

Técnicas de Gerenciamento de Sobrecarga e Alocação de Recursos para Comunicação Massiva do Tipo-Máquina em Redes de Acesso 3GPP

Tiago P. C. de Andrade¹, Nelson L. S. da Fonseca¹

¹Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
13.083-852 – Campinas – SP – Brasil

{tandrade,nfonseca}@ic.unicamp.br

Abstract. *A key component of the Internet of Things (IoT) ecosystem is wide-area connectivity, for which cellular network technologies represent a promising solution due to their support for massive Machine-type Communications (mMTC). However, the sporadic and highly synchronized transmission of small data packets by numerous devices can overload the Radio Access Network (RAN), leading to the depletion of critical resources associated with the Random-access (RA) procedure and control signaling. This paper summarizes the primary contributions of the first author's doctoral thesis, which proposes innovative Medium Access Control (MAC) techniques to mitigate the challenges inherent in supporting mMTC. The findings demonstrate that the proposed schemes not only guarantee Quality of Service (QoS) for massive traffic but also yield significant reductions in preamble collisions, control message blocking, and device energy consumption. Furthermore, the techniques enhance the probability of successful access and maximize resource utilization efficiency in massive random access scenarios.*

Resumo. *Um componente vital do ecossistema da Internet das Coisas (Internet of Things (IoT)) é a conectividade em redes de longa distância, para a qual as tecnologias celulares emergem como uma solução proeminente devido ao suporte nativo a comunicações massivas do tipo-máquina (massive Machine-type Communications (mMTC)). Contudo, a transmissão esporádica e altamente sincronizada de pequenos pacotes por uma densidade extrema de dispositivos pode sobrecarregar a rede de acesso via rádio (Radio Access Network (RAN)), exaurindo recursos críticos do procedimento de acesso aleatório (Random-access (RA)) e da sinalização de controle. Este artigo sintetiza as principais contribuições da tese de doutorado do primeiro autor, a qual propõe mecanismos inovadores na camada de controle de acesso ao meio (Medium Access Control (MAC)) para mitigar os gargalos inerentes ao suporte de mMTC. Os resultados demonstram que as técnicas propostas não apenas asseguram a Qualidade de Serviço (QoS), como também proporcionam reduções substanciais na colisão de préambulos, no bloqueio de mensagens de controle e no consumo energético. Adicionalmente, observa-se um incremento na probabilidade de sucesso de acesso e na eficiência de utilização dos recursos em cenários de tráfego massivo.*

1. Introdução

Vivenciamos uma nova era em que a proliferação de dispositivos inteligentes interconectados redefine o conceito de comunicação e interação. A Internet das Coisas (*Internet of Things (IoT)*) emerge como a força motriz dessa transformação, permitindo a conectividade de objetos cotidianos, máquinas industriais e infraestruturas urbanas [Al-Fuqaha et al. 2015]. Essa vasta quantidade de dispositivos, equipados com sensores, capacidade de processamento e comunicação, gera um fluxo contínuo de dados e promete revolucionar setores como saúde, transporte, energia, cidades inteligentes e agricultura [Cheng et al. 2012]. A IoT não é apenas uma tendência tecnológica, mas sim um catalisador de uma nova revolução industrial, na qual a coleta e a análise de dados em tempo real impulsionam a tomada de decisões mais eficientes e a criação de serviços inovadores. Essa nova era de conectividade ubíqua redefine a forma como vivemos, trabalhamos e interagimos com o mundo ao nosso redor.

As redes celulares *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* emergem como protagonistas no cenário *Low Power Wide Area (LPWA)* [Laya et al. 2016], superando deficiências típicas de redes não licenciadas em relação à interferência, confiabilidade, cobertura e onipresença de gerenciamento. Todavia, a arquitetura tradicional de comunicação do tipo-humano (*Human-type Communication (HTC)*) mostra-se insuficiente para as particularidades do tráfego de comunicação do tipo-máquina (*Machine-type Communication (MTC)*) [3GPP 2011]. Diante desse cenário, o 3GPP promoveu avanços significativos na especificação de tecnologias de Internet das Coisas Celular (*Cellular Internet of Things (CIoT)*), introduzindo melhorias críticas para o suporte a MTC em padrões existentes, notadamente o LTE-MTC (LTE-M) e o IoT de banda estreita (*narrowband IoT (NB-IoT)*) [GSMA 2018].

