

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA REDE *ZIGBEE* EM MALHA PARA TRANSPORTE DE QUADROS MODBUS

LUAN CARLOS DE OLIVEIRA, DANIEL CRUZ CAVALIERI, RODOLFO DA SILVA VILLAGA*

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo*
Rodovia ES-010 - Km 6,5 - Manguinhos - Serra/ES, Brasil

Email: luan@zaruc.com.br, {daniel.cavaliere, rodolfo.villaca}@ifes.edu.br

Abstract— This paper presents the development and performance evaluation of a ZigBee mesh network to transport MODBUS frames. Starting from a free source code that initially only provided the peer-to-peer transmission between nodes, the automatic association of the nodes to the network, serial communication for input and output of MODBUS frames, resiliency, configuration commands and transport of MODBUS frames were implemented. To evaluate the implemented prototype a mesh network was used with 100 real ZigBee nodes with the router and the coordinator connected to a terminal for sending and receiving MODBUS frames. Five scenarios were created to evaluate this proposal. The first scenario demonstrates the operation of the network, followed by the latency evaluation, maximum transmission rate, data loss rate and the resilience of the network. As a result, for two hops over the network an average latency of 241 ms and a maximum transmission rate of 2,78 frames/s were obtained. For three hops the average latency was 250 ms and the maximum transmission rate was 1,98 frames/s. This results permitted us to conclude that the performance of the network is independent of the number of nodes in the network but is influenced by the number of hops that frame does.

Keywords— ZigBee, Mesh Networks, Performance Evaluation.

Resumo— A proposta desse estudo é o desenvolvimento e a avaliação de desempenho de uma rede *ZigBee* em malha para o transporte de quadros MODBUS. Partiu-se de um código fonte gratuito que inicialmente fornecia apenas a transmissão ponto a ponto e a partir dele foram implementados a associação automática dos nós à rede, a comunicação serial para entrada e saída de quadros, resiliência, comandos de configuração e o transporte dos quadros de dados ao longo da rede. Para avaliar o protótipo implementado utilizou-se uma malha com 100 nós *ZigBee*, dentre eles um roteador e um coordenador, ambos conectados a um terminal para o envio e recebimento dos quadros MODBUS. Foram criados cinco cenários de avaliação: demonstração do funcionamento da rede, verificação da latência na transmissão de quadros, vazão máxima, taxa da perda de quadros e resiliência da rede. Como resultado, para dois saltos ao longo da rede, obteve-se uma latência média de 241 ms e vazão média de 2,78 quadros/s. Para três saltos obteve-se a latência média de 250 ms e vazão de 1,98 quadros/s. Com isso, observou-se que o desempenho da rede independe da quantidade de nós que compõem a rede, mas é influenciado pela quantidade de saltos que o quadro realiza.

Palavras-chave— *ZigBee*, Redes em Malha, Avaliação de Desempenho.

1 Introdução

As redes sem fio evoluíram rapidamente nos últimos anos (Goldsmith, 2005). Embora existam múltiplas alternativas, algumas se sobressaem em aspectos como imunidade a fontes de interferência eletromagnética e flexibilidade na formação de diferentes topologias de rede. Nesse contexto, o *ZigBee* destaca-se ao propiciar, além dessas características, a topologia de redes em malha (*mesh*) (Woo et al., 2007).

Apresentando baixo consumo energético, facilidade de instalação, capacidade de coexistência com outros equipamentos de Rádio Frequência (RF) e segurança na transmissão dos dados, o *ZigBee* é uma alternativa robusta para ambientes hostis, tais como as redes industriais (Agha et al., 2009). Nestas redes, o *layout* geralmente encontra-se organizado de tal forma que as paradas de produção para alteração ou passagem de cabos torna-se economicamente inviável. Diante disso, redes sem fio *ZigBee* garantem a flexibilidade necessária e podem ser utilizadas em substituição ao cabeamento convencional.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é incorporar a tecnologia *ZigBee* no desenvolvimento de

uma rede em malha para o transporte de quadros MODBUS, muito utilizado no controle e automação de dispositivos em redes industriais (Igre et al., 2006). Para tanto, utilizou-se um código fonte gratuito, a *Z-Stack Mesh*¹ como ponto de partida no desenvolvimento da rede. Esse código fornecia apenas o processo básico de associação entre os dispositivos e, a partir dele, foram implementados os mecanismos de associação automática, comunicação serial para entrada e saída de quadros MODBUS, resiliência, comandos de configuração e transporte de quadros.

