

# Procedimento de Acesso Aleatório Escalável para Comunicação Massiva de Dispositivos IoT em Redes Móveis

Eduardo Mosca, Silvio E. S. B. Ribeiro, Nelson L. S. da Fonseca, Carlos A. Astudillo

Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
13083-852 – Campinas – SP – Brazil

{eduardomosca,silvio}@lrc.ic.unicamp.br,  
nfonseca@ic.unicamp.br, castudillo@unicamp.br

**Abstract.** *This paper presents the performance evaluation of a scalable random access mechanism designed to meet scalability demands of random access to radio resources in mobile networks. The mechanism allows access to the network using a codeword formed by aggregating  $n$  orthogonal preambles transmitted in different random access slots, significantly increasing the number of contention resources that devices can use during the random access procedure. An analytical model is derived, and an algorithm for assessing its performance is presented. Numerical results show that the scheme significantly increases the probability of successful access, performing better than state-of-the-art schemes.*

**Resumo.** *Este artigo apresenta a avaliação de desempenho de um mecanismo escalável de acesso aleatório para atender as demandas de escalabilidade no acesso aleatório aos recursos de rádio em redes móveis. O mecanismo permite acessar a rede utilizando uma palavra-código formada pela agregação de  $n$  preâmbulos ortogonais transmitidos em slots de acesso aleatórios diferentes, aumentando significativamente o número de recursos de contenção que os dispositivos podem utilizar durante o procedimento de acesso aleatório nestas redes. Deriva-se o modelo analítico para o esquema e apresenta-se um algoritmo para o cálculo realizado na avaliação de desempenho. Os resultados numéricos mostram que o esquema aumenta significativamente a probabilidade de acesso bem-sucedido, desempenhando melhor que os esquemas do estado da arte.*

## 1. Introdução

Na definição da nova geração de redes móveis (B5G/6G) [ITU 2023], além de requisitos e recomendações que atendam as necessidades das redes e da conectividade do futuro, técnicas mais sofisticadas de acesso aleatório são necessárias. À medida que as redes móveis evoluem para suportar mais dispositivos e oferecer serviços mais robustos, a eficiência e a escalabilidade do procedimento de acesso aleatório tornam-se fatores críticos no projeto de tecnologias para redes de acesso via rádio (RAN), influenciando diretamente o desempenho da rede, a experiência do usuário e custo de implementação da infraestrutura.

O procedimento de acesso aleatório (*random access procedure* - RAP) em redes móveis é um mecanismo crucial para sincronização dos dispositivos e estabelecimento de conexão. O RAP não apenas facilita a entrada de novos dispositivos na rede, mas também suporta a transmissão de pequenas quantidades de dados, típica de aplicações de Internet das coisas (IoT) e comunicação massiva do tipo máquina (*massive machine-type communications* - mMTC) [Astudillo et al. 2021]. Sequências de preâmbulo ortogonais são empregados no processo de acesso aleatório de redes móveis para solicitar recurso para a estação rádio base (*base station* - BS), permitindo que a rede diferencie efetivamente entre as múltiplas solicitações de acesso feitas no mesmo recurso - o canal físico de acesso aleatório (*physical random access channel* - PRACH). A escassez de recursos ocorre devido a numerosas tentativas de acesso aleatório, pois muitos dispositivos concorrem simultaneamente por recursos PRACH, uma situação comum em cenários de *Massive IoT* (MIoT). Esta é a causa raiz de vários problemas introduzidos nas redes celulares devido

ao suporte de serviços mMTC, como colisão de preâmbulos, bloqueio de mensagens e colisão de dados.

Para acessar à rede, cada dispositivo seleciona um preâmbulo dentre um conjunto pré-definido. Colisão de preâmbulo e de transmissão de dados ocorre quando dois ou mais dispositivos escolhem um mesmo preâmbulo em um determinado *subframe* de RA. Um preâmbulo sob colisão é tipicamente detectado com sucesso pelo BS [Jin et al. 2017]. Isto se deve à característica física dos sinais de preâmbulos e sua técnica de detecção, geralmente baseada na busca de picos de energia no canal físico de acesso aleatório. Assim, a entidade física da BS passa a lista de preâmbulos detectados para sua entidade de acesso ao meio, incluindo preâmbulos não colididos e colididos, visando a alocação subsequente de recursos [Jin et al. 2017].

