

# Avaliação experimental do protocolo RT-WiFi em ambientes abertos

José R. Betiol Júnior<sup>1</sup>, Robson Costa<sup>2</sup>, Luciana de Oliveira Rech<sup>1</sup>, Ricardo Moraes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)  
Florianópolis/Araranguá – SC – Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)  
Lages – SC – Brasil

roque.betiol@posgrad.ufsc.br, robson.costa@ifsc.edu.br,  
{luciana.rech,ricardo.moraes}@ufsc.br

**Abstract.** *WiFi (IEEE 802.11 standard) networks are widely used in applications ranging from home environments systems to complex networked control systems (NCS). However, the extensions incorporated into the standard to provide Quality of Service (QoS) are still unable to guarantee time constraints for real-time (RT) communications requirements. This paper presents an experimental validation of the RT-WiFi protocol that was recently proposed and analyzed through simulation. The experimental results demonstrate the feasibility of implementing the RT-WiFi protocol and improving the QoS level of communications through a comparative analysis with the EDCA mechanism, which is a mechanism incorporated in the IEEE 802.11 standard to provide different levels of transmission priority of different types of traffic.*

**Resumo.** *As redes WiFi (padrão IEEE 802.11) são amplamente utilizadas em aplicações que variam desde sistemas em ambientes domésticos até complexos sistemas de controle via rede (NCS). Porém, as extensões incorporadas no padrão para prover Qualidade de Serviço (QoS) ainda são incapazes de garantir restrições temporais para comunicações com requisitos de tempo real (TR). Esse artigo apresenta a validação experimental do protocolo RT-WiFi que foi recentemente proposto e analisado através de simulação. Os resultados experimentais demonstram a factibilidade de implementação do protocolo RT-WiFi e a melhoria do nível de QoS das comunicações através de uma análise comparativa com o mecanismo EDCA, que é um mecanismo do padrão IEEE 802.11 para prover diferentes níveis de prioridade para a transmissão de diversos tipos de tráfego.*

## 1. Contextualização e motivações

Atualmente existe uma demanda por suporte à comunicação de Tempo Real (TR) utilizando tecnologias de comunicação sem fio. Isso vem sendo impulsionado pelas últimas tendências de tecnologias de automação, que são a Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT), sistemas ciber-físicos (*Cyber-Physical Systems* – CPS) e a Internet tátil,

que por consequência vem trazendo diversas soluções em sistemas industriais, de transporte, em processos de fabricação [Da Xu et al. 2014], processos de controle e automação [Song et al. 2008], saúde e sistemas biomédicos [Zhang et al. 2012], estruturas inteligentes [Li et al. 2013] e sistemas robóticos inteligentes [Han et al. 2013].

Um dos grandes problemas das tecnologias sem fio é o comportamento não-determinístico dos mecanismos de controle de acesso ao meio, onde o cumprimento das restrições temporais impostas pela comunicação de TR não são garantidas, tornando essas tecnologias pouco eficiente. No entanto, diversas melhorias têm sido propostas nos últimos anos para diminuir esses problemas. Os mecanismos presentes na emenda IEEE 802.11e foram incorporados ao protocolo IEEE 802.11 com a finalidade de prover garantias de QoS, incluindo diferentes prioridades para os pacotes de dados que trafegam pela rede. Porém, diversos trabalhos colocam a prova esses mecanismos [Mangold et al. 2003, Moraes et al. 2006, Cena et al. 2010, Betiol et al. 2018], mostrando que não é simples encontrar uma configuração adequada para cada cenário analisado. Portanto, não há garantias de que as restrições temporais de aplicações de TR, utilizando redes IEEE 802.11 sejam alcançadas, mesmo que a rede esteja operando com as funcionalidades de QoS habilitadas.

Em trabalhos anteriores, [Costa et al. 2010, Costa et al. 2011, Costa et al. 2012b, Costa et al. 2012a], foi apresentada a proposta do protocolo RT-WiFi. Este protocolo utiliza o mecanismo TDMA (*Time Division Multiple Access*) para prover melhor QoS na comunicação de TR em ambientes abertos<sup>1</sup>. Em simulações o protocolo RT-WiFi apresentou um desempenho melhor para a transmissão de tráfego de TR do que os mecanismos de QoS disponibilizados no padrão IEEE 802.11.

Com a motivação de realizar um estudo da comunicação de TR em redes IEEE 802.11 (WiFi), o presente trabalho apresenta uma validação experimental do protocolo RT-WiFi em ambientes abertos. Esse protocolo utiliza o mecanismo TDMA para evitar colisões entre os dispositivos de TR e um mecanismo de prioridades [Moraes et al. 2010] para garantir a comunicação de TR na presença de estações que estão transmitindo outros tipos de tráfego. Ressalta-se que até o momento, o mecanismo RT-WiFi tinha sido avaliado apenas em ambientes de simulação.

## **2. EDCA - *Enhanced Distributed Channel Access***

Com o objetivo de prover QoS nas redes IEEE 802.11, em 2005 foi publicada a emenda IEEE 802.11e, a qual incorporou o mecanismo HCF (*Hybrid Coordination Function*) na subcamada MAC (*Medium Access Control*). Essa função escalona o acesso ao canal alocando TXOPs (*Transmission Opportunities*) para cada estação. Cada intervalo TXOP é definido por um tempo de início e um período máximo de duração. Dessa maneira, múltiplos *frames* serão transmitidos com o TXOP obtido, tornando necessário que este seja disponibilizado por um dos dois mecanismos especificados pelo HCF, sendo um desses o mecanismo EDCA.

O mecanismo EDCA, por sua vez, acrescenta serviços de transmissão diferenciados com quatro categorias de acesso (AC). Cada categoria é mapeada com base nos oito

---

<sup>1</sup>Em um ambiente de comunicação aberto estações de tempo real (TR) e não tempo real (NTR) competem pelo acesso ao meio utilizando o mesmo canal de comunicação e em áreas geográficas sobrepostas.

níveis de prioridade definidos no padrão IEEE 802.1D, sendo estas utilizadas da seguinte forma:

- Tráfego BK (*Background*) com prioridades 1 e 2;
- Tráfego BE (*Best Effort*) com prioridades 0 e 3;
- Tráfego VI (*Video*) com prioridades 4 e 5;
- Tráfego VO (*Voice*) com prioridades 6 e 7.

