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), em Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais.
* **José Ferreira de Rezende**: professor associado do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Bolsista de produtividade CNPq nível 1D.
* **Juergen Rochol:** professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
* **Juliano Araújo Wickboldt:** professor do Instituto de Informática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Bolsista de produtividade CNPq nível 2.
* **Kleber Vieira Cardoso:** professor associado no Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás (UFG).
* **Leandro Aparecido Villas:** professor do Instituto de Computação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Bolsista de produtividade CNPq nível 2.
* **Lisandro Zambenedetti Granvile:** professor associado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Bolsista de produtividade CNPq nível 1C.
* **Magnos Martinello:** professor adjunto no Departamento de Informática da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Bolsista de produtividade CNPq nível 2.
* **Michele Nogueira Lima:** professora adjunta do Departamento de Informática da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Bolsista de produtividade CNPq nível 1D.
* **Moises Renato Nunes Ribeiro:** professor no Departamento de Informática da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Bolsista de produtividade CNPq nível 2.
* **Nelson Luis Saldanha da Fonseca:** professor titular da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Bolsista de produtividade CNPq nível 1A.
* **Rodrigo da Rosa Righi:** professor da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Bolsista de produtividade CNPq nível 2.

No exterior, o proponente possui principalmente colaborações com pesquisadores Americanos e Europeus. A seguir, os principais colaboradores são listados. É importante destacar que essa lista não é exaustiva.

* **Enzo Mingozzi:** professor titular do Departamento de Engenharia da Informação da Universidade de Pisa, Itália. A colaboração iniciou em 2010 com o doutorado sanduíche deste proponente. Atualmente, as colaborações estão voltadas para pesquisas de Internet das Coisas e *Fog Computing*.
* **Johann Marquez Barja:** professor associado da Universidade da Antwerpen, Bélgica. As colaborações iniciaram em 2016 e se intensificaram ao longo dos anos, com publicações e submissões de projetos. No segundo semestre de 2018, o aluno Henrique Resende deverá iniciar o doutorado sob a orientação do professor Johann e co-orientação deste proponente.
* **Luiz Da Silva:** professor do Departamento de Engenharia da Computação da universidade da Virginia Tech, Estados Unidos. As colaborações iniciaram em 2015 com a publicação de um artigo no periódico IEEE Wireless Communications. Em 2016, sob as coordenações do professor DaSilva, no lado Europeu, e deste proponente, no lado Brasileiro, o projeto FUTEBOL foi aprovado na 3a chamada EU-Brasil dentro do programa H2020. Além disso, os alunos de doutorado Marcelo Marotta e Maicon Kist realizaram seus doutorados sanduíches em Dublin (quando era professora daquela instituição), sob a supervisão e colaboração do professor DaSilva.
* **Sherali Zeadally**, professor associado da Universidade de Kentucky, Estados Unidos. A parceria iniciou em 2021 com colaboração em artigos científicos principalmente utilizando a tecnologia LoRa.
* **Oscar Maurício Caicedo:** professor titular do departamento de telemática da Universidade de Cauca, Colômbia. A colaboração iniciou durante seu doutorando na UFRGS, onde este proponente e o professor Oscar trabalharam juntos. Atualmente, estão trabalhando em um projeto de virtualização de redes celulares. Além disso, existem projetos de intercâmbio de estudantes e visitas de pesquisa entre as universidades dos professores.
* **Paolo Bellavista:** professor titular do Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Bologna, Itália. A colaboração iniciou em 2016 na área de Redes Heterogêneas Centralizadas na Nuvem, onde orientaram juntos o aluno Luca Tartarini da Universidade de Bologna. Essa orientação gerou a publicação de um artigo na Elsevier Computer Communications.
* **Paulo Marques:** professor titular do Instituto de Telecomunicações de Aveiro, Portugal. As colaborações iniciaram em 2016 através do projeto FUTEBOL. Nestes últimos dois anos, este proponente esteve duas vezes em Aveiro e o professor Paulo já participou de três reuniões de pesquisa no Brasil. Até o momento, foi publicado um artigo científico com esta colaboração e estão sendo realizadas pesquisas que serão publicadas em breve.
* **Tobias Zobel:** diretor do Medial Valley, Erlang, Alemanha. O senhor Tobias é responsável pela colaboração Brasil e Alemanha dentro do Medical Valley. A parceria iniciou em 2017, com consultorias na área de Inovação Tecnológica em Saúde. Este proponente esteve em um estágio de curta duração na Universidade de Friedrich Alexander (FAU) em junho de 2017, onde se iniciou um intercambio de startups no Medical Valley. Apesar do senhor Tobias não ser um professor, é importante destacar essa colaboração internacional, pois muitos resultados estão surgindo e surgirão deste relacionamento.
* **Torsten Braun:** professor de Ciência da Computação da Universidade de Bern, Suíça. As colaborações iniciaram em 2016 em uma reunião de pesquisa realizada na UFPA, Belém. A partir desse encontro, muitos trabalhos foram iniciados e, apesar do curto período, dois artigos já forma publicados através dessa colaboração.
* **Reza Nejabati:** professor da Faculdade de Engenharia da Universidade de Bristol, Inglaterra. As colaborações iniciaram em 2016 através do projeto FUTEBOL. Nestes últimos dois anos, este proponente e o professor Reza se encontraram em cinco oportunidades. Até o momento, já foram publicado alguns artigo científicos com esta colaboração.

# 4. Projetos

Atualmente, o proponente está participando de quatro projetos de pesquisa. As descrições dos projetos são apresentadas a seguir.

