

Análise de desempenho do canal de acesso aleatório para redes NB-IoT com três níveis de cobertura

Flávia Larisse S. Fernandes e José Marcos Câmara Brito

Resumo— A NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) tem por objetivo conectar uma quantidade massiva de dispositivos que possuem requisitos de baixa potência, baixa taxa de dados e baixo consumo de energia, em uma ampla área de cobertura. Esse artigo apresenta uma análise de desempenho do canal NPRACH (*Narrowband Physical Random Access Channel*), em termos de atraso e vazão, quando um dispositivo realiza o procedimento de acesso aleatório em uma rede NB-IoT com três níveis de cobertura aprimorados. Os resultados de desempenho são comparados com aqueles de uma rede NB-IoT operando com apenas um nível de cobertura, previamente publicados na literatura.

Palavras-Chave— Cobertura aprimorada, NB-IoT, NPRACH, Acesso aleatório, Análise de desempenho.

Abstract— The NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) aims to connect a massive number of devices that have low power, low data rate and low energy consumption requirements, in a wide coverage area. This paper presents an analysis of the performance of the NPRACH channel (*Narrowband Physical Random Access Channel*), in terms of delay and throughput, when a device performs the procedure of random access in an NB-IoT network with three levels of enhanced coverage. The performance results are compared with those of an NB-IoT network operating with only one level of coverage, previously published in the literature.

Keywords— *Enhancement coverage, NB-IoT, NPRACH, Random access, Performance analysis.*

I. INTRODUÇÃO

O IERC (*IoT European Research Cluster*) define a IoT (*Internet of Things*) como “a dynamic global network infrastructure with self-configuring capabilities based on standard and interoperable communication protocols where physical and virtual ‘things’ have identities, physical attributes and virtual personalities and use intelligent interfaces, and are seamlessly integrated into the information network” [1]. Ou seja, a IoT é uma rede de alta complexidade, cujo ecossistema permitirá o desenvolvimento de aplicações com potencial de revolucionar os mais diversos setores da economia, denominados de verticais de mercado.

Estima-se que o mercado global de IoT registre um crescimento anual acima de 2,4 trilhões de dólares até 2027 [2]. De acordo com [3], até 2025 prevê-se quase 25 bilhões de conexões IoT, ou seja, o número de dispositivos inteligentes ultrapassará a população mundial. Ainda de acordo com [3], as tecnologias NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) e Cat-M (Categoria M) corresponderão a 52% das conexões de IoT celular até o final do ano de 2025. Essas tecnologias foram desenvolvidas para casos de uso que exigem latência extremamente baixa e confiabilidade ultra alta [3], como:

medição inteligente, infraestrutura de cidade inteligente, sistemas de segurança, rastreamento de ativos e agricultura.

A NB-IoT é uma tecnologia LPWA (*Low Power Wide Area*) desenvolvida pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Protocol*), sendo definida na *Release 13*, para suportar uma quantidade massiva de dispositivos, também conhecidos como UE (*User Equipment*), e tem como requisitos: baixo custo, baixa taxa de dados, consumo de energia ultrabaixo, e ampla área de cobertura [4]. Projetada para comunicações M2M (*Machine to Machine*), a subportadora NB-IoT possui 180 kHz de largura de banda tanto para transmissão em *uplink* quanto para *downlink* [4]. Para comunicações no sentido de *downlink* é utilizada a técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), enquanto as comunicações de *uplink* empregam SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*). Além disso, a faixa de frequência utiliza o espectro licenciado e pode ser configurado em três modos diferentes: *in band*, que usa um ou mais PRBs (*Physical Resource Block*) LTE (*Long Term Evolution*); *guard band*, em que a subportadora NB-IoT é alocada na banda de guarda do LTE; e *standalone*, em que a subportadora GSM é realocada para uma subportadora NB-IoT.

Como a tecnologia NB-IoT foi desenvolvida para coexistir com as funcionalidades do LTE, alguns recursos foram herdados desta rede, possibilitando a reutilização de *hardware* e o compartilhamento de espectro sem problemas de interferências. No entanto, do ponto de vista da camada física, dois canais foram redesenhados no *uplink*: NPUSH (*Narrowband Physical Uplink Shared Channel*) e NPRACH (*Narrowband Physical Random Access Channel*). O NPUSH foi desenvolvido com o recurso de aprimoramento de cobertura (CE – *Coverage Enhancement*) e capacidade massiva, usado pelo UE para transmissão de dados e informações de controle, suportando o modo *single-tone*, com 48 subportadoras espaçadas em 3,75 kHz ou 12 subportadoras espaçadas em 15 kHz, e modo *multi-tone*, com espaçamento de apenas 15 kHz [5]. Já o NPRACH é usado para transmissão de preâmbulo quando o UE executa o procedimento de acesso aleatório (PAA) e suporta apenas 48 subportadoras espaçadas em 3,75 kHz em modo *single-tone* [4].