As redes de Quinta Geração (*Fifth Generation (5G)*) estruturam-se sobre três pilares fundamentais de casos de uso: banda larga móvel aprimorada (*enhanced Mobile Broadband (eMBB)*), mMTC e comunicações ultra-confiáveis e de baixa latência (*ultra-reliable and low-latency communications (URLLC)*) [ITU-R 2015]. Visando satisfazer requisitos técnicos rigorosos, o ecossistema 5G integra tanto a evolução do padrão *Long Term Evolution (LTE)* (contemplando vertentes otimizadas para MTC, como o LTE-M e o NB-IoT) quanto a introdução de uma nova interface de rádio denominada *New Radio (NR)* [Series 2021]. Dado que o NB-IoT e o LTE-M cumprem as exigências para serviços mMTC, ambos foram formalmente reconhecidos como padrões 5G no âmbito do IMT-2020, evoluindo de forma contínua como parte integrante das especificações do 3GPP [GSMA 2018].

A consolidação do ecossistema IoT tem catalisado uma expansão exponencial na densidade de dispositivos conectados, redefinindo as métricas de escalabilidade das redes móveis. Entretanto, a natureza do tráfego IoT (caracterizada por rajadas esporádicas de pequenos pacotes e comportamentos de acesso altamente sincronizados) impõe desafios severos às infraestruturas celulares contemporâneas, especialmente sob o paradigma mMTC [Bockelmann et al. 2016]. Essa dinâmica de tráfego resulta na saturação prematura do plano de controle, incidindo diretamente sobre o protocolo de acesso aleatório (RA). Como este protocolo atua como o mecanismo crítico para o estabelecimento de conexão e requisição de recursos de enlace de subida (*uplink*), sua degradação torna-se o principal gargalo para a eficiência sistêmica em cenários de alta densidade.

2. Desafios e Estratégias para a Viabilização de Comunicação Massiva do Tipo-Máquina em Redes de Acesso 3GPP

A *escassez de sinalizações de acesso e de controle* aumenta naturalmente com o aumento do número de dispositivos, uma vez que muitos dispositivos entram no procedimento de acesso simultaneamente, uma situação bastante comum em cenários mMTC [3GPP 2011]. Isso é a causa raiz de vários problemas introduzidos em redes celulares devido ao suporte a serviços de Internet das Coisas Massivo (*massive Internet of Things (mIoT)*), tais como *colisão de preâmbulos*, *bloqueio de mensagens de controle* e *colisão de dados*. Esses problemas são descritos nas subseções que se seguem.

2.1. Colisão de Preâmbulos

A colisão de preâmbulos manifesta-se quando múltiplos dispositivos selecionam o mesmo preâmbulo em um determinado *subframe* de acesso aleatório. Paradoxalmente, um preâmbulo em colisão é, em geral, detectado com sucesso pela estação base [Jin et al. 2017], devido às propriedades intrínsecas dos sinais e às técnicas de detecção baseadas na identificação de picos de energia no perfil de atraso de potência (*power delay profile (PDP)*) do canal físico de acesso aleatório (Physical Random Access Channel (PRACH)) [Bertrand and Jiang 2011]. Consequentemente, a camada física (PHY) da estação base encaminha a lista de preâmbulos identificados (contemplando tanto preâmbulos colididos quanto não colididos) para a entidade MAC, visando a subsequente alocação de recursos [Jin et al. 2017]. Embora tal fenômeno ocorra em transmissões HTC, seu impacto é severamente exacerbado no paradigma mMTC, dada a alta densidade de dispositivos que tentam acessar o canal de forma concorrente e sincronizada.