Desta forma, quanto maior o valor atribuído maior será a prioridade. Portanto, o tráfego de voz (VO) possui o nível mais elevado de prioridade.

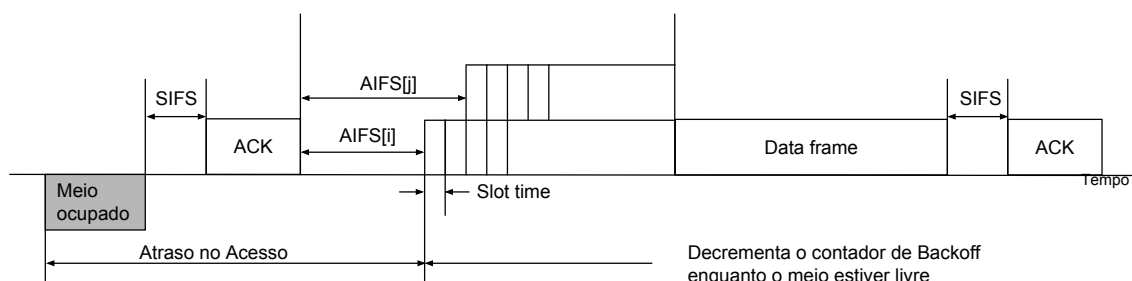
Diferentes níveis de serviço baseados em três mecanismos independentes são fornecidos a cada AC: AIFS (*Arbitration Interframe Space*), intervalo de tempo do TXOP e tamanho de CW (*Contention Window*). Para uma estação operando sob o EDCA, cada *frame* irá esperar que o meio permaneça livre durante o intervalo AIFS[AC]. O intervalo AIFS[AC] é obtido pela seguinte equação:

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime \quad (1)$$

onde AIFSN[AC] é um número inteiro positivo que deve ser maior ou igual a 2 para todas estações, exceto para o AP (*Access Point*) de QoS (QAPs), no qual esse valor deve ser maior ou igual a 1. Os parâmetros padrões definidos para o mecanismo EDCA são apresentados na Tabela 1. Os parâmetros  $aCW_{min}$  e  $aCW_{max}$  dependem das características da camada física (PHY), por exemplo, no padrão IEEE 802.11a os valores de  $aCW_{min}$  e  $aCW_{max}$  são 15 e 1023, respectivamente. A Figura 1 mostra a relação dos diferentes níveis de prioridade no acesso ao meio.

**Tabela 1. Parâmetros das categorias de acesso.**

AC	$CW_{min}$	$CW_{max}$	AIFSN	$TXOP_{max}^{a/g/n}$	$TXOP_{max}^b$
BK	$aCW_{min}$	$aCW_{max}$	7	0	0
BE	$aCW_{min}$	$aCW_{max}$	3	0	0
VI	$(aCW_{min} + 1)/2 - 1$	$aCW_{min}$	2	$3008\mu s$	$6016\mu s$
VO	$(aCW_{min} + 1)/4 - 1$	$(aCW_{min} + 1)/2 - 1$	2	$1504\mu s$	$3264\mu s$



**Figura 1. Relação dos IFS no mecanismo EDCA.**

O *Mecanismo de Controle de Admissão* tem como objetivo limitar a quantidade de tráfego admitida por uma classe de serviço para garantir QoS na comunicação existente e também garantir uma maior utilização dos recursos disponíveis. O EDCA suporta esse

controle apenas nas ACs de voz e vídeo. Um AP com essas funcionalidades pode exigir a determinadas estações um controle de admissão, indicando isso através do campo ACM (*Access Control Mandatory*), que permanece fixo para toda a rede.

Quando uma estação necessita estabelecer um fluxo de comunicação (*Traffic-Stream – TS*), a mesma solicita um TXOP ao AP enviando uma requisição ADDTS (*Add Traffic Stream*) contendo sua AC e a política de acesso do EDCA. Quando o AP recebe essa requisição (ADDTS), o mesmo pode aceitá-la ou rejeitá-la. Caso seja aceita, deve ser calculado o *Tempo no Meio* com base nas informações contidas no TSPEC (*Traffic Specification*). Esse valor deve ser enviado junto ao ADDTS.

### 3. Arquitetura RT-WiFi

A arquitetura do protocolo RT-WiFi é dividida em duas camadas como mostra a Figura 2. A camada inferior implementa um *Mecanismo de Controle de Acesso ao Meio* e a camada superior um *Mecanismo de Coordenação*. Essa arquitetura se baseia no mecanismo EDCA utilizando a topologia de rede infraestruturada, pela razão que essa topologia permite um melhor controle do algoritmo de escalonamento e controle de admissão, pois com um coordenador central é possível ter a visão total do tráfego transmitido no ambiente de comunicação.

O *Mecanismo de Controle de Acesso ao Meio* é implementado com base no mecanismo TSm (*Traffic Separation Mechanism*) [Moraes et al. 2010], o qual tem como principal objetivo aumentar a prioridade de acesso ao meio para o tráfego de tempo real nos momentos que ocorram colisões, de maneira a diminuir o comportamento não determinístico gerado pelo mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) presente na norma IEEE 802.11. A camada superior é responsável por garantir a QoS da rede, portanto nela está situada o *Mecanismo de Controle de Admissão*, que tem como objetivo controlar a admissão de novas TS na rede tempo real. Essa camada é implementada no AP, pois é a responsável pela gestão da arquitetura RT-WiFi.

