

Uso de Redes LTE para Comunicação de PMUs em Sistemas Smart Grid

Cibele C. S. Castro e Carlos Marcelo Pedroso

Resumo—A implantação de sistemas *Smart Grid* trará mudanças significativas na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Uma das principais aplicações do *Smart Grid* é a rede de monitoramento e controle, que avalia continuamente o desempenho do sistema usando unidades de medição fasorial (PMU, *phasor measurement unit*). Estes equipamentos enviam dados de tensão, corrente, frequência e fase do sinal elétrico, em tempo real. O padrão LTE (*Long Term Evolution*) é um forte candidato para a implantação da rede de comunicação de PMUs, em função do baixo atraso, baixo custo pelo ganho em escala, e grande alcance. Este artigo apresenta uma avaliação de desempenho da rede LTE aplicada na comunicação de PMUs. Foram avaliados os efeitos do aumento na quantidade de usuários de tráfego de fundo e o aumento no número de PMUs.

Palavras-Chave—LTE, Smart Grid, PMU.

Abstract—Deployment of Smart Grid systems will bring about major changes concerning generation, transmission and distribution of electricity. One of the main applications of Smart Grid is a monitoring and control network, which continuously evaluates system performance by using phasor measurement units (PMUs). These devices send data in real time, such as voltage, current, frequency and electric signal phase. The LTE standard is one of the leading candidates for PMUs communication network, due to the low delay, low cost by economies of scale and broad range. This paper presents an evaluation of LTE network performance applied to the communication of PMUs. The effects of increasing number of users and PMUs in radio network were evaluated.

Keywords—LTE, Smart Grid, PMU.

I. INTRODUÇÃO

Enquanto a demanda por energia elétrica cresce a cada ano, a infraestrutura da rede de distribuição se mantém nos mesmos moldes há décadas. A arquitetura da rede permanece radial, ou seja, a energia flui de maneira unidirecional, iniciando pelas usinas de geração, passando pelas redes de transmissão e distribuição, até chegar ao consumidor final. Enquanto nas áreas de geração e transmissão foram feitos investimentos em sistemas de automação e monitoramento, na distribuição há pouca visibilidade sobre a situação da rede. É ainda um sistema de controle passivo [1]. Este fato, aliado ao constante aumento na demanda, faz com que o diagnóstico de problemas na rede de distribuição seja mais difícil, levando a uma piora nos índices de disponibilidade e qualidade do sistema. Além disso, a preocupação com o meio ambiente, principalmente com a redução da emissão de gases e utilização de combustíveis fósseis, gera a necessidade de maior uso de sistemas de geração distribuída. Porém, a característica intermitente das fontes alternativas traz instabilidade à rede

elétrica [2]. Para integrá-las, deve-se alterar a topologia da rede, permitindo que a energia flua de maneira bidirecional. Para que isso ocorra, é necessária a modernização das redes de transmissão e distribuição, através da implantação de sistemas de comunicação bidirecional entre os diversos componentes de medição e atuação, trazendo maior automação, controle e monitoramento remoto. Este novo conceito é conhecido como *Smart Grid*.

As unidades de medição fasorial (PMU, *phasor measurement units*) são dispositivos de monitoramento do sistema elétrico que possibilitam medidas precisas de fasores de tensão e corrente, utilizando uma referência de tempo obtida do sistema de posicionamento global (GPS, *global positioning system*). Devido à sincronização precisa das medidas, o sistema de controle pode suportar operações em tempo real [3]. A tendência de aumento do número de fontes de energia distribuídas requer o uso de mais PMUs, para garantir a estabilidade da rede.

Para que os requisitos de comunicação sejam atendidos, é necessária a utilização de uma tecnologia que assegure baixa latência, grande alcance e baixa perda de dados. Dentre as várias opções, uma das possibilidades mais promissoras é a utilização do *Long Term Evolution* (LTE). Devido à sua arquitetura baseada em comutação por pacotes IP e a utilização de OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) como técnica de acesso, o LTE apresenta menor latência e maior taxa de transmissão de dados se comparado às redes 3G. Porém, o LTE foi desenvolvido para aplicações de rede móvel celular convencionais, como transmissão de voz e dados. A comunicação de PMUs possui características de comunicação M2M (*Machine to Machine*) [4], em que há maior tráfego de *uplink*, grande quantidade de terminais, sessões de comunicação iniciadas frequentemente, mas com poucos e pequenos pacotes. Dado este cenário, é necessário analisar se a comunicação via LTE garante os requisitos mínimos de qualidade de serviço (QoS, *quality of service*) requeridos pela comunicação de PMUs.