Para avaliar a rede proposta foram utilizados 100 dispositivos *ZigBee* na formação de uma rede em malha e, a partir dela, foram levantadas algumas métricas de desempenho, tais como: latência no envio dos quadros, taxa máxima de envio de quadros, taxa de perda de quadros em função do tamanho da rede e capacidade de resiliência.

Quanto à literatura correlata, (Kohvakka et al., 2006) e (Anastasi et al., 2010) avaliaram o desempenho e confiabilidade do *ZigBee* para topologias em árvore. Similarmente (Chen et al., 2010) avaliaram a utilização do *ZigBee* para

¹<http://www.ti.com/tool/z-stack>

monitoramento de aplicações industriais. Porém todos esses trabalhos fizeram suas avaliações por meio de simulações. Experimentalmente (Lee and Wang, 2013) utilizou 51 rádios *ZigBee* avaliou o desempenho do *ZigBee* em ambientes internos. Desta forma, este trabalho se diferencia dos demais e contribui para o estado da arte da área ao fazer uma avaliação de desempenho experimental, sem uso de simulação e com uma grande quantidade de nós, se comparado aos estudos relacionados.

2 Redes *ZigBee* em Malha

O *ZigBee* é um protocolo de comunicação sem fio destinado à transmissão de dados em redes de baixa potência de transmissão e com poucos requisitos de largura de banda. Apesar de não implementar todas as camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), as três primeiras camadas do protocolo *ZigBee* correspondem às três primeiras camadas do modelo OSI. A subcamada APS (*Application Support Sublayer*) e a APL (*Application Layer*) equivalem à união das camadas de transporte, sessão, apresentação e aplicação.

A Camada Física (PHY) é a camada mais inferior do protocolo e diretamente controla o hardware de transmissão/recepção. Transforma os quadros de dados para o espectro de radiofrequência e vice-versa, utilizando as técnicas O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*) e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).

O Controle de Acesso ao Meio (MAC) situa-se entre a Camada Física (PHY) e a Camada de Rede (NWK). É responsável por controlar o acesso ao meio físico de transmissão. Utiliza o mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), assegurando que o dispositivo transmita algum dado somente quando o meio físico estiver livre e tentando evitar a ocorrência de colisões. Também fornece serviços de associação e desvinculação dos dispositivos à rede.

A Camada de Rede (NWK) faz a interface entre a camada MAC e a Camada de Aplicação (APL), sendo responsável pelo gerenciamento da rede e roteamento dos quadros. O roteamento é o processo no qual busca-se um caminho entre origem e destino na rede. Em uma rede *ZigBee* esse processo é realizado por meio de sucessivas transmissões via *broadcast* para os nós vizinhos até que a informação atinja o seu destino, passando por diversos nós intermediários. Numa rede em malha diferentes rotas podem existir entre dois pontos. Entretanto, em uma rede em malha *ZigBee* não existem rotas pré-definidas e o processo acontece de forma independente para cada quadro sendo transmitido. Desta forma, quadros com uma mesma origem e um mesmo destino podem seguir por caminhos distintos na rede.

A Camada de Aplicação é formada pela subcamada de suporte à aplicação (APS), pelo ZDO (*ZigBee Device Object*) e pelo *ZigBee Application*

Framework. Atua como interface para utilização dos recursos das camadas inferiores e define as funcionalidades que são comuns a todas as aplicações *ZigBee*, tais como o tipo do dispositivo que está ligado à rede, os quais serão apresentados a seguir.

