DANILO DE SOUZA MIGUEL

Análise do Padrão IEEE 802.11g Para a Comunicação do Sistema de Controle Distribuído de Semáforos.

São Paulo

2015

DANILO DE SOUZA MIGUEL

Análise do Padrão IEEE 802.11g Para Comunicação de um Sistema de Controle Distribuído de Semáforos.

> Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do titulo de Mestre em Ciências

São Paulo

2015

DANILO DE SOUZA MIGUEL

Análise do Padrão IEEE 802.11g Para Comunicação de um Sistema de Controle Distribuído de Semáforos.

> Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do titulo de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Sistemas Digitais

Orientador: Prof. Dr. André Riyuiti Hirakawa

São Paulo

2015

À minha mãe e toda minha família, à Andrelina e nosso filho Felipe, verdadeiras motivações e fiéis incentivadores deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A família por toda compreensão e apoio, principalmente nos momentos de dificuldade e fraqueza.

Aos amigos e colegas de laboratório, pelas contribuições e principalmente por serem bom ouvintes.

Ao orientador Prof. Dr. André Riyuiti Hirakawa pela orientação, pela atenção e pela compreensão durante todo o trabalho.

RESUMO

Este trabalho propõe a análise da comunicação sem fio para um sistema de controle distribuído de semáforos, a partir da revisão das literaturas, realização de simulações e experimentos, os quais consideram as especificações estabelecidas para o sistema de semáforos. As simulações e os experimentos se baseiam na avaliação do comportamento da comunicação perante a alteração de alguns parâmetros de configuração da rede. O estudo apresentado envolve análises relacionadas ao padrão IEEE 802.11g e às definições da camada física apresentadas nas especificações do padrão. Os métodos utilizados envolvem o estudo e experimentação de parâmetros relacionados à potência de transmissão e recepção, além de análise dos esquemas de modulação utilizados pelo padrão IEEE 802.11g. A metodologia aplicada a este trabalho envolve o conhecimento das características e capacidade dos esquemas de modulação responsáveis pela definição das taxas de transmissão. As análises mostram que a possibilidade de adequação dos parâmetros de configuração de rede, levando em consideração o cenário de aplicação, pode ser um fator essencial para o bom desempenho de todo o sistema.

Palavras-Chave: IEEE 802.11g. Controle distribuído de semáforos. Esquema de modulação. Taxas de dados. Potência de Transmissão.

ABSTRACT

This work proposes the analysis of wireless communication for a distributed control system of traffic lights, from the review of the literature and conducting simulations and experiments, which consider the specifications established for traffic light system. The simulations and experiments are based on the evaluation of the communication behavior towards changing some network configuration parameters. The study presented involves analysis related to the IEEE 802.11g standard and definitions of the physical layer shown in standard specifications. The methods used involve the study and testing of parameters related to power transmission and reception, and analysis of modulation schemes used by the IEEE 802.11g standard. The methodology applied to this work involves the knowledge of the characteristics and capacity of modulation schemes responsible for setting transmission rates. The analyses show that the possibility of adaptation network configuration parameters considering the application scenario may be an essential factor to the performance of the entire system.

Keywords: IEEE 802.11g. Distributed control of traffic lights. Modulation scheme. Data rates. Power Transmission.

1.	IN	TRODUÇÃO	12	
1	.1.	OBJETIVO		15
2.	RE	EVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15	
2	.1.	Discussões sobre a revisão bibliográfica		20
3.	ΤE	CNOLOGIAS WIRELESS	21	
3	.1.	Bluetooth		21
3	.2.	ZigBee		21
3	.3.	Wireless Hart		21
3	.4.	ISA100		22
3.5.	Ρ	PADRÃO IEEE 802.11	22	
3	.5.1	. IEEE 802.11b		23
3	.5.2	. IEEE 802.11a		23
3	.5.3	. IEEE 802.11g		23
	3.5	5.3.1. Características e Considerações do padrão IEEE 802.11g		24
3	.5.4	Arquitetura do Padrão IEEE 802.11		25
3	.5.5	. Camada Física do Padrão IEEE 802.11		27
	3.5	5.5.1. Infrared (IR)		27
	3.5	5.5.2. Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)		27
	3.5	5.5.3. Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)		27
	3.5	5.5.4. Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)		28
	Fig	gura 3 - Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)		29
3	.6.	Análise das Tecnologias		29
4.	ΤÉ	CNICAS DE MODULAÇÃO	30	
4	.1.	Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK)		30
4	.2.	Binary phase-shift keying (BPSK)		30
4	.3.	Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)		31
4	.4.	Complementary Code Keying (CCK)		32
4	.5.	Quadrature Amplitude Modulation (QAM)		33
5.	ME	EDIA ACCESS CONTROL (MAC) DO PADRÃO IEEE 802.11	33	
5	.1.	Intervalos		34
6.	LIN	MITES DE ATRASO E VAZÃO	36	
7.	ME	ETODOLOGIA	37	
7	.1.	Cenário de Aplicação		39

SUMÁRIO

8.	SIN	/IULAÇÃO	
8	.1.	Parâmetros utilizados nas simulações:	40
8	.2.	Resultados das Simulações	41
8	.3.	Discussão sobre as simulações	42
9.	TE	STES EXPERIMENTAIS	
9	.1.	Primeiro Cenário de Testes - Indoor 1	43
	9.1	.1. Configurações/Dispositivos utilizadas no cenário de testes Indoor 1:	44
	9.1	.2. Resultados – Cenário Indoor 1	44
	9.1	.3. Discussão Cenário – Indoor 1	45
9	.2.	Segundo Cenário de Testes - Indoor 2	45
	9.2	.1. Configurações/Dispositivos utilizadas no cenário de testes Indoor 2:	46
	9.2	.2. Resultados do Cenário Indoor 2	46
9	.3.	Discussão cenário Indoor 2	52
10.	D	ISCUSSÃO DOS RESULTADOS TESTES EXPERIMENTAIS	
11.	N	Iodelo Analítico de comunicação54	
12.	С	ONCLUSÃO	
	13.	REFERÊNCIAS:	60

GLOSSÁRIO

- GFMAS Geometric Fuzzy Multiagent System
- DEGs Distributed energy generators
- DCF Distributed Coordination Function
- DR Demand Response
- CW Contention Window
- DSSS Direct Sequence Spread Spectrum
- FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum
- RTS/CTS Request To Send/Clear To Send
- EDCA Enhanced Distributed Coordination Function
- TCP Transmission Control Protocol
- MAC Media Access Control
- QOS Quality of Service
- QAM Quadrature Amplitude Modulation
- QPSK Quadrature Phase-Shift Keying
- BPSK Binary Phase-Shift Keying
- CCK Complementary Code Keying
- OFDM Orthogonal frequency-division multiplexing
- BER Bit Error Rate
- SNR -Signal-to-Noise Ratio
- ISA- International Society of Automation
- EVM Error Vector Magnitude

- BSS Basic Service Set
- DS Distribution System
- **AP- Access Point**
- IR infrared
- ISM Industrial, Scientific and Medical)
- PCF Point Coordination Function
- IFSs Interframe Spaces
- SIFS Short Interframe Space
- CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
- BC Backoff Counter
- ICMP Internet Control Message Protocol
- RTT Round Tripe Time

1. INTRODUÇÃO

Atualmente vive-se em um mundo de constantes mudanças no qual as cidades crescem em um ritmo acelerado e enfrentam dificuldades para acompanhar o ritmo de desenvolvimento nos diversos setores da sociedade. O crescimento desordenado das cidades gera uma série de problemas para a sociedade, tais como trânsito caótico, dificuldades no transporte, saúde, dentre outros. Em paralelo, com o crescimento das cidades, destaca-se o desenvolvimento e a expansão da tecnologia, cada vez mais presente e indispensável na vida dos cidadãos.

Dessa maneira, a tecnologia se torna uma aliada na tentativa de amenizar os problemas causados pelo crescimento acelerado das cidades. Diversos trabalhos mostram a inserção da tecnologia nos processos da estrutura das cidades, como pode ser notado em (CARVALHO; COPETTI; FILHO, 2011) que propõe um sistema computacional com o objetivo de conectar os pacientes, em suas casas, com os profissionais de saúde, para demonstrar a viabilidade da proposta, foi implementado um protótipo pelo qual se conclui que o sistema proposto atende às expectativas em relação ao acompanhamento da evolução do tratamento do paciente em sua casa. Yu; Sun e Cheng (2012) apresentam um *Framework* para gerenciar o tráfico urbano baseado na "Internet das Coisas" e em "Computação em Nuvem". O trabalho apresenta um sistema inteligente de gerenciamento de tráfego urbano e as conclusões mostram que o sistema contorna de maneira eficiente os problemas do tráfego urbano, percebendo as necessidades para o seu gerenciamento inteligente.

Como em diversos setores da sociedade, o trânsito urbano também é afetado pelo crescimento desordenado nas cidades, onde o crescimento da população não é acompanhado por uma adequação na infraestrutura. Nesse contexto, as cidades apresentam dificuldades para comportar a quantidade de veículos e pessoas nas ruas. Desta forma é crescente a necessidade de serviços de tráfego eficientes, levando também à necessidade de uma gestão eficaz da mobilidade.

Diversas áreas de conhecimento contribuem para a gestão do tráfego urbano. Oliveira e Camponogara (2010) propõem um modelo com a finalidade de decompor um problema de controle centralizado de semáforos em diversos subproblemas de controle distribuído. Nesse modelo destacam-se como principais vantagens a escalabilidade e a adaptabilidade do sistema, tornando-o assim flexível à mudança.

Di Febbraro; Giglio e Sacco (2004) utilizam Redes de Petri híbridas com o objetivo de resolver o problema de coordenação de vários semáforos. O objetivo é melhorar o desempenho de classes especiais de veículos que são formadas por veículos públicos e de emergência. Uma proposta de controle de semáforos em tempo real pode ser vista em (SRINIVASAN, 2006), na qual o controle é feito de forma distribuída utilizando redes neurais. Abordando o mesmo contexto, Gokulan e Srinivasan (2010) também apresentam o controle de semáforos de forma distribuída, que propõe o uso de *Geometric Fuzzy Multiagent* System (GFMAS) para lidar com os vários níveis de incerteza encontrados nas entradas dos controladores de semáforos.

Dentre as abordagens mencionadas, uma alternativa é o emprego das técnicas de controle distribuído no sistema de semáforos. A aplicação de abordagens de controle distribuído em sistemas de semáforos objetiva o aumento da eficiência do sistema e a melhora dos fluxos de veículos e pedestres. Dessa maneira, abordagens de controle distribuído podem se adequar bem ao tipo de sistema, por agregar vantagens como escalabilidade e adaptabilidade ao controle de semáforos. Uma questão importante nesse tipo de sistema é a troca de informações entre os nós que compõem o sistema o que afeta diretamente a qualidade do controle.

Antonelli (2013) destaca restrições relativas à comunicação entre os agentes que compõe um sistema de controle distribuído como um dos principais problemas em aberto nesta área. Zheng; Lu e Cai (2013) destacam um modelo de avaliação de desempenho de redes sem fio por meio do método *Demand Response Control*. Os autores concluíram que a confiabilidade da entrega de dados é um fator extremamente relevante quando a comunicação sem fio é utilizada em um sistema de controle em tempo real.