A literatura propõe diversas abordagens para otimizar o procedimento de acesso aleatório frente ao mMTC, classificadas majoritariamente em: *prevenção de contenção*, *resolução de contenção* e *expansão de recursos do canal de acesso aleatório (Random Access Channel (RACH))*. Este trabalho foca primordialmente nas duas primeiras.

As estratégias de *prevenção de contenção* visam mitigar a probabilidade de colisões mediante a regulagem da taxa de chegada de novos dispositivos ao RACH, especialmente sob condições de alta carga. O objetivo central desses esquemas é estabilizar o ponto de operação da rede para maximizar funções de utilidade (tipicamente a vazão (*throughput*) do RACH) ou assegurar requisitos estritos de QoS. Isso é alcançado através de mecanismos que restringem temporariamente o acesso de uma fração dos dispositivos ativos, mantendo a operação do sistema próxima ao seu patamar ideal.

Por outro lado, as soluções voltadas à *resolução de contenção* concentram-se em tratar a colisão de preâmbulos após sua ocorrência, ou em dirimir colisões de dados subsequentes. Tais abordagens buscam, fundamentalmente, impedir que uma colisão inicial de preâmbulo evolua para uma colisão de dados em *uplink*, evitando assim o desperdício de recursos de rádio e o ciclo ineficiente de retransmissões.

2.2. Bloqueio de Mensagens de Controle

Dada a finitude dos recursos de rede, o bloqueio de mensagens de controle emerge como um gargalo crítico tanto no RA quanto na transmissão e recepção de dados [Mozaffari et al. 2021]. Tal fenômeno decorre da insuficiência de recursos para processar, em tempo hábil, as respostas aos preâmbulos detectados (*MSG1*) dentro da janela de

Random Access Response (RAR), bem como para as transmissões de dados decodificadas (*MSG3*) antes da expiração do temporizador de resolução de contenção (*contention resolution (CR)*).

Sob tais condições, a escassez de recursos de sinalização impede que dispositivos com preâmbulos ou mensagens de dados validados recebam as mensagens de RAR e CR, inviabilizando a conclusão do procedimento de acesso. Conseqüentemente, o dispositivo é compelido a reiniciar o ciclo de RA após um período de *backoff*, exacerbando a carga sobre o canal. A capacidade de entrega de mensagens RAR e CR é inerentemente limitada pela disponibilidade de recursos de controle em *downlink (Physical Downlink Control Channel (PDCCH))* e de recursos de dados em *uplink*. Este cenário torna-se ainda mais complexo em redes caracterizadas pela coexistência multisserviço entre tráfego MTC e usuários HTC, em que dispositivos com requisitos heterogêneos de QoS e distintos mecanismos de escalonamento (como o dinâmico, o semi-persistente e o acesso aleatório) competem por recursos compartilhados.

Para viabilizar o fluxo de dados em *uplink* e *downlink*, a estação-base deve governar a alocação de recursos via mensagens de controle, garantindo que as transmissões e recepções ocorram de forma eficiente.

A literatura atual apresenta propostas escassas voltadas à priorização e ao escalonamento de mensagens de controle na estação base, particularmente para o PDCCH [de Andrade 2025]. Notadamente, a maioria das soluções existentes é orientada ao plano de dados, tratando exclusivamente de mensagens de controle destinadas à sinalização de alocações de usuários, em detrimento de mecanismos vitais para a gestão do procedimento de acesso aleatório. Além disso, observa-se uma lacuna no que tange ao desenvolvimento de escalonadores de mensagens de controle capazes de integrar o provisionamento de QoS diretamente na alocação de recursos de controle.

Portanto, modelos de gerenciamento de recursos de controle, aliados a algoritmos de priorização e esquemas de escalonamento que contemplem a interação entre mensagens de controle de acesso aleatório e a sinalização do plano de usuário, representam uma lacuna teórica e prática. Adicionalmente, os estudos vigentes não permitem uma avaliação fidedigna do impacto de uma carga massiva de dispositivos no desempenho da rede em cenários mMTC padronizados pelo 3GPP [3GPP 2011]. Ressalte-se ainda que, embora certas técnicas de acesso aleatório ofereçam diferenciação na *fase de transmissão de preâmbulo*, os algoritmos contemporâneos de escalonamento falham ao desconsiderar a prioridade de acesso associada a mensagens de controle individuais nas etapas subsequentes do procedimento de conexão.

