

MODELAGEM DE COMANDOS DE SINCRONIZAÇÃO DNP3 EM REDE P2P POR INTERFACE IEEE 802.15.4

LUCAS A. RAMALHO¹, AÍLTON A. SHINODA¹, VALTEMIER E. NASCIMENTO², RUY DE OLIVEIRA², ED'WILSON T. FERREIRA²

1. *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho" – Campus Ilha Solteira
Avenida Brasil, 56, Bairro: Centro, 15385-000 - Ilha Solteira, SP
E-mails: lucasarrudaramalho@gmail.com; shinoda@dee.feis.unesp.br.*
2. *Grupo de Pesquisa em Redes e Segurança, Departamento de Área de Informática, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – Campus Cuiabá
Rua Professora Zulmira Canavarros, 93, Bairro: Centro, 78005-200 - Cuiabá, MT
E-mails: valtemir.nascimento, edwilson.ferreira, ruy@cba.ifmt.edu.br*

Abstract— The Smart Grid concept establishes that, in addition to power flow, the utility has a two-way data flow in all sectors of the grid including the consumers facilities. By the system data monitoring, the failure control can be accomplished with greater speed and efficiency. To achieve such a speed, rendering Smart Grid applications viable, the requirements of safety, reliability and low latency of data flow are essential. Considering a high latency communication between the control center to the last mile applications, the control and synchronization of the Smart Meter devices should not be reliable only for administrator hands, allowing be realized automatically. So, palliative actions, taken in an independent way by the network, may reduce the need for human intervention in the management. This article presents the Distributed Network Protocol version 3 commands modeling for synchronization management between Smart Meters, with aim to help the link latency monitoring. The modeling was performed in VHDL language and considered a point-to-point wireless IEEE 802.15.4 network.

Keywords— Smart Grid, DNP3, Modeling, VHDL, Synchronization.

Resumo— O conceito *Smart Grid* estabelece que, em adição ao fluxo de energia, a concessionária tenha um fluxo de dados de duas vias em todos os setores da rede até os consumidores. Através do monitoramento do sistema de dados, o controle a falhas pode ser realizado com maior agilidade e eficiência. Para garantir essa velocidade e tornar as aplicações *Smart Grid* viáveis, requisitos como segurança, confiabilidade e baixa latência são essenciais. Considerando uma comunicação de alta latência entre a central de controle até as aplicações de última milha, o controle e sincronização dos dispositivos de medição inteligente não devem depender apenas dos administradores da rede, podendo ser realizados automaticamente. Sendo assim, as ações paliativas tomadas de forma independente na rede, poderão diminuir a necessidade de intervenção humana na gestão. Este artigo apresenta a modelagem de comandos do *Distributed Network Protocol version 3* de gerenciamento de sincronização entre *Smart Meters*, como forma de auxílio autônomo no monitoramento e gestão de latência dos enlaces. A modelagem foi realizada pela linguagem VHDL e considerou um enlace sem fio ponto-a-ponto IEEE 802.15.4.

Palavras-chave— *Smart Grid*, DNP3, Modelagem Computacional, VHDL, Sincronização.

1 Introdução

O sistema convencional de energia efetua a interligação elétrica das plantas de geração até os consumidores passando por setores de geração, transmissão e distribuição (HASSAM e HADMAN, 2010). Nesse escopo o controle às falhas do sistema, realizado pelas concessionárias de energia, tem seu alcance limitado (FANG et al., 2012).

A fim de alcançar melhorias aos sistemas elétricos e ao consumo de energia, vários países têm investido bilhões de dólares na implantação de projetos piloto ou cidades inteligentes aplicando o conceito de *Smart Grid* (SG) (NEICHIN e CHENG, 2010).

O conceito SG estabelece que, além do fluxo de energia, a concessionária possua um fluxo de dados de duas vias em todos os setores da grade e consumidores em geral (FANG et al., 2012). Através do monitoramento amplo de dados do sistema, o controle de falhas pode ser realizado com maior rapidez e eficiência.

