

Mecanismos de Alocação Dinâmica de Recursos do RACH para Controle de Congestionamento em rede LTE-A Ocasionado por dispositivos M2M

David B. P. Aragão¹, Dario Vieira², Miguel F. de Castro¹

¹ Universidade Federal do Ceará (UFC)

²Ecole d'Ingénieur Généraliste en Informatique et Technologies du Numérique (EFREI)

{davidbpa,miguel}@great.ufc.br, dario.vieira@efrei.fr

Abstract. *Machine-to-machine (M2M) plays an important role in the paradigm of the Internet of Things. The Long-Term Evolution Advanced (LTE-A) network presents itself, among the wireless networks, as a potential access network for M2M. However, the LTE-A standard also inherits some features from its predecessors that a priori were thought to a Human-to-human (H2H) and human-to-machine (H2M) communication models. Thus, emerge from this integration of the M2M with LTE-A some challenges, with highlight to the overload and congestion problem in the Radio Access Network (RAN) during the Random Access Channel (RACH) procedure. In this article, we propose two mechanisms based on the RACH resource allocation schema for division of channel resources between classes of M2M and H2H devices. Thus, we model the lack of resources as a bankruptcy problem and present two solutions for this problem, one based on the proportional rule and a second one using a framework of cooperative games. The results obtained through extensive simulations in NS-3 simulator show that the mechanisms proposed in this paper present good results in terms of energy efficiency, control of the impact over the H2H devices, the access delay and prioritization between the different classes of devices analyzed.*

Resumo. *O modelo de comunicação Máquina-a-máquina (M2M) é considerado um dos pilares para o paradigma da Internet das Coisas. A rede Long-Term Evolution Advanced (LTE-A) apresenta-se, dentre as redes sem fio, como potencial rede de acesso para o M2M. Contudo, o padrão LTE-A ainda herda algumas características de seus antecessores, que a priori, foram pensados para os modelos de comunicação Humano-a-humano (H2H) e Humano-a-máquina (H2M). Assim, emergem dessa integração do M2M com o LTE-A alguns desafios, com destaque para o problema da sobrecarga e congestionamento na RAN (Radio Access Network) durante o procedimento de RACH (Random Access Channel). Neste artigo são propostos dois mecanismos baseados na estratégia de reserva de recursos do RACH para divisão dos recursos do canal entre as classes de dispositivos M2M e H2H. Para isso, o problema da escassez de recursos é modelado como um problema de falência e posteriormente aplicam-se duas soluções, sendo uma baseada na solução proporcional, e a segunda, utilizando um framework de jogos cooperativos com transferência de utilidade. Os resultados obtidos através de exaustivas simulações no simulador NS-3 mostram que os mecanismos propostos neste trabalho apresentam bons*

resultados em termos de eficiência energética, controle do impacto do sobre os dispositivos H2H, tempo de acesso e priorização entre as diferentes classes de dispositivos consideradas.

1. Introdução

A comunicação Máquina-a-máquina (M2M) viabiliza a troca de informações entre dispositivos sem quase ou nenhuma intervenção humana [Lo et al. 2011]. A comunicação M2M é considerada um dos pilares para viabilização da visão da Internet das Coisas (Internet of Things - IoT), desempenhando papel importante na alavancagem deste paradigma. O LTE é um padrão especificado pela 3GPP (*Third-Generation Partnership Project*), também popularmente conhecido como tecnologia 4G. Devido às características da rede LTE, tais como mobilidade, acessibilidade, vasta área de cobertura e segurança, a rede LTE é apontada como potencial rede de acesso para o desenvolvimento de aplicações e serviços para a Internet das Coisas. Contudo, o padrão LTE, como evolução das redes celulares, herda características de projeto dessas redes (e.g., adoção de um modelo de comunicação entre humanos (H2H) ou entre humanos e máquinas (H2M)). Aproximadamente, 20 bilhões de dispositivos empregando o modelo de comunicação M2M são esperados até 2020. Esses dispositivos serão empregados nas mais diversificadas áreas, tais como: sistemas de medição inteligentes, saúde, segurança e vigilância, dentre outras [Chen et al. 2012]. Devido ao número excessivo de dispositivos M2M esperados para os próximos anos, os problemas da sobrecarga e congestionamento na rede de acesso via rádio (RAN) e núcleo da rede (CN) poderão inviabilizar essa integração. A partir deste contexto, percebe-se a importância de soluções para neutralizar o impacto ocasionado pelo M2M sobre as redes LTE e, conseqüentemente, possibilitem a integração do M2M [3GPP 2014].

O problema do congestionamento na RAN ocorre essencialmente durante o procedimento de acesso aleatório ao canal (RACH), descrito com mais detalhes na Seção 2. Por comportar-se como o método de acesso ao meio *slotted-aloha*, o aumento do número de dispositivos solicitando acesso à rede, não acompanhado pelo aumento na quantidade de recursos, favorece a sobrecarga e congestionamento na RAN durante o procedimento de RACH. Ciente deste problema, a 3GPP tem apresentado relatórios (e.g., [3GPP 2014, 3GPP 2012, ZTE 2011, 3GPP 2013]) para ressaltar o problema da sobrecarga e propor possíveis estratégias para neutralizar este problema. Dentre algumas das estratégias apresentadas pela 3GPP, tem-se o ACB (*Access Class Barring*), backoff, separação dos recursos do RACH, alocação dinâmica de recursos do PRACH (*Physical Random Access Channel*), *slotted access* e o *pull access* [3GPP 2014]. Embora apresentem algumas desvantagens quando analisados separadamente, tais estratégias ainda são combinadas e aprimoradas por outras abordagens na literatura (e.g., [Lo et al. 2011, Lin et al. 2014, Lee et al. 2011, Aragao et al. 2015]).

Os mecanismos propostos neste trabalho, quando comparado com o trabalho [Aragao et al. 2015], têm em comum o objetivo de reduzir o congestionamento na RAN e suas conseqüências, mas diferem em relação as técnicas utilizadas para atingir tal objetivo. Em [Aragao et al. 2015], a estratégia de controle atua na camada de acesso ao meio dos dispositivos ao passo que as propostas apresentadas neste trabalho agem na estação base (eNodeB - *evolved NodeB*). Com isso, as propostas apresentadas neste trabalho têm um caráter mais incisivo na determinação de como os recursos devem ser utilizados. Vale

ressaltar que os mecanismos proposto neste trabalho não assumem um caráter excludente em relação ao trabalho [Aragao et al. 2015], mas de complementação. A Seção 3, apresenta os trabalhos relacionados.

