

RT-WiFi: um mecanismo TDMA para suportar comunicações de tempo real em redes IEEE 802.11

Robson Costa, Paulo Portugal, Francisco Vasques, Ricardo Moraes e Ricardo Custódio

Resumo— Neste artigo é proposto o mecanismo RT-WiFi para suportar comunicações de tempo real em redes IEEE 802.11 infraestruturadas, possibilitando a coexistência de tráfego de tempo real (TR) com tráfego não controlável gerado por estações não tempo real (NTR). O artigo destaca também algumas limitações do mecanismo EDCA, proposto na emenda IEEE 802.11e, quando utilizado para suportar comunicações TR. Ambos os mecanismos foram avaliados considerando um ambiente de comunicação aberto, onde estações TR e NTR operam simultaneamente no mesmo canal de comunicação. Os resultados demonstram que o RT-WiFi oferece um atraso quase constante e também um melhor comportamento ao nível da percentagem média de *deadlines* perdidas, quando comparado ao EDCA.

Palavras-Chave— IEEE 802.11, QoS, TDMA, Tempo Real.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, as redes IEEE 802.11 [1], também conhecidas como redes WiFi, são o padrão *de facto* em conectividade para redes locais sem fio (WLANs). Este padrão utiliza o protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) como mecanismo de acesso ao meio, implementado através da função DCF (*Distributed Coordination Function*). Neste contexto, dois importantes fatores devem ser levados em consideração quando se utilizam WLANs para o suporte de aplicações TR: **i)** o algoritmo de controle das colisões (*backoff*) definido pelo padrão não é determinístico, e **ii)** o meio físico é essencialmente um *ambiente de comunicação aberto*, podendo qualquer estação realizar tentativas de acesso ao meio para estabelecer um canal de comunicação. Além disto, podem também ocorrer interferências de sistemas utilizando outras tecnologias operando na mesma frequência de transmissão [2].

Tradicionalmente, as comunicações de TR em redes cabeadas são garantidas através do controle de todos os dispositivos de comunicação. A coexistência entre estações TR e NTR torna-se possível, por exemplo, através de mecanismos de suavização de tráfego aplicados às estações NTR [3]. Infelizmente, esta e outras abordagens que consideram um meio de comunicação fechado não são adequadas para ambientes de comunicação sem fio, uma vez que não é possível impor qualquer restrição de tráfego às estações que estão fora da esfera-de-controle¹ da arquitetura de TR.

Robson Costa, Paulo Portugal e Francisco Vasques: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, E-mails: robson@fe.up.pt, pportugal@fe.up.pt e vasques@fe.up.pt.

Ricardo Moraes e Ricardo Custódio: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, E-mails: ricardo.moraes@ufsc.br e custodio@inf.ufsc.br

¹Sempre que uma entidade TR estiver dentro da esfera-de-controle, o sistema tem autorização para mudar todos os valores desta entidade, caso contrário, estes valores podem ser observados mas não podem ser modificados.

A proposta RT-WiFi apresentada neste artigo implementa um mecanismo estruturado em duas camadas, objetivando prover garantias temporais para aplicações de TR operando em ambientes de comunicação abertos. Na camada inferior (sub-camada MAC) é utilizado um mecanismo que força a resolução de colisões (MAC FCR – *Medium Access Control Forcing Collision Resolution*) em favor das estações TR. Na camada superior (*Camada de Coordenação*) é proposto um mecanismo (baseado num esquema TDMA – *Time Division Multiple Access*) que assegura o acesso livre de colisões entre o conjunto de estações TR. Esta proposta difere das abordagens tradicionais, as quais consideram somente a camada de coordenação entre o conjunto de estações TR (desprezando assim a existência de estações NTR que compartilham o mesmo meio de comunicação).