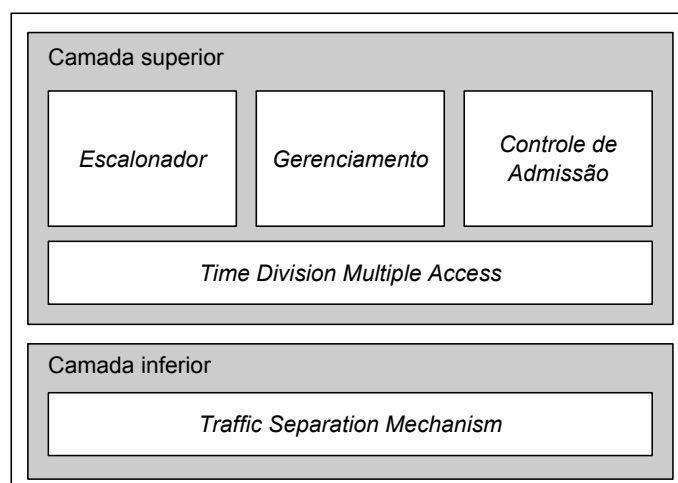


Figura 2. Arquitetura do Protocolo RT-WiFi [Costa et al. 2012b].

#### 3.1. Mecanismo de Controle de Acesso ao Meio

O *Mecanismo de Controle de Acesso ao Meio* tem como objetivo aumentar a prioridade no acesso ao meio para pacotes TR. Nessa camada se encontra o mecanismo TSm, que

utiliza o mecanismo FCR (*Forcing Collision Resolution*) para aumentar a prioridade de acesso ao meio de mensagens TR. Esse mecanismo desativa a função de *backoff* e utiliza a fila de voz.

O TSm é um mecanismo que atribui maior prioridade de acesso ao meio às estações de TR em relação a estações padrão (NTR). Esse mecanismo força a resolução de colisão do mecanismo MAC em favor da estação TR, alterando os parâmetros AIFS e CW nestas estações. Desta forma, quando ocorrer uma colisão entre uma estação TR e outra(s) estação(ões) não TR (NTR), apenas a(s) estação(ões) NTR deve(m) esperar um tempo aleatório para a retransmissão.

As estações NTR deverão esperar um intervalo referente ao tempo de *backoff* somado ao IFS da mensagem para então iniciar uma nova tentativa de transmissão. As estações TR transmitem seus pacotes utilizando os valores de IFS iguais aos valores definidos para o AIFS da categoria de voz da função EDCA.

Portanto, os valores de IFS utilizados para o tráfego *uplink* ( $AIFS_{[VO]}^{uplink}$ ) e *downlink* ( $AIFS_{[VO]}^{downlink}$ ) são definidos por:

$$AIFS_{[VO]}^{uplink} = aSIFSTime + 2 \times aSlotTime \quad (2)$$

$$AIFS_{[VO]}^{downlink} = aSIFSTime + aSlotTime \quad (3)$$

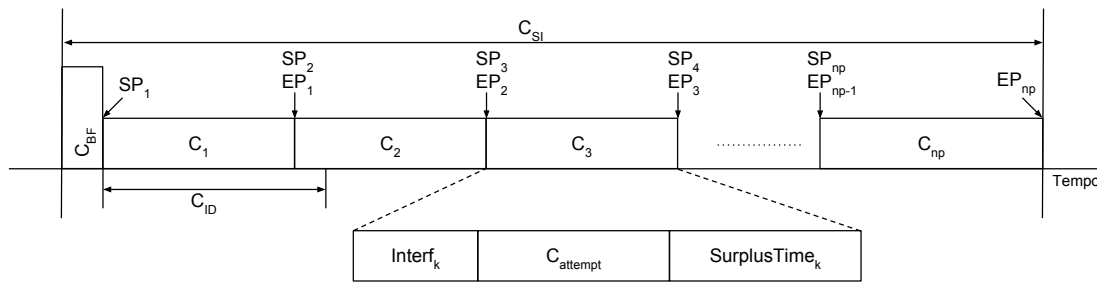
Esse mecanismo possui uma limitação, se duas ou mais estações TR tentam acesso ao meio no mesmo momento, poderão ocorrer múltiplas colisões até que os pacotes sejam descartados após atingir o máximo de tentativas de retransmissão. Para contornar essa limitação é utilizada uma *Camada de Coordenação*, implementando um mecanismo TDMA, que separa as transmissões de cada estação TR em *slots* independentes.

### 3.2. Camada de Coordenação

A Camada de Coordenação do RT-WiFi implementa um esquema TDMA para serializar a transmissão das estações TR, permitindo a coexistência entre várias estações TR operando em um ambiente aberto de comunicação. Conseqüentemente, isso possibilita o suporte à comunicação de TR apenas a uma parcela de estações com QoS habilitado, sem a necessidade de atualizar todos os dispositivos de comunicação.

Durante o período em que o mecanismo de resolução de colisões é executado a comunicação é organizada em ciclos TDMA. Cada um desses ciclos é denominado BI (*Beacon Interval*) e o tamanho de cada ciclo é definido por  $C_{SI}$ . Cada ciclo é iniciado com o envio de um BF (*Beacon Frame*) gerado pelo AP para sincronizar todas as estações TR. Desta forma, cada estação de TR ( $i = 1, 2, \dots, np$ ); onde  $np$  representa a quantidade total de estações de TR, irá transmitir seus dados em seu determinado slot de tempo ( $C_i$ ), como ilustra a Figura 3.

Cada slot é definido pelos limites inicial SP (*Start Point*) e final EP (*End Point*), e deve ter um tamanho suficiente para a transmissão de ambos os fluxos de dados (*uplink* e *downlink*), além de possíveis retransmissões que ambos os fluxos possam necessitar para suportar erros de comunicações e um intervalo reservado a possíveis interferências causadas por outras redes. Esses intervalos são denominados  $C_{attempt}$ ,  $SurplusTime_k$  e  $Interf_k$  respectivamente.