1. **(2021-2025)** PORVIR-5G: Programabilidade, ORquestração e VIRtualização de Redes em 5G

**Chamada Pública:** FAPESP/MCTIC/CGI.br - Projeto de Pesquisa Temático 2019

**Coordenador:** José Marcos Nogueira (UFMG)

**Participação do proponente:** Pesquisador Principal

**Integrantes:** cinco instituições envolvidas com 12 pesquisadores e 20 bolsistas

**Recurso financeiro:** R$ 2.000.000,00

**Financiador:** MCTIC/CGI.br

1. **(2021-2025)** SFI2​​ ​​ - Fatiamento de Infraestruturas de Internet do Futuro

**Chamada Pública:** FAPESP/MCTIC/CGI.br - Projeto de Pesquisa Temático 2018

**Coordenador:** Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho

**Participação do proponente:** Pesquisador Associado

**Integrantes:** 16 instituições envolvidas com 19 pesquisadores e 14 bolsistas

**Recurso financeiro:** R$ 2.000.000,00

**Financiador:** MCTIC/CGI.br

1. **(2021-2023)** PROJETO MAYA - Tecnologias inovadoras e disruptivas para prescrever, incentivar e avaliar a prática de atividade física

**Chamada Pública:** FAPESP/MCTIC/CGI.br - Projeto de Pesquisa Regular 2019

**Coordenador:** Pedro Dal Lago

**Participação do proponente:** Pesquisador Associado

**Integrantes:** 4 instituições envolvidas com sete pesquisadores e 3 bolsistas

**Recurso financeiro:** R$ 200.000,00

**Financiador:** MCTIC/CGI.br

1. **(2021-2021)** PMon-5G - Monitoramento do Posicionamento de Funções Virtualizadas usando Infraestrutura Nativa de Nuvem para Redes 5G

**Chamada Pública:** CT-Mon/RNP – Projeto de Pesquisa em Monitoramento 2021

**Coordenador:** Cristiano Bonato Both

**Recurso financeiro:** R$ 12.000,00

**Financiador:** RNP

# 5 Outras informações

* **Registro de programas de computadores**

O proponente possui cinco registros de programas de computadores, junto Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) com os números: BR512020002005-4, BR512020001766-5, BR512016001237-4, BR512016001235-8 e BR512016001236-6.

* **Participação em banca de Defesa de Dissertação e Tese**

Nos últimos três anos, o proponente participou de duas defesa de doutorado no programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRGS e uma defesa doutorado no programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFES. Além disso, participou de cinco qualificações de doutorado, duas no programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e uma no programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da UNISINOS e uma no programa de Computação da Universidade Federal de São Carlos. Por fim, o proponente participou de seis defesas de mestrado nos seguintes programas PPGC-UFG, PPGC-UnB, PPE-COPPE/UFRJ e PPGC-UFRGS.

* **Coordenador de Comitês de Programas**

O proponente foi coordenador do Salão de Ferramenta do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos 2021.

* **Assessor técnico**

O proponente foi assessor técnico nos seguintes comitês nacionais e internacionais:

- Comitê externo de assessoramento do Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada - Electrical and Computer Engineering, 2020.

- Comitês de Assessoramento da FAPERGS. 2019 – 2021.

* **Participação em Comitês de Programas**

O proponente é membro de diversos comitês de programas científicos, tais como:

- IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2020)

- IEEE Healthcom (Healthcom 2020)

- IEEE International Symposium on Computer and Communications (2019, 2020, 2021)

- IEEE 5G World Forum (WF-5G 2019, 2020, 2021)

- Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2019, 2020 e 2021)

- Comitê de Avaliação do I Concurso de Teses e Dissertações do SBRC (2019, 2020, 2021)

- Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS 2019, 2020, 2021)

* **Participação em Revisão de Periódicos**

O proponente tem revisado artigos submetidos a diversos periódicos, tais como:

- Elsevier Computer Networks

- Elsevier Ad Hoc Networks

- Elsevier Journal of Network and Computer Applications

- IEEE Wireless Communication

- IEEE Access

- IEEE Communications Maganize

- Springer Wireless Networks

* **Iniciativas de software de código aberto**

Idealizador da iniciativa my5G - <https://my5g.github.io/>. O principal objetivo da iniciativa my5G é tornar os sistemas de software 5G acessíveis para todos. Além disso, a iniciativa tem interesse em permitir o uso de sistemas de software 5G em uma grande variedade de cenários. Além disso, a iniciativa my5G visa criar um ambiente amigável para que alunos, pesquisadores e profissionais aprendam e contribuam com os sistemas de software 5G.

# Parte II – Projeto de pesquisa

# Núcleo 5G Inteligente Integrando Múltiplas Redes de Acesso

**RESUMO EXPANDIDO**

Nos últimos anos houve uma crescente demanda por novos serviços de redes móveis que ofereçam suporte às aplicações com requisitos de desempenho cada vez mais rigorosos. Essa nova demanda requer tanto uma ampliação da capacidade de transmissão, quanto redução da latência, grande cobertura e alta confiabilidade. Atender esses requisitos faz parte dos objetivos das redes de quinta geração (5G) que proverão suporte para três modos de operação distintos: eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*), uRLLC (*Ultra-Reliable Low-Latency Communication*) e mMTC (*Massive machine type communication*). Além disso, um novo modo de operação, denominado de eRAC (*enhanced Remote Area Communication*), foi recentemente proposto para prover conectividade em áreas remotas e rurais. Nesse contexto, Redes 5G atenderão aos diferentes requisitos de novos serviços e aplicações, tais como *Internet of Things* (IoT), realidade virtual/aumentada, carros autônomos, agricultura e pecuária de precisão. Para lidar com essa diversidade, múltiplos modos de operação, fornecidos por diferentes tecnologias de acesso sem fio, foram definidos. Além disso, as redes 5G estão sendo desenvolvidas sob um intenso processo de *softwarização*, caracterizado pelo uso de nuvem, virtualização e programabilidade. Esse processo é significativo nas redes de acesso e ainda mais notável no núcleo das redes 5G. Perante os muitos desafios, há diversas questões em aberto, como a integração de tecnologias de redes de acesso IoT não-3GPP a um núcleo 5G. Este projeto, intitulado *Núcleo 5G Inteligente Integrando Múltiplas Redes de Acesso,* se propõe a pesquisar, implantar e estender sistemas 5G, desenvolvendo o software necessário para demonstrar a integração das tecnologias de acesso sem fio ao núcleo 5G. Adicionalmente, o projeto abordará as questões relacionadas à adoção de Inteligência Artificial (IA) como um componente crítico na evolução das redes 5G. Apesar das padronizações estarem avançando na definição de um arcabouço de desenvolvimento tecnológico, ainda existem várias lacunas para o uso pleno de IA em 5G. Para superar algumas das lacunas mais relevantes, o projeto determinará algoritmos e técnicas de IA adequados para problemas nas redes de acesso e núcleo, como adaptação do enlace às condições do canal e posicionamento de funcionalidades virtuais, além de avançar o estado-da-arte no processo de coleta e uso de dados. Além disso, este projeto tem como objetivo desenvolver um núcleo 5G fatiável que permita a integração de tecnologias 3GPP e não-3GPP, e que facilite o uso de técnicas de IA nas diversas camadas. O projeto também visa o desenvolvimento e a avaliação de técnicas de IA aplicadas aos diversos componentes da rede 5G. Os resultados esperados resultarão em contribuições para a área de redes móveis, que vão desde a disponibilização de um núcleo 5G com IA, até soluções de integração e otimização de redes de acesso sem fio empregando técnicas de IA. Baseado nesse contexto, as principais contribuições deste projeto são: (i) definição de estratégias do uso de IA em telecomunicações, IoT e 5G; (ii) formação de recursos humanos especializados nas áreas de IA, IoT e 5G; (iii) soluções para experimentação e a coleta de dados sobre redes 5G operando com IA em diversas camadas; (iv) disponibilização dos dados do projeto para outros pesquisadores brasileiros.