Alternativas para a comunicação de PMUs já foram exploradas na literatura. Em [3] é realizada uma análise da performance da comunicação de PMUs utilizando o padrão WiMAX, utilizando o OPNET como ferramenta de simulação. Os requisitos de comunicação para as principais aplicações do sistema Smart Grid e as principais tecnologias disponíveis são descritos em [2] e [6]. Em [7] é apresentado um sumário com os principais resultados de pesquisa que tratam da limitação imposta pelo canal de acesso randômico do LTE à comunicação M2M.

Este artigo apresenta uma análise do atraso na comunicação de PMUs utilizando uma rede LTE comercial, com o ob-

jetivo de verificar se este padrão atende os requisitos desta aplicação. Para isso é apresentada uma avaliação analítica de desempenho, além de resultados obtidos com simulações computacionais utilizando o software *Network Simulator 3* (NS3) [8]. Os resultados de simulação permitem avaliar o desempenho do sistema com um número crescente de PMUs e dispositivos geradores de tráfego de fundo, simulando a presença de *smartphones* na rede, com o objetivo de investigar a influência da disputa por recursos de rede no desempenho da comunicação dos PMUs.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II descreve a arquitetura e os requisitos para a comunicação de PMUs. A Seção III aborda as principais características da tecnologia LTE. Na Seção IV é apresentada uma análise sobre o uso do LTE para comunicações de PMUs. Os principais resultados obtidos nas simulações são analisados na Seção V. Por fim, a Seção VI apresenta as conclusões.

II. WIDE AREA MEASUREMENT SYSTEM (WAMS)

A aplicação *Wide Area Measurement System* (WAMS) tem por objetivo monitorar a qualidade da energia transmitida e proporcionar uma visão geral do funcionamento da rede, através da medição realizada pelos PMUs instalados nas redes de transmissão e distribuição de energia. As medições geradas pelos PMUs são enviadas através de uma rede de comunicação local para o Concentrador de Dados Fasoriais (ou *Phasor Data Concentrator* - PDC), que por sua vez agrupa as medições e as repassa para o centro de controle (CC) da concessionária de energia elétrica, como mostrado na Fig. 1. A comunicação de dados dos PMUs é especificada pelo padrão IEEE C37.118.2-2011 [9], que define que cada pacote de dados do PMU tem um cabeçalho fixo de 16 bytes e um *payload* de tamanho variável, dependendo da quantidade de fasores medidos. O padrão também especifica a frequência de envio de mensagens ao PDC. Para sistemas de transmissão de energia com frequência de 50 Hz, as taxas de envio de mensagens podem ser de 10, 25 ou 50 amostras/s, enquanto que para um sistema de 60 Hz, as taxas podem ser de 10, 12, 15, 20, 30 ou 60 amostras/s. O envio de uma medição não pode demorar mais que o início do envio da próxima, pois perderia seu significado. Portanto, o atraso máximo permitido é o inverso da quantidade de amostras enviadas por segundo. [3].

Considerando a mensagem de 52 bytes mostrada como exemplo no padrão IEEE C37.118.2-2011, em que são enviados 4 fasores, sendo 3 para tensão e 1 para corrente, e adicionando os 28 bytes de cabeçalhos dos protocolos IP e UDP, resulta em um pacote com 80 bytes para cada amostra. Se fosse utilizada a taxa de envio de 30 amostras/s, cada PMU geraria 19,2 kbps, e o atraso na transmissão não poderia passar de $1/30 = 33,33$ ms. Portanto, é necessária a utilização de uma tecnologia de comunicação que proporcione baixa latência, grande largura de banda e escalabilidade, devido à grande quantidade de PMUs enviando dados no *uplink*.