**Figura 3. Intervalo de serviço [Costa et al. 2010].**

A *Camada de Coordenação* implementa mais três outros mecanismos [Costa et al. 2012b], como mostrado na Figura 2. O primeiro mecanismo, denominado Escalonador e detalhado na seção 3.3, consiste em um algoritmo de escalonamento de tempo real não-preemptivo, que é utilizado para garantir os requisitos de tempo e para permitir um gerenciamento dinâmico na alocação de cada fluxo de dados. Para informar a sequência de escalonamento, a Camada de Coordenação insere uma lista de escalonamento no BF. Essa lista contém os limites de tempo para cada fluxo de dados. Após cada estação de TR receber o BF, elas analisarão a sequência de escalonamento para então transmitir em seus determinados intervalos de tempo.

O *Mecanismo de Gerenciamento* (Seção 3.5) tem como principal objetivo avaliar os tempos de bloqueio que possam afetar um fluxo de dados inserido no BI, de maneira a otimizar dinamicamente o tamanho de cada fluxo de dados. O *Controle de Admissão* (Seção 3.4) é responsável por obter informações sobre as estações quando as mesmas se conectam ao AP. Quando uma nova estação TR ingressa na rede RT-WiFi é necessário que essa estação envie seus requisitos de tráfego ao AP utilizando o campo TSPEC. Após o AP receber as informações necessárias, como tamanho do MSDU (*MAC Service Data Unit*), período de geração e a taxa de transmissão, o mesmo irá computar um novo BI para definir os limites (SP e EP) em que cada estação deverá transmitir.

### 3.3. Escalonador

Durante a execução da Camada de Coordenação, cada estação  $TR_i$  só pode transmitir dentro de seu determinado intervalo de transmissão, ou seja, dentro do intervalo  $SP_i$  e  $EP_i$  ( $C_i$ ). Cada pacote deve ser transmitido dentro de uma única TS, pois dessa maneira torna mais simples o algoritmo de escalonamento e ainda mantém a compatibilidade com o modelo de tráfego adotado pela arquitetura RT-WiFi. Independente do tamanho desse intervalo, a estação TR deve escalonar os pacotes a transmitir contando com essa limitação. Portanto pacotes que possam ter *deadlines* perdidos devem ser descartados antes de serem alocados para transmissão.

Normalmente a transmissão de qualquer pacote TR terminará antes do  $EP_i$ , porém em certas condições, como altas cargas na rede, o tempo de transmissão do pacote pode ultrapassar essa delimitação. Quando esse caso acontecer, a transmissão não será cancelada, mas também não ocorrerão retransmissões desse pacote. O tratamento feito nesse pacote deve ser realizado no próximo momento que a estação obter acesso ao meio.

Essa situação também faz com que o intervalo de tempo da próxima estação  $TR_{i+1}$  seja sobreposto. No entanto isso não interfere no funcionamento correto do RT-WiFi,

pois uma estação só irá iniciar a transmissão se o meio estiver livre, gerando um atraso no início da transmissão do pacote subsequente. A parte negativa dessa situação é que essa sobreposição de  $C_i$  pode ser considerado um *overhead* caso a ocupação do meio seja considerada baixa.

A lista de escalonamento é inserida na mensagem de *beacon* e é gerada pelo algoritmo de escalonamento utilizando como base as informações obtidas pelo *Mecanismo de Controle de Admissão*. Essa lista contém o endereço MAC, identificador da estação e os respectivos valores de  $SP_i$  e  $EP_i$ . Esses valores podem ser alterados a cada ciclo TDMA de forma a garantir uma maior flexibilidade ao RT-WiFi.

Cada estação TR sincroniza seu relógio ao receber o *beacon* e então busca na lista de escalonamento quais os intervalos de tempo referem-se às suas TS. Em seguida cada estação escalona seus pacotes de forma a alocá-los em cada TS disponível. Caso alguma estação não receba a mensagem de *beacon*, a mesma não alocará nenhum *slot* e não transmitirá durante a rodada TDMA corrente. Caso a estação receba o *beacon* e não tenha nenhum *slot* alocado, a mesma irá apenas sincronizar seu relógio.

O RT-WiFi permite a utilização de diferentes algoritmos de escalonamento, sem a necessidade de reestruturações em sua arquitetura. Sendo assim, essa flexibilidade permite a quem for utilizar o protocolo escolher o algoritmo que melhor se adapta a seu cenário.

### 3.4. Mecanismo de Controle de Admissão

Para evitar sobrecarga de tráfego TR, o *Mecanismo de Controle de Admissão* obriga as estações que queiram transmitir mensagens TR a solicitarem a admissão de uma TS. Essa TS especifica o fluxo de dados pelo qual a mensagem vai percorrer, ou seja, a origem e destino do pacote. Para realizar esse pedido, a estação deve enviar os respectivos requisitos temporais e características específicas. Assim o AP realizará um teste de escalonabilidade para admitir ou não o TS requisitado pela estação.

O pedido de admissão de uma TS é realizado através de uma requisição ADDTS (*Add Traffic Stream*) ao  $AP_{TR}$  contendo as seguintes informações TSPEC:

- período de geração das mensagens ( $P_k$ );
- tamanho ( $L_k$ ) da MPDU (*MAC Protocol Data Unit*);
- intervalo de inatividade ( $I_k$ );
- tipo de requisição ( $CT_k$ );
- tempo extra de alocação ( $SurplusTime_k$ ).

O tipo de requisição (CT) pode conter três valores diferentes, esses valores determinam se a transmissão de tráfego TR é de alta ou baixa prioridade:

- **Alta:** solicita alocação de recursos para a transmissão de tráfegos de alta prioridade;
- **Alta/Baixa:** solicita alocação de recursos para transmissão de tráfegos de alta prioridade, porém, caso não seja possível alocar o recurso nessa categoria, solicita alocação para transmissão de tráfegos de baixa prioridade;
- **Baixa:** Solicita alocação de recursos para transmissão de tráfego de baixa prioridade.