*Code-Expanded Random Access* (CeRA) é uma técnica inovadora para aumentar os recursos de contenção no acesso aleatório em redes móveis. Em CeRA, as transmissões consecutivas de preâmbulos selecionados aleatoriamente ao longo de  $n$  *subframes* são interpretadas como uma palavra-código de comprimento  $n$  e formam um *superframe* de RA [Thomsen et al. 2013, Vural et al. 2017]. Os recursos de *uplink* são alocados com base nas palavras-código inferidas/deduzidas pelo BS no *superframe*, baseado nos preâmbulos detectados em cada RA *subframe*. No entanto, a potencialidade do CeRA é limitada pelo problema de ambiguidade do código, resultante da inferência de um número maior de palavras-código do que os realmente transmitidos [Vural et al. 2017]. Isso impacta fortemente na utilização de recursos de *uplink* e até na probabilidade de sucesso do RA sob restrições de recursos.

Sendo assim, [Astudillo et al. 2021] introduz o esquema OptCeRA, que utilizando codificação de acesso ao meio (MAC) e códigos de distância média máxima (MAD) reduz o problema de ambiguidade do código, melhora a utilização de recursos e a probabilidade de sucesso. Os resultados destacam que OptCeRA com  $n = 2$  é mais eficiente e bem-sucedido em ambientes densamente populados por dispositivos, quando comparado a esquemas prévios. No entanto, uma questão que ficou em aberto é o desempenho do esquema OptCeRA quando aumentado o número de preâmbulos transmitidos ( $n$ ). Nesse sentido, o presente trabalho visa responder as seguintes perguntas de pesquisa: (i) qual é o desempenho do esquema OptCeRA para o caso cujo  $n > 2$ ? (ii) O esquema OptCeRA mantém seu ganho de desempenho com relação a outras abordagens multipreâmbulo para o caso  $n > 2$ ? e (iii) é benéfico para o esquema OptCeRA aumentar o número de preâmbulos transmitidos?

Este trabalho responde essas perguntas de pesquisa fazendo as seguintes contribuições: (i) Modelo analítico do esquema OptCeRA para o caso de  $n > 2$ . Particularmente, a derivação, em forma aberta, da esperança do número de palavras-código válidas inferidas em função do número de preâmbulos que compõem a palavra-código. (ii) Algoritmo prático para o cálculo da esperança do número de palavras-código válidas inferidas pelo esquema OptCeRA generalizado. (iii) Análise de desempenho do OptCeRA generalizado e comparação com esquemas do estado da arte.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a versão generalizada do esquema OptCeRA, enfatizando a derivação analítica da esperança do número de palavras-código válidas inferidas, além de um algoritmo para este cálculo que foi utilizado nos experimentos. A Seção 3 descreve a metodologia utilizada no trabalho, destacando o cenário de avaliação das métricas e os experimentos realizados. A Seção 4 apresenta e discute os resultados obtidos através dos experimentos com o esquema proposto. Finalmente, a Seção 5 conclui este trabalho.

## 2. Esquema OptCeRA Generalizado

No esquema OptCeRA generalizado, diferentes valores do número de *subframes* por *superframe* são possíveis – cada *subframe* possibilita a transmissão de um preâmbulo ortogonal. Isto possibilita uma análise do comportamento do mecanismo frente a novas

dimensões, definidas pela variação deste valor ( $n$ ).