2.1 Tipos de Dispositivos

Existem dois tipos de dispositivos, ou nós, em uma rede *ZigBee*: dispositivos de função completa (FFD, ou *Full Function Devices*) e dispositivos de função reduzida (RFD, ou *Reduced Function Devices*).

Dispositivos FFD podem ser subdivididos em coordenador e roteador. Nos processos de associação, eles podem associar-se entre si e permitir a associação de RFD. O coordenador possui a tarefa de controlar e gerenciar a rede, rotear quadros, permitir a associação de novos dispositivos, endereçar os dispositivos na rede e, em muitas aplicações, é o elemento da rede para o qual se concentra todo o fluxo de dados. Com a exceção da formação e controle da rede, o roteador possui as mesmas funcionalidades do coordenador.

Os dispositivos RFD, também denominados "Dispositivos Finais", possuem funções limitadas, podendo passar a maior parte do tempo em estado de economia de energia. Esse tipo de dispositivo pode estabelecer associação somente com o FFD, não sendo capaz de efetuar funções de roteamento (Farahani, 2008).

2.2 Topologias de Rede

O *ZigBee* suporta diversas topologias de rede, dentre elas destacam-se: estrela, árvore e malha. Em todas essas topologias é necessária a presença do coordenador para a formação da rede. Ao ser inicializado ele seleciona um identificador de rede que não esteja em utilização por nenhuma outra dentro de sua região de cobertura e, a partir desse momento, roteadores ou dispositivos finais estão aptos a associar-se à rede.

Na topologia em malha, ou *mesh*, o coordenador e o roteador podem estabelecer múltiplos enlaces, resultando em redundância de caminhos. O dispositivo final pode estabelecer somente um enlace, sendo este com o roteador ou com o coordenador. Essa topologia possui as vantagens de múltiplos caminhos para os dados, capacidade de reconfiguração e resiliência.

3 Desenvolvimento

Para facilitar o desenvolvimento da rede, partiu-se de um código fonte gratuito, a *Z-Stack Mesh*, criada pela *Texas Instruments*². Nesta versão muitas funções encontram-se indisponíveis, sobretudo as funções relacionadas às três primeiras camadas do protocolo *ZigBee*.

Originalmente, a *Z-Stack Mesh* proporciona os mecanismos básicos de associação entre dispositivos para a formação de uma rede em malha.

²<http://www.ti.com/>

Contudo, como foi criada para utilização em *kits* de desenvolvimento, a associação ocorre pelo acionamento manual de micro chaves. Outra característica é que, mesmo obtendo uma topologia em malha, a troca de informações entre os dispositivos ocorre somente ponto a ponto, sem roteamento. Devido a essas limitações, foram implantados recursos no código para torná-lo apto à transmissão de quadros de quaisquer protocolos de aplicação, dentre eles o MODBUS, escolhido para avaliar o protótipo desenvolvido. As alterações dividem-se em quatro categorias, conforme segue.

3.1 Comunicação Serial

A primeira modificação consistiu na implementação da comunicação serial, recurso ausente na *Z-Stack Mesh*. Essa etapa é importante pois possibilita ao dispositivo receber quadros MODBUS via interface serial para serem transmitidos na rede. Com isso, a rede *ZigBee* implementada pode ser usada em substituição a um barramento físico que interliga equipamentos industriais.

3.2 Comandos de Configuração

O segundo recurso implementado foi a criação de comandos de configuração dos dispositivos que pudessem ser transmitidos pela rede, sem a necessidade de se ter acesso físico aos mesmos. Esses comandos realizam alterações como: canal e identificador de rede, taxa de transmissão da serial, número máximo de saltos permitidos na rede e potência do rádio transmissor/receptor.