III. A REDE LTE

O LTE é um padrão desenvolvido pelo grupo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) para a quarta geração (4G) de

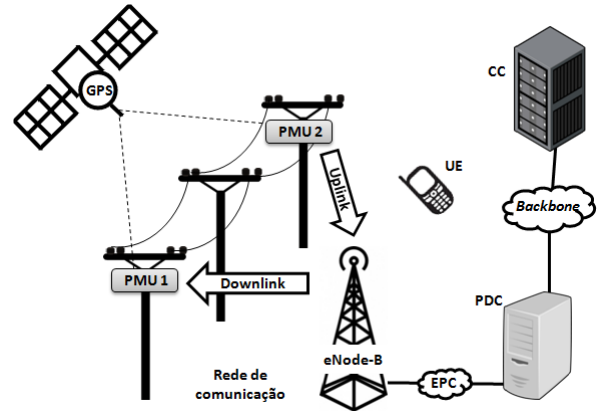


Fig. 1. Arquitetura de um sistema de comunicação de PMUs

redes móveis sem fio. Suas principais vantagens em relação às tecnologias 3G são o aumento na taxa de dados, menor latência, uso mais flexível do espectro e maior eficiência espectral, devido à utilização de multiportadoras OFDM. As taxas de pico chegam a 150 Mbps no *downlink* e 50 Mbps no *uplink*, e o sistema pode ser configurado para trabalhar com larguras de banda de 1,4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz. Por apresentar tais características, o LTE está sendo analisado para comunicação em Sistemas *Smart Grid* por diversos autores, como apresentado em [4], [11] e [12].

O LTE utiliza diferentes níveis de modulação, podendo ser QPSK, 16-QAM ou 64-QAM, de acordo com as condições do canal [13]. O elemento central da interface de rádio é a estação radio base, chamada de eNodeB, que provê conectividade para os terminais móveis, chamados de *User Equipments* (UE).

A taxa de transmissão oferecida pelo LTE no *uplink* pode ser calculada de acordo com o tamanho do bloco de transporte, que é o pacote enviado pela camada de controle de acesso ao meio (MAC, *Medium Access Control*) à camada física, e transmitido a cada 1 ms. O seu tamanho depende da modulação e codificação escolhidas, e da quantidade de recursos atribuídos para a transmissão do pacote. A especificação do LTE [14] indica que para um sistema de 10 MHz de largura de banda, a taxa de *uplink* pode variar entre 1,384 Mbps e 36,696 Mbps.

A. Alocação de recursos no LTE

A alocação de recursos no LTE é feita com base em uma grade tempo-frequência, mostrada na Fig. 2. No domínio do tempo, o sinal é dividido em quadros de 10 ms, que por sua vez são divididos em 10 subquadros de 1 ms. Cada subquadro é dividido em 2 *slots* de 0,5 ms. Estes *slots* são divididos no domínio da frequência em N partes de 180 kHz, chamadas de *resource blocks* (RB), e são o elemento básico de alocação de recurso de rádio no LTE. Quanto maior a largura de banda de transmissão, maior a quantidade de RBs por *slot* de tempo.

O RB corresponde a um slot no domínio do tempo (0,5 ms) e 180 kHz no domínio da frequência. Cada RB tem 12 subportadoras de 15 kHz, e 6 ou 7 símbolos OFDM no domínio do tempo, dependendo da extensão do prefixo cíclico, que se encontra entre os intervalos de guarda dos símbolos OFDM, e serve para evitar a interferência intersimbólica

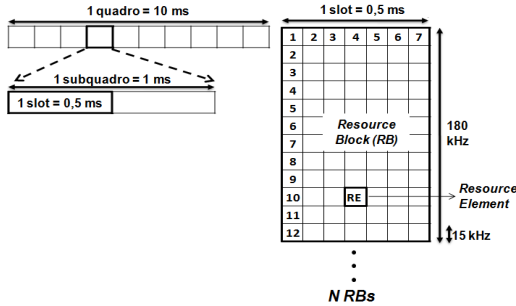


Fig. 2. Estrutura da grade de recursos do LTE

causada pelo efeito de multipercurso do sinal de rádio. Dentro da grade de recursos, a menor unidade tempo-frequência é chamada de *resource element* (RE), e corresponde a 1 linha por 1 coluna da grade, representando um símbolo OFDM em uma subportadora. Cada um destes REs representa um símbolo da constelação QAM utilizada na modulação. Como o mínimo intervalo de tempo de transmissão (TTI) é de 1 ms, ou seja, 1 subquadro, o mínimo recurso a ser alocado ao usuário são dois RBs. Desta forma, cada usuário receberá no mínimo 12 subportadoras em 14 símbolos OFDM, que equivalem a 168 REs. Porém, nem todos os 168 REs estão disponíveis para transmissão de dados, pois alguns deles são utilizados para sinalização.