Vários estudos têm sido realizados a fim de analisar a capacidade da rede NB-IoT para atender aos requisitos de uma solução IoT. Em [6], realizou-se uma análise dos parâmetros, por meio de um modelo analítico, relacionados ao PAA no cálculo da probabilidade de sucesso no acesso, atraso médio e vazão normalizada. Em [7], um modelo analítico considerando três níveis de CE para a rede NB-IoT foi apresentado. Em [8], os autores modelaram o canal de acesso aleatório usando geometria estocástica para analisar o esquema de repetição de preâmbulo no NB-IoT. Em [9], apresentou-se um modelo analítico para um protocolo de reserva de acesso aprimorado com um mecanismo de transmissão de preâmbulo parcial para sistemas NB-IoT.

Flávia Larisse da Silva Fernandes e José Marcos Câmara Brito, Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí-MG, e-mail: flavia.fernandes@mtel.inatel.br, brito@inatel.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01250.075413/2018-04, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil.

Neste artigo realiza-se uma extensão da análise apresentada em [6], investigando o impacto do atraso médio, vazão e probabilidade de sucesso no acesso no procedimento de acesso aleatório em uma rede NB-IoT. Para tal, introduz-se um novo método para calcular a probabilidade de sucesso no acesso, considerando uma rede NB-IoT com três níveis de CE, e efetua-se uma análise comparativa com base nos mesmos critérios utilizados em [6]: atraso médio de acesso e vazão normalizada do canal.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção II fornece uma visão geral do canal de acesso aleatório físico em banda estreita (NPRACH); a Seção III apresenta o modelo do sistema; a Seção IV contém a avaliação de desempenho e discute os resultados; finalmente, a Seção V conclui o artigo.

II. PREÂMBULO NB-IoT E DESIGN DO SISTEMA

O NPRACH transmite o preâmbulo utilizando a técnica de salto de frequência em modo *single-tone*, de forma a obter ganho de diversidade temporal e em frequência [10]. Um preâmbulo NPRACH consiste em quatro grupos de símbolos transmitidos sem intervalo, cada um deles formado por um CP (*Cyclic Prefix*) seguido por uma sequência de cinco símbolos idênticos, e pode ser repetido até 128 vezes para obter ganho de cobertura. Cada grupo de símbolos é transmitido em subportadora única seguindo um padrão de sequência pseudoaleatória, sendo esse salto limitado a um conjunto de 12 subportadoras contíguas [11]. A primeira subportadora alocada para enviar o primeiro grupo de símbolos é usada para diferenciar a sequência do preâmbulo [12]. Uma vez que o preâmbulo é o mesmo para todos os dispositivos, uma colisão ocorre quando dois ou mais dispositivos escolhem uma sequência de preâmbulo com a mesma subportadora inicial [7].

Dois formatos de preâmbulo foram desenvolvidos para suportar diferentes tamanhos de células: para uma célula com raio de até 10 km é usado o NPRACH formato 0 com duração de CP de 66,7 μ s; para um raio de até 40 km é usado o NPRACH formato 1 com duração de CP de 266,7 μ s [11], [13]. A sequência de símbolos para ambos os formatos tem duração de 1,33 ms. Além do mais, para oferecer uma ampla área de cobertura, o NB-IoT requer um MCL (*Maximum Coupling Loss*) de 20 dB maior que o LTE. Assim, três níveis de *coverage enhancement* (CE) podem ser configurados em uma célula: CE nível 0 (CE 0), com MCL de 144 dB; CE nível 1 (CE 1), com MCL de 154 dB e CE nível 2 (CE 2), com MCL de 164 dB [14]. O UE seleciona o nível de cobertura conforme o valor medido pelo RSRP (*Reference Signal Received Power*). Para níveis de RSRP baixo, a rede atribui ao dispositivo um nível de CE mais alto, enquanto um nível de CE mais baixo é atribuído para um nível alto de RSRP. Deste modo, CE 0 corresponde a uma cobertura normal, CE 1 a uma cobertura mais robusta e CE 2 para condições de coberturas extremas [7].