Restrições relativas à comunicação são um problema em aberto, em diversas áreas de conhecimento, como é possível notar em (LI; HAN, 2011) que aborda o agendamento distribuído da comunicação sem fio para o controle de controle de tensão em uma *Micro Smart Grid*. O trabalho destaca a importância do controle da tensão dos Micro Grids para manter o ajuste de tensão dos geradores de energia

distribuídos (DEGs). Neste contexto, a comunicação sem fio é usada para transmitir a informação dos sensores de tensão para os DEGs. Devido à interferência entre os nós sensores, o agendamento é proposto para viabilizar a comunicação entres os sensores.

Dessa forma, entende-se que a troca de informação entre nós, ou agentes que compreendem um sistema de controle distribuído, é de extrema importância para eficiência do sistema de controle. Analisar o comportamento da comunicação pode ajudar a definir quais valores e parâmetros são adequados para cada situação. Através da análise do comportamento do mecanismo básico de acesso ao meio, *Distributed Coordination Function* (DCF), Wang e Hassan (2009) propõem um modelo analítico que visa definir a taxa de vazão do padrão IEEE 802.11. Os resultados mostram que a confiabilidade do padrão pode ser aumentada ajustando, de forma adequada, o tamanho da janela de contenção (CW).

Dentre as propostas que abordam a aplicação de controle distribuído, nota-se que os aspectos que envolvem a troca de informações entre os nós é um assunto que precisa ser melhor abordado. Camponogara *et al.* (2002) discute a eficiência da comunicação, destacando a frequência com que os agentes conseguem atualizar uns aos outros como uns dos fatores essenciais para o desempenho do sistema de controle.

Os trabalhos relacionados destacam a evolução e a inserção da comunicação wireless em diversas áreas de conhecimento. Também é possível notar que a confiabilidade da comunicação é essencial para o bom desempenho do sistema como um todo. Dessa forma, o intuito dessa pesquisa é de analisar o comportamento da comunicação sem fio, propondo um modelo que permita mostrar que a configuração especificada por análises e testes torna confiável a troca de informações entre os nós de um sistema de controle distribuído de semáforos. Dentre os padrões disponíveis para comunicação analisados, o escolhido foi o padrão IEEE 802.11, pois, além da fácil instalação, simplicidade de configuração e baixo custo, ele proporciona elevadas taxas de dados. O padrão permite a alteração de algumas configurações, como taxa de dados e potência de transmissão, fazendo com que seja possível analisar o comportamento da comunicação em diferentes configurações de rede.

1.1. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo analisar os aspectos que influenciam na confiabilidade da comunicação sem fio entre nós que fazem parte de um sistema de controle distribuído de semáforos. A proposta de análise da comunicação sem fio tem como intuito estabelecer um modelo analítico como base em resultados extraídos de experimentos, e também por meio de estudos de propostas existentes. O modelo analítico pretende mostrar que é possível realizar uma comunicação confiável dentro das configurações de rede estabelecidas para sistema de controle distribuído de semáforos.

O modelo analítico resultante considera a avaliação da comunicação por meio de parâmetros invariantes em operação, definidos pelas especificações do padrão 802.11, tais como os esquemas de modulação, e também de parâmetros variantes durante operação, que são representados por fatores externos, tais como congestionamentos e interferências. Baseado nesse modelo pretende-se encontrar uma especificação que permita estabelecer a melhor configuração possível para o canal de comunicação sem fio do sistema de controle distribuído de semáforos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos mostram a utilização da comunicação sem fio em diversas áreas de conhecimento e com diversos propósitos. Matsumoto *et al.* (2009) analisa o desempenho da comunicação sem fio para redes veiculares. O trabalho mostra a avaliação da vazão e a faixa de cobertura em cenários onde os carros se comunicam através do padrão IEEE 802.11n. Os resultados mostram que a faixa de comunicação é suficiente para prover a comunicação em cenários de rede veiculares. Os resultados foram obtidos através de experimentos. Também através de experimentos, conclui-se que a comunicação tem um bom desempenho quando se trata de vazão.

Com a intenção de avaliar a confiabilidade da comunicação sem fio no controle baseado em *Demand Response* (DR), Zheng; Lu e Cai (2013) modelam e analisam o desempenho da comunicação em uma *Smart Grid*. Parâmetros como probabilidade de falha na comunicação e a taxa de entrega de pacotes são

avaliados por meio de duas topologias de rede: *Single-hop* e *Multi-hop*. Os impactos da perda da comunicação em controles DR foram avaliados e os resultados das simulações mostram que a efetividade do controle DR depende da confiabilidade da comunicação.

Xiao e Rosdahl (2002) destaca a existência de um limite superior teórico de vazão e um limite inferior teórico de atraso para o padrão IEEE 802.11. Os resultados mostram que o melhor desempenho em relação ao atraso e vazão é limitado, o que significa que o aumento da taxa de dados só implicará em melhora de desempenho até que se atinja o limite de vazão. Os autores ressaltam que é essencialmente necessária a redução do *Overhead* para que possa conseguir maiores vazões. Para chegar a esses resultados, os autores analisaram o método fundamental de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11 *Distributed Coordination Function* (DCF).

O método fundamental de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11, DCF, é a principal forma de controle de acesso ao meio, por isso, seu esquema de transmissão é frequentemente analisado.

Com o objetivo de analisar a transmissão de dados em redes *Ad-hoc* saturadas, Carvalho e Garcia-Luna-Aceves (2003) apresentam um modelo analítico para computar o *jitter* (variação do atraso) médio durante a transmissão, utilizando o algoritmo exponencial de Backoff parte do esquema de acesso do padrão IEEE 802.11. O algoritmo exponencial de *Backoff* é um dos componentes utilizados pelo padrão IEEE 802.11 para evitar colisões de pacotes. No esquema do algoritmo exponencial de *Backoff*, uma janela de contenção é divida em uma série de intervalos iguais, que são numerados de 0 a (CW). A (CW) janela de contenção é o tempo esperado até que o meio esteja livre para a transmissão, ou seja, para reduzir probabilidade de colisões o nó escolhe aleatoriamente um valor no intervalo [0, CW]. No entanto as colisões ainda podem ocorrer quando dois ou mais nos escolhem o mesmo valor no intervalo (ZHU; TIAN; ZHENG, 2011). Os resultados mostraram que o atraso e o *jitter* são decorrentes principalmente, do melhor desempenho da camada física *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) em relação à camada física *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS).

Raptis *et al.* (2007) propõe um modelo analítico para computar a média de atraso e jitter baseado no método fundamental de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11,

Distributed Coordination Function (DCF). O tamanho da rede e o tamanho de pacote foram considerados. O modelo proposto foi validado por meio de simulações. Os resultados mostram que o aumento no número das estações resulta em aumento no Jitter e atraso, e também, mostram que, com pacotes pequenos, o jitter é baixo.

Ghaboosi *et al.* (2008) analisa o atraso, o *jitter*, o tempo de serviço do pacote e a atraso de fila em uma rede sem fio *Single-hop* não estruturada. O modelo utiliza Cadeias de Markov nas análises e é validado através de simulações. Os resultados destacam o impacto de atraso da fila para o sistema de uma forma geral, ressaltando que este aspecto tem sido ignorado em diversos trabalhos e artigos.

No cenário das redes *Multi-hop*, Sugimoto *et al.* (2010) propõe a análise da vazão quando utilizado o esquema ("*Request To Send/Clear To Send*") RTS/CTS, no método fundamental de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11, o DCF. No trabalho, são apresentadas expressões analíticas derivadas da probabilidade de falha de transmissão nos nós de estrangulamento para o cálculo da vazão. Simulações foram realizadas e a comparação entre os resultados das análises e das simulações foi feita. Os resultados revelam que a taxa máxima de vazão obtida por meio da simulação difere dos resultados obtidos em análise, no entanto, a análise foi considerada válida quando o número de saltos foi igual ou superior a nove.

Wang; Yan e Li (2006) apresenta um modelo analítico para computar a saturação de vazão sobre o método fundamental de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11, DCF, em uma rede *Ad-hoc Multi-hop*. O desempenho do DCF é analisado na ausência de estações escondidas utilizando Cadeias de Markov no tempo discreto. A influência do tamanho do pacote, o número médio de vizinhos e o tamanho inicial da janela de contenção foram analisados. Os resultados indicam que pacotes grandes podem obter um aumento na vazão quando o canal de transmissão está em condições ideais para a transmissão. Também foi concluído que, o aumento da janela de contenção pode diminuir o tempo de espera que estações necessitam aguardar para iniciar a transmissão.

Procurando estimar valores de vazão e atraso em redes *Ad-hoc Single-hop* e *Multi-hop*, Khalaf e Rubin (2006) propõem um modelo analítico. Para o cálculo da vazão foi usada uma abordagem baseada em aproximação CSMA, que também foi usada para o cálculo do atraso. Simulações foram conduzidas no intuito de validar o

modelo analítico e também avaliar o desempenho da vazão e do atraso em relação à potência do sinal de transmissão. Os valores de potência de transmissão usados na simulação foram, -2dBm, 0dBm, 5dBm e 20dBm. Quando comparados com resultados da simulação, os resultados do modelo analítico mostram o bom desempenho do modelo em estimar valores de vazão e atraso. Os resultados também mostram que em transmissões onde a potência do sinal é baixa o desempenho da vazão cai e o atraso aumenta.

Khalaf; Rubin e Hsu (2007) também apresentam um trabalho para analisar a vazão e atraso na transmissão de dados em redes *Single* e *Multi-hop*. Neste trabalho são considerados os valores de interferências em um modelo de captura, no qual todos os nós estão dentro do alcance de transmissão e alcance de detecção do transportador, que é obtido no cálculo da probabilidade da recepção com sucesso. Para a validação do modelo foram realizadas simulações e os resultados mostram que a vazão conseguida nas simulações é ligeiramente menor do que o da análise, devido às condições de transmissão, pois o canal de comunicação não se encontra em condições ideais.

Em (BAROWSKI; BIAZ; AGRAWAL, 2005) é proposto um modelo analítico para analisar o desempenho do padrão IEEE 802.11 em redes *Ad-hoc Multi-hop.* Resultados de simulações realizadas no software Ns-2, com diferentes configurações de rede, são usados na validação do modelo analítico. As métricas de desempenho usadas são vazão, atraso, tamanho médio da fila e consumo de energia. Os resultados do modelo analítico são validados através de simulações e mostram que, quando a carga relacionada ao tráfego da rede é pequena, os resultados do modelo analítico se assemelham aos da simulação, porém quando a carga é maior, o modelo analítico se aproxima de suas condições de saturação, fazendo com que os resultados tenham desvios altos.

Salyers; Striegel e Poellabauer (2008) destacam a contribuição dos dispositivos físicos na perda de dados. Foram conduzidos diversos experimentos visando indicar as características individuais de perda de dados dos dispositivos. Os resultados demonstram que nem toda a situação de perda está relacionada a erros nos dispositivos. Somente algumas situações, como perdas em nós individuais, podem estar relacionadas aos dispositivos sem fio e a taxa de erros relacionada aos

dispositivos usados nos experimentos fica entre 0,034 e 3,886% das causas de perda de dados.