Uma vez recebido pela serial dos dispositivos conectados à serial, o comando é propagado por *broadcast* para que todos os demais pontos da rede efetivem a ação associada ao comando implementado. Para permitir a retenção da configuração dos dispositivos mesmo quando eles forem desligados foi utilizada parte da sua memória não-volátil.

Para facilitar a realização de testes, também foi criado um comando que retorna todos os nós da rede ao modo padrão de funcionamento: taxa de comunicação de 9600 *bps*, número máximo de 10 saltos, canal de operação 26, identificador de rede *ABCD* e máxima potência de saída para o rádio.

3.3 Mecanismo de Associação

Por padrão a associação dos dispositivos na *Z-Stack Mesh* ocorre tão logo eles são ligados. Essa característica pode se tornar um problema em redes com grande densidade de nós, pois ocorreriam muitas associações simultâneas e grande quantidade de mensagens na rede. Com o objetivo de evitar esse problema foi implementado um retardo aleatório para que os dispositivos aguardem alguns instantes antes de iniciarem o procedimento de associação à rede.

3.4 Mecanismo de Resiliência

Conforme visto na Seção 2, o roteador *ZigBee*, com exceção da formação e controle da rede, possui os mesmos recursos do coordenador. Assim,

se o coordenador for retirado de uma rede já formada, os roteadores são capazes de mantê-la operando. Uma vez que o coordenador armazena sua tabela de vizinhos na memória não-volátil, ao voltar à rede a comunicação é restabelecida.

Entretanto, eventualmente pode ocorrer um conflito entre os identificadores de rede, quando coexistiriam duas redes distintas: uma composta somente pelo coordenador, que gerou um novo identificador de rede, e a outra composta pelos roteadores da rede anterior. Neste caso, não haveria troca de dados entre elas e para contornar essa deficiência do *Z-Stack*, uma mensagem periódica de sincronismo, partindo do coordenador para os roteadores, foi implementada para restabelecer a comunicação.

Coexistindo duas redes distintas, não há o trânsito da mensagem de sincronismo na rede mantida pelos roteadores. Simultaneamente, no coordenador não há a recepção da mensagem de sincronismo retransmitida pelos roteadores vizinhos. Persistindo esse cenário durante um intervalo de tempo configurável, em ambas as redes há a propagação do comando de *reboot*. O objetivo desse mecanismo é propiciar novos processos de associação e o restabelecimento da comunicação.

4 Avaliação e Resultados

Para avaliar o protótipo utilizou-se um dispositivo microcontrolado TTAD (Transceptor para Transmissão Automática de Dados) desenvolvido pela Zaruc Tecnologia³.

Foram utilizados 100 dispositivos, sendo um roteador e um coordenador, ambos ligados a terminais seriais para envio e recebimento de quadros MODBUS. Os demais nós foram usados como roteadores para expansão da rede, simulando a situação onde o controlador mestre e o dispositivo escravo estão fisicamente distantes, caracterizando a necessidade de uma rede sem fio em malha para transmissão dos quadros na planta industrial.

Os dispositivos utilizados estão dispostos em placas de acrílico, cada uma com 10 rádios, conforme Figura 1.

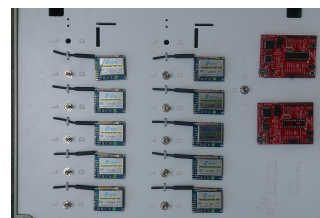


Figura 1: Rádios utilizados nos experimentos.

As placas foram posicionadas em ambiente interno, confinadas em salas com paredes de alvenaria e distância média de 5 m entre elas. Foram utilizados dois *softwares* analisadores de pacotes

³<http://www.zaruc.com.br/>

ZigBee para monitoramento da rede e visualização dos dados trafegados, sendo o primeiro deles o *Packet Sniffer*⁴ e o segundo o *Perytons Analyzer*⁵. A seguir serão apresentados os testes realizados.