A alocação de recursos é realizada dinamicamente, a cada TTI, na camada MAC implementada no eNodeB. A divisão de recursos entre os UEs é realizada por algoritmos de escalonamento, cuja especificação não faz parte do padrão LTE. Os algoritmos podem considerar variáveis como justiça entre usuários, taxa de dados do sistema, requisitos de QoS e status da fila no buffer de *uplink* do UE [10]. Na simulação realizada, foi utilizado para o tráfego de *uplink* o algoritmo *Round Robin* (RR), um dos mais conhecidos algoritmos de escalonamento independentes do canal. O RR é um algoritmo de baixa complexidade, que preza pela justiça entre os usuários, alocando recursos de acordo com a ordem de chegada das solicitações, em quantidades de tempo iguais para cada usuário.

IV. USO DO LTE PARA COMUNICAÇÃO DE PMUS

Como a aplicação envolvendo PMUs requer baixa latência, é importante analisar qual o atraso mínimo oferecido pelo LTE, e quais são os fatores que mais o afetam. De acordo com [4], as principais fontes de atraso no *uplink* são o tempo gasto no processo de solicitação de alocação de recursos pelo UE, o atraso gerado pelas retransmissões H-ARQ, e o tamanho do pacote a ser enviado. O processo de solicitação de alocação de recursos se inicia com o envio do *Scheduling Request* (SR) pelo UE. Porém, existem intervalos periódicos pré-definidos para o envio de SRs. O atraso gerado neste processo pode ser modelado por uma distribuição uniforme discreta $U_1 \sim Un(1, SR_I)$, em que U_1 representa a quantidade de subquadros de 1 ms até a próxima oportunidade de envio de SR pelo UE, e SR_I representa o intervalo periódico de subquadros configurado para o envio de SRs. SR_I pode assumir os valores 5, 10, 20, 40 ou 80 subquadros. Outra fonte de atraso neste mesmo processo é o tempo que o eNodeB

demorará para responder o SR com uma permissão ao UE, que será aqui definido por U_2 , e depende principalmente do algoritmo de alocação de recursos utilizado, e da capacidade de processamento da eNodeB. Deve ser somado a esses dois fatores o atraso fixo de 4 subquadros, do momento que o UE recebe a permissão de envio de dados até o momento que ele propriamente envia os primeiros pacotes. Se a comunicação ocorrer sem problemas, somente estas 3 fontes de atraso são consideradas. Porém, se for necessária a retransmissão de algum pacote, o processo *Hybrid Adaptive Repeat Request* (H-ARQ) adiciona um atraso fixo de 8 subquadros para cada retransmissão no *uplink*. Então, de acordo com esta análise, a latência entre as camadas MAC é dada por

$$T_{uplink} = U_1 + U_2 + 4 + 8R, \quad (1)$$

sendo R a quantidade de retransmissões realizada pelo processo H-ARQ, que por padrão tem valor máximo 4. Sendo assim, no melhor dos casos, a latência mínima entre as camadas MAC é de 6 ms. Caso ocorra 1 retransmissão, a latência mínima já sobe para 14 ms, e caso ocorram 2 retransmissões, o valor fica em 22 ms. Portanto, a quantidade de retransmissões se torna um fator crítico para o sistema de comunicação da aplicação WAMS. É importante frisar que esta análise considera que o UE não tinha permissão prévia de envio de dados, e que está enviando um pacote pequeno de dados. Caso seja enviado um pacote maior que o espaço alocado inicialmente para o UE, a latência aumenta devido à necessidade de um novo pedido de permissão de envio de dados, pois o pacote deverá ser fragmentado.