Hui e Devetsikiotis (2005) propõem um método de análise da vazão e atraso sob saturação. A análise foi feita considerando um cenário no qual o canal está em condições ideais dentro de uma rede *Single-hop*. O trabalho mostra, com as validações por simulações, que o modelo proposto obteve bons resultados, os quais mostram que o modelo é capaz de avaliar com precisão a diferenciação dos parâmetros *Enhanced Distributed Coordination Function* (EDCA) sobre o desempenho da WLAN.

Uma proposta de análise e melhoria no desempenho do protocolo TCP é apresentada em (KULKARNI; SOORIYABANDAR; LI, 2009). O trabalho propõe uma variação do protocolo TCP tornando-o inteligente. O método apresentado tem como objetivo classificar as reais causas de perda de dados. A análise de desempenho do novo protocolo foi realizada por meio do simulador de redes Ns-2. Foi mostrado que o algoritmo funciona bem em redes que possuem pouco ou nenhum congestionamento.

Levando em consideração que o método fundamental de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11, DCF, não suporta diferenciação de *Quality of Service* (QoS), Zhao *et al.*(2008) apresentam uma nova proposta com base no *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA), a qual visa melhorar a QoS em redes sem fio. Um modelo analítico é proposto para analisar a proposta em relação à vazão, largura de banda, atraso, variação do atraso e taxa de pacotes perdidos. Para a validação do modelo proposto, foram realizadas simulações que mostraram que o modelo proposto tem melhor desempenho em relação à DCF e EDCA no que diz respeito à garantia de QoS integrado.

Wolff e Wietfeld (2011) apresentam um novo conjunto de parâmetros para o suporte de QoS pelo método fundamental de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11 *Distributed Coordination Function* (DCF) em cenários de emergência. O desempenho da proposta é analisado por meio de um modelo analítico baseado em cadeias de Markov e validado com simulações. Os resultados mostram que o modelo fornece comunicação confiável para cenários de emergência.

2.1. Discussões sobre a revisão bibliográfica

Os trabalhados pesquisados apresentam análises em cenários específicos, como redes saturadas, dentre outros. Desta maneira, a utilização dos resultados de pesquisa em cenários diferentes torna-se restrita. A maior parte dos trabalhos apresentados concentram as análises em parâmetros definidos pela camada MAC do padrão IEEE 802.11, e o comportamento da comunicação é frequentemente analisado na tentativa de modelar limites de atraso e vazão da rede onde a preocupação maior é com a transmissão de grande quantidade de dados, devido às características das aplicações.

Encontram-se poucos trabalhos que avaliam aspectos relacionados à camada física do padrão IEEE 802.11, sobre o desempenho da comunicação. Utilizando o MATLAB para realizar a pesquisa, Gupta e Sharma (2012) avalia o desempenho das técnicas de modulação *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) e *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK), quando submetidas a um número de usuários, ruídos e interferências no canal de comunicação. Os autores realizam comparações de desempenho considerando valores de *Bit Error Rate* (BER) e *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) para os esquemas de modulação. As análises concluem que os esquemas de modulação que apresentam taxas de transmissão de dados elevadas tendem a apresentar maior taxa de erro.

Badhiye e Limaye (2013) realizam a análise de desempenho dos esquemas de modulação QPSK e BPSK. Simulações são realizadas com o MATLAB, considerando a presença de ruídos no canal de comunicação. Os autores destacam que QPSK é melhor em relação à BPSK em desempenho, pois a quantidade de símbolos é o dobro na constelação QPSK em relação à BPSK, possibilita a transmissão de dois bits simultaneamente.

Como visto nas biografias, são poucas as pesquisas relacionadas a parâmetros da camada física do padrão IEEE 802.11, tais como o desempenho dos esquemas de modulação, as taxas de transmissão de dados e o alcance. Os poucos trabalhos que apresentam esses tipos de análises utilizam os resultados de simulações, frequentemente realizadas no MATLAB, como mostrado em Badhiye e Limaye (2013) e Gupta e Sharma (2012). É notável a ausência de pesquisas que

apresentem testes ou experimentos em ambientes reais. Neste sentido, este trabalho pretende analisar o comportamento da comunicação sem fio utilizando cenários mais próximos possíveis da realidade.

3. TECNOLOGIAS WIRELESS

3.1. Bluetooth

A especificação *bluetooth* foi inicialmente projetada com o objetivo de interconectar dispositivos com baixo consumo de energia, por meio de frequências de radio de curto alcance (WILLIAMS *et.al.*, 2001). O *bluetooth* é gerenciado pelo Bluetooth *Special Interest Group* (SIG). As características do *bluetooth* fazem com que sua utilização tenha restrições. Como já mencionado, o alcance do *bluetooth* é bastante curto. Desta a forma, uma rede *bluetooth* se torna limitada. As características do *bluetooth* não satisfazem as necessidades de pesquisa deste trabalho, onde o cenário contemplado é o sistema de semáforos, que possui distâncias grandes entre um cruzamento e outro.

3.2. ZigBee

O ZigBee é um protocolo de rede sem fio, classificado como WPAN (redes pessoais sem fio), e possui algumas qualidades como, infraestrutura de rede mais simples e baixo consumo de energia. O padrão ZigBee foi desenvolvido pela *ZigBee Alliance* (LUGLI, 2012) e atende aos critérios do padrão IEEE 802.15.4. O ZigBee possui baixas taxas de transferência, o que, mesmo que para aplicações simples, o inviabiliza em certas ações que precisam de taxa de transferência maiores. As características do padrão ZigBee não se adequam ao desenvolvimento desta pesquisa, que objetiva analisar configurações de rede mais amplas.

3.3. Wireless Hart

O Wireless Hart é um protocolo de comunicação para redes de automação industrial baseado no protocolo HART (*Highway Addressable Remote Transducer*). O Wireless Hart é uma rede de comunicação sem fio em malha, podendo ser composta por vários nós que podem operar como ponto de acesso ou roteador (LUGLI, 2012). O

Wireless Hart atende os critérios do padrão IEEE 802.15.4 e possui caraterísticas que não satisfazem os objetivos desta pesquisa, tais como baixa taxa de transferência além de, como já mencionado, ser um protocolo voltado para automação industrial.

3.4. ISA100

O padrão ISA 100 foi desenvolvido pela *International Society of Automation* (ISA) especificamente para o ambiente industrial. No inicio de 2011, o sistema *wireless* para automação industrial, nas áreas de controle de processos e aplicações relacionadas, foi aprovado pela comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) (LUGLI 2012). O padrão foi desenvolvido para fornecer segurança e confiabilidade na operação sem fio para monitoramento não critico, alertando controle, supervisão, controle de circuito aberto e aplicações de controle em malha fechada (LUGLI, 2012). Tendo em vista as características do ISA 100, entende-se que o estudo de sua tecnologia e aplicação pode contribuir para que os objetivos da pesquisa sejam alcançados.

3.5. PADRÃO IEEE 802.11

A versão original do padrão IEEE 802.11 foi publicada em 1999 (IEEE STANDARTS, 2012), e desde então vem ganhado popularidade em diferentes ambientes cuja aplicação de comunicação sem fio se faz necessária. Conforme visto em (IEEE STANDARTS 2012) o escopo do padrão IEEE 802.11 é definir um controle de acesso ao meio (MAC) e varias especificações da camada física (PHY). No inicio de sua implantação o padrão apresentava taxas de 1 e 2Mbps, (VASSIS *et al.*, 2005).

A evolução do padrão veio com a evolução da tecnologia *wireless* e a necessidade de se obter taxas maiores na transmissão de dados. Esta evolução trouxe o IEEE 802.11b com taxas de dados de até 11 Mbps como versão posterior ao da versão original do padrão IEEE 802.11. Logo após surgiu o IEEE 802.11a com taxas de dados de 6 a 54 Mbps e o 802.11g atingindo taxas até 54 Mbps, (Vassis *et al.,* 2005).

3.5.1. IEEE 802.11b

O IEEE 802.11b é a evolução da versão original do padrão 802.11 e utiliza na camada física a técnica *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) operando no esquema de modulação *Complementary Code Keying* (CCK) com taxas de dados de 1, 2, 5.5, e 11 Mbps na frequência de 2,4GHz, (CISCO, 2005) (YANG XIAO, 2009) (KHANDURI; RATTAN; UNIYAL, 2013)

3.5.2. IEEE 802.11a

Com objetivo de obter taxas de dados mais altas o IEEE 802.11a foi lançado com novas especificações, utilizando o *Orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM) e os esquemas de modulação QAM64, QAM16, BPSK e QPSK. Atinge as taxas de dados de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 54 operando na faixa de 5GHz (YANG XIAO, 2009).

3.5.3. IEEE 802.11g

Lançado em 2003, o IEEE 802.11g herdou algumas características dos padrões anteriores, o IEEE 802.11a e IEEE 802.11b. A capacidade de atingir altas taxas de dados pode ser comparada ao IEEE 802.11g e ambos podem chegar a velocidades de 54 Mbps. O IEEE 802.11g opera na faixa de frequência de 2,4GHz o que faz com que seja compatível com IEEE 802.11b, (CISCO,2005).

O IEEE 802.11g apresenta maiores possibilidades de taxas de dados. Utilizando *Orthogonal Frequency division Multiplexing* (OFDM) é possível trafegar dados nas taxas de 6, 9, 12, 18, 24, 36 e 54 Mbps, para as taxas de dados 5.5 e 11 Mbps o tipo de transmissão utilizada é o *Direct Sequence Spread* (DSSS) tendo complementary code key (CCK) como esquema de modulação, o DSSS também é utilizado nas taxas mais baixas, 1 e 2 Mbps com esquemas de modulação BPSK e QPSK, (YANG XIAO 2009). A tabela 1 mostra os tipos de transmissão e esquemas de modulação utilizados pelo padrão IEEE 802.11g, (CISCO, 2005).

Taxa de Dados (Mbits/s)	Tipo de Transmissão	Esquema de Modulação/Codificação
54	OFDM	64 QAM
48	OFDM	64 QAM
36	OFDM	16 QAM
24	OFDM	16 QAM
18	OFDM	QPSK
12	OFDM	QPSK
11	DSSS	ССК
9	OFDM	BPSK
6	OFDM	BPSK
5.5	DSSS	ССК
2	DSSS	QPSK
1	DSSS	BPSK

Tabela 1 - 802.11g Taxa de dados, tipos de transmissão e esquemas de modulação.

Fonte: Cisco(2005)

3.5.3.1. Características e Considerações do padrão IEEE 802.11g.

O padrão IEEE 802.11g pode ser pensando como junção dos padrões 802.11b e 802.11a, pois combina as configurações de ambos (KHANDURI; RATTAN; UNIYAL, 2013). Os padrões 802.11b e 802.11g operam na mesma faixa de frequência (2.4GHz), além do que ambos possuem três canais que não sobrepõem. Tais fatores contribuem para compatibilidade entres estes dois padrões, (Cisco, 2005).