Nesse contexto, a probabilidade de sucesso do acesso aleatório ( $P_S$ ) do esquema OptCeRA é definida como  $P_S = P_N \cdot P_{alloc}$ , onde  $P_N = \frac{N_S}{K} = \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{K-1}$  é a probabilidade de não colisão da palavra-código,  $P_{alloc}$  é a probabilidade de alocação de recursos e  $M$  é o número de palavras-código disponíveis e  $K$  é número de dispositivos realizando acesso aleatório no *superframe*.  $P_{alloc} = \frac{R}{\mathbb{E}[V]}$  se  $\mathbb{E}[V] > R$ , ou igual a 1, caso contrário [Vural et al. 2017, Astudillo et al. 2021].  $R$  é o número total de recursos para transmissão de dados em um *superframe* e  $\mathbb{E}[V]$  é a esperança do número de palavras-código válidas inferidas, dada pelo Teorema 1.

### 2.1. Esperança do Número de Palavras-Código Válidas Inferidas

O Teorema 1 provê uma expressão, em forma aberta, para  $\mathbb{E}[V]$  do esquema OptCeRA generalizado.

**Teorema 1** (Esperança de  $V$  para o Esquema OptCeRA Generalizado). *Suponha  $K$  dispositivos tentando acesso aleatório simultaneamente, empregando um esquema de acesso aleatório de código expandido com código  $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{A}_r^n$  de tamanho  $M$ , onde  $r \leq q$ , e  $\pi_i(j)$  igual a  $\frac{1}{r}$ , para todo  $i = 1, 2, \dots, n$  e  $j = 0, 1, \dots, r-1$ . Seja  $\mathcal{T} = \{0, 1, \dots, M-1\}$  o índice do conjunto de palavras-código em  $\mathcal{C}$  e  $A_{t,i}^c$  o evento no qual o preâmbulo indicado pela  $i$ -ésima coordenada da  $t$ -ésima palavra-código não é detectado no  $i$ -ésimo subframe de RA do *superframe*. Então  $\mathbb{E}[V]$  é :*

$$\mathbb{E}[V](q, n, M, K) = \underbrace{\sum_{t \in \mathcal{T}} 1 - \sum_{\emptyset \neq S \subseteq \{1, 2, \dots, n\}}}_{\underbrace{\hspace{10em}}_B} \underbrace{(-1)^{|S|-1} \mathbb{P}\left(\bigcap_{i \in S} A_{t,i}^c\right)}_{\underbrace{\hspace{10em}}_A}. \quad (1)$$

*Demonstração.* Trivial a partir da demonstração em [Astudillo et al. 2021, Teorema 2].

### 2.2. Algoritmo para Calcular a Esperança do Número de Palavras-Código Válidas Inferidas

O pseudo-código apresentado em 1 descreve o algoritmo para calcular a expectativa ( $V$ ) do número de palavras-código válidas inferidas. Este aceita como entrada o conjunto de palavras-código disponíveis  $\mathcal{C}$  (o código), o número de preâmbulos por *superframe* ( $n$ ), e o conjunto  $S$  das possíveis combinações de índices das coordenadas das palavras-código.

Inicialmente,  $V$  é zerado, e um conjunto  $\mathcal{T}_c$  é criado para cada palavra-código em  $\mathcal{C}$ , e usado para armazenar correspondências válidas. O algoritmo itera sobre cada palavra-código  $c$ , verificando a correspondência com preâmbulos em  $S$ . Para cada correspondência válida, uma probabilidade  $p$  de que pelo menos uma inferência em  $\mathcal{T}_c$  seja correta é calculada e ajustada em uma variável  $a$ .

Após todas as iterações,  $V$  é incrementado pela probabilidade ajustada  $a$  para cada palavra-código, resultando no valor esperado do número de palavras-código válidas inferidas. Esse procedimento fornece uma maneira eficiente de calcular expectativas em ambientes com múltiplos acessos e seleção aleatória de preâmbulos. O algoritmo conclui retornando  $V$ , o valor esperado.

## 3. Metodologia

Esta seção descreve a metodologia utilizada para avaliação do desempenho do esquema OptCeRA generalizado. O objetivo principal desta análise é estudar as características intrínsecas deste mecanismo através de um modelo analítico.