2.3. Colisão e Bloqueio de Mensagens de Dados

Assim que a estação base aloca recursos de rádio para preâmbulos detectados por meio de mensagens RAR, incluindo uma concessão de *uplink*, todos os dispositivos envolvidos em uma colisão de preâmbulo recebem a mesma alocação. Conseqüentemente, suas transmissões de dados (*MSG3*) colidem com alta probabilidade, gerando uma colisão de dados. Uma colisão de dados também envolve colisão de retransmissões de dados porque o protocolo híbrido de solicitação automática de repetição (*Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)*) é empregado no procedimento de acesso aleatório para proteger a transmissão de dados contra imperfeições do canal.

No entanto, no procedimento de acesso aleatório, a transmissão da mensagem *MSG3* de vários dispositivos pode colidir quando eles recebem a mesma concessão de *uplink* na mensagem RAR para transmitir sua mensagem *MSG3* (interferência intracelular). Isso acontece porque mais de um dispositivo selecionou o mesmo preâmbulo na fase inicial do procedimento de acesso aleatório.

Mesmo as transmissões de dados que não integram o procedimento de acesso aleatório (como os fluxos de dispositivos já sincronizados) devem ser processadas rigorosamente dentro de seus respectivos orçamentos de latência para assegurar a QoS estabelecida. Contudo, em cenários de alta carga, uma fração significativa dessas mensagens enfrenta bloqueios sistêmicos devido à incapacidade do canal de controle em fornecer as respectivas concessões de escalonamento (i.e., os *scheduling grants*), resultando em uma subutilização forçada dos recursos de rádio.

3. Objetivos e Contribuições

Esta tese propõe e avalia soluções de controle de acesso ao meio voltadas ao suporte de mMTC em redes de acesso celular 3GPP, explorando a sinergia entre o procedimento de RA e a alocação de recursos. Especificamente, investiga-se a *escassez de recursos de acesso e de controle* e suas repercussões no desempenho sistêmico. Primeiramente, introduzem-se soluções de acesso aleatório destinadas a dirimir colisões de preâmbulos e retransmissões de dados. Subsequentemente, são propostas técnicas de alocação de recursos concebidas para mitigar os efeitos do bloqueio de mensagens de controle.

A seguir, são descritas as principais contribuições deste estudo, correlacionando-as às problemáticas de pesquisa delineadas inicialmente. Tais contribuições são transversais às redes, desde o 4G LTE até o 5G NR. A aplicabilidade dessas soluções em um espectro tecnológico tão amplo fundamenta-se no fato de que os obstáculos críticos ao suporte de mMTC residem no procedimento de RA e no gerenciamento de recursos de controle, cujos princípios fundamentais permanecem comuns às diversas gerações de redes celulares.

Questão de Pesquisa 1: *Qual é o impacto real do tráfego mMTC no desempenho das tecnologias de acesso 3GPP?*

Esta problemática foi endereçada no *Capítulo 5* em [de Andrade 2025], mediante uma investigação rigorosa do impacto da MTC em redes de acesso 3GPP. O referido trabalho constituiu, conforme a literatura vigente, o primeiro estudo exaustivo a quantificar o desempenho de redes celulares convencionais em cenários de coexistência entre tráfego MTC e HTC. A análise fundamenta-se na perspectiva integrada que abrange: (i) o protocolo de acesso aleatório não-coordenado; (ii) o escalonamento conjunto de tráfego de dados e sinalização de controle; e (iii) modelagens fidedignas das restrições de recursos no procedimento de acesso. Esta abordagem holística viabilizou a extração de *insights* cruciais acerca dos gargalos e das potencialidades da integração de serviços MTC em infraestruturas legadas.