O problema da sobrecarga e congestionamento motivou o desenvolvimento deste trabalho. Neste trabalho são propostos dois mecanismo para controlar o impacto gerado pelos dispositivos M2M sobre os dispositivos H2H durante o procedimento de RACH. Os mecanismos propostos neste trabalho se baseiam na estratégia de reserva de recursos do RACH da 3GPP para os dispositivos H2H e M2M [3GPP 2014]. Nessa estratégia, os recursos reservados para o procedimento de RACH são alocados para os diferentes tipos de dispositivos, restringindo as colisões aos dispositivos de uma mesma classe. Contudo, a estratégia apresentada pela 3GPP assume um comportamento estático, ou seja, desconsiderando o nível de congestionamento na RAN. Neste trabalho, os mecanismos propostos flexibilizam a estratégia apresentada pela 3GPP permitindo que a reserva dos recursos seja realizada dinamicamente. Além disso, os mecanismos propostos neste trabalho também consideram a priorização entre os dispositivos M2M com a criação de diferentes classes de prioridade. As propostas deste trabalho são detalhadas na Seção 4. A motivação pela criação das diferentes classes de dispositivos M2M está associada a possibilidades de estender a prioridade entre as aplicações e serviços alicerçados sobre as redes LTE durante o procedimento de RACH. Os resultados obtidos através de exaustivas simulações realizadas no NS-3, apresentados e discutidos na Seção 5, mostram que os mecanismos propostos neste trabalho alcançam os objetivos supracitados.

O restante deste trabalho está organizado na seguinte forma. A Seção 5 apresenta o cenário de simulação. Finalmente, a Seção 6 apresenta a conclusão e trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Procedimento de Acesso Aleatório ao Canal (RACH)

O procedimento de RACH do LTE é iniciado, dentre outras razões, para o estabelecimento de conexão entre o dispositivo e a rede e pode ser categorizado em livre de contenção ou baseado em contenção. No método livre de contenção a comunicação é iniciada pelos elementos do núcleo da rede e está associado às atividades que apresentam fortes restrições de tempo (e.g., *handover*). No método baseado em contenção a comunicação é iniciada pelos dispositivos e estes competem entre si pelos recursos do canal para enviarem suas solicitações. O procedimento de RACH baseado em contenção é composto por quatro mensagens (msg1, msg2, msg3, msg4) que são trocadas entre o dispositivo e a estação base, como ilustrado na Fig. 1. As seguintes atividades são realizadas durante cada etapa da troca de mensagem:

1. Envio do preâmbulo de PRACH - *PRACH Preamble* (msg1): O dispositivo escolhe aleatoriamente um código de preâmbulo e aguarda o próximo *slot* de acesso (*RA-slot*) para enviar sua solicitação de acesso.
2. Resposta da Solicitação de Acesso - *Random Access Response* (msg2): As seguintes atividades são realizadas neste estágio: (i) detecção de recebimento da mensagem pela eNodeB, (ii) assinalamento de um identificador temporário para o dispositivo e (iii) atribuição de recursos para o dispositivo no canal de *uplink*.
3. Solicitação de Contenção - *Contention Request* (msg3): O dispositivo envia o seu identificador para a estação base no canal compartilhado de *uplink* alocado no estágio anterior do procedimento de RACH.

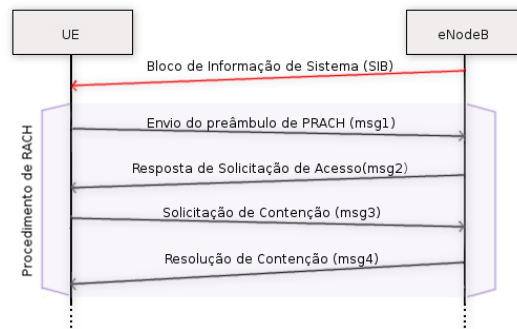


Figura 1. Etapas do Procedimento de RACH Baseado em Contenção

4. Resolução de Contenção - *Contention Resolution* (msg4): Após o recebimento da mensagem, o dispositivo verifica se nela consta o seu identificador. Se sim, o dispositivo envia uma mensagem de confirmação. Caso contrário, o dispositivo entra no estado de espera cujo tempo é definido pelo indicador de *backoff* (*Backoff Indicator* - (BI)) recebido da eNodeB. Durante o período de espera o dispositivo fica impossibilitado de enviar novas solicitações de acesso.

2.2. Teoria dos Jogos

A teoria dos jogos é um conjunto de ferramentas utilizadas para modelagem e compreensão da interação entre indivíduos, também chamados de jogadores, diante de cenários de tomada de decisão. São assertivas comuns à teoria dos jogos o comportamento racional dos participantes do jogo e a tomada de decisão realizada pelos seus jogadores a partir do conhecimento e comportamento esperado dos outros participantes [Osborne and Rubinstein 1994]. Os principais elementos presentes em um jogo são: jogadores/indivíduos, estratégias/ações e retorno/pagamento (*payoff*).

O jogador é a entidade básica comum a todos os modelos de jogos. Dependendo do tipo de jogo, a interação dos jogadores durante o jogo pode ser analisada a partir de duas perspectivas. Na primeira, a interação entre os jogadores pode ser analisada individualmente, ou seja, cada jogador age com o intuito de maximizar o seu retorno e tendem a não cooperar. Na segunda, comum aos jogos cooperativos, a análise da interação deixa de ser individualizada para ser sobre o grupo de jogadores, ou seja, os jogadores tendem a cooperar formando coalizão para maximizar o retorno/pagamento. Nos jogos cooperativos não existe a noção de conjunto de estratégias individuais. Os jogos cooperativos podem ser classificados em jogos com transferência de utilidade e jogos sem transferência de utilidade. Nos jogos com transferência de utilidade, as ações tomadas pelas coalizões determinam o *payoff* para cada coalizão. Nos jogos sem transferência de utilidade, as ações tomadas pela coalizão determinam o *payoff* de cada indivíduo.