---

**Algoritmo 1** Algoritmo para o Cálculo da Esperança de  $V$ 

---

```
1: Entrada
2:    $\mathcal{C}$    O Código - conjunto de palavras-código disponíveis.
3:    $n$      Número de preâmbulos transmitidos por superframe
4:    $q$      Número de preâmbulos disponíveis por subframe de acesso aleatório.
5:    $K$      Número total de dispositivos tentando acesso aleatório em um superframe.
6:    $\mathcal{S}$    Conjunto de combinações dos índices das coordenadas da palavra-código.
7: Saída
8:    $V$      Valor esperado do número de palavras-código válidas inferidas
9:    $\mathcal{I}_c \leftarrow \emptyset, \forall c \in \mathcal{C}$            ▷ Inicializa os conjuntos de palavras-código .
10:   $V \leftarrow 0$                                ▷ Inicializa  $V$  em zero.
11: //Calcula  $C$  em (1).
12: para cada  $c$  in  $\mathcal{C}$  faça                       ▷ Itera sobre cada palavra-código em  $\mathcal{C}$ .
13:    $a \leftarrow 0$ 
14:   // Calcula  $B$  em (1).
15:   para cada  $s$  in  $\mathcal{S}$  faça                       ▷ Itera sobre os elementos (subconjuntos) de  $\mathcal{S}$ .
16:     //Calcula  $A$  em (1).
17:     para cada  $j$  in  $s$  faça                       ▷ Itera sobre os elementos de  $s$ .
18:       para cada  $l$  in  $\mathcal{C}$  faça                   ▷ Itera sobre as palavras-código do código.
19:         para cada  $z$  in  $l$  faça                   ▷ Preâmbulo  $z$  na palavra-código  $l$ .
20:           se  $z = c_j$  então                   ▷ Verifica se preâmbulo  $j$  de  $c$  e  $z$  são iguais
21:              $\mathcal{I}_c \leftarrow \mathcal{I}_c \cup l$    ▷ Guarda palavra-código que correspondeu.
22:           fim se
23:         fim para
24:       fim para
25:      $p \leftarrow 1 - \frac{|\mathcal{I}_c|}{|\mathcal{C}|}$ 
26:      $a \leftarrow a + \left[ (-1)^{|s|-1} \cdot p^K \right]$ 
27:      $\mathcal{I}_c \leftarrow \emptyset$            ▷ Reseta as palavras-código inferidas para o próximo  $s$ .
28:   fim para
29:    $V \leftarrow V + (1 - a)$  ▷ Adiciona probabilidade de inferência da palavra-código  $c$ 
30: fim para
31: fim para
32: retorna  $V$ 
```

---

Em [Vural et al. 2017],[Vural et al. 2018], é comparado extensivamente o esquema Multipreamble RA com o esquema CeRA original, proposto em [Pratas et al. 2012]. Os autores mostram que o esquema Multipreamble RA supera amplamente o desempenho do esquema CeRA original. Assim, nesta seção, é suficiente considerar o esquema Multipreamble RA, referido como CeRA.

### 3.1. Cenário de Avaliação e Métricas de Desempenho

Considera-se uma rede móvel com  $p$  *subframes* de RA por *frame*, cuja duração é  $s$  *subframes* ou *slots* e com  $K_i$  dispositivos IoT tentando acesso aleatório por *subframe* de RA. Apenas nos *subframes* os dispositivos podem transmitir preâmbulos de acesso aleatório dentre um conjunto  $r$  preâmbulos disponíveis. A rede pode trabalhar por divisão de frequência (FDD) ou tempo (TDD), porém assume-se que a rede trabalha num esquema *half-duplex* com tempo de mudança de frequência desprezível. Para os esquemas de

acesso aleatório baseado em código expandido,  $n$  indica o número de *subframes* de RA por *superframe*.  $R_s$  é o número de blocos físicos de recursos de *uplink* disponíveis por *subframe*  $s$ . A métrica de desempenho selecionada para esta análise foi a probabilidade de sucesso do acesso aleatório ( $P_S$ ), como definida na Seção 2. Os resultados são apresentados como uma função dos recursos de contenção formados pelas palavras-código, além de vários valores de  $n, q, R, K$ .