# Contextualização e caracterização do problema

Atualmente, existe uma fragmentação na oferta de serviços de comunicação para IoT, com várias tecnologias disputando o mercado. As mesmas podem ser agrupadas em tecnologias 3GPP (*e.g.*, NB-IoT e LTE-M) e não-3GPP (*e.g.*, LoRa/LoRaWAN, SigFox, Bluetooth/BLE e WiFi) [34]. Essa heterogeneidade cada vez maior de tecnologias nas redes de acesso sem fio gera diversos problemas para aqueles que precisam manter e operar uma infraestrutura de comunicação. Soluções como o SOFTWAY4IoT [35] permitem manter e operar múltiplos *gateways* de comunicação sem fio, cada um com múltiplas tecnologias não-3GPP. Para suportar tecnologias 3GPP, são necessárias uma rede de acesso e um núcleo 4G/5G [36]. Embora existam soluções abertas de núcleo 4G [37] e 5G [38], claramente, pode-se definir um problema de integração e convergência de redes.

**Problema 1:** *Não existe solução na literatura e na indústria que oferece integração do núcleo 5G com tecnologias não-3GPP.*

O núcleo 5G a ser desenvolvido neste projeto realizará a integração de tecnologias de acesso sem fio 3GPP e não-3GPP para suporte eficaz a IoT. Essa integração demonstrará a capacidade da arquitetura 5G em acomodar novas tecnologias, com uma gerência centralizada e homogênea. A integração de múltiplas tecnologias de acesso ao núcleo das redes 5G pode ser facilitada pela concepção de uma infraestrutura controlada por software, permitindo flexibilidade na integração de novas tecnologias e na customização e adição de novos serviços e funcionalidades a essa infraestrutura. Destacam-se a otimização da Qualidade de Serviço e Experiência (QoS/QoE), a minimização do consumo energético, a redução do tempo de implantação de um novo serviço e outros. Além disso, a adoção de conceitos de *softwarização* de rede permite que se usufrua da computação em nuvem tradicional, assim como computação de borda. As funções de núcleo e da rede de acesso por rádio poderão ser implantadas utilizando as vantagens da computação em nuvem que, juntamente com o paradigma de funções de redes virtualizadas (NFV - *Network Function Virtualization*), pode reduzir os custos de implantação e de operação do sistema 5G. Por exemplo, a versão 15 do 3GPP [39] apresenta uma nova arquitetura baseada em serviços que introduz um novo conceito de fatiamento de rede (*network slicing*) [40], permitindo que serviços específicos tenham uma rede independente, otimizada e configurada para atender diferentes demandas de comunicação. Apesar dos benefícios mencionados, todo esse ecossistema torna-se bastante complexo, o que é motivo de preocupação, pois as redes 5G proverão serviços críticos e precisam ser robustas a falhas. Além disso, a dinamicidade esperada desse tipo de infraestrutura torna a intervenção humana no gerenciamento algo ineficiente e altamente sujeito a falhas.

**Problema 2:** *A integração e gerenciamento de múltiplas redes de acesso com o núcleo 5G deve minimizar a intervenção humana para ser eficiente.*

O uso de soluções baseadas em IA torna-se uma abordagem necessária para a eficaz operação da rede [41]. Essas soluções trazem um significativo avanço ao processo de automatização, reduzem o custo de operação e barateiam o serviço para o usuário final. Este projeto almeja alavancar o uso de técnicas de IA em diferentes redes de acesso sem fio, assim como no núcleo 5G. O fatiamento de rede, as redes definidas por software e funções virtuais de rede são alguns elementos importantes em relação ao núcleo 5G. O 3GPP já prevê a necessidade do uso de IA para permitir o gerenciamento eficiente da infraestrutura, em especial no contexto de fatiamento de rede. Essa necessidade é justificada pelo compartilhamento dos recursos e pela alta dinamicidade da demanda, devido a fatores como comportamento dos usuários e mobilidade. Apesar do padrão definir um arcabouço para o uso de soluções de IA, não existem definições sobre quais algoritmos devem ser empregados. Além disso, fatias de rede compostas também por recursos não-3GPP introduzem aleatoriedade na oferta, não apenas na demanda, i.e., existem mais variáveis aleatórias para serem tratadas na alocação de recursos. Finalmente, é importante destacar, que esses problemas estão alinhados com projetos internacionais, como os projetos 6G *Flagship* e One6G [42].

# Objetivos

Os principais objetivos do projeto estão relacionados à concepção e avaliação de desempenho de mecanismos de IA aplicados em diferentes camadas da rede 5G. O principal objetivo científico consiste em especificar, dimensionar, treinar e avaliar os algoritmos para as camadas da rede 5G. Além disso, o grande objetivo tecnológicoconsiste na implementação destes algoritmos em uma Plataforma Inteligente para analisar a operação da proposta em uma rede real, como pode ser observado na Figura 1.

![](data:None;base64,iVBORw0KGgoAAAANSUhEUgAAAAEAAAABCAYAAAAfFcSJAAAAAXNSR0IArs4c6QAAAARzQklUCAgICHwIZIgAAAALSURBVAiZY2AAAgAABQABYlUyiAAAAABJRU5ErkJggg==)

Figura 1 – Plataforma Inteligente para Integração de Múltiplas Redes de Acesso.