Como é possível observar em (CISCO, 2005) assim como 802.11a, o padrão 802.11g utiliza o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) para a transmissão de dados. O OFDM é uma forma mais eficiente de transmissão que o *Direct Sequence Spectrum* (DSSS) que é usado no 802.11b. Quando combinado com vários tipos de modulação o 802.11g (como o 802.11a) é capaz de suportar taxa de dados muito mais elevadas do que o 802.11b.

Em relação às altas taxas de dados suportadas pelo padrão 802.11g, existe um fator importante que deve ser levado em consideração, o fenômeno conhecido como *Error Vector Magnitude* (EVM), que mostra que o aumento da potência de

transmissão tende a diminuir o alcance do dispositivo em altas taxas de dados, (CISCO, 2005). A tabela 2 mostra o decréscimo na capacidade de alcance dos padrões 802.11a/b/g em relação às taxas de dados elevadas, ilustrando impacto do fenômeno EVM.

Data Rate (Mbps)	802.11a (40 mW with 6 dBi gain diversity patch antenna) Range	802.11g (30 mW with 2.2 dBi gain diversity dipole antenna)	802.11b (100 mW with 2.2 dBi Gain diversity dipole antenna)
54	13 (m)	27 (m)	-
48	15 (m)	29 (m)	-
36	19 (m)	30 (m)	-
24	26 (m)	42 (m)	-
18	33 (m)	54 (m)	-
12	39 (m)	64 (m)	-
11	-	48 (m)	48 (m)
9	45 (m)	76 (m)	-
6	50 (m)	91 (m)	-
5.5	-	67 (m)	67 (m)
2	-	82 (m)	82 (m)
1	-	124 (m)	124 (m)

Tabela 2 - Alcance dos padrões em relação à taxa de transmissão, fenômeno EVM.

Fonte: Cisco(2005)

O padrão 802.11g foi definido para o desenvolvimento deste trabalho. Dentre os fatores que contribuíram para a escolha deste padrão estão: compatibilidade com dispositivos que utilizam o padrão 802.11b e altas taxas de dados alcançadas, conseguidas devido aos esquemas de modulação utilizados pelo padrão.

3.5.4. Arquitetura do Padrão IEEE 802.11

A arquitetura do padrão IEEE 802.11 inclui vários componentes, tendo o *Basic Service Set* (BSS) como o conjunto básico para a formação de uma LAN IEEE 802.11. A definição básica para um BSS é apresentada como um tipo de área de cobertura onde um determinado grupo de estações de trabalho pode permanecer em comunicação (IEEE STANDARTS, 2012). O padrão IEEE 802.11 também possui os *Independent Basic Service Set* (IBSS) que são BSS independentes. Esse tipo de operação também é conhecido como Ad-hoc. São redes independentes de infraestrutura e fazem parte de um mesmo BSS. Essa estrutura permite que os IBSS se comuniquem sem que a informação passe por um *Access Point* onde diferentemente das redes infraestruturadas que necessitam do *Access Point*, onde basicamente todas as funcionalidades da rede são controladas por ele.

Parâmetros definidos na camada física limitam as distâncias em que duas estações podem se comunicar. Para aumentar a área de alcance das redes, são usados os *Distribution Systems* (DS), que interconectam os BSS, (IEEE Standard 802.11, 2012). Esse tipo de rede é conhecido como *Extended Service Set* (ESS) A Figura 1 representa os componentes de uma arquitetura de rede infraestruturada do padrão IEEE 802.11.





Fonte: IEEE Standard 802.11 (2012)

A Figura 1 representa uma configuração de rede infraestruturada, onde é necessário um *Access Point* (AP) que faz a interface entre o BSS e o sistema de distribuição (DS) e possibilita a comunicação entre as estações (STA) e entidades externas. O sistema de distribuição permite interligar múltiplos BSSs, formando um conjunto estendido de serviços *Extended Service Set* (ESS). No modo *Ad Hoc,* as estações se comunicam sem a ajuda de uma infraestrutura e qualquer estação pode estabelecer a comunicação com outra sem a necessidade de um ponto de acesso, desde que ambas estejam dentro do mesmo BSS.

3.5.5. Camada Física do Padrão IEEE 802.11

Conforme descrito em (MANSHAEI *et al.*, 2005), a camada física seleciona o esquema de modulação correto, levando em conta as condições do canal, e fornece a largura de banda necessária. O padrão IEEE 802.11 define quatro tipos de camadas físicas: *infrared* (IR), *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) e *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM).

3.5.5.1. *Infrared* (IR)

A camada física IR pode operar em comprimento de ondas que se aproximam de 850 nm. O sinal IR é produzido por diodos de laser semicondutores ou LEDs. Os diodos de laser são mais usados porque seu comportamento na conversão elétricoóptico é mais linear, no entanto, o LED é mais barato e atendem perfeitamente as especificações da camada física quanto ao uso de IR, (NICOPOLITIDIS *et al.* 2002).

3.5.5.2. Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS).

O FHSS é uma técnica de espalhamento de espectro que divide a banda total em vários canais com largura de 1MHz, (GAST, 2005; CHEHRI *et al.*, 2006). É um método no qual os sinais de rádio são transmitidos operando na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz. Essa técnica possibilita transmissões em 1Mbps e 2Mbps como operação opcional.

3.5.5.3. Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM).

Na técnica OFDM as transmissões são realizadas em diferentes frequências simultaneamente em sub portadoras ortogonais. A Camada física OFDM utiliza várias sub portadoras moduladas em BPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM para a transmissão paralela de dados, (PINTO, 2002). Os padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11g podem chegar 54 Mbps em sua configuração máxima utilizando OFDM nas

técnicas de modulação QAM 64. A técnica divide uma única transmissão em múltiplos sinais com menor ocupação espectral, a modulação por multi-portadoras divide a banda do sinal em portadoras paralelas que são chamadas sub-portadoras. As sub-portadoras não possuem sobreposição de frequência, dessa forma não interferem umas com as outras. A figura 2 representa o funcionamento da técnica OFDM.





3.5.5.4. Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

O DSSS também opera na banda ISM (*Industrial Scientific and Medical*) de 2,4 GHz. Inicialmente o DSSS apresentava as taxas de 1 e 2Mbps e com a especificação do padrão 802.11b, vieram as taxas de dados de 5.5 e 11Mbps. A taxa de 1Mbps utiliza o esquema de modulação *Differential Binary Phase Shift Keying* (DBPSK) e a taxa e 2Mbps utiliza o *Differential Quadratuture Phase Shift Keying* (DQPSK). Já as taxas de 5.5 e 11Mbps utilizam *Complementary Code Keying* (CCK) como esquema de modulação, (WARE; WYSOCKI; CHICHARO, 2001).

A técnica DSSS utiliza um método conhecido como sequência de Barker para espalhar o sinal através de um único canal sem alterar as frequências, para cada bit transmitido é gerado um padrão de bits, chamado código de chip.

O código de chip

- Permite que sinais que não utilizam o mesmo padrão sejam filtrados pelos receptores, incluindo ruídos e interferências.
- Identifica os dados para que o receptor possa reconhecê-los como pertencentes a um determinado transmissor.
- Distribui os dados pela largura de banda disponível. A figura 3 representa a técnica DSSS.



Figura 3 - Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

3.6. Análise das tecnologias

A análise das tecnologias wireless apresentadas no texto, possibilitou estabelecer os critérios e os parâmetros para a escolha do padrão a ser estudado e modelado. Conhecendo as características das tecnologias estudadas foi possível definir quais tecnologias podem contribuir com a pesquisa. O *Bluetooth, ZigBee e Wireless Hart* não satisfazem as necessidades e objetivos da pesquisa. As três tecnologias wireless mencionadas atendem aos critérios do padrão 802.15 e possuem características semelhantes, como curto alcance e taxas baixas de transmissão. O ISA 100 foi desenvolvido e vem sendo atualizado visando aplicações de controle de processos, como controle de circuitos abertos e controle de malha fechada. Este

Fonte: ESTEEM (2015)

trabalho visa estabelecer um modelo analítico que represente os atrasos da comunicação, em uma função de atraso conhecida e com base nos princípios básicos da teoria de controle. Desta forma, entende-se que o estudo da tecnologia ISA 100 terá grande contribuição para a pesquisa, pois com a melhor compreensão de sua tecnologia será possível obter informações que colaborem no uso da comunicação sem fio para controle de processos. O Wifi (IEEE 802.11) foi escolhido para a realização deste trabalho, pois possui grande usabilidade o que possibilita a definição parâmetros de configuração como, taxa e potência de transmissão, além disso, existe a possibilidade de atingir maiores distâncias de transmissão usando dispositivos (roteadores) com configurações e especificações adequadas.

4. TÉCNICAS DE MODULAÇÃO

4.1. Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK)

Na modulação GFSK os pulsos passam por um filtro gaussiano de modo a reduzir sua largura espectral, mas com objetivo de reduzir a interferência (Horak, 2007). O desempenho do GFSK não permite taxas altas de transmissão, produzindo velocidades entre de 1 e 2Mbps, no entanto, a sua simplicidade permite a implementação em dispositivos de baixo custo.

4.2. Binary phase-shift keying (BPSK)

No BPSK a modulação ocorre pelo deslocamento da fase, onde uma fase 0 graus representa 0, e a fase 180 graus representa o 1. Cada símbolo é formado por um bit e no deslocamento de fase ocorre a transição do bit 0 para o bit 1, (Gast, 2005; Horak, 2007). A figura 4 apresenta o esquema de troca de fases do BPSK.



Figura 4 - Esquema de troca de fase BPSK e Constelação BPSK

Fonte: Shaikh (2009)

4.3. Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

No esquema de modulação QPSK é possível transmitir uma taxa maior de dados. Utilizam-se dois parâmetros para realizar a modulação do sinal, parâmetros de fase e quadratura de onda portadora, por isso existem mais tipos possíveis de símbolos neste esquema, sendo possível transmitir dois bits por símbolo. A figura 5 apresenta o esquema de troca de fases do BPSK (GAST, 2005).



Figura 5 - Esquema de troca de fase BPSK e Constelação QPSK

4.4. Complementary Code Keying (CCK)

A modulação CCK é uma forma de espalhamento espectral utilizando códigos binários complementares, que são sequencias do mesmo comprimento. O número de pares de elementos iguais com uma separação determinada dentro de uma sequência é igual ao número de elementos diferentes dentro da mesma sequência. A modulação CCK pode ser feita nos modos 11Mbps e 5,5Mps. Na taxa de 11 Mbps cada símbolo é formado por 8 bits e na taxa 5,5 Mbps são utilizados 4 bits por símbolo.

4.5. Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

No QAM os símbolos são mapeados em diagrama de fase e quadratura da onda portadora. Isso é possível, pois, os símbolos estão mapeados por fase e quadratura e estão a uma distância específica da origem, o que representa sua amplitude, (National Instruments, 2014). Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora. A figura 6 apresenta a constelação dos esquemas de modulação QAM 16 e QAM 64. A constelação QAM 16 apresenta símbolos 6 em cada quadrante, enquanto QAM 64 apresenta 16 símbolos em cada quadrante da constelação.





Fonte: Shaikh (2009)

5. MEDIA ACCESS CONTROL (MAC) DO PADRÃO IEEE 802.11

Os mecanismos de acesso ao meio são definidos pela camada MAC e existem dois tipos de funções de acesso: Função de coordenação distribuída *Distributed Coordination Function (*DCF) e a função de coordenação em um ponto *Point Coordination Function* (PCF). O DCF é o mecanismo básico de acesso ao meio do IEEE 802.11 e a sua implementação é obrigatória, ao contrario do PCF.