2.3. Problema de Falência

O problema da falência é utilizado para descrever cenários de falência, ou seja, cenários onde a quantidade de recursos disponíveis para serem distribuídos entre os indivíduos é menor do que o somatório das reivindicações dos indivíduos [Herrero and Villar 2001]. Diante deste cenário, surge o problema de como esses recursos devem ser distribuídos entre os indivíduos de modo justo. Dentre as soluções amplamente conhecidas, tem-se a

regra proporcional e a estratégia utilizando jogos cooperativos com transferência de utilidade (TU) [Herrero and Villar 2001]. Na regra proporcional, o senso de justiça é definido a partir das diferentes características desejadas durante a divisão dos recursos e essas características são, por sua vez, descritas através de axiomas. O senso de justiça presente na solução utilizando jogos cooperativos é herdado do Valor de Shapley [Shapley 1952], explicado ainda nesta seção, e dos axiomas que embasam a sua definição de justiça.

O problema de falência podem ser modelados da seguinte forma: seja $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ um conjunto finito com todos os indivíduos, grupos/classes. Um problema de falência para N pode representado pela tupla (E, c) , onde $E \in \mathbb{R}_+$ identifica a quantidade de recursos disponíveis para serem distribuídos entre os N indivíduos e $c \in \mathbb{R}_+^n$ o vetor com as reivindicações dos indivíduos. Deste modo, c_i identifica a quantidade de recursos demandados pelo i -ésimo indivíduo.

Na regra proporcional, o problema de falência pode ser representado do seguinte modo: $P(E, c)$, onde E representa a quantidade de recursos disponíveis e c , como apresentado anteriormente, também representa o vetor de reivindicações dos indivíduos. Assim, para todo problema de falência representado por (E, c) , existe uma solução $P(E, c) = \lambda c$, $\lambda = \frac{E}{C}$, onde $C = \sum_{i \in N} c_i$, onde N representa os indivíduos.

São características sustentadas pela regra proporcional: (i) tratamento igual de iguais; (ii) invariância de escala ou homogenia de grau um; (iii) composição; (iv) aditividade; (v) monotonicidade.

Uma das soluções utilizando jogos para o problema de falência está apresentada em [O'Neill 1982], que modela o problema usando uma estratégia de jogos cooperativos com transferência de utilidade. Um jogo cooperativo com TU aplicado ao problema da falência pode ser representado a partir da tupla $G(N, v)$, onde N representa os indivíduos e v a função característica, $v : 2^N \rightarrow \mathbb{R}$ e $v(\emptyset) = 0$. A cooperação entre os indivíduos em um jogo cooperativo inexistente na etapa que precede a aquisição dos recursos pela coalizão. Um desafio comum aos jogos cooperativos é como os recursos alocados devem ser distribuídos entre os indivíduos que formam a coalizão. Uma coalizão formada por todos os indivíduos recebe o nome de grande coalizão. A fórmula para cálculo do valor de Shapley, apresentada em 1953 por Lloyd Shapley, é considerada uma abordagem justa para divisão desses recursos entre os indivíduos da coalizão. As propriedades que definem a justiça do valor de Shapley são: (i) eficiência; (ii) simetria; (iii) agregação; (iv) jogador nulo. Como apresentado em [Shapley 1952], o cálculo da contribuição de um dado jogador i a um jogo $G(N, v)$ é dado por: $\phi_i(v) = \sum_{S \subseteq N \setminus i} \frac{|S|!(n-|S|-1)!}{n!} (v(S \cup \{i\}) - v(S))$, onde $S \subseteq N$.

3. Trabalhos Relacionados

Em [Pang et al. 2014], os autores propõem uma estratégia para divisão dos códigos de preâmbulos do RACH em três grupos: H2H, M2M e um grupo híbrido. Os preâmbulos de cada grupo só podem ser utilizados pelos dispositivos que fazem parte do grupo. Contudo, os preâmbulos alocados para o grupo híbrido podem ser utilizados pelos dispositivos das classes H2H e M2M. O foco principal do trabalho é definir como os recursos do grupo híbrido devem ser compartilhados entre os dispositivos H2H e M2M. Para isso, os autores modelam este cenário de decisão como um jogo não cooperativo. Contudo, a alocação

fixa de recursos para os dispositivos H2H e M2M impossibilita que os recursos sejam realocados de acordo com a necessidade de cada grupo. O cenário de simulação não é suficientemente congestionado o que dificulta a análise do mecanismo diante de um cenário congestionado. Além disso, os autores não estabelecem priorização entre os dispositivos M2M.

Em [Lee et al. 2011], os autores apresentam dois métodos para divisão dos recursos entre os dispositivos das classes H2H e M2M. No primeiro, os preâmbulos são divididos em grupos disjuntos para os dispositivos H2H e M2M. O segundo método difere do primeiro em relação à utilização dos recursos alocados para o M2M, pois nesse método os preâmbulos, antes alocados somente para os dispositivos M2M, também podem ser utilizados pelos dispositivos H2H. Os dois métodos utilizados para dividir os recursos fixam a quantidade de recursos que devem ser alocados. Os autores não estabelecem nenhuma priorização entre os dispositivos M2M.

Em [Jian et al. 2013], os autores se baseiam em uma abordagem centrada na técnica de backoff, onde diferentes intervalos de espera são atribuídos aos diferentes tipos de dispositivos. Na ocorrência de colisões, cada dispositivo aguarda por um determinado intervalo de tempo, de acordo com a sua classe de backoff, antes de retransmitir uma nova solicitação. A principal desvantagem apresentada por este mecanismo está na estratégia utilizada para definir o intervalo das classes de backoff, pois não estabelecem nenhuma relação entre o tempo atribuído as classes de backoff e o número de dispositivos em cada classe. Ou seja, não importa quantos dispositivos há em cada classe, o intervalo atribuído às classes permanece inalterado.

Em [Choi et al. 2011], os autores propõem uma estratégia para alocação dinâmica de recursos do PRACH para reduzir a latência no acesso dos dispositivos. A técnica de alocação dinâmica de recursos do PRACH baseia-se na semialocação de recursos para o envio de códigos de preâmbulos no PRACH durante o procedimento de RACH. A relação entre os *slots* para envio dos preâmbulos de acesso (*RA-slots*) e a latência no acesso é apresentada como um problema de otimização. Para auxiliar na solução deste problema, os autores propõem um modelo para identificar a taxa de chegada das solicitações de acesso à rede. Contudo, a semialocação de códigos de preâmbulos para o PRACH acarreta redução nos recursos que antes estavam alocados para a transferência de dados. Os autores não analisam como a estratégia pode impactar na transferência de dados no canal de *uplink*. Além disso, os autores não estabelecem nenhuma priorização entre os dispositivos M2M.