Outro fator que afeta a latência na comunicação M2M é o processo de admissão de usuários na rede LTE. A alocação pode ser semi-estática, ou seja, a alocação de RBs é válida durante um tempo determinado, ou dinâmica, em que o UE faz a solicitação todas as vezes que quiser realizar uma transmissão. Neste artigo é tratado apenas o caso da alocação dinâmica. Há um canal físico no *uplink* específico para este procedimento, chamado *Physical Random Access Channel* (PRACH). São reservados para este canal 6 RBs no domínio da frequência, chamado *RA slot*, com diversas configurações disponíveis no domínio do tempo. No domínio do tempo, a periodicidade do *RA slot* pode ser de 1 a cada 1 milissegundo (mínimo) até 1 a cada 20 milissegundos (máximo). O pré-âmbulo é escolhido aleatoriamente pelos UEs para solicitar à eNodeB o acesso à rede. Caso dois UEs enviem o mesmo pré-âmbulo no mesmo subquadro, ocorre uma colisão, e nenhum deles recebe acesso à rede. Neste caso, o UE poderá reenviar um pré-âmbulo somente após 3 ms, além da janela de tempo da resposta do eNodeB, que pode variar de 2 ms a 10 ms [7]. Na simulação realizada, esta janela está configurada em 3 ms. Portanto, haveria um atraso de 6 ms para uma nova solicitação de acesso à rede. O UE possui um contador que é incrementado a cada tentativa de acesso à rede, pois existe um número máximo de tentativas definido pelo eNodeB. Com base nestas informações, pode-se concluir que quanto mais usuários a célula tiver, menor a chance de receber acesso à rede na primeira tentativa, e maior a probabilidade de colisões de pré-âmbulos, acarretando em um maior atraso na comunicação.

Segundo [15], a probabilidade de colisão verificada em uma simulação no NS3 com 200 UEs é de 75%. Considerando um sistema com PRACH disponível em cada subquadro, a probabilidade de bloqueio no acesso à rede pode ser calculado da seguinte forma:

$$p = \left(1 - \frac{P_{\text{PRACH}}}{U}\right)^n, \quad (2)$$

onde P_{PRACH} é o número de preâmbulos disponíveis, U é a quantidade de UEs solicitando simultaneamente acesso à rede, e n é a quantidade máxima de tentativas possíveis de comunicação com a eNodeB. Note que o valor de P_{PRACH} reduz conforme o número de UEs aumenta. O valor de n pode ser configurado entre 3 e 50.

Por exemplo, considerando um sistema com 64 preâmbulos e 200 solicitações simultâneas, o número de preâmbulos úteis após considerar as colisões seria de 16. Considerando um sistema com $n = 50$, a probabilidade de bloqueio será de 1,55%.

A quantidade máxima de tentativas que um PMU pode utilizar para acessar a rede antes que o prazo da sua mensagem expire depende da sua taxa de envio de mensagens f , e da janela de tempo de resposta do eNodeB j , em milissegundos:

$$n = \left\lfloor \frac{1000/f}{3 + j} \right\rfloor \quad (3)$$

Por exemplo, em um sistema com 200 UEs simultaneamente solicitando acesso à rede e PMUs enviando 30 mensagens por segundo, a probabilidade de um deles não conseguir acesso à rede em tempo hábil será de 14,53%.

Considerando o uso do algoritmo de escalonamento RR no *uplink*, é possível estabelecer expressões para determinar o número máximo de PMUs admitidos no sistema, de forma a atender os requisitos de atraso máximo e *throughput*. Para atender o *throughput* mínimo exigido, o número de usuários U_t admitidos no eNodeB deve ser de

$$U_t < \frac{R_a \cdot N}{R_p} \quad (4)$$

onde R_a é taxa de transmissão de um par de RBs, N é o número de RBs disponíveis no domínio da frequência, e R_p é a taxa de dados exigida pelo PMU.

Para atender o requisito de atraso, o número de UEs admitidos pelo eNodeB deve ser de

$$U_d < \frac{(1000/f) \cdot N}{N_{rbg}} \quad (5)$$

onde N_{rbg} representa o número mínimo de RBs alocados pelo escalonador em um *slot* para cada UE.

Desta forma, com o uso do escalonador RR no *uplink*, o número máximo de usuários admitidos pela eNodeB pode ser calculado através de $\min(U_t, U_d)$. Por exemplo, um sistema operando em 10 MHz possui $N = 50$. Se os PMUs medirem 4 fasores com frequência de 30 amostras por segundo, a taxa necessária seria de $R_p = 19,2$ kbps. Considerado o uso do QPSK e um *overhead* de sinalização de 25%, a taxa de transmissão de dois RBs será dada por $R_a = 0,75 \cdot (12 \cdot$

$14 \cdot 2 \cdot 1000) = 252$ kbps. Se $N_{rbg} = 3$, o número máximo de usuários admitidos pela eNodeB seria dado por $\min(656, 555)$. No entanto, as Equações (2) e (3) indicam que o número efetivo de usuários deve ser bem menor em função do acesso aleatório do LTE.