O núcleo da rede 5G, baseado em serviços e micro serviços de rede, será responsável pelo gerenciamento e orquestração das diferentes fatias de redes que podem coexistir e compartilhar recursos disponíveis nas redes de acesso propostas. A configuração de fatias de redes é um tópico de pesquisa de interesse mundial [43] e multidisciplinar que envolve telecomunicações e tecnologia da informação. O projeto irá propor um orquestrador de fatiamento de rede inteligente no núcleo que interligará diferentes redes de acesso sob demanda. As fatias devem ser criadas e configuradas para atender aos requisitos específicos de cada serviço atribuído a elas. A orquestração deve garantir que todas as fatias atendam às demandas do serviço, mesmo considerando as mudanças dinâmicas da rede móvel. O orquestrador precisa adotar soluções inteligentes, como por exemplo aprendizado de máquina, capazes de tomar decisões precisas para manter qualidade de serviço e experiência, mesmo nas condições dinâmicas impostas. O projeto desenvolverá uma solução autônoma que utiliza IA para configurar e reconfigurar várias fatias durante seu ciclo de vida.

No contexto tecnológico, o principal objetivo envolve a definição e implementação de uma solução para contemplar tecnologias que não são descritas no padrão 3GPP, mas possuem ampla adesão, como LoRa/LoRaWAN [44]. Até o momento, as implementações em código aberto de núcleo 5G estão em estágio inicial e não contemplam recursos mais avançados, como suporte a redes de acesso sem fio Não-3GPP, a não ser IEEE 802.11 e redes cabeadas. No contexto científico, a integração de redes de acesso sem fio IoT ao núcleo 5G pode ser vista como um problema de alocação de recursos, envolvendo elementos de rede e computação. Tipicamente, redes de acesso sem fio IoT (assim como os dispositivos IoT) oferecem suporte a serviços com requisitos específicos e, portanto, o uso de fatiamento de rede é uma abordagem adequada. Esse é outro tema investigado pelo projeto NECOS [45], porém sob uma perspectiva de desenvolvimento, implantação e avaliação de sistemas e não de modelagem. Neste projeto, o intuito é combinar as duas abordagens, uma vez que a infraestrutura implantada permitirá a obtenção de experiência e dados para construir e avaliar os modelos, que auxiliarão no aperfeiçoamento do software e no desenvolvimento das soluções baseadas em IA.

Com relação a IA, duas questões principais pretendem ser abordadas. A primeira é relacionada ao uso desse tipo de técnica em problemas de otimização, por exemplo para escalonamento e alocação de recursos [46]. Embora soluções como *Deep Reinforcement Learning* (DRL) tenham demonstrado resultados promissores, existem alguns desafios para sua efetiva utilização. Um desses desafios é o tratamento de recursos heterogêneos, distribuídos e inter-relacionados, comum em redes de acesso virtualizadas. A segunda questão diz respeito aos dados usados pelas técnicas de IA, os quais precisam de um grande volume e alta diversidade para permitir que o aprendizado dos algoritmos seja suficientemente amplo, como é o caso de técnicas de aprendizado de máquina. Tradicionalmente, ambientes de testes não conseguem produzir os dados com essas características. O objetivo é utilizar as próprias técnicas de IA para abordar essa questão, uma vez que soluções como *Generative Adversarial Networks* (GANs) vêm mostrando resultados promissores na sintetização de dados e na pseudo-rotulagem automática [47].

# Metodologia

Inicialmente, é importante destacar que a pesquisa e desenvolvimento deste projeto serão baseadas na iniciativa my5G ([https://my5g.github.io/](https://my5g.github.io/%20-)), idealizada pelo proponente desse projeto, juntamente como o professor Kléber Cardoso da Universidade Federal de Goiás. O principal objetivo da iniciativa my5G é tornar os sistemas de software 5G acessíveis para o desenvolvimento de novas soluções. Desta forma, a iniciativa my5G visa criar um ambiente amigável para que alunos, pesquisadores e profissionais aprendam e contribuam com os sistemas de software 5G. Além disso, a iniciativa tem interesse em permitir o uso de sistemas de software 5G em uma grande variedade de cenários. A fim de atingir os objetivos propostos em relação ao núcleo 5G inteligente integrando múltiplas redes de acesso, a metodologia está organizada em três módulos.

**3.1 Núcleo baseado em micro serviços**

O objetivo principal deste módulo é definir a integração das redes de acesso sem fio, através de uma arquitetura baseada em serviços e fatiamento de rede, como definida pelo 3GPP. Objetiva-se projetar, desenvolver e testar soluções orientadas a IA para a integração dessas redes inteligentes, com os seguintes atividades:

1. Estudar a integração das redes de acesso ao núcleo.
2. Definir as ferramentas integradoras.
3. Projetar e desenvolver uma plataforma baseada em micro serviços de IA.
4. Projetar e desenvolver orquestração integrada e inteligente.

O sistema 5G baseia-se nos conceitos da computação em nuvem, cujo núcleo é orientado a serviços com suporte nativo a fatiamento de recursos de rede, virtualização e computação móvel de borda [39]. Os aspectos da arquitetura 5G permitem a implantação virtualizada das redes 5G, podem ser totalmente distribuídos, redundantes e escaláveis. Além disso, as várias instâncias de funções de rede podem estar presentes individualmente ou em conjunto com serviços e micro serviços, representando a plenitude dessa nova geração de redes móveis. Conforme descrito pelo 3GPP Lançamento 15, as principais funções são: Função de Gerenciamento de Sessões (SMF), Função de Gerenciamento de Mobilidade (AMF), Função de Plano de Usuário (UPF), Função de Aplicativo (AF), Função de Controle de Políticas (PCF), Gerenciamento de Dados Unificado (UDM), Função de Servidor de Autenticação (AUSF), Função de Exposição de Rede (NEF), Repositório de Funções de Rede (NRF), Função de Seleção de Fatia de Rede (NSSF), Função de Interconexão Não 3GPP (N3IWF) e Função de Análise de Dados de Rede (NWDAF). Essas funções são fundamentais para suportar os requisitos de novos serviços das redes 5G, tanto no contexto do plano de dados, como de controle. Desta forma, essas funções serão utilizadas no projeto para integrar as diferentes redes de acesso através do conceito de fatiamento de rede. A partir do estudo realizado, serão definidos os principais habilitadores a serem utilizados na plataforma Inteligente responsável pela orquestração dos micro serviços, análise de dados e implantação dos algoritmos de aprendizado por reforço para redes de acesso heterogêneas.