Em [Lo et al. 2011], os autores propõem um mecanismo para controlar a sobrecarga durante o procedimento de RACH que utiliza a técnica de alocação dinâmica de recursos para o envio dos códigos de preâmbulos do PRACH. A quantidade de recursos disponibilizados varia de acordo com o nível de congestionamento na RAN. O nível de congestionamento na RAN é inferido a partir do número de tentativas de acesso já enviadas pelos dispositivos. O número de tentativas é informado para a estação base por cada dispositivo quando este se conecta a rede. Além da técnica de alocação dinâmica de recursos, os autores utilizam as técnicas *Slotted-Access* e *ACB* para mitigar o impacto sobre os dispositivos H2H gerado pelo excesso de dispositivos M2M e prover priorização entre os dispositivos M2M. Infelizmente o mecanismo proposto não é avaliado pelos autores, seja por simulação ou analiticamente.

Os mecanismos propostos neste trabalho utilizam a estratégia de divisão dos recursos do RACH entre dispositivos das classes: (i) H2H, (ii) M2M de alta e (iii) M2M de baixa prioridade. A diferenciação entre dispositivos M2M de baixa e alta prioridade é influenciada pela possível variação nos requisitos existentes entre as aplicações e serviços IoT. Além disso, este trabalho também analisa a eficiência energética dos mecanismos propostos. A modelagem do problema da escassez de recursos do RACH como um problema de falência e a estratégia utilizada para composição do vetor de reivindicações são alguns dos aspectos que diferenciam este trabalho das outras abordagens apresentadas.

4. Abordagens Propostas

Neste artigo, o problema da divisão dos recursos do RACH é modelado como um problema de falência. As diferentes classes de dispositivos são representadas por N , a quantidade de recursos disponíveis é dado por E . A reivindicação de cada classe de dispositivo é armazenada no vetor de reivindicações c_i , onde $i = \{1, 2, \dots, n\}$ e $n = |N|$. Os mecanismos propostos neste trabalho se baseiam nas soluções que abordam o problema a partir de uma estratégia de jogos cooperativos com transferência de utilidade e na regra proporcional.

Durante o procedimento de RACH cada dispositivo escolhe aleatoriamente um código de preâmbulo e aguarda o próximo *slot* de acesso (*RA-Slot*) disponível para enviar sua solicitação para a eNodeB. Contudo, com o aumento do número de solicitações mais colisões tendem a ocorrer, aumentando nível de congestionamento na RAN. Considerando que há M códigos de preâmbulos disponíveis para o procedimento de RACH baseado em contenção e K dispositivos competindo por esses recursos. O número esperado de códigos de preâmbulos recebidos com sucesso pela estação base (Y), ou seja, escolhidos por somente um dispositivo é dado:

$$E[Y] = K \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{K-1} \quad (1)$$

Assim, o número de preâmbulos necessários para suprir a demanda de K dispositivos que estão solicitando acesso à rede é dado por: $F(M) = K \times \frac{1}{\sigma}$, onde σ é o desempenho máximo esperado do canal (cf., Eq. 1).

4.1. Vetor de Reivindicações

Esta seção identifica como a eNodeB calcula o vetor de reivindicação. Seja N as diferentes classes de dispositivos. Cada classe solicita $M_i = Col_i + L_i$ códigos de preâmbulos, onde $i \in N$, Col_i identifica a quantidade de solicitações que colidiram e L_i os preâmbulos recebidos com sucesso. Baseado na Eq. 1, o número esperado de solicitações recebidas com sucesso pela eNodeB é dada por: $E[Y] = \sum_{i \in N} K_i \left(1 - \frac{1}{M_i}\right)^{K_i-1}$, onde K_i identifica a quantidade de dispositivos de uma dada classe i . O vetor que armazena as reivindicações das i classes de dispositivos é dado por: $c_i = \frac{1}{j} \sum_{l \in 0}^j F(L_{i,k-l} + Col_{i,k-l})$, onde k identifica o procedimento de RACH corrente. Essa equação calcula a média móvel simples (SMA) dos preâmbulos recebidos e as colisões que ocorreram durante as últimas j tentativas de acesso. Neste trabalho, a priorização entre as classes de dispositivos é realizada a partir da atribuição de pesos ao vetor de reivindicações das diferentes classes de dispositivos. Além disto, assume-se que a prioridade dos dispositivos da classe H2H é maior do

que a dos dispositivos da classe M2M. Os dispositivos M2M também são divididos em dispositivos de alta e baixa prioridade.

Os pesos (α , β e γ) atribuídos às diferentes classes de dispositivos foram definidos a partir de simulações. A priorização entre os dispositivos durante a simulação foi mensurada a partir do número total de acessos. Os pesos são atribuídos de forma a garantir que o total de acessos realizados pelos dispositivos M2M prioritários (alta prioridade) seja de aproximadamente 50% em relação ao H2H, e 100% em relação aos dispositivos M2M não prioritários (baixa prioridade). O cálculo da quantidade total de recursos demandado pelas n classes de dispositivos é dada por: $C = \alpha(\frac{1}{j} \sum_{l \in 0}^j F(M_{H2H,k-l})) + \beta(\frac{1}{j} \sum_{l \in 0}^j F(M_{M2M_p,k-l})) + \gamma(\frac{1}{j} \sum_{l \in 0}^j F(M_{M2M_{wp},k-l}))$. Os pesos utilizados para os mecanismos propostos neste trabalho são 3,2,1 e 3,2,0.265, sendo estes para a solução utilizando jogos cooperativos e aqueles para a solução baseada na regra proporcional. Além dos pesos que são atribuídos ao vetor de reivindicações, também há a priorização no atendimento das solicitações pela própria estação base. Nas propostas apresentadas neste trabalho, os códigos de preâmbulos são divididos dinamicamente entre as diferentes classes de dispositivos.