Para cada nível de CE correspondente, a estação rádio base, também conhecida como eNodeB (*Evolved Node B*), transmite uma configuração de parâmetros NPRACH. Recursos no domínio do tempo-frequência são fornecidos e contém os seguintes dados necessários para o PAA: periodicidade das possibilidades de ocorrências do NPRACH (N_{period}^{NPRACH}), indicação do início das subportadoras designadas ao PAA (N_{sc}^{NPRACH}), número de subportadoras alocadas (N_{sc}^{NPRACH}), número de repetições do preâmbulo por tentativa (N_{rep}^{NPRACH}),

intervalo entre o início do quadro de possível ocorrência do NPRACH e o início da transmissão dos preâmbulos (N_{start}^{NPRACH}), número máximo de tentativas de retransmissão por nível de cobertura ($maxNumPreambleAttemptCE$), e duração da janela de resposta do acesso aleatório ($ra-ResponseWindowSize$). Os possíveis valores para os parâmetros NPRACH são apresentados na Tabela I [15].

TABELA I. PARÂMETROS NPRACH

Parâmetros	Valores
nprach-Periodicity (N_{period}^{NPRACH})	{ms40, ms80, ms160, ms240, ms320, ms640, ms1280, ms2560}
nprach-StartTime (N_{start}^{NPRACH})	{ms8, ms16, ms32, ms64, ms128, ms256, ms512, ms1024}
nprach-Subcarrieroffset (N_{sc}^{NPRACH})	{n0, n12, n24, n36, n18, n34}
nprach-NumSubcarrier (N_{sc}^{NPRACH})	{n12, n24, n36, n48}
$maxNumPreambleAttemptCE$	{n3, n4, n5, n6, n7, n8, n10}
numRepetitionsPerPreambleAttempt (N_{rep}^{NPRACH})	{n1, n2, n4, n8, n16, n32, n64, n128}
ra-ResponseWindowSize	{pp2, pp3, pp4, pp5, pp6, pp7, pp8, pp10}

A. Procedimento de Acesso Aleatório

Para obter sincronização no tempo e frequência, a fim de estabelecer uma comunicação inicial com o eNodeB e fazer requisições de escalonamento, o UE realiza o procedimento de acesso aleatório, o qual desempenha um importante papel para garantir a ortogonalidade do *uplink* [5]. Da mesma maneira que o LTE, o dispositivo executa o PAA baseado em contenção, o qual consiste em uma troca de mensagens feita em quatro etapas com o eNodeB, conforme ilustrado na Fig. 1.

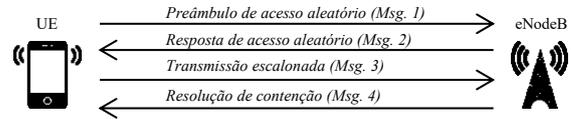


Fig. 1. Procedimento de acesso aleatório baseado em contenção.

1) Preâmbulo de acesso aleatório (Msg. 1): antes de iniciar o PAA, o UE precisa receber informações e parâmetros transmitidos através do MIB (*Master Information Block*). O UE lê as configurações NPRACH do SIB2 (*System Information Block 2*), escolhe o nível de CE conforme o limiar de RSRP definido no SIB e seleciona aleatoriamente um preâmbulo, transmitindo-o por meio do NPRACH. O tempo de início do preâmbulo é dado por: $N_{start}^{NPRACH} \times 30720 \times T_s$ unidades de tempo após o início do quadro que atenda à seguinte condição [11]:

$$n_f \bmod (N_{period}^{NPRACH} / 10) = 0 \quad (1)$$

onde n_f refere-se ao número do quadro e T_s à unidade básica de tempo em sistemas LTE/NB-IoT, calculada como: $T_s = 1 / (15000 \times 2048) = 32,552$ ns.

2) Resposta de acesso aleatório (Msg. 2): após a transmissão da sequência de preâmbulo para o eNodeB, o UE monitora o NPDCCH (*Narrowband Physical Downlink Control Channel*) à espera da Msg. 2 na janela de resposta de acesso aleatório. A janela de resposta tem uma duração igual a $ra-ResponseWindowSize$ para o nível de cobertura correspondente e inicia-se 4 subquadros após o subquadro que possui o final da última repetição do preâmbulo, caso o parâmetro $numRepetitionsPerPreambleAttempt$ seja menor que 64, caso contrário, a janela de resposta inicia-se 41 subquadros após o subquadro que possui o final da última repetição do preâmbulo