Para que tal rapidez seja alcançada, os requisitos de segurança, confiabilidade e baixa latência do

fluxo de dados são essenciais para a viabilidade das aplicações SG (IEEE Std. 2030, 2011; LU et al., 2013; SADEGHI et al., 2012).

Entretanto, a gestão do fluxo de dados é uma questão vital para manutenção da agilidade e qualidade do serviço. Se considerado um enlace de última milha que precise de reparos, ações por intervenção humana podem conter atrasos indesejados ao sistema.

Sendo assim, ações autônomas, tomadas pelo próprio sistema, podem ser uma alternativa para solução de problemas conhecidos, como a falta de sincronização de medidores inteligentes ou *Smart Meter*.

Existem diversas interfaces, cabeadas ou não, que podem ser utilizadas na interconexão entre *Smart Meter*. O ambiente sem fio oferece uma solução que pode ajudar a reduzir os custos de implementação da infraestrutura SG. Entretanto, as tecnologias de comunicação *wireless* tem sua latência de enlace elevada quando comparadas com comunicação por fibra ótica ou *ethernet* (IEEE Std. 802.3, 2003).

Neste trabalho foi utilizado como estudo de caso para a simulação de cenários onde a sincronização

entre os *Smart Meters* DNP3 deve considerar o atraso de cada enlace sem fio para ser realizada com sucesso.

Este artigo tem o objetivo de apresentar uma modelagem de comandos do *Distributed Network Protocol version 3* (DNP3), como forma de auxílio autônomo no monitoramento e gestão de latência dos enlaces. A modelagem foi realizada através da linguagem *Very High Speed Hardware Description Language* (VHDL) e considerou uma interface de comunicação sem fio IEEE 802.15.4 em rede ponto-a-ponto.

Este trabalho está organizado em seções. A seção 2 apresenta os conceitos *Smart Grid* necessários ao entendimento do trabalho. A modelagem do protocolo e comandos DNP3 utilizados é descrita na seção 3. As principais características da modelagem da interface sem fio IEEE 802.15.4 são apresentadas na seção 4. A seção 5 analisa os resultados das simulações do cenário proposto. Por fim, a seção 6 realiza as conclusões e trabalhos futuros.

2 Smart Grid

A rede de energia convencional consiste em dois sistemas primários: Primeiro, um sistema de transmissão da energia das fontes geradoras até as subestações; Segundo, um sistema de distribuição de energia entre as subestações e os consumidores (Zhou et al., 2012). Nesse tipo de rede, o controle às falhas do sistema fica limitado a ações paliativas até os sistemas de distribuição. Assim, a assistência aos usuários domésticos depende de ações executadas por equipes de campo, o que gera um maior atraso para as soluções do problema.

A fim de modernizar e atualizar o sistema de energia elétrica, vários países têm investido bilhões de dólares na implantação de projetos piloto ou cidades inteligentes aplicando o conceito de *Smart Grid* (SG) (NEICHIN e CHENG, 2010).

O conceito SG estabelece que a energia elétrica entregue ao usuário final seja monitorada utilizando tecnologia digital com o objetivo de economizar energia, reduzir custos e aumentar a confiabilidade. Além disso, as redes inteligentes possibilitam a melhor interação, controle e administração das concessionárias e dos consumidores sobre o sistema de energia.

Segundo (ZHOU et al., 2012), a arquitetura clássica de redes SG, além de possuir um fluxo de energia entre as fontes de energia, as subestações e os consumidores, adiciona um fluxo de dados entre a HAN e seus dispositivos inteligentes, a BAN, a NAN, até a Central de Controle *Wide Area Network* (WAN). Os dados domésticos são armazenados em um medidor *Smart Meter* (gateway doméstico) e enviados para um concentrador de maior capacidade (gateway de vizinhança), que responde as requisições da Central de Controle, conforme ilustra a Figura 1. Os autores definem elementos importantes desta arquitetura:

- *Smart Meter*: Responsável pela coleta de dados requisitados (sorvedouro de dados) pelas aplicações *Smart Meter*;
- *Gateway*: Responsável pela transmissão entre HAN, passando por NAN, até a chegada dos dados até a Estação Base WAN ou Central de Controle, utilizando meio de transmissão cabeado ou não;
- Central de Controle: Promove o processamento dos dados e otimiza o fornecimento e/ou distribuição de energia.