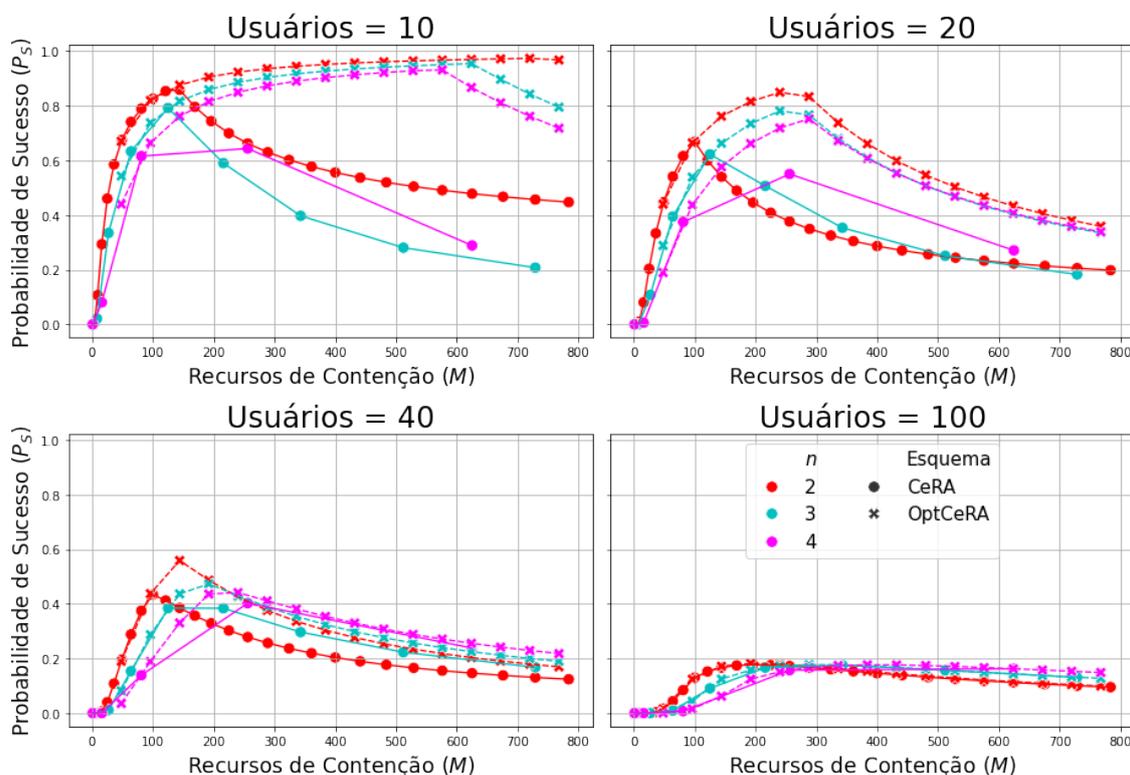
### 3.2. Configuração dos Experimentos

Para os experimentos foram definidos os seguintes parâmetros comuns para o esquema CeRA e OptCera generalizados:  $q = 48, R_s = 12, K_i \in \{10, 20, 40, 100\}$  e  $M < 800$ . Foram executados experimentos para os dois esquemas, variando os valores de  $n$  para 2, 3 e 4. É importante ressaltar que  $M$  equivale a  $a^n$  e  $q \cdot k$  para os esquemas CeRA e OptCeRA, respectivamente. Para atribuir valores a  $M$  utilizou-se  $k \in \{1, 2, \dots, 15\}$  para o esquema OptCeRA e  $a \in \{1, \dots, r_{max}\}$  para o esquema CeRA, onde  $r_{max}$  é igual a 32, 10 e 6 para  $n = 2, n = 3$  e  $n = 4$ , respectivamente.