O tempo extra de alocação refere-se ao tempo adicional solicitado ao Mecanismo de Controle de Admissão para alocar uma TS. Esse valor é baseado no número de retransmissão que cada fluxo de dados pode realizar. Portanto o valor de  $SurplusTime_k$  se dá pela seguinte equação:

$$SurplusTime_k = (C_{Attempt}^{uplink} \times RN_K^{uplink}) + (C_{Attempt}^{downlink} \times RN_K^{downlink}) \quad (4)$$

onde  $RN_K^{uplink}$  e  $RN_K^{downlink}$  representam o número de retransmissões utilizadas pela  $TK_k$  e os parâmetros  $C_{Attempt}^{uplink}$  e  $C_{Attempt}^{downlink}$  são os tempos necessários para efetuar as transmissões com sucesso de uma única mensagem de dados. Os valores dos tempos de transmissão são dados pelas seguintes equações:

$$C_{Attempt}^{uplink} = AIFS_{[VO]}^{uplink} + C_{data}[L_k] + SIFS + C_{ack} \quad (5)$$

$$C_{Attempt}^{downlink} = AIFS_{[VO]}^{downlink} + C_{data}[L_k] + SIFS + C_{ack} \quad (6)$$

### 3.5. Gerenciador

Com a finalidade de otimizar o tamanho dos *slots* alocados para cada TS, o *Mecanismo de Controle de Admissão* os redimensiona com base num estimador, que mede o atraso sofrido durante os fluxos de dados nas rodadas TDMA. Esse valor é obtido a partir da soma do atraso no acesso ao meio com o atraso gerado por retransmissões (resultantes de colisões ou erros na transmissão).

Pelo fato do RT-WiFi se basear numa arquitetura infraestruturada, é possível que o *Mecanismo de Controle de Admissão* verifique a origem das transmissões efetuadas dentro de cada *slot*, assim possuirá um histórico e irá prever o tempo necessário para que cada TS admitida pelo sistema possa efetuar a transmissão com sucesso, calculando o tempo de transmissão *uplink* de uma TS a partir do tempo entre o início de seu *slot* e o início da transmissão de um pacote finalizado com sucesso.

Essa topologia também permite que o tempo de *downlink* de uma TS possa ser calculado pelo *Mecanismo de Controle de Admissão* com base no tempo que o  $AP_{TR}$  necessita para encaminhar uma mensagem com sucesso. A contabilização desse tempo é iniciada após o envio da mensagem de ACK para a estação de origem e finaliza no início de uma transmissão com sucesso para a estação de destino.

## 4. Validação experimental

Nesta seção apresenta-se como foi realizada a implementação do protocolo RT-WiFi em dispositivos físicos, a construção de um cenário adequado para a sua avaliação e a obtenção dos resultados experimentais. O objetivo desta validação é demonstrar, através de uma análise comparativa do RT-WiFi com o mecanismo EDCA, a factibilidade de implementação do protocolo RT-WiFi e que este fornece um melhor nível de QoS para aplicações com restrições temporais.



## 4.1. Implementação

O protocolo RT-WiFi foi implementado modificando o driver de placas de rede sem fio comerciais do modelo TP-Link TL-WDN4800, que possui o *chipset* Atheros AR9287 e o módulo de código aberto ath9k<sup>2</sup>, que por sua vez é compatível com o *framework* mac80211<sup>3</sup>. O sistema operacional utilizado nas estações foi o Ubuntu com a versão de *kernel* 3.13 e o pacote *Backports* na versão 3.13.2.

A implementação do protocolo partiu de um *fork* da implementação do protocolo desenvolvido para o trabalho de [Wei et al. 2013] disponível no Github<sup>4</sup>. Esse projeto já havia implementado o mecanismo TDMA e um escalonador fixo, componentes esperados na arquitetura do protocolo desenvolvido neste trabalho, então foi necessário realizar algumas modificações para que o seu funcionamento fosse compatível com o protocolo RT-WiFi, descrito na seção 3.

O principal objetivo da implementação do protocolo foi replicar um funcionamento muito próximo ao proposto para o ambiente da avaliação experimental. Para isso foi preciso adequar a abstração de duas camadas do RT-WiFi no código existente.

A camada inferior consiste em aumentar a prioridade de acesso ao meio dos pacotes do tipo voz (*voice*). Para isso, os valores máximo e mínimo das variáveis da janela de contenção (*aCWmax* e *aCWmin*) foram fixados com o valor zero para tráfego deste tipo. Assim, as estações e o AP que utilizarem o RT-WiFi irão escutar o meio pelo menor período possível antes de iniciar a transmissão, mesmo em casos de colisões. Esta estratégia é equivalente a desligar o mecanismo de *backoff* aleatório do padrão IEEE 802.11.

A camada superior implementa o mecanismo TDMA e escalona os pacotes a serem transmitidos utilizando o algoritmo FIFO (*First in First out*). A implementação do módulo *Gerenciamento* foi realizada de forma simplificada, sem a alocação dinâmica de *slots* para cada TS, mas sim gerando TS com período fixo e pré-calculado para cada estação. O *Controle de Admissão* foi abstraído de tal forma que o tamanho de cada  $C_i$  foi fixado e pré-determinado pela quantidade de estações de cada cenário avaliado. Desta forma, cada estação fica responsável por escalonar seus pacotes para serem transmitidos nesse período.

A sincronização dos temporizadores das estações com o temporizador do AP é realizada pela transmissão do *beacon*. Cada estação utiliza o momento de recebimento do *beacon* como parâmetro para calcular em qual intervalo de tempo deve ser realizada as suas respectivas transmissões. Como o fluxo de mensagem da arquitetura RT-WiFi necessariamente exige que a mensagem seja transmitida para o AP e também sejam encaminhadas do AP para a estação de destino, metade do tempo de um BI é destinado para o tráfego *upstream* e a outra metade para o tráfego *downstream*. Devido a dificuldades na implementação o TS reservado a uma estação, que originalmente tem capacidade de possuir tráfego *upstream* e *downstream*, foi dividido em dois TS, sendo um reservado ao tráfego *upstream* e outro ao *downstream*.