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a seção II descreve as soluções relevantes que pretendem garantir comunicações de tempo real em redes IEEE 802.11; a seção III detalha o funcionamento do mecanismo proposto, sendo a sua análise temporal apresentada na seção IV; posteriormente, na seção V, são apresentados os cenários de simulação utilizados bem como seus respectivos resultados; as conclusões deste artigo são apresentadas na seção VI.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

A função PCF (*Point Coordination Function*), proposta no padrão original como um mecanismo de acesso opcional, tem por objetivo prover determinismo às comunicações. Nesta função, um coordenador, normalmente localizado no AP (*Access Point*), implementa um esquema de *polling* centralizado para a transmissão de dados síncronos. Embora o PCF esteja supostamente bem adaptado para suportar aplicações sensíveis ao atraso, a maioria dos dispositivos WLAN nunca o implementou devido à sua complexidade [4].

Com o objetivo de prover Qualidade de Serviço (QoS), em 2005 foi publicada a emenda IEEE 802.11e [5], que incorpora uma nova função de coordenação chamada HCF (*Hybrid Coordination Function*). No HCF são definidas duas funções: o EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) e o HCCA (*HCF Controlled Channel Access*).

O EDCA é uma melhoria do DCF e prevê 4 categorias de QoS (voz, vídeo, *best-effort* e *background*), sendo a categoria de voz a de mais alta prioridade. Diante disto, seria desejável que a categoria de voz fosse adequada para a transferência de tráfego TR, porém, em [6] constatou-se que mesmo para cargas médias, o número de *deadlines* perdidas é inaceitável para grande parte das aplicações TR. Já o HCCA foi proposto como uma melhoria do PCF. No entanto, alguns estudos

demonstraram que este mecanismo pode não ser adequado para garantir os requisitos específicos das aplicações TR [7].

Encontram-se na literatura diversas abordagens desenvolvidas com o objetivo de prover comunicação de TR em redes sem fio. As principais soluções baseiam-se em esquemas de *Polling*, *Master-Slave* e *Token Passing* [8], [9], [10], [11], [12].

É digno de se destacar a proposta apresentada por Sobrinho e Krishnakumar [12], a qual adapta o mecanismo EQuB [13] para redes sem fio. O esquema denominado *Black-Burst* (BB), implementa um sistema MAC distribuído em redes *ad hoc* exigindo a substituição do esquema de transmissão aleatória. Todas as estações TR implementando o BB tentam acessar o meio físico, após detectá-lo livre, por um período igual a t_{med} , que é menor que o tempo de espera das estações padrão IEEE 802.11. Desta forma, as estações TR obtêm prioridade de acesso ao meio sobre as demais estações.

Dentro do nosso conhecimento, o VTP-CSMA [11] e o BB [12] são as únicas soluções que permitem a comunicação TR em ambientes abertos. A principal desvantagem do BB é que este mecanismo obriga à modificação da sub-camada MAC (e possivelmente também partes da camada física), impedindo o uso de hardware COTS (*Commercial Off-The-Shelf*). Embora os mecanismos VTP-CSMA e RT-WiFi também modifiquem partes da sub-camada MAC, estes podem ser implementados em hardware COTS sobre dispositivos padrão IEEE 802.11, como por exemplo FPGAs (*Field Programmable Gate Array*).

III. O MECANISMO RT-WiFi

O trabalho proposto neste artigo considera uma arquitetura de comunicação de TR infraestruturada, onde um coordenador central (QoS AP) interconecta um conjunto de estações TR (QoS STA). O objetivo é prover QoS em ambientes de comunicação abertos. Neste contexto, podem existir estações fora da esfera-de-controle da arquitetura de TR, operando em modo infraestruturado e/ou *ad hoc* na mesma área de cobertura. Além disto, estas estações podem estar transmitindo dados no mesmo canal de comunicação que as estações TR.

É importante observar que em redes infraestruturadas (que não estejam operando segundo os mecanismos PCF ou HCCA) o AP opera como uma estação normal com a função de repassar as mensagens para o destino final, competindo igualmente pelo acesso ao meio. Logo, para obter uma transferência de dados simétrica (mesma taxa de *uplink* e *downlink*) é necessário que a taxa de *downlink* do AP seja N vezes maior que a quantidade de tráfego *uplink* de cada estação, onde N é o número de estações associadas ao AP.