4.1 Prova de Conceito

Após a montagem de uma rede *ZigBee* com 100 nós, gerou-se um quadro MODBUS de 8 *Bytes* para ser enviado pelo roteador para a rede. A etapa de formação da rede, bem como o quadro trafegado podem ser vistos na Figura 2. Na Figura 2(a) vê-se a etapa inicial de formação da rede, estando o coordenador mais à direita e o roteador ligado ao terminal no extremo oposto. Na Figura 2(b) o quadro enviado é apresentado. Nota-se que inicialmente o quadro realizou dois saltos para partir do roteador e chegar ao coordenador, o que pode ser visto no parâmetro *Nwk Radius*. Esse parâmetro é iniciado em 10 e decrementado a cada salto do quadro na rede. Ao chegar no coordenador, dispositivo de endereço 0x0000, o parâmetro *Nwk Radius* estava com valor 8, demonstrando os dois saltos realizados.

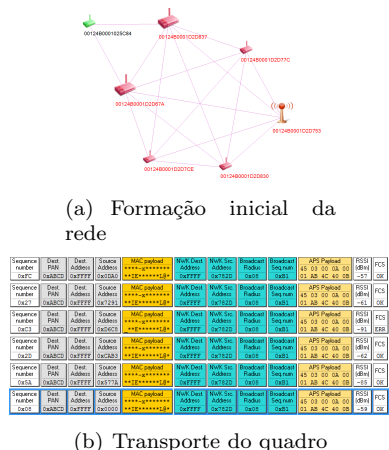


Figura 2: Rede *Mesh* em operação

Outra informação interessante é que diferentes roteadores propagaram o mesmo quadro. Por meio do parâmetro *Broadcast Seq. Num* nota-se o mesmo quadro sendo transmitido por diferentes caminhos.

Por fim, o quadro não é mais propagado na rede em duas situações: ao atingir o valor 0 para o número de saltos ou quando chega ao coordenador. Nesta última situação, o coordenador repassa o quadro a seus vizinhos. Ao detectarem a presença de um quadro com o mesmo número de sequência vindo do coordenador, os roteadores reconhecem que o quadro fora recebido com sucesso e encerram sua retransmissão. Esse mecanismo é chamado de reconhecimento passivo.

⁴<http://www.ti.com/tool/packet-sniffer>

⁵<http://www.perytons.com/>

4.2 Latência na Transmissão

Após certificar-se de que a rede estava corretamente configurada e em funcionamento, o mesmo quadro passou a ser enviado periodicamente a uma taxa de 1 quadro por segundo (*qps*). O objetivo desse experimento foi avaliar o retardo médio entre o envio do quadro pelo roteador e o posterior recebimento deste quadro pelo coordenador.

Os resultados podem ser vistos na Figura 3. A média da latência foi de $241 \pm 10ms$, em 25 amostras. Cinco pontos da amostra desviaram-se expressivamente da média (*outliers*). Sua ocorrência não foi investigada a fundo, mas pode ser atribuída a picos instantâneos no processamento de pacotes, haja vista que a curva média de latência no restante do intervalo mostrou-se regular.

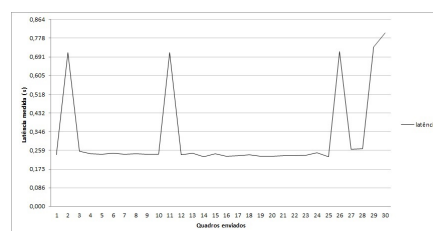


Figura 3: Medidas de latência por quadro enviado

4.3 Limite de Vazão

O terceiro experimento consistiu no envio de uma rajada de 30 quadros. Em seguida o intervalo de envio entre quadros sucessivos foi reduzido e a taxa de transmissão foi aumentada exponencialmente, porém mantendo-se o envio de 30 quadros em cada rajada. Esse experimento visa encontrar o limite da vazão de quadros que podem ser transportados na rede.