**3.2 IoT - acesso sem fio**

Objetivo principal deste módulo é integrar redes de acesso sem fio não-3GPP, que são usadas para comunicação com dispositivos IoT, e o núcleo 5G desenvolvido no projeto. Para tanto, é necessário lidar com diversas questões relacionadas, principalmente, a transporte e segurança. Além disso, é objetivo deste módulo investigar soluções para realizar a integração de um núcleo 5G com múltiplas tecnologias de comunicação sem fio, com as seguintes atividades:

1. Projetar solução de integração com o núcleo.
2. Desenvolver solução de integração com núcleo.
3. Monitorar informações não-3GPP.
4. Orquestrar de forma inteligente fatias de rede não-3GPP.

Em um núcleo 5G, a função AUSF permite que um dispositivo se autentique de maneira unificada para ter acesso à rede e seus serviços, podendo usar tanto uma interface sem fio 3GPP (*e.g.*, NR), quanto uma interface não-3GPP (*e.g.*, WiFi). O acesso não-confiável, definido nos padrões da 3GPP, utiliza a função N3IWF. Um túnel IPSec seguro e criptografado é estabelecido entre um dispositivo (ou gateway) não-3GPP e a N3IWF, por onde todo o tráfego de dados e controle (não-3GPP) é transportado. Portanto, independente da tecnologia de acesso utilizada, o tráfego de seus dispositivos é isolado a partir do ponto de integração com a rede 5G. Entre a N3IWF e a funçãoUPF, são estabelecidas sessões (também seguras), sob o controle da gerência da AMF e controle da SMF. Essas sessões permitem que os dispositivos tenham acesso à Internet e aos serviços hospedados dentro da rede, tanto no núcleo quanto na própria rede de acesso. Cada sessão consome recursos de uma fatia de rede, a qual é composta por recursos virtualizados de rede e computação, além de funções virtuais de rede de uso geral ou específico. Tecnologias como WiFi, dependem apenas de uma estação-base para se integrar a um núcleo, porém outras tecnologias, como LoRaWAN, dependem também de um servidor de rede (*i.e.*, LoRaWAN *network server*). Embora esse componente possa estar em qualquer local, existem motivos (como segurança e disponibilidade) que justificam sua inclusão como uma função virtual de rede que compõe a fatia de rede correspondente. Cada fatia de rede pode ser caracterizada por parâmetros de QoS, como vazão e atraso. A escolha de qual fatia de rede é usada para cada sessão é assistida pela NSSF, levando em conta fatores como demanda da aplicação e permissão do dispositivo/usuário. Nesse contexto, passa a ser possível oferecer comunicação integrada para dispositivos IoT com duas interfaces, por exemplo, um sensor/atuador desenvolvido sobre um hardware como o Raspberry Pi com uma interface 3GPP (*e.g.*, NB-IoT) e uma interface não-3GPP. Essa funcionalidade pode ser explorada por um equipamento de usuário (UE - *User Equipment*) convencional, e.g., celular. Além disso, é possível criar fatias de redes com todos os recursos (de rede e computação) necessários para atender redes de acesso sem fio que servem dispositivos IoT com apenas uma interface não-3GPP, e.g., LoRa. Assim, desenvolvedores, aplicações e usuários passam a perceber uma única infraestrutura unificada de comunicação, na qual vários serviços podem ser fornecidos e consumidos.

**3.3 Orquestração do núcleo 5G inteligente integrando múltiplas redes de acesso**

O objetivo deste módulo é orquestrar o núcleo 5G considerando infraestrutura definida por software. Essa infraestrutura consiste em uma nuvem central e uma nuvem de borda fisicamente distribuída, ambas interconectadas por uma rede virtualizada. As principais atividades dessa orquestração são destacadas a seguir.

1. Especificar os requisitos do Núcleo 5G e as redes de acesso.
2. Escolher uma solução de orquestração existente na academia e indústria.
3. Evoluir e integrar com as solução de orquestração escolhida.
4. Definir casos de uso para avaliar a solução proposta.

Problemas de orquestração entre diferentes tecnologias de acesso sem fio e o núcleo 5G são tratados nos padrões da 3GPP. A função NWDAF oferece um arcabouço para monitoramento de eventos e atuação baseado em IA, que pode ser usado como base para novas soluções. Entretanto, os algoritmos de orquestração que tomam as decisões e realizam as ações não são abordados no padrão, ficando a cargo dos desenvolvedores de um sistema 5G criar esse software. Recentemente, surgiram propostas na literatura para abordar algumas questões importantes nesse contexto, tais como a previsão de capacidade da rede. Por exemplo, em [48], uma abordagem baseada em *Deep Neural Network* (DNN) é proposta para lidar com a alta dimensionalidade do tráfego de dados móveis, as complexas correlações espaciais e temporais, além da não linearidade das métricas de interesse. No contexto de acesso sem fio não-3GPP, é importante considerar que novas métricas de desempenho serão potencialmente introduzidas, exigindo que a função NWDAF, seja estendida para incluir tais informações. Finalmente, é necessário avaliar as soluções desenvolvidas, não apenas sob a perspectiva de desempenho, mas também de confiabilidade.

# Resultados e Disseminação

Baseada na metodologia proposta, espera-se obter resultados científicos e tecnológicos com grande impacto para a comunidade científica e para a indústria. Por exemplo, atualmente, o proponente já possui publicações com empresas como a Ericsson [49] e Operadoras com a Telefônica Espanha [50]. Os principais resultados específicos são listados a seguir, de acordo com os três módulos definidos na metodologia.

**Núcleo baseado em micro serviços:**

* Integração de diferentes fatias de rede de acesso ao núcleo 5G.
* Plataforma Inteligente baseada em micro serviços de rede para gerenciar a análise de dados de redes de acesso heterogêneas.
* Sistema de coleta e armazenamento de dados da rede 5G.

**IoT - acesso sem fio**

* Especificação dos requisitos do núcleo 5G e redes de acesso.
* Integração entre tecnologias não-3GPP de acesso sem fio IoT com o núcleo 5G.
* Monitoramento de métricas de tecnologias não-3GPP de acesso sem fio IoT.