5.1. Intervalos

As prioridades de pacotes são definidas pelos espaços distribuídos entre quadros. Existem *Interframe Spaces* (IFSs) de três diferentes tamanhos: O menor IFS é o *Short Interframe Space* (SIFS), usado para a transmissão de quadros de alta prioridade, como pacotes ACK (pacotes de confirmação de recebimento). *Interframe Space* (PIFS), depois de expirado o intervalo, quadros de qualquer modo PCF podem ser transmitidos. *DCF Interframe Space* (DIFS), depois que intervalo terminar, qualquer modo de quadros DCF assíncrono pode ser transmitido de acordo com o mecanismo de "*Backoff*" do CSMA.

O método fundamental de acesso ao meio da camada MAC do padrão IEEE 802.11, DCF, utiliza o protocolo de acesso aleatório *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), (IEEE STANDARD 802.11, 2012). Existem dois tipos de DCF, o baseado em CSMA/CA (obrigatório) e outro opcional que também usa *Request To Send - RTS e Clear To* Send (CTS) (VIEIRA, 2005). O funcionamento básico do acesso ao meio é mostrado na figura 7.



Figura 7 - Esquema básico de acesso no DCF

Quando uma estação quer transmitir, primeiramente ela espera que o meio permaneça livre durante um intervalo de tempo igual ao "*Interframe Space*" em questão, no caso do DCF é o DIFS. Em seguida, quando se trata de quadros de dados, a estação espera pelo tempo de "*Backoff*" que é formado de *Backoff Counter* (BC) e *Backoff Time*. A estação começa a contar o tempo com o auxílio do *Backoff Counter* até que este se iguale ao *Backoff Time* que foi escolhido aleatoriamente

entre 1 e a janela de contenção (CW) corrente, (VIEIRA, 2005). A estação transmite depois que o tempo *Backoff* passa, porém, se o meio voltar a ficar ocupado antes do fim da transmissão, a estação para a contagem de tempo e espera até que o meio permaneça livre durante o *Interframe Space* novamente, e então continua a contagem do tempo *Backoff.* Na sequência, aguarda um ACK que é enviado pelo receptor após o *Interframe Space* SIFS e caso não receba, admite que houve colisão.

Como já mencionado, o outro tipo de acesso à camada MAC do 802.11 é o PCF. No modo PCF, um único ponto controla o acesso ao meio através da consulta a cada estação proporcionando a oportunidade de transmitir sem contenção, (RUBINSTEIN 2002). O coordenador de ponto, que pertence ao *Access Point*, divide o tempo de acesso em períodos de super-quadros. Cada super-quadro compreende um período livre de contenção (modo PCF) e um período com contenção (modo DCF), como na Figura 8. Durante os períodos nos quais as estações estão no modo PCF, o coordenador de ponto consulta se cada estação tem algo a transmitir. As estações recebem dados quando são consultadas pelo coordenador de ponto, (RUBINSTEIN 2002).

Figura 8 - Modos CPF PCF Operando Juntos



Fonte: (RUBINSTEIN, 2002)

O coordenador de ponto inicia e controla o tempo livre de contenção. Ele escuta o meio por PIFS segundos e então começa um período livre de contenção através da difusão de um sinal de Bacon (Figura 8), (RUBINSTEIN 2002). Quando uma estação quer transmitir, o coordenador de ponto envia um quadro de dados, dentro de um pacote de consulta. O receptor envia de volta um ACK, também com dados se for o caso, depois de SIFS segundos, (RUBINSTEIN 2002).

Conforme foi apresentado nessa seção, dentre os mecanismos que compõe a estrutura de comunicação do padrão IEEE 802.11, o método principal de acesso ao meio *Distributed Coordination Function* (DCF) é estudado frequentemente. Grande parte dos trabalhos visa entender o modo de operação do DCF no intuito de encontrar soluções para os problemas de comunicação do padrão IEEE 802.11. Percebe-se que, para compreender o esquema de funcionamento da comunicação do padrão IEEE 802.11, é necessário entendimento das funções de acesso ao meio definidas pela camada MAC. Como mencionado em alguns trabalhos, conhecendo o esquema de funcionamento do método fundamental de acesso ao meio da camada MAC do padrão IEEE 802.11, DCF, é possível modelar alguns comportamentos relacionados ao desempenho da comunicação do padrão, como destacam Yang (2002) e Vieira (2005). Através dos parâmetros que envolvem o esquema de acesso no DCF, é possível estabelecer limites teóricos, limite inferior de atraso e limite superior de vazão.

Nessa fase foi avaliado o comportamento das funções de acesso ao meio definidas pela camada MAC, *Distributed Coordination Function* (DCF) e *Point Coordination Function* (PCF) em relação ao esquema de transmissão de dados. A análise permitiu compreender o processo de transmissão de dados, quais são as etapas necessárias para que uma estação comece a realizar a transmissão, quais informações são agregadas ao corpo da mensagem e qual o impacto que tais informações provocam na comunicação.

6. LIMITES DE ATRASO E VAZÃO

Na definição dos limites superior vazão (TUL) e inferior de atraso (DLL), considerase somente o mecanismo básico de acesso ao meio, DFC, sem RTC/CTS. Duas métricas de desempenho precisam ser consideradas para encontrar os limites de atraso e vazão. São elas: vazão máxima alcançável (MT) e atraso mínimo alcançável (MD), como apresentadas pelas equações (1) e (2).

$$MT = \frac{8L_{DATA}}{T_{D_{DATA}} + T_{D_{ACK}} + 2\tau + T_{DIFS} + T_{SIFS} + \overline{CW}}$$
(1)

(XIAO e ROSDAHL, 2002)

$$MD = T_{D_DATA} + \tau + T_{DIFS} + \overline{CW}$$
⁽²⁾

(XIAO e ROSDAHL, 2002)

Portanto, através do estudo da lógica de funcionamento do mecanismo básico de acesso ao meio, DFC, foi possível definir a existência de limites, superior de vazão e inferior de atraso. No qual, para o mecanismo de acesso básico, o *Throughput Uper Limit* (TUL) e o *Delay Lower Limit* (DLL) existem, independente da taxa de dados como mostrado nas equações (3) e (4) (VIEIRA, 2005).

$$TUL = \frac{8L_{DATA}}{2T_P + 2T_{PHY} + 2\tau + T_{DIFS} + T_{SIFS} + \frac{cw_{min}T_{slot}}{2}}$$
(3)

(XIAO e ROSDAHL, 2002)

$$DLL = T_{P} + T_{PHY} + \tau + T_{DIFS} + \frac{cw_{min}T_{slot}}{2}$$
(4)

(XIAO e ROSDAHL, 2002)

Nas quais, L_{DATA} é o tamanho da carga útil em bytes, $T_{D_{-}DATA}$ é o retardo da transmissão de dados, $T_{D_{-}ACK}$ é o retardo da transmissão do ACK, τ é o retardo de propagação, T_{DIFS} é o tempo de DIFS, T_{SIFS} é o tempo de SIFS, \overline{CW} é o tempo médio de "Backoff", T_P é o tempo de transmissão do preâmbulo físico, T_{PHY} é o tempo de transmissão do cabeçalho físico, cw_{min} é o tamanho mínimo da janela de "Backoff" e T_{slot} é o tempo de um segmento Vieira (2005).

7. METODOLOGIA

Abordagens de controle distribuído são aplicadas a problemas de diversas áreas de conhecimento, como automação, robótica, mecânica e biologia. Porém, no âmbito

da distribuição da capacidade de controle, deve-se levar em consideração a necessidade da avaliação do processo de troca de informação entre os nós que fazem parte do sistema de controle distribuído, ou seja, o canal de comunicação que provê a integração.

O cenário de aplicação adotado foi o sistema de controle distribuído de semáforos, neste cenário o processo de troca de informação ocorre entre os controladores de semáforos e extremamente importante podendo afetar diretamente a confiabilidade da comunicação. A figura 9 representa o sistema de controle distribuído de semáforos.





Fonte: Barros (2014)

Assim, a metodologia adotada para esse trabalho considera, como etapa inicial, a compreensão, e a modelagem do processo de controle distribuído para estabelecer os requisitos do canal de comunicação sem fio que realiza a comunicação no sistema de controle distribuído.

Como estudo de caso para essa pesquisa, utiliza-se o cenário do sistema de trânsito, no qual cada nó representa um cruzamento entre as ruas e possui a lógica de controle dos semáforos pertencentes ao cruzamento; e cada cruzamento deve transferir informações aos nós vizinhos. Nesse cenário, a confiabilidade da

comunicação entre os nós se torna essencial, podendo afetar diretamente a qualidade do controle e o funcionamento do sistema.

Para analisar o canal de comunicação, propõe-se a análise e validação do modelo destacado em (XIA; ROSDAHL, 2002) que apresenta equações que definem os valores teóricos para a vazão e o atraso da transmissão. Através desta ação esperase estabelecer especificações para a utilização da comunicação sem fio entre os nós que compõem o sistema distribuído de semáforos, levando em consideração a estrutura do padrão IEEE 802.11. A análise da estrutura do padrão IEEE 802.11 será comprovada com a realização de testes para diferentes configurações de redes e posteriormente será validada junto ao modelo de equações proposto em (XIA; ROSDAHL, 2002).

7.1. Cenário de Aplicação

O cenário definido na figura 10 representa o cenário real da Portaria 3 do Campus da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira, em que o nó B é representa cruzamento central da saída da portaria 3; os nós A e C são os primeiros semáforos acima e abaixo na Avenida Corifeu de Azevedo Marques, e o nó D seria um semáforo dentro do campus ainda não existente. Este cenário será utilizado para a realização de simulações no software Ns-2 e experimentos em campo. Vislumbrando a eventualidade da distância entre os nós ultrapassar o alcance máximo da comunicação, um cenário com um nó de apoio também é analisado.

A distância física entre os nós está especificada nos intervalos entres os nós, no qual a maior distância esperada para o sistema é de 250 m. O tamanho do pacote estipulado é de 50 bytes e o tempo de máximo de transmissão 1 segundo.



Figura 10 - Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira

Fonte: Barros (2014)

8. SIMULAÇÃO

O objetivo da simulação é analisar o comportamento da comunicação Wi-Fi com relação aos aspectos que influenciam no "delay", "jitter" e perda de pacotes de acordo com a variação do tamanho do pacote.

8.1. Parâmetros utilizados nas simulações:

- O tráfego entre eles é CBR (CONSTANT BIT RATE).
- Intervalo de transferência é de 0,25 segundos.
- A transmissão é unidirecional do nó 0 que transmite e o nó 1 que recebe.
- Tamanho do pacote: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 e 900 Bytes.
- Distância: 150 metros.
- Protocolo UDP.
- As simulações foram conduzidas com software Ns2. Os nós 0 e 1 apresentados na figura 10 representam os nós B e D na figura 11.