A análise do RA não-coordenado, integrada à complexa interdependência das funcionalidades da rede sob variados níveis de carga, provê subsídios fundamentais para a evolução das redes celulares. Este estudo demonstra que a severidade da sobrecarga na RAN e do congestionamento na RACH, impulsionada pela demanda massiva de dispositivos (majoritariamente MTC), foi subestimada. Nossos resultados evidenciam que

restrições na infraestrutura física e limitações no canal de controle (i.e., o PDCCH) degradam significativamente o desempenho do sistema durante o procedimento RA, transmissão e recepção de dados, especialmente em cenários de alta densidade. Caracterizar essa dinâmica sob condições de estresse é, portanto, imperativo para o desenvolvimento de soluções que assegurem a escalabilidade e a confiabilidade das comunicações tipo-máquina.

Adicionalmente, o *Capítulo 5* em [de Andrade 2025] elucidou o papel crítico do protocolo de acesso aleatório nas redes de acesso celular habilitadas para comunicação do tipo-máquina, demonstrando que os atrasos de acesso impactam substancialmente o provisionamento de QoS em cenários mMTC, especialmente para dispositivos HTC e aplicações com restrições de latência. Essa análise aprofundada revela a importância de otimizar o acesso aleatório para garantir o desempenho adequado de aplicações mIoT sensíveis a atrasos.

A realização deste estudo foi possibilitada pelo desenvolvimento de um modelo de simulação realista, apresentado nos *Capítulos 3 e 4* em [de Andrade 2025], que integra de forma abrangente aspectos técnicos cruciais das camadas de protocolos das redes de acesso 3GPP. Este modelo inovador, concebido com foco em cenários mMTC, abrange com precisão o protocolo de acesso aleatório, o gerenciamento e monitoramento do canal de controle, e o controle de potência dos canais PRACH e *Packet Uplink Shared Channel (PUSCH)*. Ao modelar a intrincada interação entre esses componentes, o modelo permite uma análise mais precisa e realista do impacto da mMTC no desempenho das redes de acesso celular, fornecendo entendimentos valiosos para o desenvolvimento de soluções otimizadas.

Esses dois capítulos demonstraram a importância crucial de considerar todos os aspectos mencionados na avaliação de redes de acesso celular projetadas para suportar a comunicação do tipo-máquina. A análise abrangente revelou que a *escassez de recursos de acesso aleatório e de controle* é uma problemática inerente a essas redes, especialmente em cenários com um número massivo de dispositivos acessando a rede simultaneamente. Essa constatação enfatiza a necessidade de soluções inovadoras que otimizem o uso dos recursos de acesso aleatório e garantam o desempenho adequado das redes de acesso celular em cenários mMTC.

Questão de Pesquisa 2: *Como aumentar a eficiência do atual protocolo de acesso a rede 3GPP para dar suporte à comunicação massiva, fornecendo QoS a seus usuários?*

Essa questão foi respondida no *Capítulo 6* em [de Andrade 2025], apresentando novos esquemas para aliviar a sobrecarga na RAN e congestionamento no RACH, a fim de enfrentar a *escassez de recursos de acesso aleatório*. Os esquemas apresentados se enquadram nas categorias de prevenção e resolução de contenção. Por um lado, o *Capítulo 6* em [de Andrade 2025] mostrou que abordagens orientadas à priorização de preâmbulos ajudam a melhorar o desempenho, enquanto abordagens "QoS-aware" são capazes de melhorar o provisionamento de QoS em cenários coexistentes em redes de acesso celular 3GPP.

Os estudos revelaram que o atraso associado ao RA impacta significativamente o provisionamento da QoS para os dispositivos, especialmente em cenários mMTC onde a sobrecarga no protocolo de RA torna-se desafiadora. Diante disso, o *Capítulo 6* em

[de Andrade 2025] representou um avanço importante na implementação do paradigma mMTC em redes de acesso 3GPP, abordando os desafios encontrados no atual protocolo de RA 3GPP e propondo soluções eficazes para a mitigação desses problemas.

As propostas no *Capítulo 6* em [de Andrade 2025] provaram ser fundamentais para o suporte de mMTC em redes de acesso celular atuais, por fornecerem as Operadoras de Redes Móveis (*Mobile Network Operator (MNO)*) as ferramentas para dar suporte à priorização, à QoS e à eficiência energética no protocolo RA. A grande vantagem das propostas apresentadas é que elas são compatíveis com o protocolo RA padronizado, e, assim, não requerem profundas modificações no protocolo, facilitando a implementação em redes de celulares comerciais.