A curva exponencial da taxa de envio e a vazão alcançada podem ser vistas na Figura 4. O limite máximo de vazão da rede foi de 2,78 *qps*, valor a partir do qual começam a acontecer perda de quadros. O ponto em destaque na figura evidencia esse instante. Qualitativamente, após esse ponto ocorre certa estabilização no limite da vazão de saída. Em seguida, à medida que a vazão de entrada é incrementada, há uma queda na vazão de saída devido às perdas e retransmissões de quadros. Nesse momento a origem transmite mais quadros do que o destino é capaz de receber e ocorre a saturação da rede e dos dispositivos.

4.4 Resiliência da Rede

O quinto experimento foi realizado com o objetivo de verificar a capacidade da rede em voltar ao estado normal após a retirada coordenador. A Figura 5 mostra o experimento de resiliência e destaca os instantes da saída e volta do coordenador na rede. Com a rede formada e o roteador transmitindo 1 *qps*, o coordenador foi desligado no instante $t1$ da Figura 5. A partir do desligamento, nota-se que os quadros não foram mais recebidos.

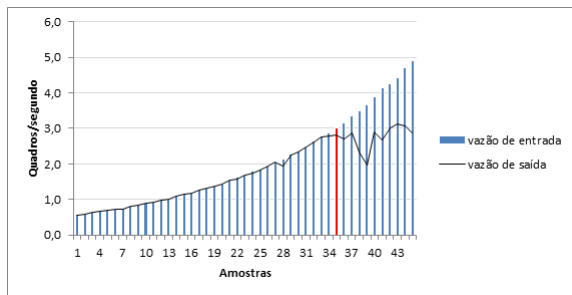


Figura 4: Vazão de entrada e saída para dois saltos

No instante t_2 o coordenador foi religado e dois quadros foram recebidos em um mesmo instante.

O aumento da taxa de chegada no instante da volta do coordenador pode ser explicado pelo fato de que o primeiro quadro estava em trânsito antes do envio do quadro subsequente. Para redes com maior número de saltos, menos quadros seriam perdidos por estarem sendo "retidos" na rede.

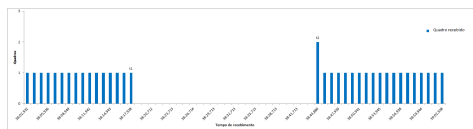


Figura 5: Experimento de resiliência da rede.

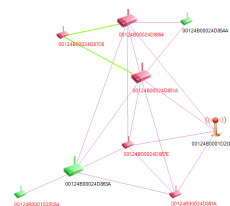
Ainda avaliando a capacidade de resiliência, o coordenador foi desligado permanentemente até que os roteadores identificassem a falta de sincronismo. Uma vez que o conflito entre redes é eventual e de reprodução dispendiosa, o desligamento do coordenador emula esse fenômeno na rede mantida pelos roteadores. Desta forma, avalia-se o mecanismo de resiliência implementado, conforme pode ser visto na Figura 6. Em (a) é evidenciado o comando de *reboot* e em (b) é observa-se a formação inicial da rede, com o coordenador ligado. Nota-se que logo na etapa inicial da formação da rede seu diâmetro foi ampliado, pois a rota mínima entre o roteador e o coordenador conectados aos terminais passou a ter dois nós intermediários.

4.5 Perda de Quadros

A taxa perda de quadros em função do aumento da vazão de entrada também foi avaliada. O resultado é mostrado na Figura 7. Como foi visto em resultados anteriores, à medida que a vazão de entrada aumenta, esse crescimento é acompanhado pela vazão de saída. Em certo ponto há uma estabilização da vazão de saída e, com o aumento contínuo da entrada de quadros, essa vazão tende a cair devido à perdas e retransmissões. A partir da amostra 35, ponto em que ocorre a primeira perda de quadros, verifica-se a tendência crescente da perda dos quadros transmitidos.

Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	RSNI (dBm)	FCS
Type: Sec. Prod. Ack. req. PAM_compt	0x5E	0xFFFF	0xFFFF	0xFFFF	-34	OK
DATA	0	0	0	0	0	0
Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	RSNI (dBm)	FCS
Type: Sec. Prod. Ack. req. PAM_compt	0x66	0x1234	0xFFFF	0x5478	-37	OK
DATA	0	0	0	0	0	0
Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	RSNI (dBm)	FCS
Type: Sec. Prod. Ack. req. PAM_compt	0x5F	0xFFFF	0xFFFF	0xFFFF	-37	OK
DATA	0	0	0	0	0	0
Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	RSNI (dBm)	FCS
Type: Sec. Prod. Ack. req. PAM_compt	0x69	0x1234	0xFFFF	0x5478	-37	OK
DATA	0	0	0	0	0	0
Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	RSNI (dBm)	FCS
Type: Sec. Prod. Ack. req. PAM_compt	0x54	0xFFFF	0xFFFF	0xFFFF	-37	OK
DATA	0	0	0	0	0	0

(a) Comando de reconfiguração da rede.



(b) Formação da rede

Figura 6: Detecção da falta de sincronismo com o coordenador

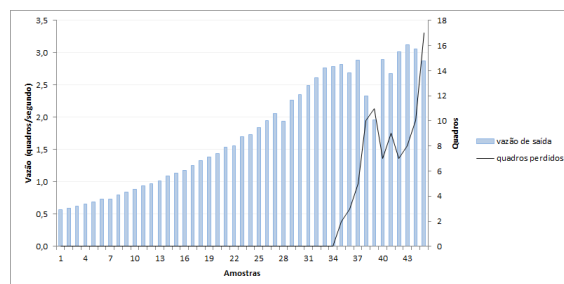


Figura 7: Perda de quadros enviados

4.6 Reconfiguração da rede

Mantendo-se o mesmo cenário e utilizando-se dos comandos de ajuste de potência, a rede em malha foi reorganizada convenientemente de modo a ter pelo menos dois nós entre o roteador e o coordenador. Em outras palavras, o quadro passou a executar três saltos para partir do roteador e chegar ao coordenador. Nessa disposição novas avaliações da latência, taxa de vazão de saída e de perda dos quadros foram realizadas. Os resultados são vistos, respectivamente, nas Figuras 8, 9 e 10.

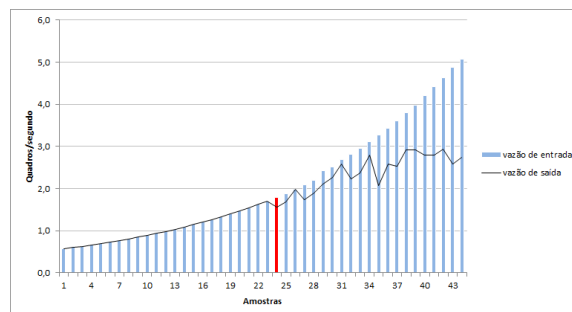


Figura 8: Vazão de entrada e saída para três saltos

Com o acréscimo de um salto a latência média foi de 250 ms, ou seja, um aumento de 3,3 % em relação ao resultado anterior. A vazão máxima de saída, sem ocorrência de perda de quadros, caiu de

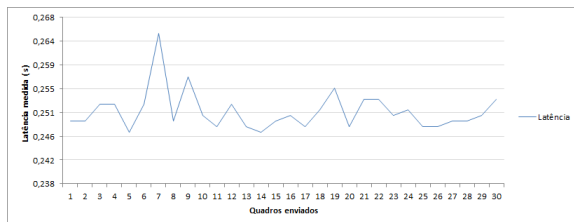


Figura 9: Medidas de latência por quadro enviado

2,78 *qps* para 1,98 *qps*. Analogamente ao primeiro cenário, adotou-se o nível de confiança de 95%, resultando em desvio padrão de 4 ms e intervalo de confiança de 1 ms.

Em relação aos quadros perdidos, a existência de mais um salto na rede significou na antecipação do início da perda de quadros. Desta forma pode-se assegurar que a conexão serial não é o fator limitante da vazão alcançada.