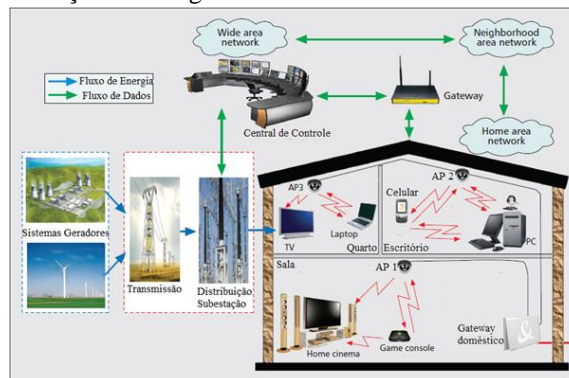


Figura 1 - Arquitetura Clássica de uma rede SmartGrid. Fonte: Adaptado de (ZHOU et al., 2012).

Analisando a arquitetura clássica através da Figura 1, pode-se notar que a HAN interconecta dispositivos inteligentes, eletrodomésticos e barramento de energia ao medidor *Smart Grid*. Essa interconexão pode ter interface de Rádio Frequência (RF) para permitir a mobilidade dos objetos, e ainda diminuir os custos de implementação.

Entretanto, o meio compartilhado sem fio, está exposto ao vazamento de dados sigilosos e íntimos do ambiente doméstico. Além disso, devido à possibilidade de instabilidade de sinal, provocado, por exemplo, por interferências, obstáculos ou simples falhas de equipamentos, esses dados podem ser perdidos ou sofrer alterações que podem influenciar, de forma equivocada, a tomada de decisão da Central de Controle.

Por esses desafios, segurança, confiabilidade e disponibilidade de informação são atributos importantes para uma aplicação de Rede Inteligente de Energia. Sendo assim, as implementações do sistema de comunicação devem satisfazer a requisitos que possibilitem uma tomada de decisão sem atrasos e confiável. Considerando que existem várias aplicações SG, como *Phasor Measurement Unit* (PMU), *Wide Area Control/ Measurement/ Protection Schemes* (WACS/ WAPS/ WAMS), *Teleprotection*, *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) *Reading*, *Demand Response*, entre outros, adequar um sistema de comunicação que permita uma gestão eficaz de latência torna-se difícil.

A fim de validar a modelagem e simulação realizada neste trabalho, foram utilizados os requisitos da norma IEEE 2030 (IEEE Std. 2030, 2011), que define as requisições mínimas de atraso de acordo com a área de atuação da rede de comunicação.

Network). A proposta realizada, considera que os enlaces de comunicação tenham latência em nível baixo o suficiente, cerca de 1 ms, para não influenciar na sincronização dos *clocks*. A técnica utilizada neste trabalho deverá ser adaptada da especificação, para que possa ser utilizada em ambientes *wireless* de latência mais elevada. Esta será descrita detalhadamente na seção 5.

Assim que os comandos API são formatados em fragmentos, estes são repassados para a função de transporte (TF) que, através da segmentação dos fragmentos, efetua a transmissão em porções de dados menores chamadas segmentos. Os segmentos possuem tamanho fixo de 250 octetos. Além disso, essa função também remonta os segmentos em fragmentos durante a recepção de dados.

A camada de enlace de dados (DLL) monta os segmentos em datagramas seguido pela transmissão dos mesmos pelo meio físico. Cada datagrama pode possuir 17 blocos de *bits* com sistema de verificação de erro *Cyclic Redundancy Check* (CRC) 16 *bits* por bloco, ou seja, até 34 octetos de um datagrama são destinados à verificação de erro. Além da verificação de erros a camada de enlace retorna confirmações de entrega de datagramas ou ACK (*Acknowledgement*), garantindo assim a confiabilidade de dados.