A Fig. 1 apresenta o fluxo de transmissão das mensagens no mecanismo RT-WiFi. Neste exemplo, observa-se que há um fluxo fim-a-fim entre o emissor (TR_1) e o receptor (TR_2), passando pelo coordenador central denominado de QoS AP. Este fluxo é obtido através do uso dos menores valores de espaçamento entre mensagens (definidos no padrão IEEE 802.11) e do mecanismo de separação de tráfego (MAC FCR) proposto num trabalho anterior [14]. O funcionamento do MAC FCR consiste em, sempre que ocorrer uma colisão entre uma estação TR e um conjunto de estações NTR, todas as estações envolvidas (com exceção da estação TR) utilizarão os valores padrões definidos no mecanismo EDCA

para selecionar um intervalo de *backoff* aleatório de acordo com a categoria de acesso em que a mensagem esteja sendo transmitida. Por outro lado, as estações TR definem como zero os valores mínimo e máximo da janela de contenção ($acW_{min} = acW_{max} = 0$), o que equivale a desabilitar o mecanismo de *backoff*. Além disto, as estações TR transferem o seu tráfego (*uplink*) utilizando a categoria de mais alta prioridade do EDCA, ou seja, definindo o AIFS (*Arbitration Interframe Space*) como: $AIFS_{VO}^{QSTA} = aSIFSTime + 2 \times aSlotTime$. Os valores de $aSIFSTime$ e $aSlotTime$ são fixos e definidos de acordo com o meio físico utilizado.

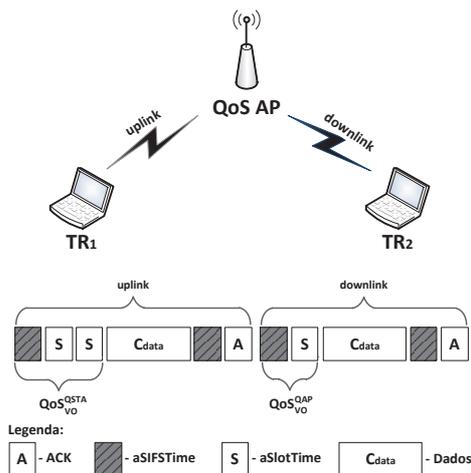


Fig. 1. Fluxo de transmissão do mecanismo RT-WiFi.

Sendo assim, sempre que ocorrer uma colisão, diferentemente das estações NTR, que deverão aguardar um intervalo de tempo definido pela função de $AIFS + backoff$ da mensagem, a estação TR tentará retransmitir sua mensagem imediatamente após $AIFS_{VO}^{QSTA}$. A principal limitação deste mecanismo é que, se duas ou mais estações TR disputarem o acesso ao meio simultaneamente, podem ocorrer repetidas colisões resultando em um descarte da mensagem após o número máximo de retransmissões. Esta limitação é a principal razão para a utilização da *Camada de Coordenação*, a qual serializa as transmissões das estações TR através de um esquema TDMA, permitindo assim que múltiplas estações TR possam coexistir com múltiplas estações NTR.

O MAC FCR também é utilizado no QoS AP pois, em ambientes com dois ou mais APs operando na mesma área de cobertura e mesmo canal de comunicação, podem ocorrer colisões no tráfego *downlink*. Diferentemente das estações TR, o QoS AP transmite o dados TR definindo seu AIFS como: $AIFS_{VO}^{QAP} = aSIFSTime + aSlotTime$.

Esta proposta considera um grupo G com np membros representados por $G = \{TR_1, TR_2, \dots, TR_{np}\}$, onde TR_i denota a i -ésima estação de G , no qual i é utilizado como identificador da estação. O mecanismo atribui para cada estação TR_i um *slot* TDMA, o qual define o tempo de duração máximo em que a estação TR_i pode disputar o acesso ao meio.