[16]. A Msg. 2 contém o identificador de preâmbulo de acesso aleatório, um C-RNTI (*Cell Radio Network Temporary Identifier*) temporário e uma concessão inicial de *uplink*. Se a resposta contiver o mesmo identificador de preâmbulo transmitido pelo UE e for recebida dentro de *ra-ResponseWindowSize*, a resposta de acesso aleatório será considerada bem-sucedida. Se o identificador do preâmbulo for diferente daquele enviado pelo UE ou a resposta não for recebida dentro de *ra-ResponseWindowSize*, a resposta de acesso aleatório falhará. Neste caso, o UE tenta novamente o PAA, desde que o número de tentativas de acesso aleatório (*maxNumPreambleAttemptCE*) seja menor que o limite superior para cada nível de CE.

3) Transmissão escalonada (Msg. 3): com as informações de escalonamento fornecidas pela Msg. 2, o UE envia a Msg. 3 através do NPUSCH. A Msg. 3, também conhecida como solicitação de conexão RRC (*Radio Resource Control*), inclui seu identificador, *status* do *buffer* e solicitação de escalonamento.

4) Resolução de contenção (Msg. 4): após a transmissão da Msg. 3, o UE inicia o temporizador *T300* (Tabela II) [15], e monitora o canal NPDCCH à espera da mensagem de resolução de contenção. Se a Msg. 4 for recebida dentro do tempo definido, o PAA é bem-sucedido, e o UE está apto para enviar dados para o eNodeB; caso contrário, o UE precisa realizar novamente o PAA, desde que o número de tentativas de retransmissão esteja dentro do limite estabelecido pelo parâmetro *maxNumPreambleAttemptCE*.

TABELA II. PARÂMETROS RRC

Parâmetro	Valor
T300	{ms2500, ms4000, ms6000, ms10000, ms15000, ms25000, ms40000, ms60000}

III. MODELO DO SISTEMA

Este artigo apresenta uma rede NB-IoT com três níveis de CE, na qual uma grande quantidade de UEs inicia o PAA ao mesmo tempo após receberem uma mensagem de paginação do eNodeB [17]. Para cada nível CE c (isto é, $0 \leq c \leq 2$), o eNodeB reserva R_c subportadoras não sobrepostas (isto é, $R_0 + R_1 + R_2 \leq 48$), com uma duração de slot igual à periodicidade NPRACH (N_{period}^{NPRACH}). Além disso, os M_c dispositivos inicialmente no nível CE c podem transmitir o preâmbulo até $N_{PTmax,c}$ vezes para cada nível de CE e $N_{PTmax,G}$, (isto é, $N_{PTmax,G} = N_{PTmax,0} + N_{PTmax,1} + N_{PTmax,2}$) para todos os níveis de CE. Dessa forma, se um UE colidido já tiver transmitido $N_{PTmax,c}$ vezes no nível CE c , ele retransmitirá o preâmbulo no próximo nível de cobertura b (isto é, $c < b \leq 2$), contanto que o limite superior para todos os níveis de CE, $N_{PTmax,G}$, não tenha sido alcançado. Para simplificar a análise, o valor do parâmetro de *backoff* é definido em θ ms, ou seja, o dispositivo colidido realiza o PAA imediatamente no próximo recurso NPRACH disponível. A mesma notação usada em [7] será adotada neste trabalho; assim, quando relatado que o preâmbulo foi transmitido no nível CE c significa que o primeiro grupo de símbolos da primeira repetição é transmitido na subportadora alocada no nível CE c .

O sucesso no acesso refere-se ao dispositivo que conclui o PAA dentro do número máximo de tentativas de transmissão do preâmbulo. Segundo [7], a probabilidade de sucesso no acesso do nível CE c , P_c , é definida como a razão entre o número

médio de UEs que iniciaram o PAA no nível CE c e obtiveram sucesso e o número total de UEs inicialmente no nível CE c :

$$P_c = \frac{\sum_{b=c}^2 \sum_{i=I_{min}(c,b)}^{I_{max}(c,b)} S_c^b[i]}{M_c}, \quad (2)$$

em que $I_{min}(c,b)$ e $I_{max}(c,b)$ são a primeira e a última oportunidade NPRACH no nível CE b ($c \leq b \leq 2$), respectivamente, para que um dispositivo inicialmente no nível CE c retransmita uma nova tentativa de PAA.