Figura 11- Simulação NS2

Fonte: Autoria Própria (2015)

8.2. Resultados das Simulações

A simulação foi conduzida com objetivo de analisar dois parâmetros de desempenho, o delay e a porcentagem de perda de pacotes. Tais parâmetros foram analisados em relação ao aumento do tamanho do pacote.



Gráfico 1 - Perda de dados em relação ao aumento no tamanho do pacote

Fonte: Autoria Própria (2015)



Gráfico 2 - Delay em relação ao aumento no tamanho do pacote

8.3. Discussão sobre as simulações

- Simulações consideram o canal em condições ideias de transmissão;
- Não há perda de dados mesmo que se aumente o tamanho do pacote;
- Delay aumenta na medida em que o tamanho do pacote aumenta;
- O Ns2 realiza a simulação do comportamento do WiFi sobre às camadas 3 e 4 do modelo ISO/OSI;
- Não permite especificar os parâmetros da camada 2 do modelo ISO/OSI, (Modulação, MAC);
- Não permite analisar o Jitter, perda de pacote de acordo com a potência do sinal e a distância;

Com base nos resultados obtidos nas simulações percebeu-se a necessidade de realização de testes experimentais, pois as simulações não representam os resultados esperados para pesquisa.

9. TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes de desempenho da comunicação foram realizados com base na variação de parâmetros como: Potência do sinal transmitido, taxa de transmissão e distância da transmissão. Os experimentos foram realizados dentro da Universidade de São

Paulo, no departamento PCS no prédio da Engenharia Elétrica, foram especificados dois cenários diferentes: O primeiro cenário foi nominado Indoor 1 e o segundo cenário Indoor 2, no primeiro cenário o desempenho comunicação sem fio foi testado através da variação da potência do sinal de transmissão e da taxa de transmissão, já no segundo cenário, o desempenho da comunicação foi testado através da variação da taxa e da distância da transmissão.

Para realizar a comunicação entre as estações e também diminuir a quantidade de variáveis que possam interferir na comunicação, algumas medidas foram adotadas. O protocolo *SSH* (OPENSSH,1999) e o emulador de terminal *putty*, (Putty, 2015) foram utilizados para estabelecer a comunicação e definir os parâmetros de configuração dos testes. Houve a necessidade de alteração do *firmware* do roteador para poder definir os valores de potência e a taxa de transmissão. Nenhuma providência foi adotada para evitar interferências de outros dispositivos. Desta forma, o cenário se aproxima bastante do esperado para uma aplicação real de comunicação sem fio.

9.1. Primeiro Cenário de Testes - Indoor 1.

Os testes foram realizados dentro do laboratório considerando a variação da potência e da taxa de transmissão. Os softwares utilizados foram: IPERF (Iperf.fr, 2015) para definições de parâmetros como tamanho do pacote, protocolo de rede e duração da transmissão, e o software *inSSIDer Home* (metageek, 2015)utilizado para a medição do sinal da potência no receptor, os parâmetros analisados foram o delay e a perda de pacotes. A figura 12 representa o cenário Indoor 1.

Figura 12 - Cenário Indoor 1

Fonte: Autoria Própria (2015)

- 9.1.1. Configurações/Dispositivos utilizadas no cenário de testes Indoor 1:
 - Potências de transmissão 100%, 50%, 25% e 12,5% que representam -27dBm, -29dBm, -31dBm e -34dBm respectivamente.
 - Roteador D-Link modelo DI-624.
 - Análise realizada em modo RTS/CTS.
 - Protocolo: UDP.
 - Tamanho do pacote: 1024 bytes.
 - Número de pacotes: 70.
 - Distância: 3 m.
 - Duração da transmissão: 10 s.
 - Diferentes taxas de transmissão: 1 Mbps até 54 Mbps.

9.1.2. Resultados – Cenário Indoor 1.

Os gráficos 3 e 4 mostram os resultados obtidos no primeiro cenário de testes experimentais, a porcentagem de perda de pacotes relativa à diferentes taxas de transmissão e diferentes valores de potência de transmissão é apresentada.



Gráfico 3 - Porcentagem de perdas relativa a taxa de transmissão

Fonte: Autoria Própria (2015)



Gráfico 4 - Porcentagem de perdas relativa a potência de transmissão

9.1.3. Discussão Cenário – Indoor 1

As análises realizadas no cenário indoor 1 não produziram resultados significativos, pois os dispositivos utilizados durante a transmissão estavam a uma distância pequena. A ocorrência de perdas de dados é baixa, assim como atraso na comunicação.

Em relação à variação da potência, os resultados mostram que quando a distância é pequena o sinal de potência de transmissão não interfere no desempenho da comunicação, em fatores como perda de dados e atraso.

9.2. Segundo Cenário de Testes - Indoor 2.

Os testes foram realizados no corredor do departamento do PCS no prédio da Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo. O firmware do roteador foi alterado no intuito de obter diferentes configurações de rede, possibilitando a definição de parâmetros como potência de transmissão e esquema de modulação. O cenário foi constituído apenas de um notebook e um *Access Point*, A conexão (entre roteador e terminal de configuração) foi estabelecida via SSH através da emulação do terminal Putty, o firmware utilizado foi o TOMATO (POLARCLOUD, 2015), os

Fonte: Autoria Própria (2015)

parâmetros analisados foram o delay calculado por meio do RTT (*Round trip time*) e a perda de pacotes. A figura 13 representa o cenário indoor 2.



Figura 13 - Cenário Indoor 2

Fonte: Autoria Própria (2015)

9.2.1. Configurações/Dispositivos utilizadas no cenário de testes Indoor 2:

- Potências de transmissão: 0 dBm.
- Taxas de transmissão: 54, 48, 36, 24, 18, 12, 11, 9, 6, 5.5, 2 e 1Mbps.
- Roteador Linksys E-900.
- Protocolo: ICMP.
- Tamanho do pacote: 50 bytes.
- Número de pacotes: 700 (10 transmissões de 70 pacotes).
- Distâncias: 1 a 25 m. Distância adotada para os testes: 25 m.

9.2.2. Resultados do Cenário Indoor 2

O gráfico 5 apresenta os valores relativos a media é desvio padrão do RTT para cada taxa de transmissão, o objetivo foi identificar o limite da relação entre perdas de dados e as diferentes taxas de transmissão. O RTT representa o período para

que um pacote seja enviado, mais o tempo da confirmação de recebimento do pacote.



Gráfico 5 – Média e Desvio Padrão do (RTT) Relacionados a Taxa de Dados

Esperava-se que, em velocidades mais altas de transmissão, melhor desempenho fosse observado no que diz respeito ao RTT médio, porém os valores se mantém próximos a média, paras as taxas baixas e as taxas elevadas. As taxas mais baixas de transmissão, 1 e 2 Mbps, apresentam desempenho ligeiramente melhor em relação às taxas mais altas, 48 e 54Mbps. Este comportamento se deve ao fenômeno conhecido por EVM (Error Vector Magnitude), no qual a potência de transmissão, principalmente relacionada a altas taxas de dados, tende à diminuir o alcance do receptor, (CISCO, 2005).

As taxas de dados de 9 e 6 Mbps utilizam o OFDM para a transmissão de dados e utilizam o BPSK como esquema de modulação, que tem pior desempenho em relação ao QAM, como pode ser notado em (GUPTA; SHARMA, 2012). Esse trabalho avalia as técnicas de modulação QAM, QPSK e BPSK quando o sistema é submetido a um número de usuários, ruídos e interferência no canal.

Nota-se um desvio padrão menor nas taxas de transmissão mais baixas. Novamente, o EVM (Error Vector Magnitude) que contribui para que taxas altas de transmissão tenham o alcance reduzido. Além disso, na modulação QAM a capacidade de bits por símbolo na constelação é elevada, o que faz com que essa técnica esteja sujeita a erros divido a ruídos provocados pelos símbolos que estão mais próximos uns dos outros, (GUPTA; SHARMA, 2012).

O gráfico 6 apresenta a taxa de perdas de pacote de dados relacionadas a cada taxa de transmissão de dados. Nota-se que a taxa de perdas cai gradativamente a medida que as taxas de dados caem. Alguns fatores podem explicar este comportamento. O EVM explica o desempenho em taxas elevadas de comunicação, (CISCO, 2005), e ainda o esquema de modulação utilizado pelas taxas de transmissão, pois taxas elevadas possuem maior quantidade de símbolos por quadrantes, aumentando a probabilidade de erros provenientes de ruídos provocados por símbolos próximos uns dos outros, (GUPTA; SHARMA, 2012).



Gráfico 6 - Porcentagem de PerdaDados

Fonte: Autoria Própria (2015)

O gráfico 7 apresenta o comportamento da comunicação quando a alteração nos valores de potência de transmissão. Foram estabelecidas distâncias fixas, e dentro destes valores de distância, a potência do transmissor foi alterada. O gráfico mostra a queda gradativa da potência do receptor a medida que se diminui a potência do transmissor. O gráfico também mostra o ponto de saturação com potência de recepção -50 dBm a uma distância de 20m, em a recepção se estabiliza.



Gráfico 7 – Distâncias fixas e alteração da potência

Para essa etapa do experimento as taxas elevadas de dados não foram utilizadas, a análise foi com a taxa de 1Mbps. Dessa forma, o desempenho não sofre influência dos diferentes esquemas de modulação/codificação e também de fatores externos como aa capacidade de cobertura do roteador, sendo que a diminuição da potência do transmissor significa o decréscimo na potência do sinal recebido.

O gráfico 8 mostra o desempenho da potência do sinal no receptor em relação ao aumento da distância. Como esperado, a potência do receptor cai a medida que a distância aumenta, o sistema distribuído de controle de semáforos especifica distâncias de 200m para a comunicação. Os testes foram realizados com um dispositivo (roteador) sem antena, a antena foi retirada com objetivo de representar a potência do sinal do dispositivo. O objetivo foi estimar a potência no transmissor para atingir a distância especificada pelo sistema distribuído de controle de semáforos, 200m.

Fonte: Autoria Própria (2015)



Gráfico 8 – Potência Fixa e Alteração da Distância

Fonte: Autoria Própria (2015)

Os gráfico 9 mostra a relação entre o atraso mínimo teórico e o RTT mínimo obtido nos testes experimentais. As taxas de transmissão de dados de 1 a 54 Mbps e o tamanho de pacote (50 bytes) foram inseridos na equação com o objetivo de validar o modelo de comunicação proposto. O comportamento da comunicação em ambos os casos foi parecido como pode ser notado no gráfico. As menores taxas de transmissão apresentam maiores atrasos de transmissão, no entanto é possível notar alguns picos no atraso teórico que podem ser facilmente explicados, as taxas de 11, 5.5, 2 e 1 Mbps consideram o padrão IEEE 802.11b para o cálculo e as demais taxas consideram o padrão IEEE 802.11g.



Gráfico 9 – Atraso mínimo teórico e RTT mínimo obtido nos testes.

Fonte: Autoria Própria (2015)

Os gráficos 10, 11 e 12 mostram a variação do atraso (jitter) considerando a taxa de 1Mbps, evidenciado o bons resultados obtidos pela taxa de 1Mbps. Nos valores de RTT mínimo, que representam os menores tempos de transmissão o jitter é pequeno, nos tempos médios de transmissão jitter também é pequeno e nos piores tempos há um aumento jitter, porém ainda dentro do considerado aceitável para as especificações do sistema de controle distribuído de semáforos.