4.2. Alocação de Códigos de Preâmbulos

Neste trabalho, os dispositivos M2M foram divididos em classe de alta prioridade e classe de baixa prioridade. Assim, os indivíduos competindo pelos recursos pertencem as classes H2H, M2M de alta prioridade ($M2M_p$) e M2M de baixa prioridade ($M2M_{wp}$), tal que $N = \{H2H, M2M_p, M2M_{wp}\}$. Os recursos disponíveis para serem distribuídos entre as diferentes classes são os códigos de preâmbulos definidos para o procedimento de RACH. Neste trabalho, a coalizão é igual ao número de indivíduos, ou seja, tem-se uma grande coalizão formada pelas três classes de dispositivos. A partir deste cenário de falência, as seguintes abordagens são propostas:

- **Proporcional:** define a quantidade de códigos de preâmbulos que serão alocados para cada uma das classes de dispositivos usando a regra $P(E, c)$, onde $E = T$, sendo T a quantidade de códigos de preâmbulos disponíveis para o procedimento de RACH baseado em contenção e c o vetor com as reivindicações das classes, apresentado na Seção 4.1. Neste trabalho, este mecanismo será referenciado por 'Proporcional'.
- **Shapley:** define a quantidade de códigos de preâmbulos que serão alocados para cada uma das classes a partir do jogo $G(N, v)$, onde $v(S) = \max\{T - \sum_{i \in N \setminus S} c_i, 0\}$ e $S \subseteq N$ o conjunto das possíveis coalizões [O'Neill 1982]. A função característica ($v(S)$) valora a relevância de uma coalizão a partir do resultado da subtração dos recursos disponíveis menos os recursos solicitados pelas possíveis coalizões. O cálculo da quantidade de preâmbulos que serão alocados para cada uma das classes é realizado a partir do Valor de Shapley $\phi_i(v)$, apresentado na Seção 2.3. Neste trabalho, este mecanismo será referenciado por 'Shapley'.

As propostas apresentadas neste trabalho são comparadas com uma abordagem fixa, ou seja, onde os códigos de preâmbulos são fixados para cada classe de dispositivo.

5. Ambiente de Simulação e Resultados Numéricos

Os mecanismos propostos neste trabalho foram validados no simulador de rede NS-3 [NS-3 2014]. Os dispositivos são categorizados em H2H, M2M de alta prioridade

($M2M_p$) e M2M de baixa prioridade ($M2M_{wp}$), e estão solicitando acesso a uma única eNodeB. A eNodeB está configurada para operar na largura de banda de 5 MHz. O índice de configuração do PRACH define quantos *slots* de acesso (*RA-slots*) são disponibilizados para os dispositivos enviarem suas solicitações. A taxa de chegada dos dispositivos segue uma distribuição de Poisson ($\lambda_{H2H} = 1/300$, $\lambda_{M2M_p} = 1/200$ e $\lambda_{M2M_{wp}} = 1/500$). O número de dispositivos H2H está fixado em 200, enquanto o número de dispositivos $M2M_p$ e $M2M_{wp}$ variam entre $\{50, 200, 450, \dots, 950\}$ e $\{100, 400, 700, \dots, 1900\}$, respectivamente. Cada cenário de simulação foi executado 30 vezes, e o intervalo de confiança considerado foi de 95%. O cenário de simulação supracitado está sumarizado na Tabela 1 e foi baseado nas configurações apresentadas pela 3GPP em [3GPP 2014].

Parâmetros Gerais da Rede	
Largura de Banda	5 MHz (25 RBs)
Número de Estações Base (eNB)	1
Índice de Configuração do PRACH	6 ($n = 2$)
Número de Máximo de Retransmissões de Preâmbulo (L)	10
Tempo da Janela de Resposta (RAR)	5 ms
Códigos de Preâmbulo Disponíveis	54
Intervalo de Chegada dos Dispositivos	[0, ..., 1000] ms
Tempo de Simulação	1000 ms
Dispositivos H2H	200
Dispositivos M2M de alta prioridade ($M2M_p$)	{50, 200, 350, ..., 950}
Dispositivos M2M de baixa prioridade ($M2M_{wp}$)	{100, 400, 700, ..., 1900}
Taxa de Chegada (H2H) - Poisson	$\lambda_{H2H} = 1/300$
Taxa de Chegada ($M2M_p$) - Poisson	$\lambda_{M2M_p} = 1/200$
Taxa de Chegada ($M2M_{wp}$) - Poisson	$\lambda_{M2M_{wp}} = 1/500$
Parâmetros dos mecanismos Shapley (jogo cooperativo) e Proporcional (regra proporcional)	
Recursos Disponíveis: 54 códigos; $\sigma = 0.37$; $j = 4$; SIB2 = 10 ms (periodicidade), $\delta = 0.37$; Pesos $\alpha = 3$, $\beta = 2$, $\gamma = 1$ - Proporcional / $\alpha = 3$, $\beta = 2$, $\gamma = 0.265$ - Shapley	

Tabela 1. Parâmetros utilizados nas simulações

5.1. Indicadores Chave de Performance

Os indicadores utilizados para analisar as propostas foram: o tempo de acesso, a probabilidade de acesso, o número de acessos realizados com sucesso e número total de preâmbulos transmitidos. O tempo de acesso é o tempo transcorrido entre o envio da primeira solicitação de acesso até o instante em que o dispositivo consegue acessar a rede. O número de acessos é dado pela média de acessos realizados com sucesso dentro do intervalo de simulação considerado. Os três mecanismos simulados neste trabalho serão referenciados por: 'Fixo', 'Proporcional' e 'Shapley', onde 'Fixo' identifica a estratégia de alocação fixa, 'Proporcional' o mecanismo baseada na regra proporcional e 'Shapley' o mecanismo baseado no valor de Shapley.

5.2. Impacto Sobre os Dispositivos H2H

O impacto sobre o número total de dispositivos H2H que conseguem acessar a rede com sucesso é muito baixo. Independente do número de dispositivos M2M, quase todos os dispositivos H2H conseguem acessar a rede, como ilustrado na Fig. 2. Por apresentarem prioridade superior à dos demais dispositivos, os dispositivos da classe H2H têm suas reivindicações mais facilmente atendidas. Além disso, vale ressaltar a priorização que também é dada aos dispositivos desta classe pela eNodeB (cf., Seção 4.1). A alta prioridade definida para os dispositivos H2H também reflete na probabilidade de acesso, que se mantém dentro do intervalo de 1.0 a 0.995, como apresentado na Fig. 2. Em suma, as três abordagens controlam o impacto dos dispositivos M2M sobre os dispositivos H2H.