Considerando $M_c^b[i]$ o número médio de dispositivos inicialmente no nível CE c que começam a transmitir preâmbulos no início do i -ésimo NPRACH no nível CE b [7], temos que dentre os $M_c^b[i]$ dispositivos, o número médio de UEs que obtiveram êxito, $S_c^b[i]$, no final do NPRACH, é aproximado por um sistema *Slotted Aloha* multicanal, com uma taxa de Poisson de chegada de M dispositivos competindo por oportunidades de acesso aleatório em acesso único [7], [17]:

$$S_c^b[i] = M_c^b[i] e^{-\left(\frac{\sum_{c=0}^b M_c^b[i]}{R_b}\right)}, \quad (3)$$

e que o número médio de dispositivos colididos, $C_c^b[i]$, é dado pela diferença entre o número de dispositivos concorrentes no nível CE c e dispositivos que obtiveram sucesso no nível CE c :

$$C_c^b[i] = M_c^b[i] - S_c^b[i]. \quad (4)$$

Para obter o número de dispositivos concorrentes, analisa-se se o UE colidido retransmite o preâmbulo na próxima oportunidade NPRACH ($i+1$), no mesmo nível de cobertura ou retransmite no próximo nível de cobertura CE superior (nível CE $b+1$) no início da oportunidade NPRACH ($I_{min}(c,b)$). Assim, o primeiro caso é dado por [7]:

$$M_c^b[i+1] = C_c^b[i], \text{ para } 1 \leq I_{min}(c,b) \leq i \leq I_{max}(c,b)-1, \quad (5)$$

e o último caso é:

$$M_c^{b+1}[I_{min}(c,b+1)] = C_c^b[I_{max}(c,b)], \text{ para } 0 \leq c \leq b \leq 1. \quad (6)$$

O atraso médio do acesso refere-se ao tempo médio para que o UE, inicialmente no nível CE c , conclua o PAA e é obtido por meio da análise dos fatores que influenciam o atraso [6]. O primeiro parâmetro de atraso diz respeito à Msg. 1, que compreende o tempo necessário para o UE acessar a rede, isto é, o tempo de início da transmissão do preâmbulo descrito na Equação (1). Este atraso pode variar de θ ms a N_{period}^{NPRACH} e apresenta uma distribuição uniforme, tendo, portanto, seu valor médio dado por:

$$T_{início} = N_{period,c}^{NPRACH} / 2 \quad (7)$$

O atraso devido ao número de tentativas é dado por [6]:

$$T_i = i \times \left[\left(N_{rep,c}^{NPRACH} \times T_{PA} \right) + T_{esp} + \alpha \text{raResponseWindowSize} \right] + \left[(i-1) \times T_{int} \right], \quad (8)$$

onde i é o número da tentativa NPRACH ($1 \leq i \leq \text{MaxNumPreambleAttempt}$); $N_{rep,c}^{NPRACH}$ é o número de repetições por tentativa de um dispositivo no nível CE c ; T_{PA} compreende a duração total do preâmbulo (Formato $\theta=5,6$ ms e Formato $l=6,4$ ms); T_{esp} é o tempo entre o final da transmissão do preâmbulo (Msg. 1) e o início da janela de resposta (Msg. 2) e, conforme o parâmetro N_{rep}^{NPRACH} , pode

assumir o valor de δ ms ou $\delta 4$ ms; $ra_{ResponseWindowSize}$ é o comprimento da janela de resposta do preâmbulo; e T_{int} é o intervalo de tempo necessário para o dispositivo enviar uma nova tentativa de transmissão de preâmbulo. Para determinar o valor médio de T_i , assume-se que o dispositivo tenha êxito no PAA até o NPRACH I_{max} , pois se ele falhar até a I_{max} -ésima tentativa, todo o cálculo do atraso médio será inútil. Portanto, considerando a probabilidade condicional realizada em [6], a qual obtém a probabilidade de sucesso no NPRACH I_{max} , assumindo que houve sucesso até a I_{max} tentativa, temos que o valor médio de (8) é:

$$E(T_i) = \sum_{b=c}^2 \sum_{i=I_{min}(c,b)}^{I_{max}(c,b)} \{i \times [(N_{rep}^{NPRACH} \times T_{PA}) + T_{esp} + ra_{responseWindowSize}] + [(i-1) \times T_{int}]\} \times \left(\frac{\sum_{b=c}^2 S_c^b[i]}{\sum_{b=c}^2 \sum_{n=I_{min}(c,b)}^{I_{max}(c,b)} S_c^b[n]} \right). \quad (9)$$