O mecanismo proposto assume os seguintes pressupostos:

- 1) o grupo G é fixo e seus participantes operam em uma rede infraestruturada sob a coordenação de um QoS AP;
- 2) o ambiente de comunicação é aberto, ou seja, estações

- NTR podem utilizar o mesmo canal de comunicação;
- 3) todas as estações TR estão na área de cobertura do QoS AP, não existindo assim o problema do terminal oculto;
 - 4) os dispositivos NTR operam de acordo com o estabelecido no padrão IEEE 802.11, e estão fora da esfera-de-controle da arquitetura de TR.

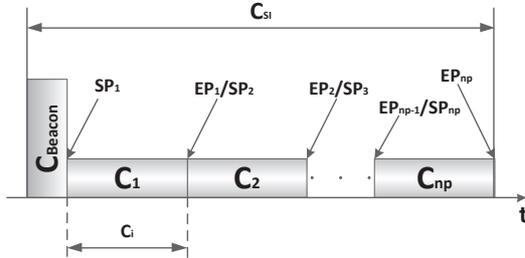


Fig. 2. Ciclo TDMA.

As comunicações TR estão organizadas em ciclos TDMA (C_{SI}). Cada ciclo (Fig. 2) é iniciado com a transmissão de um *Beacon* pelo QoS AP (utilizado para sincronizar o grupo de estações TR), e é constituído por np slots de duração fixa. Ao recebê-lo, cada estação TR calcula o limite inicial (SP_i) e final (EP_i) do seu *slot*. Uma estação TR_i somente pode competir pelo acesso ao meio durante este intervalo de tempo. Como se considera um ambiente aberto, as estações NTR podem competir a qualquer instante pelo acesso ao meio. Consequentemente, colisões ou erros podem ocorrer durante uma transmissão TR. Para lidar com este problema, as estações TR utilizam o MAC FCR descrito anteriormente, garantindo assim uma alta probabilidade de sucesso nas transmissões. O tamanho do *slot* (C_i) deve garantir a transmissão do tráfego TR mesmo em cenários onde estações NTR estejam transmitindo. A dedução destes intervalos é apresentada na Seção IV.

IV. ANÁLISE TEMPORAL

Nesta seção é apresentada a análise temporal do mecanismo RT-WiFi. O principal objetivo é demonstrar que o acesso ao meio para o tráfego TR tem um atraso máximo definido, mesmo considerando situações onde o meio de comunicação é compartilhado com estações NTR. Para isto consideram-se as seguintes condições:

- as estações TR transmitem apenas mensagens periódicas;
- o tráfego TR tem uma *deadline* igual ao período;
- o período das mensagens é definido por C_{SI} (Fig. 2);
- as transmissões TR são do tipo *unicast*;
- a TXOP (*Transmission Opportunity*) para todas as estações TR é 0, ou seja, somente uma mensagem é transmitida em cada *slot*.

O tamanho do *slot* (C_i) em que cada estação TR_i pode competir pelo acesso ao meio é dado por:

$$C_i = C_{uplink} + C_{downlink} \quad (1)$$

onde C_{uplink} é o tempo necessário para a transmissão de uma mensagem TR (incluindo possíveis retransmissões) da estação TR para o QoS AP e $C_{downlink}$ é o tempo necessário para o encaminhamento desta mensagem TR (incluindo possíveis retransmissões) do QoS AP ao destino final. O tempo necessário para este encaminhamento é dado por:

$$C_{downlink} = (RN + 1) \times [AIFS_{VO}^{QAP} + C_{data} + aSIFSTime + C_{ack}] \quad (2)$$

onde RN é o número máximo de retransmissões, C_{data} é o tempo necessário para transferir uma mensagem de dados e C_{ack} é o tempo necessário para receber uma mensagem de reconhecimento positivo (ACK²). A Fig. 1 ilustra os tempos apresentados na Equação 2. É importante observar que no caso de erros na transmissão ou colisão com um AP NTR, a nova tentativa do QoS AP inicia-se logo após $AIFS_{VO}^{QAP}$, ou seja, sem nenhum *backoff*, garantindo assim o acesso ao meio.