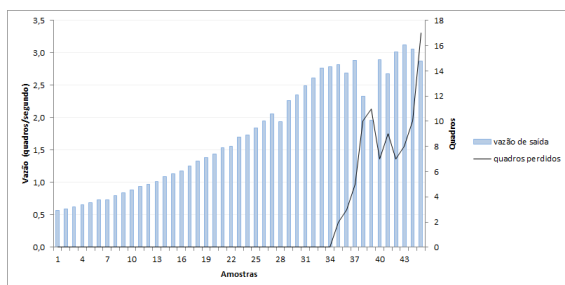


Figura 10: Quadros perdidos para três saltos.

5 Discussões Finais, Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho uma rede em malha *ZigBee* com 100 nós foi implementada e avaliada. O coordenador e o roteador ligados aos terminais foram dispostos com 2 e 3 saltos entre si, variando o diâmetro da rede. A partir dos resultados obtidos concluiu-se que a latência da transmissão dos dados independe da quantidade de dispositivos presentes na rede, mas está associada diretamente à quantidade de saltos que o quadro realiza.

Apesar da baixa vazão encontrada pode-se afirmar que a rede atende ao transporte de quadros MODBUS devido aos baixos requisitos de largura de banda desse protocolo. Para efeito de comparação, (Gomes et al., 2013) também utilizou o *Z-Stack Mesh* em 5 equipamentos com mesmo microprocessador presente no TTAD e alcançou baixas taxas de entrega de quadros, justificadas pela presença de nós ocultos na rede e retransmissões nos roteadores.

Por fim, a partir dos trabalhos relacionados, pode-se inferir que a capacidade de processamento de pacotes do TTAD utilizado pode ser a causa dessa limitação, sobretudo por ele utilizar microprocessador de 8 *bits*. Deixa-se como sugestão para trabalho futuro a utilização de rádios *ZigBee*

com maior poder de processamento. Adotando a mesma metodologia deste estudo para os novos rádios, consegue-se validar ou refutar a hipótese do TTAD como limitante do desempenho.

Referências

- Agha, K. A., Bertin, M.-H., Dang, T., Guitton, A., Minet, P., Val, T. and Viollet, J.-B. (2009). Which Wireless Technology for Industrial Wireless Sensor Networks? The Development of OCARI Technology, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **56**(10): 4266–4278.
- Anastasi, G., Conti, M., Francesco, M. and V.Neri (2010). Reliability and Energy Efficiency in Multi-Hop IEEE 802.15.4 Zigbee Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 15th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'10)* pp. 336–341.
- Chen, F., Wang, N., German, R. and Dressler, F. (2010). Simulation Study of IEEE 802.15.4 LR-WPAN for Industrial Applications, *Wireless Communications and Mobile Computing*, **10**(5): 609–621.
- Farahani, S. (2008). *Zigbee Wireless Networks and Tranceivers*, 1 edn, Newnes Newton.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*, Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- Gomes, D., Gonçalves, C. and Afonso, J. A. (2013). Performance Evaluation of Zigbee Protocol for High Data Rate Body Sensor Networks, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2013* **2**(6810): 3–5.
- Igure, V. M., Laughter, S. A. and Williams, R. D. (2006). Security Issues in SCADA Networks, *Computers & Security* **25**(7): 498–506.
- Kohvakka, M., Kuorilehto, M., Hannikainen, M. and T.D.Hamalainen (2006). 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 (PE-WASUN'06)* pp. 48–57.
- Lee, J.-S. and Wang, Y.-M. (2013). Experimental Evaluation of Zigbee-Based Wireless Networks in Indoor Environments, *Journal of Engineering* **2013**.
- Woo, L., Kinsner, W., Ferens, K. and Diamond, J. (2007). Performance Results and Analysis of Zigbee Networks in the Presence of Multifractal Noise, *2007 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* pp. 924–927.