---

<sup>2</sup><https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/drivers/ath9k>

<sup>3</sup><https://www.kernel.org/doc/html/latest/driver-api/80211/>

<sup>4</sup><https://github.com/AlexisTM/RT-WiFi>

## 4.2. Ambiente de avaliação

A validação experimental do protocolo foi realizada em um ambiente onde duas redes (uma TR e outra NTR) operam em um mesmo canal de comunicação e em uma mesma área de cobertura. A rede TR é composta por quatro estações conectadas a um  $AP_{TR}$ , tal que todos os equipamentos utilizam o protocolo RT-WiFi ou o mecanismo EDCA definido pelo padrão IEEE 802.11. A rede NTR é composta por duas estações conectada a um  $AP_{NTR}$  utilizando o mecanismo EDCA. Desta forma, ambas as redes têm suas estações conectadas aos seus respectivos APs formando uma topologia estrela (Figura 4(a)). As estações RT-WiFi estão configuradas para transmitir pacotes de 45 bytes nas taxas de transmissão de 11.125Kbps, 22.25Kbps, 33.375Kbps e 44.5Kbps. As estações NTR têm o papel de impor carga na rede, sendo assim, cada estação transmite pacotes de 1470 bytes e a taxa de transmissão somadas imposta por essas estações variam de 0 a 32Mbps, incrementando 3,2Mbps a cada cenário de avaliação. Para cada cenário avaliado foram executadas trinta repetições com duração de dez segundos.

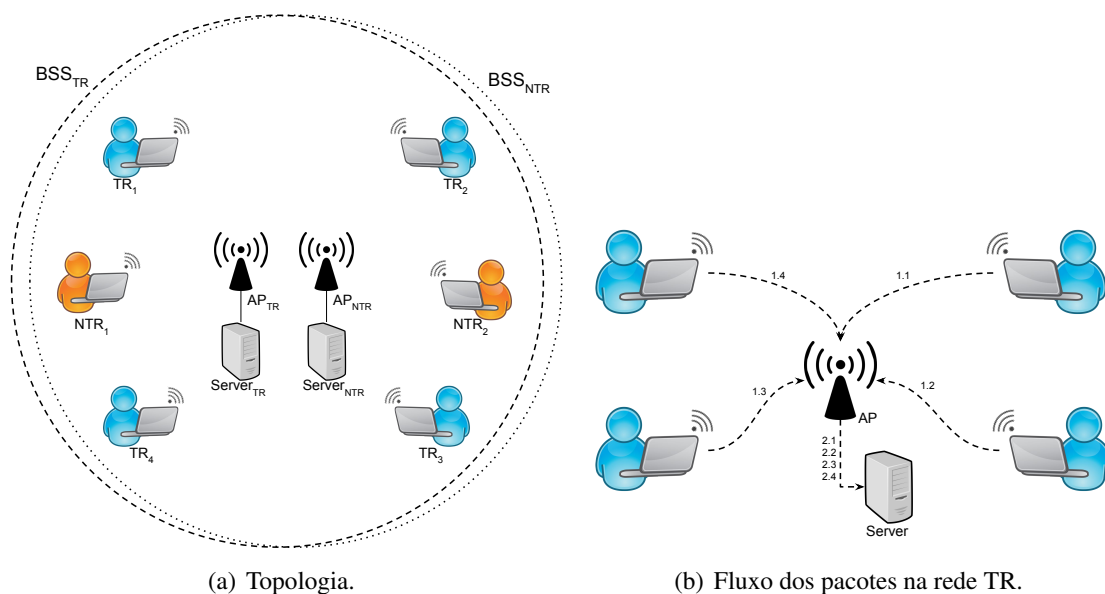


Figura 4. Ambiente de avaliação.

Para compor a rede TR foram utilizados cinco computadores com o *driver* RT-WiFi implementado. Uma das máquinas foi configurada como AP (utilizando o *software hostapd*<sup>5</sup>) e as outras quatro máquinas funcionaram como estações. Para compor a rede NTR foram utilizados um AP e duas estações com adaptadores sem fio USB de modelos distintos.

Para a geração de tráfego de TR e NTR foi utilizada a ferramenta *iperf*<sup>6</sup>, a qual é capaz de gerar pacotes de diferentes tipos e tamanhos, assim como determinar a taxa máxima de transmissão. O *iperf* funciona com base no modelo cliente/servidor, onde uma estação deve enviar pacotes destinados a outra estação. Para elevar a carga imposta pela rede NTR, aumentou-se a taxa de transmissão de cada estação NTR.

<sup>5</sup><https://github.com/jmalinen/hostap/tree/master/hostapd>

<sup>6</sup><https://iperf.fr/>

O fluxo de transmissão dos pacotes TR durante os experimentos é representado pela Figura 4(b). Antes da execução de cada experimento os relógios das estações e servidor são sincronizados. As estações transmitem pacotes para o AP dentro do seu determinado ST (passos 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4), o AP encaminha os pacotes para o servidor (passos 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4), onde é confirmado o recebimento dos pacotes. Como o AP e o servidor são fisicamente o mesmo computador, não é considerado nenhum atraso adicional nos passos 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4. Portanto, o atraso obtido consiste apenas na comunicação sem fio.

Os experimentos foram efetuados no Laboratório de Pesquisa de Sistemas Distribuídos (LaPeSD) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Como esse é um ambiente composto por outras diversas redes WiFi, foi escolhido o canal que possuía a menor interferência possível e os experimentos foram executados durante períodos de baixa utilização das redes WiFi (noite e finais de semana), a fim de reduzir ao máximo as interferências externas, ou seja, o mecanismo RT-WiFi foi avaliado em um ambiente aberto e com a presença principal da rede externa (NTR), que foi controlada durante os testes.

### 4.3. Critérios de avaliação

Foram avaliados as seguintes métricas durante a execução dos experimentos:

- *taxa de perda de pacotes* - relação entre pacotes que não chegaram ao destino ou que não cumpriram o *deadline* com o total de pacotes transmitidos;
- *atraso médio* - tempo médio necessário para transmitir um pacote. Medido desde a geração do pacote na aplicação até a entrega do mesmo ao destino. Esta métrica considera todos os pacotes recebidos com sucesso no destino, ou seja, são excluídos os que não cumpriram o *deadline*;
- *jitter* - variação no atraso médio.