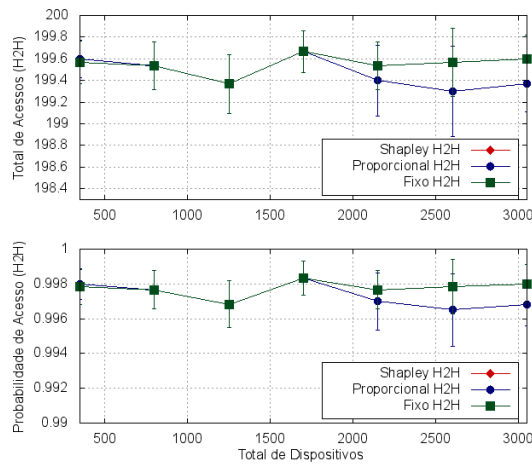
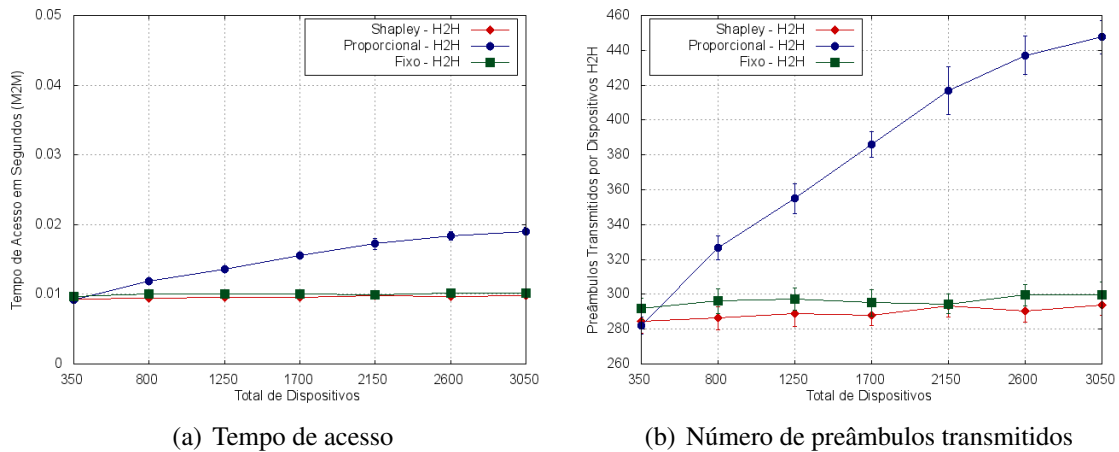


Figura 2. Total de acessos e probabilidade de acesso



(a) Tempo de acesso

(b) Número de preâmbulos transmitidos

Figura 3. Tempo de acesso e total de preâmbulos transmitidos

O tempo de acesso aumenta à medida que mais dispositivos solicitam acesso a rede, como ilustrado na Fig. 3(a). Entre as três estratégias simuladas, as abordagens Shapley e Fixo apresentam resultados melhores do que a abordagem Proporcional. Contudo, mesmo apresentando desempenho inferior aos mecanismos Shapley e Fixo, o mecanismo Proporcional ainda sustenta o tempo de acesso abaixo 0.02 s.

O número total de preâmbulos transmitidos por cada classe de dispositivo está ilustrado na Fig. 3(b). Para o cenário com 3050 dispositivos, o mecanismo proporcional apresenta o pior resultado, onde aproximadamente 450 preâmbulos são transmitidos. Resultados melhores são apresentados pelos mecanismos Fixo e Shapley, onde são transmitidos aproximadamente 290 e 300 preâmbulos, respectivamente. Com exceção dos cenários onde há menos de 500 dispositivos solicitando acesso, o desempenho apresentado pelos mecanismos Fixo e Shapley se mantém melhor do que o mecanismo proporcional.

5.3. Impacto Sobre os Dispositivos M2M

A Fig. 4 identifica como os mecanismos reagem ao aumento do número dos dispositivos M2M de alta e baixa prioridade. A partir dos resultados apresentados na Fig. 4 é possível verificar que o mecanismo Proporcional apresenta desempenho melhor do que os outros

mecanismos simulados. Além de possibilitar que mais dispositivos M2M acessem a rede, percebe-se que o mecanismo Proporcional reage mais rapidamente às solicitações dos dispositivos M2M de alta prioridade, como identificado pelo ponto 'A' na Fig. 4. A inversão que ocorre nos pontos 'A' e 'B' está associada à prioridade estabelecida para os dispositivos M2M prioritários em relação aos de baixa prioridade. Assim, quando mais dispositivos M2M prioritários estão solicitando acesso, a estação base passa a realocar os recursos do M2M de baixa prioridade para o M2M prioritário.

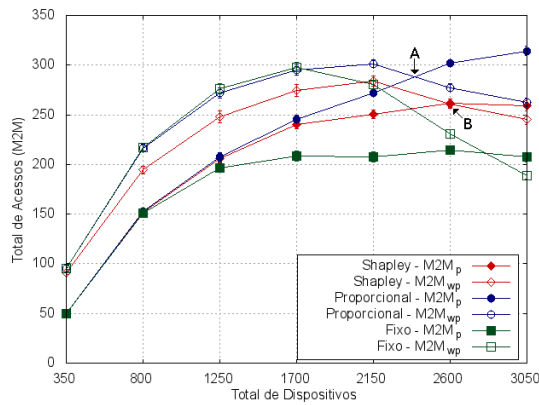
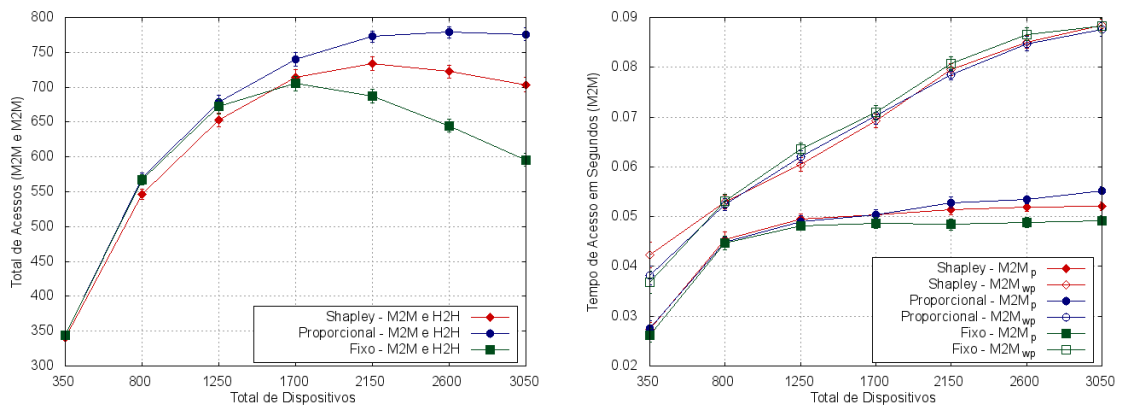