O tempo de transmissão *uplink* é um pouco mais complexo, pois devido às características de um ambiente de comunicação aberto, as estações e os APs NTR podem capturar o meio, sempre que este estiver livre por um tempo mínimo igual à $AIFS_{VO}^{QAP}$. O tempo de *uplink* é dado por:

$$C_{uplink} = (RN + 1) \times C_{att} + C_{guard} \quad (3)$$

onde C_{att} é a duração de uma tentativa de transmissão (com ou sem sucesso), dada por:

$$C_{att} = AIFS_{VO}^{QSTA} + C_{data} + sSIFSTime + C_{ack} \quad (4)$$

O parâmetro C_{guard} usado na Equação 3 define o pior caso de interferência que uma estação TR_i pode sofrer. Em outras palavras, o atraso máximo que uma estação TR_i pode sofrer antes de iniciar sua tentativa de acesso ao meio. Esta situação ocorre quando uma estação NTR captura o meio num instante de tempo imediatamente anterior ao instante SP_i da estação TR_i . Considera-se ainda que esta estação transmite através de um AP NTR uma mensagem contendo a maior quantidade de dados possível³, logo:

$$C_{guard} = AIFS_{VO}^{QAP} + 2 \times (C_{MPDU_{max}} + aSIFSTime + C_{ack}) \quad (5)$$

onde $C_{MPDU_{max}}$ é o tempo de transmissão de uma mensagem de tamanho máximo. A Fig. 1 pode ser utilizada para o entendimento dos tempos apresentados na Equação 5. A única diferença é que não se considera o espaçamento inicial ($AIFS_{VO}^{QSTA}$), pois, na interferência considera-se que a transmissão de dados já foi iniciada.

Os limites inicial (SP_i) e final (EP_i) para cada *slot* (C_i) são dados respectivamente por:

$$SP_i = C_{beacon} + (i - 1) \times C_i \quad (6)$$

$$EP_i = SP_i + C_i \quad (7)$$

O intervalo de cada ciclo TDMA (C_{SI}) é dado por:

$$C_{SI} = C_{beacon} + \sum_{i=1}^{np} C_i \quad (8)$$

onde C_{beacon} é o tempo de transmissão de um *Beacon*.

Para garantir que o fluxo de mensagens TR tenha um tempo de resposta com um limite máximo definido, é necessário que o período das mensagens TR seja maior ou igual ao ciclo TDMA ($P_i \geq C_{SI}$), o qual é definido pelo número de estações TR (np).

²Um *acknowledgement* (ACK) tem comumente 14 bytes.

³Um quadro de tamanho máximo tem 2340 bytes.

V. SIMULAÇÕES

O objetivo das simulações apresentadas nesta seção é comparar o suporte ao tráfego TR (periódico) no mecanismo RT-WiFi com o mecanismo EDCA, em que este último utiliza a categoria de maior prioridade (voz) para transmitir o tráfego TR. O mecanismo EDCA foi escolhido para fins comparativos por ser atualmente o mais utilizado para prover QoS numa rede IEEE 802.11. A comparação com o PCF ou o HCCA não foi realizada uma vez que até o momento é desconhecido pelos autores qualquer dispositivo de rede que implemente estes mecanismos. Além disto, diversos estudos já apontaram algumas deficiências nestes mecanismos para suportar tráfego de TR. Como ferramenta de simulação foi utilizado o *OPNET Wireless Modeler* [15].

A. Cenários

Os cenários de simulação apresentados neste artigo avaliam o impacto do tráfego NTR sobre o tráfego TR. Para isto foi considerado um ambiente de comunicação aberto onde estações TR coexistem com estações NTR utilizando o mesmo canal de comunicação. As estações TR transmitem somente tráfego TR através de um QoS AP dedicado. Já as estações NTR transmitem dois tipos de tráfego: voz e *background*, através de um outro AP destinado exclusivamente para estas estações. Ressalta-se ainda que os dois APs estão sobrepostos na mesma área de cobertura e utilizam o mesmo canal de comunicação.