**Orquestração do núcleo 5G inteligente integrando múltiplas redes de acesso**

* Orquestração inteligente de fatias de recursos que incluem elementos de redes não-3GPP.
* Algoritmo de orquestração baseado em IA para automação da integração dos diferentes fatiamentos de rede de acesso.
* Casos de uso reais utilizando a Plataforma Inteligente.

Considerando o escopo do projeto, durante os 36 meses de desenvolvimento, devem ser envolvidos alunos de doutorado, mestrado e iniciação científica, como indicado na Tabela 1. Dessa forma, os resultados deste projeto irão proporcionar o desenvolvimento de trabalho de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado em cooperação com os parceiros envolvidos. Além disso, os resultados das investigações devem ser publicados em veículos de grande impacto e que alcance um grande número de pessoas da área, visto que o projeto proposto é inovador. Assim, deve-se submeter registros de propriedade intelectual de software para proteger as principais ideias inovadoras do projeto e estimular a criação de produtos tecnológicos e *startups*. Além disso, a meta é submeter a produção científicos principalmente revistas de prestígio internacional, tais como IEEE Transactions on Mobile Computing, IEEE Transactions on Network and Service Management, IEEE Wireless Communication Magazine, Elsevier Computer Networks, Elsevier Computer Communications, Elsevier Ad Hoc Networks, Springer Wireless Networks, IEEE Communications Magazine, IEEE Communications Letters. Da mesma forma, trabalhos completos em boas conferências da área, tais como, IEEE ICC, IEEE GLOBECOM e SBRC. É importante destacar que durante os três anos que o proponente obteve bolsa de produtividade, foram publicados artigos científicos nos veículos indicados.

**Tabela 1 – Formação de Recursos Humanos e Produção Científica**

| **Recursos humanos e produção** | **Número** |
| --- | --- |
| Alunos de doutorado | 3 |
| Alunos de mestrado | 4 |
| Alunos de iniciação científica | 3 |
| Periódicos internacionais | 15 |
| Eventos internacionais | 6 |
| Eventos nacionais | 3 |
| Registro de software | 3 |

# 6. Plano de Trabalho e Cronograma

Os desafios científicos e tecnológicos que o projeto se propõe a superar foram detalhados em 12 atividades listadas na metodologia. Além disso, destaca-se uma atividade adicional de disseminação e transferência do conhecimento adquirido ao longo dos 36 meses do projeto e definidas a seguir:

1. **Estudar a integração das redes de acesso ao núcleo (Mês 1 – Mês 6):** estudar as técnicas, modelos e ferramentas para a integração da arquitetura 5G *Service-Based Architecture* (SBA) com fatiamento de redes de acesso.
2. **Definir as ferramentas integradoras (Mês 1 – Mês 6):** definir as ferramentas que serão utilizadas no projeto, para o núcleo da rede baseada em micro serviços. Essas ferramentas devem ser compatíveis com *plugins* para a integração com o orquestrador de *containers,* por exemplo Kubernetes.
3. **Projetar e desenvolver uma plataforma baseada em micro serviços de IA (Mês 7 – Mês 18):** projetar e desenvolver uma plataforma para coletar e armazenar dados a serem utilizados nos algoritmos de IA para a integração inteligente das fatias de redes e suas aplicações.
4. **Projetar e desenvolver orquestração integrada e inteligente (Mês 12 – Mês 24):** projetar e desenvolver orquestração baseada em IA para automatizar a integração dos diferentes fatiamentos de rede de acesso e suportar a demanda dos requisitos das aplicações desenvolvidas nos casos de uso.
5. **Projetar solução de integração com o núcleo (Mês 12 – Mês 18):** investigar as integrações de redes de acesso sem fio não-3GPP.
6. **Desenvolver solução de integração com núcleo (Mês 19 – Mês 30):** implementar a solução de integração baseada no resultado da Atividade 5.
7. **Monitorar informações não-3GPP (Mês 19 – Mês 24):** identificar as informações não-3GPP relevantes, definir como coletá-las e implementar os componentes de software necessários.
8. **Orquestrar de forma inteligente fatias de rede não-3GPP (Mês 25 – Mês 30):** utilizar IA para automatizar a orquestração das fatias de rede não-3GPP com o auxílio do monitoramento implementado na Atividade 7.
9. **Especificar os requisitos do Núcleo 5G e as redes de acesso (Mês 1 – Mês 6):** especificar os requisitos do núcleo 5G com relação às funcionalidades a serem oferecidas pela Plataforma Inteligente.
10. **Escolher uma solução de orquestração existente na academia e indústria (Mês 7 – Mês 12):** investigar soluções de orquestração existentes na literatura e na indústria de código aberto, como por exemplo Kubernetes, Open MANO, etc.
11. **Evoluir e integrar com as solução de orquestração escolhida (Mês 13 – Mês 24):** evoluir o sistema de orquestração para permitir o funcionamento do núcleo 5G e a integração das múltiplas redes de acesso de acordo com os requisitos levantados na Atividade 10.
12. **Definir casos de uso para avaliar a solução proposta (Mês 25 – Mês 36):** definir, desenvolver, testar e implantar através de casos de uso demonstrações das soluções e tecnologias desenvolvidas no projeto.
13. **Disseminar informação e transferir conhecimento (Mês 1 – Mês 36):** um *site* com informações do projeto será criado para servir como repositório de documentos, códigos e *software*. A transferência de conhecimento para a indústria e sociedade será buscada neste projeto, bem como a submissão de registro de propriedade intelectual.

O cronograma previsto para a realização das atividades é apresentado na Tabela 2, organizado ao longo de cada semestre dos 36 meses do projeto.

**Tabela 2 – Cronograma Semestral**

| Etapa | 2022/1 | 2022/2 | 2023/1 | 2023/2 | 2024/1 | 2024/2 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |
| 7 |  |  |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |  |  |
| 9 |  |  |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |  |  |
| 11 |  |  |  |  |  |  |
| 12 |  |  |  |  |  |  |
| 13 |  |  |  |  |  |  |

# Referências

[1] TARTARINI, L.; MAROTTA, M.; CERQUEIRA, E.; ROCHOL, J.; BOTH, C. GERLA, M. BELAVISTA, P. Software-defined handover decision engine for heterogeneous cloud radio access networks. Computer Communications 115, 21-34, 2017.

[2] MAROTTA, M.; AHMADI, H.; ROCHOL, J.; DASILVA, L; BOTH, C. Characterizing the Relation between Processing Power and Distance between BBU and RRH in a Cloud RAN. IEEE Wireless Communications Letters 7 (3), 2017.