Portanto, com todas as análises concluídas, o tempo médio para que um UE inicialmente no nível CE c conclua o PAA é:

$$E[T_{atraso}] = T_{inicio} + N_{start,c}^{NPRACH} + E(T_i). \quad (10)$$

A vazão normalizada para o nível CE c , V_c , é a razão entre o número médio de dispositivos inicialmente no nível CE c que obtiveram êxito no PAA e o número de subportadoras reservadas para o nível CE c . O número de subportadoras (R_c) alocadas durante o PAA aumenta a cada nova tentativa, uma vez que na última oportunidade NPRACH para o nível CE c haverá $N_{PTmax,c} \times R_c$ subportadoras disponíveis [6]. Portanto, na primeira tentativa, o número de subportadoras será R_c , na segunda tentativa, serão utilizadas $2 \times R_c$ subportadoras, e assim por diante, até a última tentativa ($N_{PTmax,c}$) para o nível CE c . Portanto, a vazão normalizada é:

$$V_c = \frac{1}{N_{PTmax,c} \times R_c} \sum_{b=c}^2 \sum_{i=I_{min}(c,b)}^{I_{max}(c,b)} S_c^b[i] \quad (11)$$

IV. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta seção são apresentados os resultados computacionais obtidos para o atraso médio do acesso e para a vazão normalizada da rede NB-IoT, assim como resultados comparativos com a análise de desempenho realizada em [6], a qual considera apenas um nível de cobertura. Os parâmetros NPRACH foram definidos de forma a representar o comportamento da rede no mundo real, portanto, os valores foram configurados com base na *Release 13* do 3GPP [16]. Para analisar o desempenho do atraso, dois cenários são definidos: Cenário 1 e Cenário 2, em que os valores mínimos e máximos dos parâmetros NPRACH são empregados, respectivamente, conforme mostra a Tabela III. Para o Cenário 1, o número máximo de retransmissões foi definido em 3, assim temos a seguinte configuração para cada nível de CE: $N_{PTmax,1} = N_{PTmax,2} = N_{PTmax,3} = 1$. Já para o Cenário 2, como $N_{PTmax,G}$ é igual a 10, o número máximo de retransmissões para cada nível de CE é definido como: $N_{PTmax,1} = N_{PTmax,2} = 3$, $N_{PTmax,3} = 4$. Além disso, para ambos os cenários, uma configuração comum é usada para todos os níveis de CE, isto é, $N_{period,c}^{NPRACH} = N_{period}^{NPRACH}$; $N_{start,c}^{NPRACH} = N_{start}^{NPRACH}$; $M_c = M$.

As figuras 2 e 3 apresentam as curvas do atraso médio do acesso em função do número de UEs por nível CE c para o

Cenário 1 e Cenário 2, respectivamente. Ademais, é apresentado o impacto do número de subportadoras em dois casos: 1) com $R_c = 36$, com uma configuração comum para os três níveis de CE: $R_0 = R_1 = R_2 = 12$; e 2) com $R_c = 48$, com a seguinte configuração para cada nível CE c : $R_0 = R_1 = 12$ e $R_2 = 24$.

TABELA III. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

Parâmetros	Cenário 1	Cenário 2
N_{period}^{NPRACH}	ms40	ms2560
N_{start}^{NPRACH}	ms8	ms1024
N_{rep}^{NPRACH}	n1	n128
$ra_{responseWindowSize}$	pp2	pp10
$maxNumPreambleAttempt (N_{PTmax,G})$	n3	n10

Dado que para o Cenário 1 os parâmetros do atraso são configurados em seus valores mínimos, temos que a Figura 2 retrata o menor atraso médio que uma rede NB-IoT pode apresentar. Na rede com três níveis de cobertura, para $R_c = 36$, o maior atraso ocorre nos níveis CE 1 e 2, uma vez que os preâmbulos colididos retransmitem no nível de cobertura subsequente, aumentando assim a concorrência pela oportunidade NPRACH; quando $R_c = 48$, o menor atraso ocorre no nível CE 2, pois o número de subportadoras para este nível é maior, aumentando assim o número de oportunidades para que o UE obtenha êxito no PAA. Já para o caso em que existe apenas um único nível de cobertura, em ambas as configurações de subportadoras ($R_c = 36$ e $R_c = 48$), o atraso é menor quando a quantidade de UE é pequena, sendo assim, à medida que a quantidade de dispositivos aumenta na rede, o atraso também aumenta, o que provoca um atraso maior quando comparado com uma rede com divisão de nível de cobertura.