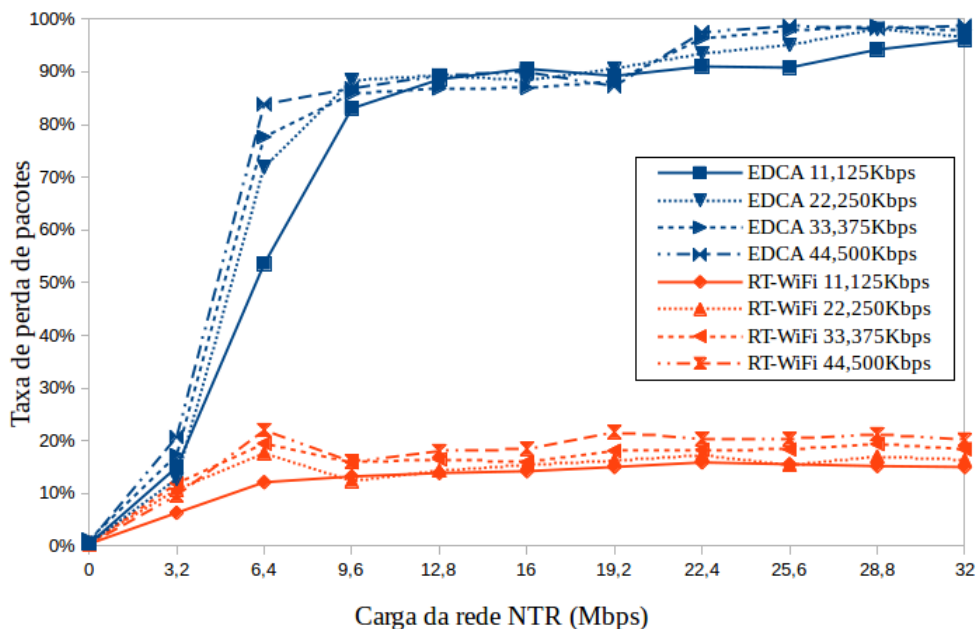
Esses critérios são comumente utilizados em trabalhos científicos que têm como objetivo avaliar o funcionamento de algum mecanismo de comunicação em redes sem fio. Os dados obtidos servirão de comparativo entre o protocolo RT-WiFi e o mecanismo EDCA.

### 4.4. Resultados

Os cenários avaliados são representados pela combinação da taxa de transmissão das estações TR e a carga na rede que as estações NTR impuseram, isso resultou em quarenta e quatro variações. Foram executados 30 repetições em cada uma dessas variações e cada repetição consistiu na transmissão periódica de pacotes durante dez segundos.

Analisando o critério taxa de perda de pacotes, o comportamento dos cenários quando alterada a taxa de transmissão das estações TR se mostrou semelhante. Quando não há carga da rede NTR ambos os mecanismos, EDCA e RT-WiFi, apresentam uma taxa de perda de pacotes baixa, sendo o maior caso de 1,22%. Porém, quando a rede NTR começa a impor carga nota-se uma diferença entre esses protocolos. Quando a carga imposta pela rede NTR é de 3,2 Mbps, a taxa de perda de pacotes quando utilizado o EDCA fica entre 12,78% e 20,71%, enquanto que para o RT-WiFi fica entre 9,63% e 14,69%. Quando a carga da rede NTR é maior que 6,4 Mbps a diferença fica ainda mais

evidente, como pode ser observado na Figura 5, chegando a apresentar uma diferença de 81,20% no cenário onde as estações TR transmitem a uma taxa de 22,250 Kbps e a carga da rede NTR é de 28,8 Mbps.



**Figura 5. Taxa de perda de pacotes.**

Durante a execução dos experimentos, notou-se que a quantidade de pacotes enviados, ou seja, transmitidos pela origem mas não necessariamente recebidos pelo destino, foi consideravelmente menor quando utilizado o mecanismo EDCA.

O atraso médio apresentado mostrou-se menor em todos os casos de uso do protocolo RT-WiFi comparado aos resultados obtido utilizando o mecanismo EDCA, como pode ser observado na Figura 6. Vale ressaltar que o atraso médio contabiliza apenas o atraso dos pacotes que cumpriram o *deadline*.

O *jitter* pode ser observado de forma indireta a partir do desvio padrão do atraso médio. Analisando novamente a Figura 6 é possível observar que na maioria dos casos o desvio padrão obtido quando utilizado o mecanismo EDCA é consideravelmente maior ao do protocolo RT-WiFi. Esse comportamento já era esperado, pois a utilização do mecanismo TDMA contido no protocolo RT-WiFi provê um comportamento determinístico na comunicação.

#### 4.5. Considerações finais

Os resultados apresentados neste trabalho mostraram que o protocolo RT-WiFi provê maior QoS que o mecanismo EDCA para comunicações de tempo real. Enquanto a média da taxa de perda de pacotes utilizando o mecanismo EDCA foi de 88,91%, o protocolo RT-WiFi apresentou taxa de perda de pacotes de 15,89%. Mesmo nas condições mais extremas, ou seja, quando a carga imposta pela rede NTR era de 32Mbps, o protocolo RT-WiFi garantiu uma maior entrega de pacotes cumprindo os *deadlines*. O caso mais expressivo é apresentado quando a taxa de transmissão das estações TR é de 44,5Kbps,