[3] NOBRE, J.; DE SOUZA, A.; ROSÁRIO, D.; BOTH, C.; VILLAS, L; CERQUEIRA, E.; BRAUN, T.; GERLA, M. Vehicular Software-Defined Networking and Fog Computing: Integration and Design Principles. Ad Hoc Networks, v. 18, p. 1-21, 2018.

[4] MAROTTA, M.; FAGANELLO, L.; KIST, M.; BONDAN, L.; WICKBOLDT, J.; BOTH, C. Integrating dynamic spectrum access and device‐to‐device via cloud radio access networks and cognitive radio. International Journal of Communication Systems 31 (11), e3698, 2018.

[5] SCHIMUNECK, M.; KIST, M.; ROCHOL, J.; RIBEIRO-TEIXEIRA, A.; BOTH, C. Adaptive Monte Carlo algorithm to global radio resources optimization in H-CRAN. IEEE International Conference on Communications (ICC), 1-6, 2017.

[6] ROSÁRIO, D.; SCHIMUNECK, M.; CAMARGO, J.; NOBRE, J.; BOTH, C.; ROCHOL, J.; GERLA, M. Service Migration from Cloud to Multi-tier Fog Nodes for Multimedia Dissemination with QoE Support. Sensors , v. 18, p. 329-346, 2018.

[7] DANTAS S.; NETO, E.; OLIVEIRA, H.; ROSARIO, D.; CERQUEIRA, E.; BOTH, C.; ZEADALLY, S.; NETO, A. A Survey on Long-Range Wide-Area Network Technology Optimizations. IEEE Access , v. 1, p. 1-1, 2021.

[8] PRADE, L.; UBERTI, V.; ABAIDE, A.; SILVA P.; FIGUEIREDO, R.; BOTH, C. LoRa Mesh Architecture for Automation of Rural Electricity Distribution Networks. Electronics Letters, v. 1, p. 1-3, 2020.

[9] DEALMEIDA, J.; DASILVA, L.; BOTH, C.; RALHA, C.; MAROTTA, M. Artificial Intelligence-Driven Fog Radio Access Networks: Integrating Decision Making Considering Different Time Granularities. IEEE Vehicular Technology Magazine, v. 1, p. 2-13, 2021.

[10] MORAIS, F.; DA COSTA, C.; ALBERTI, A.; BOTH, C.; RIGHI, R. When SDN meets C-RAN: A survey exploring multi-point coordination, interference, and performance. Journal of Network and Computer Applications, v. 1, p. 102655-1, 2020.

[11] SANTOS, H.; ALENCAR, D.; MENEGUETTE, R.; ROSÁRIO, D.; NOBRE, J.; BOTH, C.; CERQUEIRA, E. BRAUN, T. A Multi-Tier Fog Content Orchestrator Mechanism with Quality of Experience Support. Computer Networks, v. S1389, p. 107288-107318, 2020.

[12] COSTA, F.; RIGHI, R.; COSTA, C.; BOTH, C. Nuoxus: A proactive caching model to manage multimedia content distribution on fog radio access networks. Future Generation Computer Systems, v. 93, p. 143-155, 2019.

[13] FRASCOLLA, V.; DOMINICINI, C.; PAIVA, M.; CAPOROSSI, G.; MAROTTA, M.; RIBEIRO, M.; SEGATTO, M.; MARTINELLO, M.; MONTEIRO, M.; BOTH, C. Optimizing C-RAN Backhaul Topologies: A Resilience-Oriented Approach Using Graph Invariants. Applied Sciences-Basel, v. 9, p. 136-153, 2019.

[14] D'ORO, S.; MAROTTA, M.; BOTH, C.; DASILVA, L.; PALAZZO, S. Power-Efficient Resource Allocation in C-RANs with SINR Constraints and Deadlines. IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 68, p. 1-1, 2019.

[15] BOTH, C.; GUIMARAES, R.; SLYNE, F.; WICKBOLDT, J.; MARTINELLO, M.; DOMINICINI, C.; MARTINS, R.; ZHANG, Y.; CARDOSO, D.; VILLACA, R.; CERAVOLO, I.; NEJABATI, R.; MARQUEZ-BARJA, J.; RUFFINI, M.; DASILVA, L. FUTEBOL Control Framework: Enabling Experimentation in Convergent Optical, Wireless, and Cloud Infrastructures. IEEE Communications Magazine, v. 57, p. 56-62, 2019.

[16] KIST, M.; ROCHOL, J.; DASILVA, L.; BOTH, C. HyDRA: A hypervisor for software defined radios to enable radio virtualization. IEEE Conference on Mobile Networks Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2017.

[17] KIST, M.; ROCHOL, J.; DASILVA, L.; BOTH, C. SDR Virtualization in Future Mobile Networks: Enabling Multi-Programmable Air-Interfaces. In: IEEE International Conference on Communications, Kansas, 2018. v. 1. p. 1-6.

[18] DALLA-COSTA, A.; BONDAN, L.; WICKBOLDT, J.; BOTH, C.; GRANVILLE, L. Maestro: An NFV Orchestrator for Wireless Environments Aware of VNF Internal Compositions. IEEE 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), Taipei, 2017, v. 1. p. 484-8.

[19] ALENCAR, D.; BOTH, C.; ANTUNES, R.; OLIVEIRA, H.; CERQUEIRA, E.; ROSARIO, D. Dynamic Microservice Allocation for Virtual Reality Distribution with QoE support. IEEE Transactions on Network and Service Management, v. 1, p. 1-1, 2021.

[20] DE JESUS MARTINS, R.; BOTH, C.; WICKBOLDT, J.; GRANVILLE, L. Virtual Network Functions Migration Cost: from Identification to Prediction. Computer Networks, v. 1, p. 107429-1, 2020.

[21] DALLA-COSTA, A.; BONDAN, L.; WICKBOLDT, J.; BOTH, C.; GRANVILLE, L. Orchestra: A Customizable Split-Aware NFV Orchestrator for Dynamic C-RAN. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, v. 1, p. 1-1, 2020.

[22] KIST, M.; SANTOS, J.; COLLINS, D.; ROCHOL, J.; DASILVA, L.; BOTH, C. AIRTIME: End-to-end Virtualization Layer for RAN-as-a-Service in Future Multi-Service Mobile Networks. IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, v. 1, p. 1-1, 2020.