O desenvolvimento dos esquemas propostos enfrentou dois desafios fundamentais: (i) a estimativa acurada da carga no RACH, e (ii) a coordenação descentralizada para agrupamento e seleção de dispositivos aptos a executar o RA no instante oportuno. Diferente das abordagens convencionais centradas na estação-base (que frequentemente demandam cálculos probabilísticos recursivos e algoritmos de otimização de alto custo computacional), este trabalho propõe uma técnica de baixa complexidade e alta robustez baseada na detecção de colisões do protocolo *Slotted ALOHA*. Complementarmente, para viabilizar a gestão distribuída do acesso, implementou-se uma estratégia de agrupamento descentralizada. Nela, a estação-base limita-se ao envio de parâmetros de configuração inicial, conferindo autonomia aos dispositivos para a tomada de decisão operacional.

Os resultados demonstram que os esquemas propostos mitigam de forma robusta a incidência de colisões de préambulos. Adicionalmente, as soluções proporcionam ganhos expressivos em eficiência energética, redução da latência de acesso e otimização da ocupação do canal PUSCH quando comparadas ao mecanismo de acesso aleatório convencional. Consequentemente, o protocolo validou sua eficácia ao elevar o desempenho da fase de transmissão de préambulos. Tais esquemas constituem uma contribuição pioneira ao endereçar, de forma integrada, a problemática da colisão de préambulos e dados por meio de redes contemporâneas.

Questão de Pesquisa 3: *Como uma operadora de rede móvel pode fornecer priorização e QoS em tecnologias de acesso 3GPP para um número massivo de dispositivos?*

Essa pergunta foi respondida nos *Capítulos 7 e 8* em [de Andrade 2025], propondo e avaliando políticas de priorização de solicitações de controle e esquemas de alocação de recursos de acesso aleatório para lidar com o *bloqueio de mensagens de controle*. Para abordar essa questão, o *Capítulo 3* em [de Andrade 2025] propõe inicialmente um modelo de gerenciamento de recursos PDCCH que inclui as mensagens de controle de acesso aleatório em todo o processo de alocação de recursos na estação-base. Em seguida, os *Capítulos 7 e 8* em [de Andrade 2025] empregam esse modelo para propor novas políticas de priorização e escalonamento de solicitações de controle, com o intuito de fornecer à rede os meios de priorizar mensagens de controle tanto para RA quanto para transmissões de dados. Foram propostas políticas de priorização de controle para priorização de acesso aleatório e provisionamento de QoS.

Por um lado, o *Capítulo 7* em [de Andrade 2025] mostrou que a priorização de mensagens de acesso aleatório ajuda a melhorar o desempenho de redes orientadas a

MTC, enquanto as políticas "QoS-aware" são capazes de melhorar o provisionamento de QoS em cenários coexistentes. Para conseguir isso, as políticas de priorização de solicitações de controle precisam ser acopladas a estratégias adequadas de escalonamento de pacotes, dependendo das metas e objetivos de negócios da MNO. Por outro lado, o *Capítulo 8* em [de Andrade 2025] mostrou que a priorização dentro das mensagens de controle de acesso aleatório também é necessária para suportar acesso aleatório diferenciado sob altas cargas de acesso e restrições de recursos de rádio.

As propostas nestes dois capítulos provaram ser fundamentais na análise e suporte de MTC em redes de acesso celular atuais. Elas fornecem à operadora de rede móvel as ferramentas para dar suporte à priorização e diferenciação de acesso aleatório em cenários mMTC.