## 4. Resultado e Discussão

A Figura 1 mostra a probabilidade de sucesso ( $P_S$ ) para os esquemas de acesso aleatórios OptCeRA e CeRA tradicional. O esquema OptCeRA generalizado supera o esquema CeRA para todos os valores de  $n$ , de cargas de usuários, e tamanhos de código, atingindo até 300% de ganho de desempenho. Além disso, é mostrado como a variação do número de usuários e do  $n$  impacta na probabilidade de sucesso do acesso aleatório.

Em todos os casos, o esquema OptCeRA supera na  $P_S$ , entretanto, a medida que a rede fica mais carregada, as colisões aumentam, diminuindo a probabilidade dos dispositivo conseguirem acessar os recursos de rádio da estação base em ambos os esquemas. Em todos os casos, quando  $M$  cresce é perceptível uma queda na  $P_S$ . Esta queda acontece



**Figura 1.** Impacto do número de usuários na probabilidade de sucesso do acesso aleatório para  $n = 2, 3, 4, q = 48$  e  $R_s = 12$ .

por volta de  $M = 200$  e  $M = 100$  para os esquemas OptCeRA e CeRA, respectivamente. Quando o número de usuários aumenta para 100, é possível perceber que a chance de colisão é muito alta, tornando a  $P_S$ , muito baixa, em todos os casos – seja para todos os valores de  $n$ , como para a variação do esquema e dos recursos de contenção. No OptCeRA com 40 e 100 usuários, os valores de  $n > 2$  permanecem levemente acima de  $n = 2$ , indicando uma melhoria, apesar do pico ter sido atingido com  $n = 2$ . Portanto, é perceptível que o melhor desempenho do RAP, considerando as configurações e limitações físicas atuais das redes celulares, acontece no caso  $n = 2$ .

## 5. Conclusão

Este artigo propõe e avalia o desempenho do esquema de acesso aleatório OptCeRA generalizado, que é uma solução para lidar com o problema de colisão de preâmbulos e escassez de recursos de contenção para o acesso aleatório em redes móveis. A generalização do esquema demonstrou a sua eficácia quando comparado com o esquema CeRA tradicional, e permaneceu sem ganho real com relação ao OptCeRA para  $n = 2$ , considerando a mesma configuração e carga de rede. Este fato possibilita prospectar cenários futuros onde novas bases tecnológicas possam comportar um maior número de usuários, número de recursos de contenção disponíveis, preâmbulos, dentre outros cenários em redes 6G, uma vez que assim possam se beneficiar melhor do esquema OptCeRA generalizado apresentado.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado parcialmente pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo 23/00673-7, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/MCTI) processo 403979/2023-4, o INCT Redes de Comunicação e Internet das Coisas Inteligentes (ICoNIoT) processo CNPq 405940/2022-0, e o Programa de Incentivo a Novos Docentes (PIND) da UNICAMP processo 3406/23.

## Referências

- Astudillo, C. A., Hossain, E., and da Fonseca, N. L. S. (2021). Random access based on maximum average distance code for massive MTC in cellular IoT networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 10(9):1852–1856.
- ITU (2023). Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2023 and beyond. TR M.216.0, International Telecommunications Union (ITU).
- 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.
- Pratas, N. K., Thomsen, H., Stefanović, Č., and Popovski, P. (2012). Code-expanded random access for machine-type communications. In *2012 IEEE Globecom Workshops*, pages 1681–1686.
- Thomsen, H., Pratas, N. K., Stefanović, Č., and Popovski, P. (2013). Code-expanded radio access protocol for machine-to-machine communications. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 24(4):355–365.
- Vural, S., Wang, N., Bucknell, P., Foster, G., Tafazolli, R., and Muller, J. (2018). Dynamic preamble subset allocation for RAN slicing in 5G networks. *IEEE Access*, 6:13015–13032.
- Vural, S., Wang, N., Foster, G., and Tafazolli, R. (2017). Success probability of multiple-preamble-based single-attempt random access to mobile networks. *IEEE Communications Letters*, 21(8):1755–1758.