Gráfico 10 - RTT Mínimo obtido nos testes

Fonte: Autoria Própria (2015)



Gráfico 11 - RTT Médio obtido nos testes

Fonte: Autoria Própria (2015)



Gráfico 12 - RTT Máximo obtido nos testes

9.3. Discussão cenário Indoor 2

Analisando os resultados apresentados nos gráficos, é possível notar no gráfico 6 que, para as especificações definidas para o sistema distribuído de controle de semáforos, a transmissão de dados em taxas menores tem menor porcentagem de perda de dados. O RTT médio da transmissão fica próximo à media para todas as taxas de transmissão, portanto, não é significativo. No entanto, para a validação do modelo de equações, o RTT mínimo foi observado, no qual um comportamento semelhante pode ser observado.

Em (XIAO; ROSDAHL, 2002) é destacado que somente aumentando a taxa de dados, sem reduzir o overhead, o desempenho é limitado. Nos testes realizados neste trabalho também é possível notar que, para as configurações utilizadas, as taxas mais altas têm desempenho limitado, devido a diversos parâmetros, tais como o esquema de modulação utilizado, a distância de transmissão e também o overhead, o que ressalta o bom desempenho das taxas menores.

A relação distância de sinal de transmissão pode ser observada no gráfico 8, no qual aumentando a potência de transmissão atinge-se as distâncias especificadas pelo sistema distribuído de semáforos. A taxa de 1mbps apresenta as condições ideias para atender as especificações estabelecidas pelo sistema de controle distribuído de semáforos, pois: Apresenta baixa ocorrência de perda de dados, O Jitter é aceitável nos três casos, RTT mínimo, médio e máximo como pode ser notado nos gráficos. Portanto, Para a validação do modelo, o RTT médio da taxa de 1mbps foi considerado, pois: O desvio padrão para o RTT médio é de 16,3%, o que significa que em 95% das transmissões o RTT estará entre 70 e 98 mas e mesmo nos piores casos de RTT os resultados atendem às especificações do sistema de controle distribuído.

10. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS TESTES EXPERIMENTAIS

Os resultados obtidos mostram que a especificação proposta para o sistema de controle distribuído de semáforos é valido. A especificação pode ser validada através do modelo de equações proposto por (XIAO; ROSDAHL, 2002), que apresentou um comportamento semelhante aos resultados dos testes. As baixas porcentagens de perdas em taxas de transmissão menores, juntamente com os resultados observados em relação ao alcance da comunicação reforçam a validação da especificação de comunicação sem fio para sistema de controle distribuído de semáforos, mostrando que é possível e obter uma comunicação mis confiável através da adequação das configurações de rede de acordo com as necessidades do projeto em questão.

Os gráficos apresentam uma ligeira diferença entre os valores de RTT e atraso mínimo, que pode ser explicada por diversos fatores. A equação do atraso mínimo considera para a realização do cálculo o canal de comunicação em condições ideais de transmissão, sem erros, como destaca (XIAO; ROSDAHL, 2002). A equação também não considera o tempo que se leva para a confirmação de que o sinal foi recebido, diferentemente do mínimo RTT, onde o cálculo considera o tempo necessário para que o sinal seja enviado e o tempo que se leva para uma confirmação de que o sinal foi recebido, além de outros fatores. Como já mencionado, foi utilizado *SSH* para a transmissão de dados via *Putty*, e o tempo de processamento das aplicações que estão no dispositivo de transmissão também deve ser considerado, além do tempo de processamento do receptor que é responsável por enviar o sinal de confirmação.

Como já mencionado anteriormente, as análises mostram que em taxas elevadas de transmissão obtém-se uma maior porcentagem de perda de dados, devido a fatores como o esquema de modulação utilizado e a capacidade de alcance do transmissor, explicado pelo fator EVM. As análises relacionadas ao atraso de transmissão mostram que em taxas altas o atraso é ligeiramente menor, porém não é significativo, pois o atraso observado em taxas menores está muito próximo da média.

11. Modelo Analítico de comunicação.

A validação dos resultados dos testes foi realizada com base no modelo de equação apresentado por (XIAO; ROSDAHL, 2002), no qual o retardo mínimo alcançável para o padrão IEEE 802.11 é apresentado. Os valores especificados para o sistema de controle distribuído foram inseridos na equação e os resultados da equação podem ser comparados com os resultados dos testes. Abaixo é apresentada a equação 2 utilizada na validação dos resultados,

$$MD = T_{D_DATA} + \tau + T_{DIFS} + \overline{CW}$$
(2)

(XIAO e ROSDAHL, 2002)

O qual T_{D_DATA} é o retardo da transmissão de dados, τ é o retardo de propagação T_{DIFS} é o tempo de DIFS e \overline{CW} é o tempo médio de "Backoff". O T_{D_DATA} foi calculado para todas as taxas de transmissão de 1 a 54 Mbps utilizando o padrão 802.11g. O T_{D_DATA} foi obtido através da equação 5 como pode ser notado abaixo.

$$T_{D_{DATA}} = T_{P} + T_{PHY} + T_{H_{DATA}} + T_{DATA}$$
 (5)

(XIAO e ROSDAHL, 2002)

Na fórmula, T_P é o tempo de transmissão do preambulo físico T_{PHY} é o tempo de transmissão do cabeçalho físico, o T_{H_DATA} é tempo de transmissão do overhead MAC, e T_{DATA} o delay relacionado ao pacote de dados. Os valores de T_P + T_{PHY} foram extraídos da tabela 3, como pode ser vista abaixo.

Parâmetro	802.11a	802.11b	Parâmetro	802.11a	802.11b
T _{solt}	9 µs	20 µs	T_{SIFS}	16 μs	10 μs
τ	1 μs	1 μs	CW_{min}	15 μs	31 <i>µs</i>
T_p	16 μ <i>s</i>	144 μs	T_{PHY}	4 μs	48 μs
T _{DIFS}	34 μs	50 μs	T _{SYM}	4 μs	N/A
Easte: Vice E Bendehl (2002)					

Tabela 3 - Parâmetros para o IEEE 802.11a e 802.11b

Fonte: Xiao E Rosdahl (2002).

Os valores T_{H_DATA} e T_{DATA} que representam respectivamente o tempo de transmissão do cabeçalho MAC e o tempo de transmissão da carga útil foram calculados da seguinte forma: para o T_{H_DATA} tem-se o valor do overhead MAC obtido em Xiao e Rosdahl (2002); utiliza-se da formula obtida em (KUROSE; ROSS, 2012), na qual o tamanho da informação é divido pela taxa de dados, para calcular o T_{DATA} ; tem-se o tamanho do pacote especificado pelo sistema de controle de semáforos e utiliza-se da mesma formula obtida em (KUROSE; ROSS, 2012).

A equação 1 apresenta o atraso mínimo alcançado na transmissão. Tais valores foram comparados à media de RTT mínimo obtida nos testes e foi observado que o comportamento da comunicação corresponde aos resultados apresentados pelo modelo pela substituição dos valores na equação. Nos dois casos, à medida que as taxas de transmissão diminuem, o atraso aumenta. Os gráficos 9 destaca este comportamento, o que reforça a validação do modelo junto aos resultados das equações.

Com os resultados dos testes e do modelo, foi possível comprovar que, para transmissões com as configurações apresentadas pelo sistema distribuído de semáforos, as taxas mais baixas de transmissão são as melhores opções, pois a porcentagem de perdas é baixa, como apresentado no gráfico 6 e o atraso de transmissão não apresenta diferença significativa em relação às taxas mais elevadas, como é possível notar no gráfico 5.

A figura 14 representa a comunicação sem fio incorporada ao modelo distribuído de controle de semáforos, no qual a lógica de funcionamento dos nós é apresentada, ressaltando que cada nó representa um cruzamento, ou seja, a lógica apresentada é referente a um só nó.



Figura 14 - Malha genérica de controle do semáforo.

Fonte: Autoria Própria (2015)

Fazendo uma analogia entre o modelo analítico e a teoria de controle, o objetivo é representar o atraso da rede como uma função de transferência de atraso conhecido e estabelecer condições para que a confiabilidade da comunicação não interfirá no processo de controle dos semáforos.

Após o estudo do comportamento da comunicação do padrão IEEE 802.11 em diversas configurações de rede, a concepção da especificação do modelo de comunicação para o sistema distribuído de semáforos foi estabelecida. Atrasos da rede representados como uma função de atrasos. Os parâmetros que definem o atraso mínimo teórico são representados na figura 15.





Fonte: Autoria Própria (2015)

Taxas (Mbps)	T _{D DATA} (μs)	τ(µs)	T _{DIES} (μs)	<u><i>CW</i></u> (μs)	MD(ms)
54	27,9	1	34	67,5	0,130
48	28,9	1	34	67,5	0,131
36	31,8	1	34	67,5	0,134
24	37,8	1	34	67,5	0,140
18	43,7	1	34	67,5	0,146
12	55,6	1	34	67,5	0,158
11	230,9	1	50	310	0,592
9	67,5	1	34	67,5	0,170
6	91,3	1	34	67,5	0,194
5,5	269,8	1	50	310,0	0,631
2	406,0	1	50	310,0	0,767
1	620,0	1	50	310,0	0,981

Tabela 4 - Parâmetros que definem o atraso mínimo teórico

Fonte: Autoria própria (2015)

Substituindo os valores dos resultados dos testes no diagrama obtém-se:

Atraso de transmissão obtido pelo modelo utilizando o RTT mínimo

T = Delay da Rede + Controlador + semáforo + sensores + delay da rede.

T = 2,5ms + 10ms + 1ms + 5ms + 2,5ms.

T= 21ms.

Atraso de transmissão obtido pelo modelo utilizando o RTT médio

T = Delay da Rede + Controlador + semáforo + sensores + delay da rede.

T = 36ms + 10ms + 1ms + 5 ms + 36 ms.

T= 88ms.

Atraso de transmissão obtido pelo modelo utilizando o RTT máximo

T = Delay da Rede + Controlador + semáforo + sensores + delay da rede.

T = 215ms + 10ms + 1ms + 5ms + 215ms.

T= 446ms.

Pior Caso

O pior tempo obtido na transmissão ocorre nos valores de RTT máximos obtidos na transmissão. O tempo máximo de RTT obtido na transmissão foi 321,566ms.

Então:

T = Delay da Rede + Controlador + semáforo + sensores + delay da rede.

T = 321,57ms + 10ms + 1ms + 5ms + 321,57ms.

T = 659,14ms

Dessa forma percebe-se que mesmo considerando o pior caso, o máximo RTT é menor que o tempo de 1000ms especificado para o sistema de controle distribuído de semáforos. O atraso médio de transmissão obtido pelo modelo foi de 88ms, que está muito abaixo do atraso máximo especificado para o sistema distribuído de semáforos, de 1000 ms. Desta forma, o modelo é valido e as especificações propostas para o sistema atendem às necessidades.