Questão de Pesquisa 4: *Como uma operadora de rede móvel pode aumentar a eficiência da alocação de recursos de controle e dados das atuais tecnologias de acesso 3GPP para suportar mMTC?*

Esta questão é endereçada no *Capítulo 9* em [de Andrade 2025] por meio da proposição de esquemas de escalonamento voltados à minimização do *bloqueio de solicitações de controle* e da *fragmentação do canal de controle*. Esses problemas constituem o gargalo fundamental para diversas ineficiências observadas tanto no procedimento de acesso aleatório quanto na transmissão de dados em mMTC [Osti et al. 2014]. Ao minimizar esses impedimentos, os esquemas propostos otimizam a utilização da infraestrutura de rede sob demandas de alta densidade.

Uma das estratégias primordiais para aumentar a eficiência reside na maximização do número de dispositivos aptos a transmitir e receber dados simultaneamente. Essa meta pode ser atingida por meio da otimização da distribuição de recursos PDCCH entre as solicitações pendentes. Dada a arquitetura do mapeamento nos recursos do PDCCH, observa-se que um número significativo de solicitações apresenta sobreposição nos recursos nos quais podem ser escalonadas [3GPP 2025]. Consequentemente, o escalonamento eficiente de solicitações de controle emerge como um fator crítico em cenários mMTC, nos quais a sobreposição de solicitações é uma ocorrência comum.

O *Capítulo 9* em [de Andrade 2025] propõe novas abordagens para o escalonamento no PDCCH, especialmente projetadas para aumentar a eficiência da rede CIoT. Em conformidade com as redes de acesso 3GPP, o objetivo primordial da alocação de recursos no PDCCH reside na maximização do número de dispositivos escalonados por *subframe*, atendendo simultaneamente aos requisitos de QoS estabelecidos. Esse desafio se torna particularmente complexo em cenários mMTC, onde a quantidade de recursos disponíveis é limitada em relação à demanda de dispositivos.

Considerando que os requisitos de QoS são definidos durante a concepção da fila conjunta de solicitações priorizadas (visto nos *Capítulos 7 e 8* em [de Andrade 2025]), as abordagens propostas para o escalonamento de solicitações no PDCCH visam otimizar a quantidade de solicitações atendidas. Essa otimização é alcançada por meio da minimização do bloqueio das mensagens na fila de solicitações priorizadas e da minimização da fragmentação dos recursos de controle, garantindo, dessa forma, um nível aceitável de QoS para os dispositivos na rede.

Os resultados evidenciam que as abordagens propostas lidam eficazmente com

os problemas de bloqueio de mensagens e fragmentação dos recursos de controle, resultando em um incremento significativo na eficiência do escalonamento. Adicionalmente, a arquitetura dos esquemas oferece flexibilidade metodológica e permite tanto a derivação de soluções ótimas via Programação Linear Inteira (PLI), quanto a obtenção de soluções quase-ótimas fundamentadas em heurísticas, adequando-se a diferentes requisitos de desempenho e complexidade computacional.

4. Principais Resultados

Dentre os principais resultados desta tese, destacam-se: o desenvolvimento de abordagens eficientes para a mitigação de colisões de preâmbulos e para a priorização de acesso em cenários de alta densidade; e a proposição de mecanismos que asseguram o provisionamento de QoS e a alocação otimizada de recursos de controle, fundamentais tanto para a conclusão do procedimento de acesso aleatório quanto para a transmissão e recepção de dados no PUSCH e Physical Downlink Shared Channel (PDSCH).

Adicionalmente, propôs-se um novo modelo de interação entre os componentes da subcamada MAC da estação base – integrando o gerenciador de acesso aleatório, o escalonador dinâmico de pacotes e o gerenciador do canal de controle. Essa arquitetura orquestrada permite que as decisões de alocação de recursos sejam fundamentadas em uma visão holística do estado da rede, provendo QoS com maior previsibilidade, eficiência e agilidade.

5. Publicações

As atividades de pesquisa desenvolvidas durante este doutorado culminaram em um expressivo portfólio de 22 publicações. No âmbito específico do tema desta dissertação, o registro bibliográfico compreende 13 publicações, distribuídas em três artigos em periódicos e dez trabalhos em conferências internacionais já publicados. Dentre os artigos de conferências, o artigo aceito e publicado no *Wireless Days 2025* foi escolhido para ser estendido e submetido ao *Springer Journal Annals of Telecommunications*.