4 Modelagem IEEE 802.15.4

Entre os protocolos sem fio, foi escolhido o IEEE 802.15.4 que possui latência mais elevada que o protocolo IEEE 802.11 (IEEE Std. 802.11, 2011). Apesar dessa desvantagem, a tecnologia pode reduzir ainda mais os custos de implementação e consumo energético.

A pilha do protocolo IEEE 802.15.4 (IEEE Std. 802.15.4, 2012), define as camadas de acesso ao meio (MAC) e física (PHY).

A camada de MAC (*Media Access Control*) faz uso de uma série de mecanismos para evitar que ocorram colisões nas transmissões realizadas através do meio compartilhado de Rádio Frequência. O protocolo define dois modos de operação para controle de acesso, sendo o primeiro de forma centralizada através de *beacons* enviados pelo coordenador da rede, e o segundo de forma distribuída através do mecanismo *unslotted CSMA/CA* (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), cujo algoritmo é ilustrado na Figura 4. Este trabalho efetuou a modelagem da camada MAC com modo de controle de acesso distribuído.

Nesse modo quando um nó da rede deseja efetuar uma transmissão, este faz uma verificação de atividade RF no canal utilizado durante 128 *us* através da ferramenta CCA (*Clear Channel Assignment*). Se o canal de frequência está ocioso, então o nó pode efetuar a transmissão dos dados sem ativar o algoritmo CSMA/CA. Caso o canal esteja sendo utilizado, o nó que deseja enviar dados deverá ativar o algoritmo para esperar um período aleatório de *timeslots*

(320 *us*) chamados *backoff* para escanear o canal novamente.

Com o término do período *backoff*, a função CCA é ativada novamente verifica a assinatura do canal. Se o canal estiver ocioso, então a transmissão ocorre. Caso o canal esteja ocupado, há um incremento nos parâmetros *nb* e *be* para que seja executado novamente o *backoff*. Quando o parâmetro *nb* for maior que 5, a transmissão é abortada.

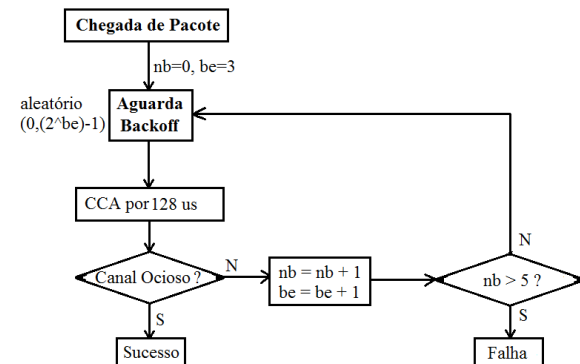


Figura 4 - Algoritmo *unslotted CSMA/CA*.

Fonte: Adaptado de (BURATTI e VERDONE, 2009).

Além do mecanismo CSMA/CA e CCA, camada MAC estabelece períodos de disputa pelo acesso ao meio. A Figura 5 mostra o funcionamento das transmissões no protocolo IEEE 802.15.4.

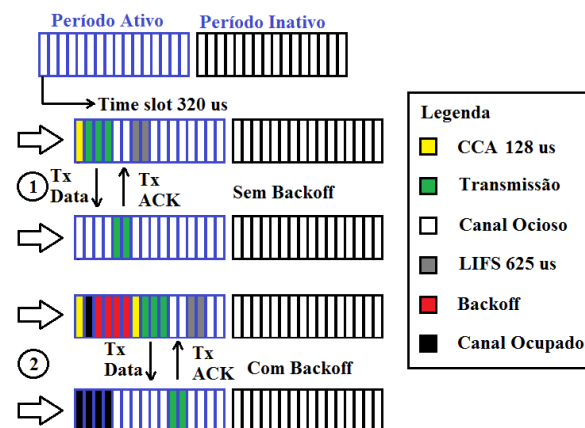


Figura 5 - Comunicação protocolo IEEE 802.15.4 com disputa de acesso ao meio. Legenda: 1- Transmissão sem *backoff*, 2- Transmissão com *backoff*.