[23] KIST, M.; WICKBOLDT, J.; GRANVILLE, L.; ROCHOL, J.; DASILVA, L.; BOTH, C. Flexible Fine-Grained Baseband Processing with Network Functions Virtualization: Benefits and Impacts. Computer Networks, v. 151, p. 158-165, 2019.

[24] DE ALMEIDA, J.; DASILVA, L.; BOTH, C.; RALHA, C.; MAROTTA, M. Optimal Allocation of vBBUs Considering Distance Between MDC and RRH in F-RANs. In: IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, p. 1-6, 2020.

[25] NOBRE, J.; ROSARIO, D.; BOTH, C.; CERQUEIRA, E.; GERLA, M. Toward software-defined battlefield networking. IEEE Communications Magazine (Print), v. 54, p. 152-157, 2016.

[26] WICKBOLDT, J.; JESUS, W. P.; ISOLANI, P. H.; BOTH, C.; ROCHOL, J ; GRANVILLE, Z. L. Software-defined networking: management requirements and challenges. IEEE Communications Magazine (Print), v. 53, p. 278-285, 2015.

[27] MAROTTA, M.; KIST, M.; WICKBOLDT, J.; GRANVILLE, L.; ROCHOL, J.; BOTH, C. Design considerations for software-defined wireless networking in heterogeneous cloud radio access networks. Journal of Internet Services and Applications, v. 8, p. 18-31, 2017.

[28] KIST, M.; FAGANELLO, L.; BONDAN, L.; MAROTTA, M.; GRANVILLE, L.; ROCHOL, J.; BOTH, C. Adaptive threshold architecture for spectrum sensing in public safety radio channels. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2015, New Orleans, v. 1. p. 287-304.

[29] ISOLANI, P.; WICKBOLDT, J.; BOTH, C.; ROCHOL, J.; GRANVILLE, L. Interactive monitoring, visualization, and configuration of OpenFlow-based SDN. IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM), 2015, Ottawa, v. 1. p. 207-5.

[30] GONÇALVES, J.; DE RESENDE, H.; VILLACA, R.; MUNICIO, E.; BOTH, C.; MARQUEZ-BARJA, J. Distributed Network Slicing Management Using Blockchains in E-Health Environments. Mobile Networks & Applications, v. 1, p. 1-12, 2021.

[31] DE RESENDE, H.; SCHIMUNECK, M.; BOTH, C.; WICKBOLDT, J.; MARQUEZ-BARJA, J. COPA: Experimenter-level Container Orchestration for Networking Testbeds. IEEE Access, v. 8, p. 1-1, 2020.

[32] MEDEIROS, I.; PACHECO, L.; ROSÁRIO, D.; BOTH, C.; NOBRE, J.; CERQUEIRA, E.; GRANVILLE, L. Quality of experience and quality of service-aware handover for video transmission in heterogeneous networks. International Journal of Network Management, v. 1, p. e2064-18, 2019.

[33] CARVALHO, M; SILVA, V.; DE BRITTO, E.; MACEDO, D.; DE RESENDE, H.; MARQUEZ-BARJA, J.; BOTH, C.; BARDINI, A.; WICKBOLDT, J. QoE-Based Video Orchestration for 4G Networks. In: IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), p. 1-6, 2019, Istanbul.

[34] J. Navarro-Ortiz, et al., "Integration of LoRaWAN and 4G/5G for the Industrial Internet of Things," in IEEE Comm. Magazine, vol. 56, no. 2, pp. 60-67, Feb. 2018.

[35] Oliveira Júnior, A., et al., "Internet das Coisas para Aplicações Sustentáveis", Computação Brasil, 40, 14-18.

[36] Parkvall, S., et al., "NR: The new 5G radio access technology". IEEE Communications Standards Magazine, v. 1, n. 4, p. 24–30, 2017.

[37] Ismael Gomez-Miguelez, et al., SrsLTE: an open-source platform for LTE evolution and experimentation. In Proceedings of the Tenth ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation, and Characterization (WiNTECH ’16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 25–32.

[38] free5GC (2020). free5GC. https://www.free5gc.org/. [Acessado em 04/08/2021].

[39] 3GPP TS 24.502, “5G; Access to the 3GPP 5G Core Network (5GCN) via non-3GPP access networks (Release 15)," 2019.

[40] Foukas, X., et al., "Network slicing in 5G: Survey and challenges". IEEE Communications Magazine, v. 55, n. 5, p. 94–100, 2017.

[41] ITU-T FG ML5G 17289-TD1-R1 (2019), Machine learning in IMT-2020 and future networks: use cases and basic requirements.

[42] Finnish 6G Flagship Programme. http://www.6gflagship.com [Acessado em 04/08/2021].

[43] Wang, H. et al., "Data-driven dynamic resource scheduling for network slicing: A Deep reinforcement learning approach”, Information Sciences, 498, 106-116.

[44] B. Buurman, et al., "Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges," in IEEE Access, vol. 8, pp. 17179-17220, 2020.

[45] S. Clayman, et al., "The NECOS Approach to End-to-End Cloud-Network Slicing as a Service," in IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 3, pp. 91-97, March 2021.

[46] Hongzi Mao, et al., Resource Management with Deep Reinforcement Learning. In Proceedings of the 15th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets), 2016.

[47] Y. Xiao, et al., "Toward Self-Learning Edge Intelligence in 6G," in IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 12, pp. 34-40, December 2020.

[48] D. Bega, et al., "AI-Based Autonomous Control, Management, and Orchestration in 5G: From Standards to Algorithms," IEEE Network, vol. 34, no. 6, pp. 14-20, 2020.

[49] S. Lins, et al., "Artificial Intelligence for Enhanced Mobility and 5G Connectivity in UAV-Based Critical Missions," in IEEE Access, pp. 1-1, 2021

[50] F. Morais, et al., "PlaceRAN: optimal placement of virtualized network functions in the next-generation radio access networks," submetido para IEEE Transactions on Mobile Computing, March 2021, disponível em https://arxiv.org/abs/2102.13192.

1. <https://drive.google.com/file/d/1PVbt_OzFQkPeEvOjoBbOPRo0DAqR4ezb/view> [↑](#footnote-ref-0)