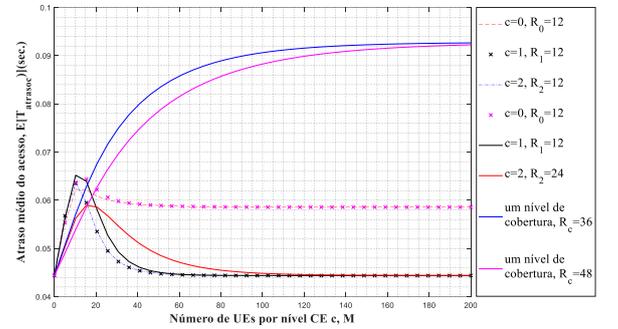


Fig. 2. Atraso médio para o Cenário 1.

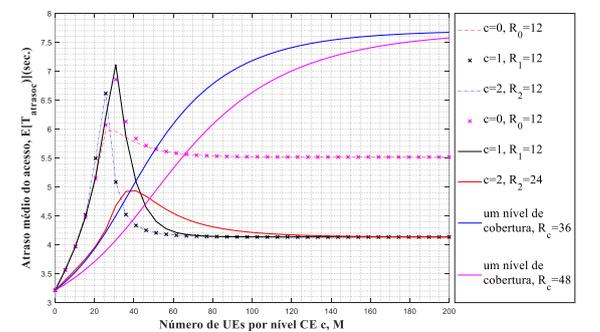


Fig. 3. Atraso médio para o Cenário 2.

Para o Cenário 2, mostrado na Figura 3, temos o maior atraso médio de uma rede NB-IoT, visto que os parâmetros NPRACH foram configurados com os seus valores máximos. A mesma análise realizada para o Cenário 1 pode ser feita para o

Cenário 2, averiguando que o número de subportadoras por nível de CE é um fator crucial para que o atraso seja menor, pois quando $R_2=24$, no caso em que $R_c=48$, a rede alcança o menor tempo para que o UE execute o PAA. Para as curvas em que há apenas um único nível de cobertura, o atraso maior acontece quando $R_c=36$, constatando assim que quanto menor o número de subportadoras alocadas no NPRACH, maior será o tempo para que o UE obtenha sucesso no procedimento de acesso aleatório. Ainda, é possível afirmar que a rede alcança um melhor desempenho quando esta possui divisão de níveis de cobertura, pois conforme o número de dispositivos concorrentes aumenta, o atraso tende a ficar constante e aproximadamente duas vezes menor que uma rede com apenas um nível de cobertura.

A Figura 4 exibe os resultados para a vazão normalizada para o Cenário 1. Para ambos os casos em que $R_c=36$ e $R_c=48$, temos que a maior taxa é alcançada no nível CE 0 e o menor desempenho é dado para a rede que possui apenas um único nível de cobertura. Observa-se que quanto menor o número de subportadoras, maior será a taxa da vazão normalizada, porém menor será a quantidade de UEs atendidos. Ainda, verifica-se que para a rede com um nível único de cobertura, embora a taxa seja aproximadamente duas vezes menor para aquela com três níveis de CE, o número de dispositivos atendidos consegue ser até três vezes maior, o que também é averiguado na Figura 5.

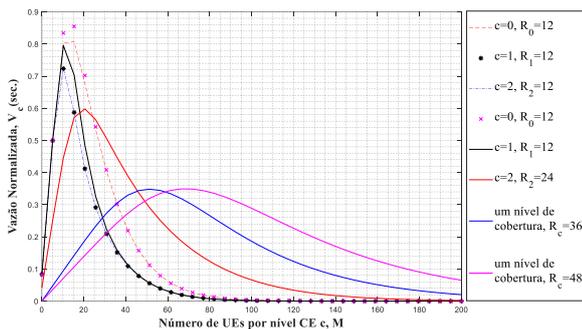


Fig. 4. Vazão normalizada para o Cenário 1.

Os resultados computacionais para o Cenário 2 estão representados na Figura 5. Para o caso em que $R_c=36$, a vazão máxima ocorre no nível CE 0, pois a quantidade de dispositivos concorrentes para os níveis superiores (CE 1 e CE 2) é maior, o que acarreta uma menor probabilidade de sucesso para realizar o PAA. Já para o caso em que $R_c=48$, a menor taxa da vazão normalizada acontece para o nível CE 2, o qual possui uma maior quantidade de subportadoras alocadas e atende à um maior número de UEs. Ainda, observa-se que quanto maior o número de retransmissões, menor o valor de V_c .