V. SIMULAÇÃO

Para analisar o desempenho da rede LTE aplicada à comunicação de PMUs, foram realizadas simulações computacionais utilizando o software NS3. Os parâmetros da simulação estão listados na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
Frequência	<i>Uplink</i> : 1920 MHz; <i>Downlink</i> : 2110 MHz
Largura de banda e duplexação	10 MHz FDD
Posicionamento dos PMUs e UEs	Distribuídos uniformemente em um círculo de raio 1000 m; Sem mobilidade
Posicionamento do eNodeB	Posicionamento fixo; Altura 45 m
Tráfego dos PMUs (<i>uplink</i>)	UDP/IP; Pacotes de 80 bytes com tráfego constante de 30 pacotes/s
Tráfego de fundo UEs (<i>uplink</i>)	UDP/IP; Pacotes de 1028 bytes com intervalo entre pacotes exponencial; Taxa de 36 Mbps
Algoritmo de escalonamento	<i>Round Robin</i>

A topologia da rede simulada é muito semelhante à apresentada na fig. 1. Além da eNodeB conectando os PMUs e UEs via LTE, há um servidor remoto conectado ao *Evolved Packet Core* (EPC) do sistema LTE através de um link ponto a ponto de 10 Gbps, simulando a comunicação entre a rede LTE e o PDC. Foram realizadas simulações em 15 cenários diferentes. A quantidade de PMUs variou entre 30, 60 e 90, e a de UEs gerando tráfego de fundo variou entre 10, 20, 50, 100, 150, 200 e 250. A taxa de dados gerada pelo tráfego de fundo foi fixada em 36 Mbps para todos os cenários, a fim de estressar o sistema. A simulação foi repetida 10 vezes em cada cenário para se estabelecer o erro máximo no intervalo de confiança de 97,5%. Como foram realizadas 10 amostras para cada ponto do gráfico, na maior parte das situações simuladas o intervalo de confiança ficou bem pequeno. Por isso, aparece somente em alguns pontos do gráfico.

Os resultados obtidos para a média do atraso na comunicação dos PMUs são apresentados na Fig. 3. Este atraso considera o tempo entre o envio do pacote pelo PMU e seu recebimento no servidor remoto. Portanto, trata-se do atraso entre os PMUs e o PDC. Apesar do aumento considerável de UEs no tráfego de fundo, a variação deste atraso foi baixa para um número menor de 230 dispositivos ativos (somados os UEs e as PMUs) na rede de rádio. Nas simulações que envolvem mais dispositivos, a perda de pacotes foi muito alta, como pode ser visto na Fig. 4. Portanto o atraso médio decresceu nestas condições. Este crescimento na taxa de perda de pacotes ocorre devido ao aumento da probabilidade de colisões de preâmbulos durante a solicitação de acesso à rede, fazendo com que muitos dispositivos não consigam enviar nenhum dado ou tenham um atraso além do aceitável para a comunicação de PMUs. O *jitter*

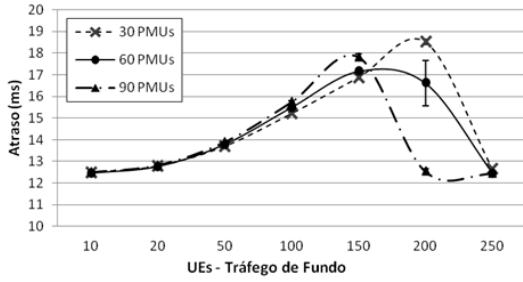


Fig. 3. Média do atraso fim-a-fim na comunicação dos PMUs

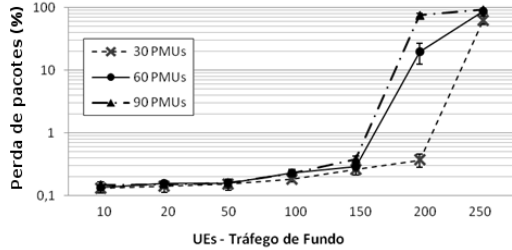


Fig. 4. Percentual de perda de pacotes dos PMUs

apresentou valores aceitáveis para a comunicação de PMUs, apresentado na Fig. 5. O *throughput* se manteve estável em todas as simulações até 230 UEs, conforme apresentado na Fig. 6.