Fonte: Adaptado de (KOHVAKKA et al., 2006).

No evento da transmissão 1, dois nós da rede IEEE 802.15.4 participam de uma troca de mensagens sem necessidade de utilização de *backoff*. Primeiramente é realizado um escaneamento de assinatura do canal, através do mecanismo CCA, durante um período de 128 *us* (KOHVAKKA et al., 2006). Como o canal está inativo, a transmissão é realizada. O evento da transmissão 2 representa uma situação de tentativa de envio com ocupação do canal, ocasionando assim, a utilização dos *timeslots* aleatórios.

Cada nó que deseje transmitir deve efetuar o processo de disputa apenas no período de atividade. Entretanto, uma vez que consiga acesso ao meio, a transmissão pode utilizar os *timeslots* do período de inatividade. O nó que efetuar uma transmissão deve esperar por um período LIFS de 625 *us* (*Long Inter Frame Spacing*) durante período ativo de disputa.

A camada PHY modelada realiza somente a transmissão de acordo com a velocidade do protocolo IEEE 802.15.4 (250 kpbs), além de auxiliar na utilização do mecanismo CCA.

5 Cenário simulado e resultados

O cenário de simulação representa a comunicação entre os dois *Smart Meters* DNP3 através da interface sem fio IEEE 802.15.4. O monitoramento de latência, juntamente com sistema de sincronização automática, foi modelado de acordo com a Figura 6.

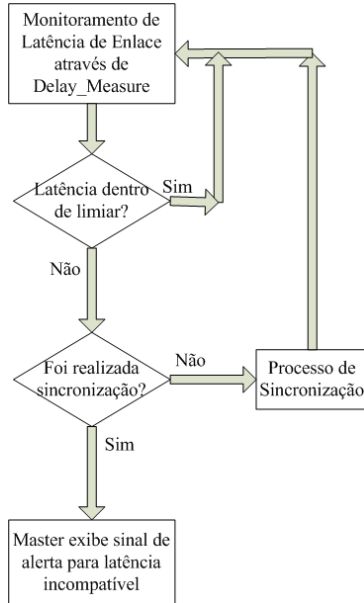


Figura 6 – Fluxograma do sistema de sincronização modelado.

O fluxograma apresentado prevê que um monitoramento de latência é realizado rotineiramente. Uma vez que a latência medida do enlace for maior que um limiar definido pelo administrador, iniciasse um processo de sincronização entre os dispositivos. A definição do limiar de latência pode ser realizada através de documentações apresentadas na Tabela 1.

Se após o processo de sincronização a latência ainda superar o limiar definido, o código deve alertar o administrador da rede.

O processo de sincronização, que é ilustrado na Figura 7, se inicia no envio do comando “*Record Current Time*” do dispositivo *Master* para o *Outstation*. Esses dispositivos devem respectivamente armazenar os momentos de envio (A) e recebimento (B) do comando. Ao enviar uma resposta nula ao *Master*, o dispositivo *Outstation* confirma a gravação do *clock* e que está pronto para receber o comando “*Write*”. Então o dispositivo *Master* envia o comando, contendo a informação do momento (A), para o *Outstation*. Ao receber o comando com a informação desejada, o dispositivo *Outstation* efetua a gravação do momento de recebimento (C), podendo assim ajustar seu *clock* de forma sincronizada.

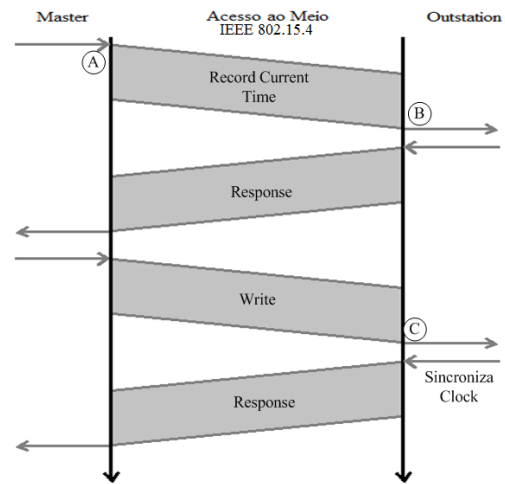


Figura 7 – Diagrama do tempo da troca de mensagens no processo de sincronização. Fonte: Adaptado de (IEEE Std. 1815 p. 269,2012).