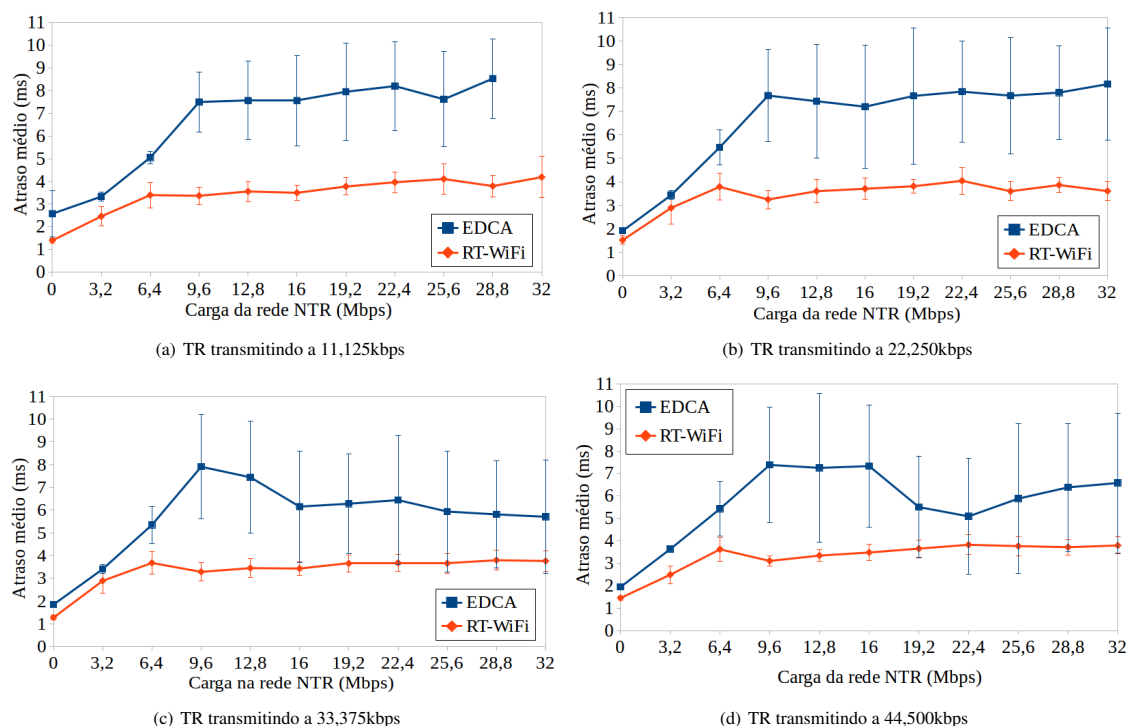


Figura 6. Atraso médio.

onde a média de *deadlines* cumpridos foi em torno de 3899 e 21 pacotes, respectivamente, nas redes RT-WiFi e EDCA. Portanto, o valor obtido utilizando o mecanismo EDCA representa apenas 0,54% da quantidade de pacotes transmitidos com sucesso na rede.

#### 4.6. Agradecimentos

Este trabalho teve auxílio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil (400508/2014-1, 401364/2014-3).

#### Referências

- Betiol, J. R. J., Lau, J., de Oliveira Rech, L., Analcia, S. M., and Moraes, R. (2018). Experimental evaluation of the coexistence of IEEE 802.11 EDCA and DCF mechanisms. In *IEEE 23th Conference on Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 1–6.
- Cena, G., Seno, L., Valenzano, A., and Zunino, C. (2010). On the performance of IEEE 802.11e wireless infrastructures for soft-real-time industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(3):425–437.
- Costa, R., Portugal, P., Moraes, R., and Vasques, F. (2012a). An admission control mechanism to handle real-time traffic in IEEE 802.11 networks in open communication environments. In *9th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, pages 63–66.
- Costa, R., Portugal, P., Vasques, F., and Moraes, R. (2010). A TDMA-based mechanism for real-time communication in IEEE 802.11 e networks. In *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pages 1–9.

- Costa, R., Portugal, P., Vasques, F., and Moraes, R. (2012b). Comparing RT-WiFi and HCCA approaches to handle real-time traffic in open communication environments. In *IEEE 17th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, pages 1–8.
- Costa, R., Portugal, P., Vasques, F., Moraes, R., and Custódio, R. F. (2011). A coordination layer to handle real-time communication in Wi-Fi networks with uncontrolled traffic sources. In *IEEE 36th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 263–266.
- Da Xu, L., He, W., and Li, S. (2014). Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 10(4):2233–2243.
- Han, S., Mok, A. K., Meng, J., Wei, Y.-H., Huang, P.-C., Leng, Q., Zhu, X., Sentis, L., Kim, K. S., and Miikkulainen, R. (2013). Architecture of a cyberphysical avatar. In *Proceedings of the ACM/IEEE 4th International Conference on Cyber-Physical Systems*, pages 189–198.
- Li, B., Sun, Z., Mechitov, K., Hackmann, G., Lu, C., Dyke, S. J., Agha, G., and Spencer, B. F. (2013). Realistic case studies of wireless structural control. In *ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS)*, pages 179–188.
- Mangold, S., Choi, S., Hiertz, G. R., Klein, O., and Walke, B. (2003). Analysis of IEEE 802.11 e for QoS support in wireless LANs. *IEEE wireless communications*, 10(6):40–50.
- Moraes, R., Portugal, P., and Vasques, F. (2006). Simulation analysis of the IEEE 802.11 e EDCA protocol for an industrially-relevant real-time communication scenario. In *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pages 202–209.
- Moraes, R., Vasques, F., Portugal, P., and Souto, P. F. (2010). A forcing collision resolution approach able to prioritize traffic in CSMA-based networks. *Computer Communications*, 33(1):54–64.
- Song, J., Han, S., Mok, A., Chen, D., Lucas, M., Nixon, M., and Pratt, W. (2008). WirelessHART: Applying wireless technology in real-time industrial process control. In *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'08)*, pages 377–386.
- Wei, Y.-H., Leng, Q., Han, S., Mok, A. K., Zhang, W., and Tomizuka, M. (2013). RT-WiFi: Real-time high-speed communication protocol for wireless cyber-physical control applications. In *IEEE 34th Real-Time Systems Symposium (RTSS)*, pages 140–149.
- Zhang, W., Zhu, X., Han, S., Byl, N., Mok, A. K., and Tomizuka, M. (2012). Design of a network-based mobile gait rehabilitation system. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 1773–1778.