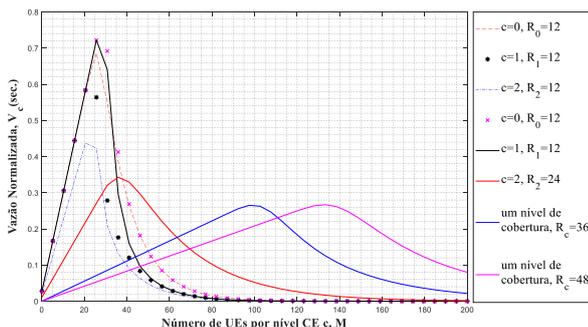


Fig. 5. Vazão normalizada para o Cenário 2.

V. CONCLUSÃO

Dado o exposto, constata-se que quando a quantidade de UEs concorrentes para realizar o PAA é pequena, uma rede com um nível único de cobertura consegue ter um desempenho melhor que uma rede que possui divisão de níveis. Porém, à medida que o número de UEs aumenta, a rede com níveis de CE apresenta melhores resultados, entregando um menor atraso e uma maior vazão normalizada. Além disso, a relação de compromisso entre o número de subportadoras e o número de retransmissões é um importante critério que pode comprometer significativamente o desempenho da rede, pois quanto maior a quantidade de subportadoras, menor atraso e menor a taxa da vazão normalizada; e quanto maior o número de retransmissões, maior o atraso e menor a taxa da vazão. Assim, cabe ao operador fazer as melhores configurações, e prover o que é mais viável: maior vazão na rede ou um maior número de UEs sendo atendidos.

REFERÊNCIAS

- [1] "Internet of Things - IERC (European Research Cluster on the Internet of Things)," 2014. http://www.internet-of-things-research.eu/about_iiot.htm.
- [2] P. Newman, "Internet of Things Report - Business Insider," 2020. <https://www.businessinsider.com/internet-of-things-report>.
- [3] "Ericsson Mobility Report," Oct. 2019. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/november-2019>.
- [4] M. Chen, Y. Miao, Y. Hao, and K. Hwang, "Narrow Band Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 5, no. Set. 2017, pp. 20557–20577, 2017.
- [5] Y. E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grövlén, and Y. Sui, "A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB - IoT)," pp. 1–8, 2017.
- [6] G. H. Baracat and J. M. C. Brito, "NB-IoT Random Access Procedure Analysis," *Proc. - 2018 10th IEEE Latin-American Conf. Commun. LATINCOM 2018*, pp. 1–6, 2019.
- [7] R. Harwahyu, R. Cheng, and C. Wei, "Investigating the Performance of the Random Access Channel in NB-IoT," *2017 IEEE 86th Veh. Technol. Conf.*, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/VTCFall.2017.8288195.
- [8] N. Jiang, Y. Deng, M. Condoluci, W. Guo, A. Nallanathan, and M. Dohler, "RACH Preamble Repetition in NB-IoT Network," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 1244–1247, 2018.
- [9] T. Kim, D. M. Kim, N. Pratas, P. Popovski, and D. K. Sung, "An Enhanced Access Reservation Protocol with a Partial Preamble Transmission Mechanism in NB-IoT Systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 10, pp. 2270–2273, 2017, doi: 10.1109/LCOMM.2017.2720585.
- [10] Y. Wu, H. Huang, C.-X. Wang, and Y. Pan, *5G-Enabled Internet of Things*. CRC Press, 2019.
- [11] "3GPP TS 36.211; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 13)," 2016.
- [12] R. Harwahyu, R. G. Cheng, W. J. Tsai, J. K. Hwang, and G. Bianchi, "Repetitions versus retransmissions: Tradeoff in configuring NB-IoT random access channels," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 3796–3805, 2019, doi: 10.1109/IIOT.2019.2891366.
- [13] R. Ratasuk, N. Mangalvedhe, Y. Zhang, M. Robert, and J. P. Koskinen, "Overview of narrowband IoT in LTE Rel-13," *2016 IEEE Conf. Stand. Commun. Networking, CSCN 2016*, 2016.
- [14] Y. Sun, F. Tong, Z. Zhang, and S. He, "Throughput Modeling and Analysis of Random Access in Narrow-band Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 3, p. 1, 2017.
- [15] "3GPP TS 36.331; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 13)," 2016.
- [16] "3GPP TS 36.321; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 13)," 2016.
- [17] C. H. Wei, R. G. Cheng, and S. L. Tsao, "Modeling and estimation of one-shot random access for finite-user multichannel slotted ALOHA systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 1196–1199, 2012.