Na especificação do protocolo, o processo de sincronização utiliza uma fórmula de sincronização, descrita na equação (1), que deve ser aplicada em aplicações cuja interface de comunicação possua uma baixa latência. Para que seja possível sua utilização em ambientes de latência elevada, este trabalho faz uma adaptação da fórmula conforme descrito na equação (2).

$$Clock = A + (C - B) \quad (1)$$

$$Clock = A + 3 * \frac{(C-B)}{2} \quad (2)$$

A diferença dos valores C e B é igual ao tempo de envio da resposta do comando “*Record Current Time*” e o recebimento do comando “*Write*”. Quando esse tempo é dividido por 2, o valor representa a latência de um enlace. Assim, a reconfiguração do *clock* é encontrada a partir da soma do valor de tempo A, presente no quadro do comando “*Write*”, e três vezes o tempo de latência de enlace encontrado. Deve se considerar os tempos provindos do processamento do protocolo DNP3.

A simulação realizada, ilustrada na Figura 8, utilizou o *software Modelsim®* (Mentor Graphics, 2012). Durante a simulação, foi forçada uma dessincronização entre o *Master* e o *Outstation*, tal que a latência medida entre ambos ultrapasse o limiar de redes de Classe Nível 1 de latência, ou 16 ms, conforme descrito na Tabela 1.

Após o processo de sincronização, dispositivo *Master* realiza outra medição de latência, atestando que o processo obteve sucesso.

Todas as transmissões realizadas no cenário consideraram o melhor caso de acesso ao meio IEEE 802.15.4, ou seja, sem necessidade de utilização de *backoff*.

6 Considerações Finais

Este artigo apresentou um cenário modelado em VHDL, que descreve uma adaptação de técnica de sincronização prevista em protocolo. A modelagem dos comandos e fluxograma envolvidos focou em

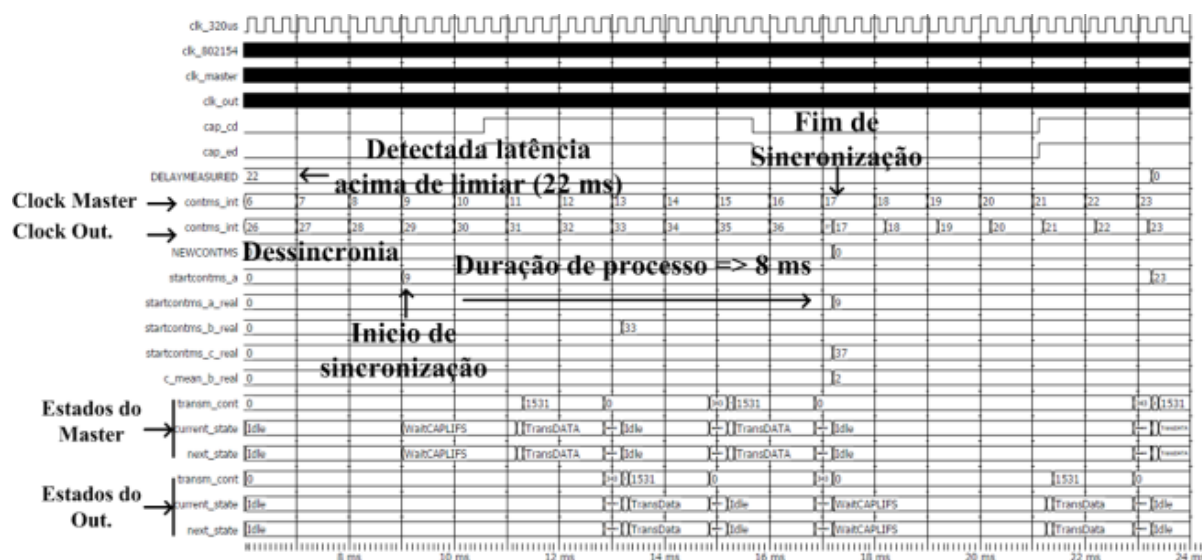


Figura 8 – Simulação do cenário de sincronização de dispositivos *Smart Meter* DNP3 utilizando interface IEEE 802.15.4

possibilitar a sincronização de dois *Smart Meters* DNP3 através de interface sem fio.