O escalonador utilizado alocou no mínimo $N_{rbg} = 3$ para cada usuário. Sendo assim, no máximo 16 usuários obtiveram permissão para envio de dados a cada subquadro no *uplink*. Se divididas por 16 as taxas mínima e máxima de transmissão no *uplink* comentadas anteriormente, obtém-se para o pior caso 84,25 kbps, e para o melhor caso 2,2 Mbps. Isto significa que em qualquer situação, os PMUs não necessitam solicitar mais recursos que os já escalonados a eles inicialmente, o que

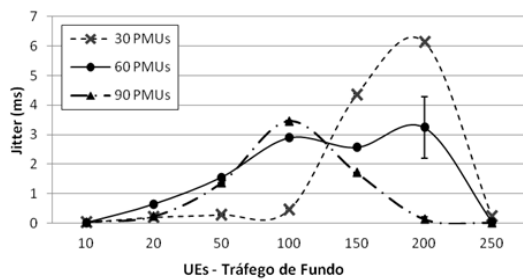


Fig. 5. Média do jitter na comunicação dos PMUs

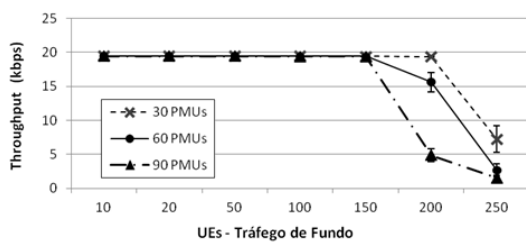


Fig. 6. Throughput na comunicação dos PMUs

levaria a um aumento no atraso da comunicação. Desta forma, pode-se dizer os PMUs levam vantagem em relação aos UEs de tráfego de fundo no escalonamento de recursos feito pelo RR, pois com um único subquadro eles já são atendidos.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo foi mostrado que uma rede LTE pode oferecer a performance necessária para a comunicação de PMUs em um sistema *Smart Grid*. A avaliação teórica do escalonador RR indica que os requisitos de qualidade podem ser atingidos limitando-se o número de UEs admitidos pela eNodeB. Com os resultados da simulação pode-se perceber que, apesar do RR não oferecer priorização de pacotes por categorias de QoS, os PMUs conseguem obter acesso à rede no tempo adequado, desde que tenham sido admitidos no acesso inicial. Além disso, a simulação mostra que restrições à quantidade de dispositivos M2M conectados à rede se devem ao procedimento de acesso aleatório do LTE, que impede o sistema de atingir sua capacidade máxima. O estudo deste problema é um interessante tópico de pesquisa futura.

REFERÊNCIAS

- [1] R. H. Khan and J. Y. Khan, "A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network," *Computer Networks*, vol. 57, no. 3, pp. 825–845, 2013.
- [2] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G. P. Hancke, "A survey on smart grid potential applications and communication requirements," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 1, pp. 28–42, 2013.
- [3] R. H. Khan and J. Y. Khan, "Wide area PMU communication over a WiMAX network in the smart grid," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 187–192.
- [4] J. Brown and J. Y. Khan, "Key performance aspects of an LTE FDD based Smart Grid communications network," *Computer Communications*, vol. 36, no. 5, pp. 551–561, 2013.
- [5] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif, and D. Tipper, "A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 1, pp. 5–20, First 2013.
- [6] A. Laya, L. Alonso, and J. Alonso-Zarate, "Is the random access channel of LTE and LTE-A suitable for M2M communications? a survey of alternatives," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 16, no. 1, pp. 4–16, First 2014.
- [7] NS-3 Network Simulator – <http://www.nsnam.org/>. [Online]. Available: <http://www.nsnam.org/>
- [8] IEEE, "IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems," *IEEE Std C37.118.2™-2011 (Revision of IEEE Std C37.118™-2005)*, pp. 1–53, Dec 2011.
- [9] Y. Xu and C. Fischione, "Real-time scheduling in LTE for smart grids," in *Communications Control and Signal Processing (ISCCSP), 2012 5th International Symposium on*. IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [10] B. Akyol, H. Kirkham, S. Clements, and M. Hadley, "A survey of wireless communications for the electric power system," *Prepared for the US Department of Energy*, 2010.
- [11] A. Ghosh, J. Zhang, J. G. Andrews, and R. Muhamed, *Fundamentals of LTE*, 1st ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press, 2010.
- [12] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 36.213, Sep. 2008.
- [13] F. Capozzi, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, "Down-link packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 2, pp. 678–700, 2013.
- [14] R. Subramanian and K. Sandrasegaran, "RACH Congestion in Vehicular Networking," *International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN)*, vol. 6, no. 5, pp. 153–164, Oct 2014.