Foram analisados dois cenários. No primeiro, 5 estações TR compartilham o acesso ao meio com 20 estações NTR. No segundo, o número de estações TR é aumentado para 10. No mecanismo EDCA, as estações TR transferem seu tráfego utilizando a fila de voz com os parâmetros padrões. No mecanismo RT-WiFi, as estações TR transferem seu tráfego utilizando as regras definidas pelo mecanismo proposto. Por fim, são analisados cenários livres e sujeitos a erros de comunicação. Neste último, foi utilizado o modelo de erro disponibilizado pelo OPNET, em que a BER (*Bit Error Ratio*) é avaliada dinamicamente com base no valor médio da SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Para ambos os cenários avaliados, os valores médios da BER variam entre 10^{-4} e 10^{-3} .

As estações NTR impõem uma carga de rede que varia de 10% a 90% em intervalos de 10%. Cada estação TR gera mensagens com 45 bytes de dados úteis em um fluxo periódico (P_i) que não pode ser menor que o tamanho do ciclo TDMA (C_{SI}). No caso específico destes cenários, foram utilizados períodos de 9,458 e 18,868 ms, para 5 e 10 estações TR, respectivamente (de acordo com a equação 8). Já para os tráfegos de voz e *background* gerados pelas estações NTR (caracterizados por uma distribuição *Poisson*) foram utilizados 160 e 1500 bytes de dados úteis, respectivamente.

Os parâmetros físicos usados baseiam-se no padrão IEEE 802.11a [16], onde as mensagens de controle são transmitidas utilizando a taxa de transmissão base (6 Mbits/s), enquanto as mensagens de dados são transmitidas a 36 Mbits/s. Os demais parâmetros são apresentados na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO.

Parâmetros	Tráfego TR		Tráfego NTR	
	RT-WiFi	EDCA	VO	BK
aCW_{min}	0	3	3	15
aCW_{max}	0	7	7	1023
AIFS	2	2	2	7
TXOP (ms)	0	1.504	1.504	0
Dados úteis (bytes)	45	45	160	1500
Retransmissões	2	7	7	7

B. Resultados

As métricas de desempenho analisadas para as estações TR incluem: atraso médio e percentagem média de *deadlines* perdidas. O atraso médio representa o atraso fim-a-fim das mensagens recebidas com sucesso. A percentagem média de *deadlines* perdidas representa a percentagem de mensagens que perderam suas respectivas *deadlines*. Todos os resultados foram obtidos com um intervalo de confiança de 95% com um intervalo relativo de 5%. As barras referentes ao desvio padrão foram excluídas dos gráficos por serem demasiadamente pequenas, tornando-se imperceptíveis.

A Fig. 3 apresenta os atrasos médios (com e sem erros) para os cenários contendo 5 e 10 estações TR. Em ambos os cenários as estações que implementam o mecanismo RT-WiFi mantêm um atraso constante mesmo em ambientes passíveis de erro (as linhas estão sobrepostas). Uma importante característica apresentada é a previsibilidade do atraso médio no mecanismo RT-WiFi. Independentemente da carga externa imposta pelas estações NTR, o atraso médio tende para $C_{SI}/2$, devido à natureza periódica do ciclo TDMA.

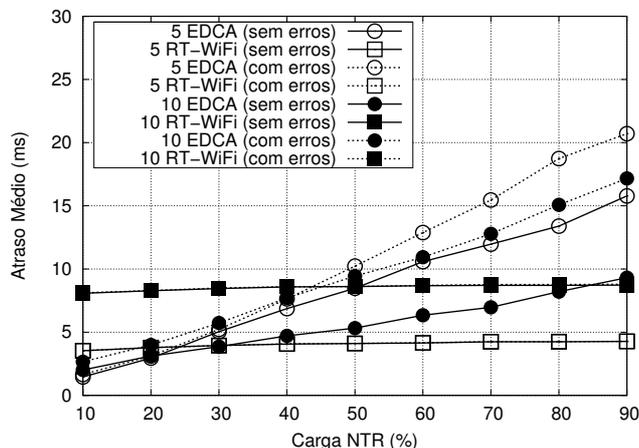


Fig. 3. Atraso médio.