Figura 4. Acessos realizados com sucesso pelos dispositivos $M2M_p$ e $M2M_{wp}$

A Fig. 5(a) apresenta a soma dos acessos realizados pelas classes H2H, $M2M_p$ e $M2M_{wp}$ dos três mecanismos simulados neste trabalho. Como apresentado na Fig. 2, a quantidade de dispositivos H2H que conseguem efetuar acesso com sucesso permanece praticamente constante entre os três mecanismos. Assim, o desempenho dos mecanismos Proporcional e Shapley em relação a implementação fixa deve-se essencialmente aos dispositivos da classe M2M. Como apresentado na Fig. 5(a) os mecanismos Fixo, Shapley e Proporcional atingem performance máxima próxima de 700, 740 e 780 acessos, respectivamente. Depois de atingidos esses picos, o número de acessos realizados com sucesso começa a reduzir, com queda mais acentuada apresentada pelo mecanismo fixo.



(a) Total de acesso efetuados com sucesso pelos dispositivos H2H, $M2M_p$ e $M2M_{wp}$

(b) Tempo de acesso dos dispositivos $M2M_p$ e $M2M_{wp}$

Figura 5. Total de acessos e o tempo de acesso

O tempo médio de acesso apresentado pelos mecanismos para os dispositivos das

classes $M2M_{wp}$ e $M2M_p$ é de respectivamente 0.09 e 0.055, como ilustrado na Fig. 5(b). Esses resultados embasam as vantagens apresentadas pelos mecanismos propostos neste trabalho em relação ao mecanismo Fixo. Os mecanismos propostos neste trabalho possibilitam que mais dispositivos acessem a rede sem que, para isso, tenham que aumentar o tempo de acesso.

Os resultados ilustrados na Fig. 6(a) mostram como cada estratégia lida com a priorização entre os dispositivos M2M. Quando analisados separadamente, é possível verificar que os mecanismos simulados proveem priorização entre os dispositivos $M2M_p$ e $M2M_{wp}$. Quando comparados entre si, a priorização estabelecida pelos mecanismos Proporcional e Shapley para a classe de dispositivo M2M prioritário é mais evidente do que a provida pelo mecanismo Fixo. Em relação aos mecanismos propostos, o Proporcional apresenta desempenho melhor do que o Shapley em relação a priorização, como evidenciado na Fig. 6(a). Em relação os dispositivos da classe $M2M_{wp}$, percebe-se que a diferença entre os mecanismos é pouco significativa, como ilustrado na Fig. 6(a).

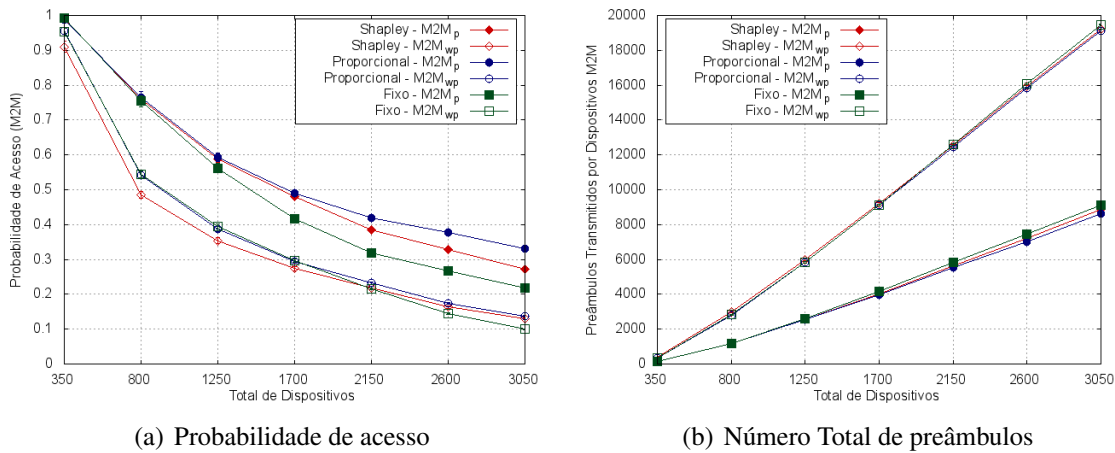


Figura 6. Probabilidade de acesso e total de preâmbulos transmitidos

A quantidade de preâmbulos transmitidos pelos três mecanismos é aproximadamente igual nas três abordagens simuladas, como apresentado pela Fig. 6(b). Contudo, o número de preâmbulos recebidos com sucesso, ou seja, sem colisão é maior nos mecanismos Proporcional e Shapley, como apresentado na Fig. 7(b). Por ser possível inferir causalidade entre número de preâmbulos e eficiência energética, os mecanismos Proporcional e Shapley podem ser considerados energeticamente mais eficientes.

A Fig. 7(b) complementa a informação apresentada na Fig. 7(a), mostrando como os códigos de preâmbulos estão distribuídos para o cenário de simulação com 3050 dispositivos. O mecanismo Fixo, como esperado, distribui os recursos igualmente entre as três classes de dispositivos, como ilustrado na Fig. 7(a). Assim, é possível observar que muitos dos recursos alocados para o H2H não estão sendo utilizados, como ilustrado na Fig. 7(b). Contudo, ao mesmo tempo em que há códigos sobrando para os dispositivos da classe H2H, tem-se os dispositivos $M2M_{wp}$ sofrendo as consequências da escassez de recursos, como pode ser evidenciado pelo número excessivo de colisões.