6. Conclusão

Este artigo resume as contribuições da tese intitulada “*Técnicas de Gerenciamento de Sobrecarga e Alocação de Recursos para Comunicação Massiva do Tipo-Máquina em Redes de Acesso 3GPP*” [de Andrade 2025], que propõe e avalia soluções de controle de acesso ao meio para o suporte à comunicação massiva do tipo-máquina em redes celulares 3GPP, explorando a interação entre acesso aleatório e alocação de recursos. Em particular, a escassez de recursos de acesso aleatório e os problemas dela decorrentes foram abordados.

Primeiramente, esta tese realiza um estudo detalhado do impacto da comunicação massiva nas redes de acesso celular. Para tal, uma ferramenta de simulação para redes de acesso celular foi desenvolvida, a primeira ferramenta integrando todo o procedimento de gerenciamento da troca de mensagens do acesso aleatório. Em seguida, soluções de acesso aleatório para lidar com os problemas de colisão de preâmbulo e dados são propostas. Nesse processo, uma técnica inovadora, centrada na estação-base, para determinar a carga no RACH foi proposta. Além disso, uma técnica para eleição de maneira descentralizada dos dispositivos que podem realizar a transmissão do preâmbulo também é

proposta. Por último, algoritmos para priorização de mensagens de controle e esquemas para alocação de recursos de controle para lidar com os efeitos do bloqueio de mensagens no desempenho da rede são propostas.

As soluções propostas demonstraram sua eficiência na resolução dos problemas apresentados. As publicações geradas pelo trabalho da tese receberam cerca de 220 citações de artigos indexados no *Google Scholar* até janeiro de 2025, evidenciando sua relevância para a área.

Referências

- 3GPP (2011). Technical Specification Group Radio Access Network; Study on RAN Improvements for Machine-type Communications. TR 37.868, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
- 3GPP (2025). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. TS 36.213, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., and Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):2347–2376.
- Bertrand, P. and Jiang, J. (2011). Random access. In Sesia, S., Toufik, I., and Baker, M., editors, *LTE – The UMTS Long Term Evolution*, pages 371–406. John Wiley & Sons, Ltd, 2 edition.
- Bockelmann, C., Pratas, N., Nikopour, H., Au, K., Svensson, T., Stefanovic, C., Popovski, P., and Dekorsy, A. (2016). Massive machine-type communications in 5g: physical and MAC-layer solutions. *IEEE Communications Magazine*, 54(9):59–65.
- Cheng, M.-Y., Lin, G.-Y., Wei, H.-Y., and Hsu, A. C.-C. (2012). Overload control for machine-type-communications in lte-advanced system. *IEEE Communications Magazine*, 50(6):38–45.
- de Andrade, T. P. C. (2025). *Técnicas de Gerenciamento de Sobrecarga e Alocação de Recursos para Comunicação Massiva do Tipo-Máquina em Redes de Acesso 3GPP*. State University of Campinas. PhD Thesis.
- GSMA (2018). Mobile iot in the 5g future - nb-iot and lte-m in the context of 5g. White Paper.
- ITU-R (2015). IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation M.2083-0, International Telecommunication Union.
- Jin, H., Toor, W. T., Jung, B. C., and Seo, J.-B. (2017). Recursive pseudo-bayesian access class barring for m2m communications in lte systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(9):8595–8599.
- Laya, A., Kalalas, C., Vazquez-Gallego, F., Alonso, L., and Alonso-Zarate, J. (2016). Goodbye, aloha! *IEEE Access*, 4:2029–2044.
- Mozaffari, M., Wang, Y.-P. E., and Kittichokechai, K. (2021). Blocking probability analysis for 5g new radio (nr) physical downlink control channel. In *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*, pages 1–6.
- Osti, P., Lassila, P., Aalto, S., Larmo, A., and Tirronen, T. (2014). Analysis of PDCCH Performance for M2M Traffic in LTE. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(9):4357–4371.
- Series, M. (2021). Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of international mobiletelecommunications-2020 (imt-2020). volume 2150.