No cenário contendo 10 estações TR, como o período de geração das mensagens TR é o dobro quando comparado ao cenário anterior (devido a limitação imposta pelo ciclo TDMA onde $P_i \geq C_{SI}$), o número de colisões diminuiu, e consequentemente o atraso médio do EDCA também.

Uma análise comparativa de ambos os cenários mostra que as estações RT-WiFi têm um atraso médio quase constante. É importante salientar que este é um comportamento desejável para aplicações de TR. Entretanto, devido a natureza do ciclo TDMA, seu atraso médio aumenta linearmente em função do aumento do número de estações TR.

A Fig. 4 apresenta a percentagem média de *deadlines* perdidas para os cenários contendo 5 e 10 estações TR. No cenário com 5 estações TR, os resultados mostram que o mecanismo EDCA tem um número de *deadlines* perdidas maior que 10%, mesmo quando a carga imposta pelas estações NTR é considerada pequena (25%). Este comportamento piora significativamente com o aumento da carga imposta pelas estações NTR. O RT-WiFi garante uma percentagem pequena de perdas de *deadlines* para cargas de até 70% em ambientes livres de erro, e 50% para ambientes com erros.

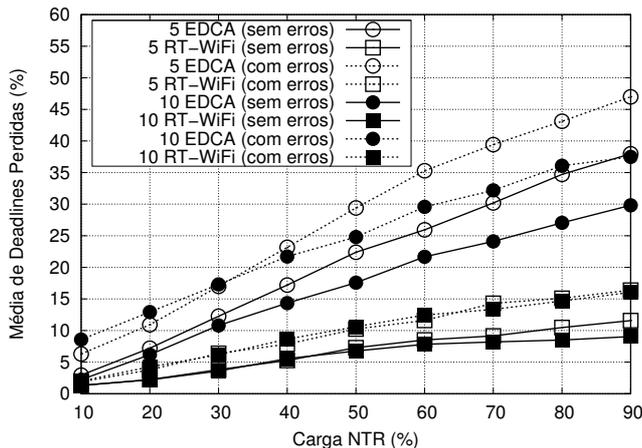


Fig. 4. Percentagem média de *deadlines* perdidas.

Os resultados mostram ainda que o mecanismo RT-WiFi não é afetado pelo aumento do número de estações TR. Em ambientes livres de erro, a percentagem de perda de *deadlines* não ultrapassa os 10%, independentemente da carga de rede imposta pelas estações NTR, o que para a maioria das aplicações TR é considerado um limite máximo aceitável. As estações TR transferindo mensagens através do mecanismo EDCA, têm uma perda de *deadlines* muito superior.

Para efeito de comparação destes resultados deve-se levar em consideração a diferença no número de tentativas de transmissão configurado para cada mecanismo. Enquanto que para o EDCA este valor é 7 (definido pelo padrão IEEE 802.11e), o mecanismo RT-WiFi utiliza somente 2 tentativas. Se estes valores fossem iguais, isto resultaria em uma melhoria significativa nos resultados de percentagem de *deadlines* perdidas. Como consequência, aumentaria o atraso médio em função do aumento do ciclo TDMA (C_{SI}).

Também foram avaliados cenários contendo 15 e 30 estações TR, tendo sido mantidas todas as tendências apresentadas anteriormente. Portanto, os resultados apresentados neste artigo demonstram que o mecanismo RT-WiFi ultrapassa o desempenho do mecanismo EDCA no âmbito de suporte ao tráfego TR. É capaz de suportar tráfego TR com um atraso médio constante (e previsível) mesmo em ambientes passíveis de erro e com altas cargas impostas pelas estações NTR.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo foi proposto o mecanismo RT-WiFi, que tem por objetivo prover suporte à comunicação TR em redes IEEE 802.11. Seu desempenho foi avaliado através de simulação considerando ambientes de comunicação abertos, com estações

TR e NTR compartilhando o mesmo canal. Além disso, foi também considerada a existência de erros de comunicação.