Comparado com a abordagem fixa, o Shapley distribui mais recursos para os dispositivos M2M de baixa prioridade. A Fig. 7(b) ilustra como os recursos estão sendo

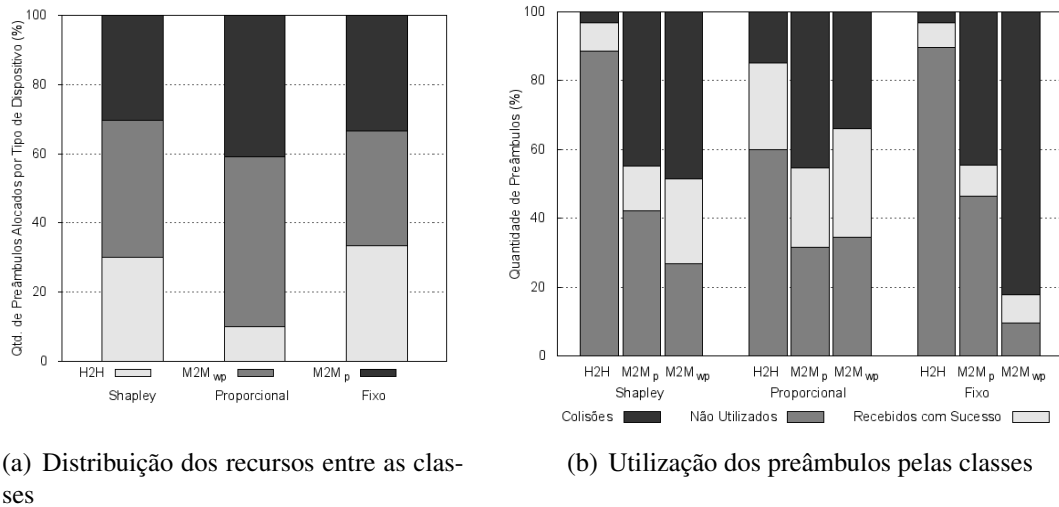


Figura 7. Utilização dos preâmbulos

distribuídos pelo Shapley. É possível observar que o Shapley apresenta um desempenho melhor do que o Fixo em relação aos dispositivos da classe M2M. Além disso, percebe-se controle sobre as colisões para os dispositivos H2H. Contudo, o número de preâmbulos não utilizados pelos dispositivos H2H permanece elevado no mecanismo Shapley.

Na abordagem Proporcional mais recursos são alocados para os dispositivos da classe M2M. Os resultados, como ilustrado na Fig. 7(b), mostram um gráfico mais balanceado, mas que apresenta muitas colisões. As consequências em reduzir o número total de preâmbulos alocados para os dispositivos H2H refletem no resultado previamente mencionado, ou seja, aumento no tempo de acesso e número de preâmbulos transmitidos pelos dispositivos da classe H2H.

6. Conclusões

Neste artigo são apresentados dois mecanismos para controlar o congestionamento ocasionado na RAN da rede LTE devido ao excesso de dispositivos M2M solicitando acesso à rede. Os mecanismos propostos baseiam-se no esquema apresentado pela 3GPP para separação dos códigos de preâmbulos entre as três classes de dispositivos, sendo elas: H2H, M2M de alta prioridade e M2M de baixa prioridade. Neste trabalho, o problema da alocação de códigos de preâmbulos é modelado como um problema de falência, onde os códigos de preâmbulos disponíveis não são suficientes para satisfazer a quantidade de códigos demandado por cada classe. Os resultados obtidos através de exaustivas simulações mostram que todos os mecanismos simulados controlam o impacto dos dispositivos M2M sobre os dispositivos H2H e a priorização entre os dispositivos M2M. Contudo, os mecanismos propostos apresentam desempenho melhor do que o mecanismo Fixo em termos de eficiência energética, número total de acessos e tempo de acesso. Figuram dentre as atividades a serem realizadas em trabalhos futuros: (i) aprimoramento da estratégia utilizada para definir o vetor de reivindicações; (ii) emprego da técnica de alocação de códigos de preâmbulos com outras estratégias (i.e., [Aragao et al. 2015]).

Referências

- 3GPP (2012). System improvements for machine-type communications. Technical report, 3GPP.
- 3GPP (2013). Service requirements for machine-type communications (mtc). Technical report, 3GPP.
- 3GPP (2014). Study on ran improvements for machine-type communication. Technical report, 3GPP.
- Aragao, D. B., Vieira, D., and de Castro, M. F. (2015). Uma proposta de controle de congestionamento ocasionado pela comunicação máquina-a-máquina em lte. In *Proceedings of the 32th Brazilian Symposium on Computer Networks (SBRC 2015)*.
- Chen, M., Wan, J., and Li, F. (2012). Machine-to-machine communications. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, 6(2):480–497.
- Choi, S., Lee, W., Kim, D., Park, K.-J., Choi, S., and Han, K.-Y. (2011). Automatic configuration of random access channel parameters in lte systems. In *Wireless Days (WD), 2011 IFIP*, pages 1–6.
- Herrero, C. and Villar, A. (2001). The three musketeers: four classical solutions to bankruptcy problems. *Mathematical Social Sciences*, 42(3):307–328.
- Jian, X., Jia, Y., Zeng, X., and Yang, J. (2013). A novel class-dependent back-off scheme for machine type communication in lte systems. In *Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2013 22nd*, pages 135–140. IEEE.
- Lee, K.-D., Kim, S., and Yi, B. (2011). Throughput comparison of random access methods for m2m service over lte networks. In *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011 IEEE*, pages 373–377. IEEE.
- Lin, T.-M., Lee, C.-H., Cheng, J.-P., and Chen, W.-T. (2014). Prada: Prioritized random access with dynamic access barring for mtc in 3gpp lte-a networks. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 63(5):2467–2472.
- Lo, A., Law, Y. W., Jacobsson, M., and Kucharzak, M. (2011). Enhanced lte-advanced random-access mechanism for massive machine-to-machine (m2m) communications. In *27th World Wireless Research Forum (WWRF) Meeting*, pages 1–5.
- NS-3 (2014). *The network simulator ns-3*.
- O’Neill, B. (1982). A problem of rights arbitration from the talmud. *Mathematical Social Sciences*, 2(4):345–371.
- Osborne, M. J. and Rubinstein, A. (1994). *A course in game theory*. MIT press.
- Pang, Y.-C., Chao, S.-L., Lin, G.-Y., and Wei, H.-Y. (2014). Network access for m2m/h2h hybrid systems: a game theoretic approach. *Communications Letters, IEEE*, 18(5):845–848.
- Shapley, L. S. (1952). A value for n-person games. Technical report, DTIC Document.
- ZTE (2011). Backoff enhancements for ran overload control. Technical report, 3GPP.