A interface *wireless* utilizada foi a IEEE 802.15.4 que apresenta latência mais elevada quando comparada com interfaces cabeadas ou tecnologia IEEE 802.11, por exemplo.

A linguagem VHDL, permitiu a modelagem e integração de ambos os protocolos, DNP3 e IEEE 802.15.4, de forma rápida. As simulações através de *software Modelsim®* possibilitaram uma análise adequada do cenário, bem como auxílio em eventuais erros durante o design.

Como trabalhos futuros, pretende-se analisar a técnica de sincronização com outras interfaces de comunicação *wireless*, como por exemplo IEEE 802.11. A aplicação desse cenário em ambiente simulado também será foco dos próximos trabalhos dos autores.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e a PADTEC S/A pelo apoio financeiro ao trabalho.

Referências

- BURATTI, C.; VERDONNE, R. (2009), Performance Analysis of IEEE 802.15.4 Non Beacon-Enabled Mode. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, vol.58, no.7, pp.3480-3494. DOI: [10.1109/TVT.2009.2014956](https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2014956)
- FANG, X.; MISRA, S.; ZUE, G.; YANG, D. Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey, Communications Surveys & Tutorials, IEEE, vol.14, no.4, pp.944-980, 2012. DOI: [10.1109/SURV.2011.101911.00087](https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087)
- IEEE Draft Standard for 1815 (Distributed Network Protocol - DNP3), IEEE P1815.1/D4.00, June 2012, vol., no., pp.1-283, June 15 2012.
- IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads, IEEE P2030.1/D4.00, vol., no., pp.1-126, 2011.
- IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) speci-

fications Amendment 8: IEEE 802.11 Wireless Network Management, IEEE Std 802.11v-2011, vol., no., pp.1-433, Feb. 9 2011.

IEEE Std P802.3aj/D3.1, vol., no., 2003.

IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE Std 802.15.4-2012, vol., no., pp.1-252, 2011.

KOHVAKKA, M.; KUORILEHTO, M.; HANNIKAINEN, M.; HAMALAINEN, T. D. Performance Analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for Large-Scale Wireless Sensor Network Applications. Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor and ubiquitous networks, vol. 3, no., pp.48-57, 2006.

LU, X.; WANG, W.; MA, J. An Empirical Study of Communication Infrastructures Towards the Smart Grid: Design, Implementation, and Evaluation. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, vol.4, no.1, pp.170-183, 2013. DOI: [10.1109/TSG.2012.2225453](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2225453)

MENTOR GRAPHICS. HDL Designer 2012b. Página: <http://www.mentor.com> Acesso em: 9/11/2012.

NEICHIN, G.; CHENG D. Smart Grid Vendor Ecosystem: Report on the companies and market dynamic shaping the current U.S. smart grid landscape. Available at <http://www.energy.gov/media/Smart-Grid-Vendor.pdf>, U.S., 2010.

SADEGHI, S.; MASHAD, I.; YAGHMAEE, M. M. H.; BAHEKMAT, M.; HEYDARI, Y. A. S. Modeling of Smart Grid Traffics Using Non-Preemptive Priority Queues. Iranian conference on Smart Grids, IEEE, vol.2, no.1, pp.1-4, 2012.

ZHOU, L.; RODRIGUES, J. J. P. C.; OLIVEIRA, L.M. QoE-driven power scheduling in smart grid: architecture, strategy, and methodology. Communications Magazine, IEEE, vol.50, no.5, pp.136-141, May 2012. DOI: [10.1109/MCOM.2012.6194394](https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6194394)