A análise dos resultados mostrou que: **i)** o atraso médio do RT-WiFi, com ou sem erros de comunicação, manteve-se constante e previsível (diferentemente do mecanismo EDCA), demonstrando um comportamento desejável para aplicações TR; e **ii)** tanto sem quanto com erros de comunicação, a percentagem média de *deadlines* perdidas no mecanismo RT-WiFi manteve-se estável, mesmo com o aumento do número de estações TR, o que não ocorreu no mecanismo EDCA.

Pode-se assim concluir que o mecanismo RT-WiFi mantém um comportamento determinista no que diz respeito ao atraso médio. Os resultados mostraram que independente do número de estações TR, da carga imposta pelas estações NTR ou da possibilidade de haver ou não erros providos por interferência no ambiente o atraso médio é praticamente constante.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Standard for Information Technology - Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Std., Rev. do IEEE 802.11-1999, 2007.
- [2] D. Miorandi, E. Uhlemann, S. Vitturi, e A. Willig, "Guest Editorial: Special Section on Wireless Technologies in Factory and Industrial Automation, Part I," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 3, no. 2, pp. 95-98, 2007.
- [3] L. Lo Bello, G. A. Kaczynski, e O. Mirabella, "Improving the Real-Time Behavior of Ethernet Networks Using Traffic Smoothing," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 1, no. 3, pp. 151-161, 2005.
- [4] D. Miorandi e S. Vitturi, "Analysis of Master-Slave Protocols for Real-Time-Industrial Communications Over IEEE 802.11 WLANs," em *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2004, pp. 143-148.
- [5] IEEE Standard for Information Technology - Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements, Std., 2005.
- [6] R. Moraes, P. Portugal, F. Vasques, e R. Custódio, "Assessment of the IEEE 802.11e EDCA Protocol Limitations when Dealing with Real-Time Communication," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2010, p. 14 pages, 2010.
- [7] C. Casetti, C.-F. Chiasserini, M. Fiore, e M. Garetto, "Notes on the Inefficiency on 802.11e HCCA," Dipartimento de Elettronica, Politecnico di Torino, 2005.
- [8] J. Proenza e S. Vitturi, "Guest Editorial Special Section on Industrial Communication Systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 6, no. 3, pp. 365-368, 2010.
- [9] Y.-J. Wu, J.-H. Chiu, e T.-L. Sheu, "A modified EDCA with dynamic contention control for real-time traffic in multi-hop ad hoc networks," *Journal of Information Science and Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 1065-1079, 2008.
- [10] J. Villalón, P. Cuenca, L. Orozco-Barbosa, e A. Garrido, "B-EDCA: A QoS mechanism for multimedia communications over heterogeneous 802.11/802.11e WLANs," *Computer Communications*, vol. 31, no. 17, pp. 3905-3921, 2008.
- [11] R. Moraes, F. Vasques, P. Portugal, e J. A. Fonseca, "VTP-CSMA: A Virtual Token Passing Approach for Real-Time Communication in IEEE 802.11 Wireless Networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 3, no. 3, pp. 215-224, 2007.
- [12] J. Sobrinho e A. Krishnakumar, "Quality-of-Service in Ad Hoc Carrier Sense Multiple Access Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 8, pp. 1353-1368, 1999.
- [13] J. L. Sobrinho e A. Krishnakumar, "EQuB - Ethernet Quality of Service using Black Bursts," em *Proceedings of 23rd Annual Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 1998, pp. 286-296.
- [14] R. Moraes, F. Vasques, P. Portugal, e P. Souto, "A forcing collision resolution approach able to prioritize traffic in CSMA-based networks," *Computer Communications*, vol. 33, no. 1, pp. 54-64, 2010.
- [15] OPNET. (2011) O. Tech. OPNET. Available at: <http://www.opnet.com>.
- [16] IEEE Standard for Information Technology - Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band, Std., 1999.