12. CONCLUSÃO

Como objetivo principal, este trabalho visava analisar e validar as especificações estabelecidas da comunicação para o sistema de controle distribuído de semáforos. A análise foi realizada por meio de testes da comunicação sem fio pelo padrão IEEE 802.11. O modelo foi validado, foi obtida uma especificação para os parâmetros do padrão IEEE 802.11 que atende às necessidades do sistema distribuído de controle de semáforos. Como o tempo médio de transmissão obtido pelo uso da especificação, 88ms e também o pior caso analisado durante transmissão 659,14ms, foram menores que o tempo estimado pelo sistema de semáforos, 1000ms, conclui-se que as especificações obtidas pelas análises dos testes e pela validação no modelo de equações são validas e atendem às necessidades do sistema de controle distribuído de semáforos. Assim entende-se que os resultados obtidos através dos experimentos mostram que é possível utilizar a comunicação Wifi para a transmissão de dados no sistema de controle distribuído de semáforos.

Não foi encontrado trabalho semelhante e que avalia a comunicação na camada 2, considerando fatores tais como esquemas de modulação/codificação e potência de transmissão. Durante as análises é necessário que ambiente de experimentação seja controlado de modo a diminuir a quantidade de variáveis que possam interferir nos resultados. Para atingir as distâncias especificadas para o sistema de

semáforos, é necessário analisar o dispositivo juntamente com o tipo de antena para que o ganho de potência do sinal seja adequado.

Como observado nas análises dentre aspectos que possam vir a contribuir em pesquisas relacionadas ao desempenho da comunicação sem fio estão, a escolha adequada da taxa de dados, pois para o tipo de comunicação estudado taxas elevadas de dados tem maior porcentagem de perdas, para atingir maiores de distâncias durante a transmissão, é necessário analisar o dispositivo juntamente com o tipo de antena para que o ganho de potência do sinal seja adequado. Dessa forma entende-se que os resultados obtidos neste trabalho podem contribuir para que aplicações que utilizam da comunicação sem fio tenham melhor conhecimento sobre os aspectos que afetam o desempenho da comunicação.

13. REFERÊNCIAS:

ABBAS, A. M.; SOUFY, K. A. M. A. Analysis of IEEE 802.11 DCF for ad hoc networks: Saturation. **2011 IEEE 5th International Conference on Internet Multimedia Systems Architecture and Application (IMSAA)**, p. 1-6, Dezembro 2011. ISSN 978-1-4577-1329-3.

AMAN, M. N.; CHAN, W. K.; SIKDAR, B. Collision Detection in IEEE 802.11 Networks by Error Vector Magnitude Analysis. **2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)**, p. 5218-5223, Dezembro 2012. ISSN 1930-529X.

ANTONELLI, G. Interconnected dynamic systems: An overview on distributed control. **IEEE Control Systems**, v. 33, n. 1, p. 76-88, Janeiro 2013. ISSN 1066-033X.

BADHIYE, B. B.; LIMAYE, S. S. Performance Evaluation Of BPSK And QPSK Modulation With LDPC Codes. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), v. 2, n. 1, p. 1-4, janeiro 2013. ISSN 2278-0181.

BAROWSKI, Y.; BIAZ, S.; AGRAWAL, P. Towards the performance analysis of IEEE 802.11 in multi-hop ad-hoc networks. **2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference**, v. 1, p. 100-106, Março 2005. ISSN 1525-3511.

CAMPONOGARA, E. et al. Distributed model predictive control. **IEEE Control Systems**, Agosto 2002. 44 - 52.

CARVALHO, M. M.; GARCIA-LUNA-ACEVES, J. J. Delay analysis of IEEE 802.11 in single-hop networks. **11th IEEE International Conference on Network Protocols 2003. Proceedings.**, p. 146 - 155, Novembro 2003. ISSN 1092-1648.

CARVALHO, S. T.; COPETTI, A.; FILHO, O. G. L. Sistema de computação ubíqua na assistência domiciliar à saúde. **Journal of Health Informatics**, v. 3, n. 2, p. 51-57, 2011.

CHEHRI, A. et al. A comparison between different FHSS techniques for use in a multiple access secure wireless sensor network. **Wireless and Microwave Technology Conference, 2006. WAMICON '06. IEEE Annual**, 4 Dezembro 2006. 1-4.

CISCO. Cisco, 2005. Disponivel em:

http://www.cisco.com/en/US/products/hw/wireless/ps4570/products_white_paper09186a00801d61a3.shtml. Acesso em: 1 junho 2014.

DI FEBBRARO, A.; GIGLIO, D.; SACCO, N. Urban traffic control structure based on hybrid Petri nets. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, Dezembro 2004. 224-237.

ESTEEM. (2015). Acesso em 2015, disponível em ESTEEM: http://www.esteem.com/articles/industrial-wireless-ethernet.html.

GAST, M. S. 802.11 Wireles Networks. 2. ed. [S.I.]: O' Reilly, 2005.

GHABOOSI, K. et al. IEEE 802.11 Distributed Coordination Function service time and queuing delay analysis using Parallel Space - Time Markov Chain. **Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International**, p. 15-18, Setembro 2008. ISSN 978-1-4244-2643-0.

GNASSOU, A.; FRIGON, J.-F.; SANSO, B. Impact of Wireless Channel on VoIP QoS and Admission Regions in IEEE 802.11g WLANs. **Networking and Communications, 2008. WIMOB '08. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing,** Avignon, Outubro 2008. 63 - 68.

GOKULAN, B. P.; SRINIVASAN, D. Distributed Geometric Fuzzy Multiagent Urban Traffic Signal Control. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 11, n. 3, p. 714 - 727, Junho 2010. ISSN 1524-9050.

HORAK, R. **Telecommunications and Data Communications Handbock**. 2^a. ed. [S.I.]: Wiley, 2007.

HUI, J.; DEVETSIKIOTIS, M. A unified model for the performance analysis of IEEE 802.11e EDCA. **IEEE Transactions on Communications**, Setembro 2005. 1498 - 1510.

IEEE STANDARTS. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. **IEEE**, New York, 29 Março 2012. 1-2793.

Iperf.fr. (2015). Acesso em 2014, disponível em Iperf.fr: https://iperf.fr/

K, R.; RATTAN, S. S.; U, A. Understanding the Features of IEEE 802.11g in High Data Rate Wireless LANs. International Journal of Computer Applications, Fevereiro 2013. 1-5.

KHALAF, R.; RUBIN, I. Throughput and Delay Analysis in Single Hop and Multihop IEEE 802.11 Networks. **Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, 2006. BROADNETS 2006. 3rd International**, Outubro 2006. 1-9.

KHANDURI, R.; RATTAN, S. S. Performance Comparison Analysis between IEEE 802.11a/b/g/n Standards. International Journal of Computer Applications, v. 78, n. 1, p. 1-8, Setembro 2013.

KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M.; LI, L. Improving TCP Performance in Wireless Networks by Classifying Causes of Packet Losses. **2009. WCNC 2009. IEEE Wireless Communications and Networking Conference**, Abril 2009. 1 - 6. KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Computer Networking:** A Top-Down Approach (6th Edition). [S.I.]: Person, v. 6, 2012.

LI, H.; HAN., Z. Distributed Scheduling of Wireless Communications. **2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)**, p. 1188 - 1193, Dezembro 2011. ISSN 978-1-4673-0039-1.

LINKSYS. **LINKSYS**, 2015. Disponivel em: http://www.linksys.com/pt-latam/products/routers/E900>. Acesso em: 13 Janeiro 2015.

LUGLI, B.A.; SOBRINHO, G.D. **Tecnologias Wireless para automação Industrial: Wireless_Hart, Bluetooth, Wisa, Wi-fi, ZigBee e Sp-100:** Instituto Nacional de Telecomunicações Inatel: 2012.

LUGLI, B.A. et.al. **Redes sem fio em Automação Industrial:** Instituto Nacional de Telecomunicações Inatel: 2012.

MANSHAEI, H. et al. Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC and physical layer protocol. World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM 2005. Sixth IEEE International Symposium on a, 13 june 2005. 88-97.

MATSUMOTO, A. et al. Performance evaluation of IEEE 802.11n devices for vehicular networks. **IEEE 34th Conference on Local Computer Networks**, **2009**. **LCN 2009**., Outubro 2009. 669 - 670.

metageek. (2015). Acesso em 2015, disponível em metageek: http://www.metageek.com/products/office/.

NATIONAL Instruments. **Quadrature Amplitude Modulation (QAM)**, 05 Novembro 2014. Disponivel em: http://www.ni.com/white-paper/3896/en/. Acesso em: 12 fevereiro 2015.

NICOPOLITIDIS, P. et al. **Wireless Networks**. 1°. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2002.

OLIVEIRA, B. L.; CAMPONOGARA, E. Multi-agent model predictive control of signaling split in urban traffic networks. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 18, n. 1, p. 120-139, Fevereiro 2010.

OPENSSH. **OpenSSH**, 1999. Disponivel em: http://www.openssh.com/. Acesso em: janeiro 2015.

PINTO, E. L. A Técnica de Transmissão OFDM. **Revista Científica Periódica -Telecomunicações**, v. V, n. 1, p. 1-10, Junho 2002. ISSN 1516-2338.

POLARCLOUD. **polarcloud**, 2015. Disponivel em: http://www.polarcloud.com/tomato. Acesso em: 13 janeiro 2015.

PUTTY. Putty. Disponivel em: http://www.putty.org/. Acesso em: janeiro 2015.

RAPTIS, P. et al. Delay jitter analysis of 802.11 DCF. **Electronics Letters**, 1472 - 1474 Dezembro 2007.

RUBINSTEIN, M. G. . A. R. J. F. Qualidade de serviço em redes 802.11. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2002, 2002.

SAKSHI GUPTA, H. S. Performance Investigation for Different Modulation Techniques in WCDMA with Multipath Fading Channels. **International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering**, v. 2, n. 7, p. 20-23, Julho 2012. ISSN 2277 128X.

SALYERS, D. C.; STRIEGEL, A. D.; POELLABAUER, C. Wireless reliability: Rethinking 802.11 packet loss. International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2008. WoWMoM 2008, Junho 2008. 1 - 4.

SHAIKH, M. K. The Performance Evaluation of OFDM Based WLAN (IEEE **802.11a and 802.11g)**. [S.I.]: School of Computing at Blekinge Institute of Technology, 2009. 1-48 p.

SRINIVASAN, D.; CHOY, M. C.; CHEU, R. L. Neural Networks for Real-Time Traffic Signal Control. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, Setembro 2006. 261 - 272.

SUGIMOTO, T. et al. Maximum throughput analysis for RTS/CTS-used IEEE 802.11 DCF in wireless multi-hop networks. **2010 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)**, Maio 2010. 1 - 6.

VASSIS, D. et al. The IEEE 802.11g standard for high data rate WLANs. **Network**, **IEEE**, 20 junho 2005. 21-26.

VIEIRA, D. L. F. G. **IEEE 802.11**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 18. 2005.

WANG, Y.; YAN, N.; LI, T. Throughput Analysis of IEEE 802.11 in Multi-Hop Ad Hoc Networks. **WiCOM 2006.International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2006**, Setembro 2006. 1 - 4.

WANG, Z.; HASSAN, M. The Throughput-Reliability Tradeoff in 802.11-Based Vehicular Safety Communications. **CCNC 2009. 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2009.**, Janeiro 2009. 1 - 5.

WARE, C.; WYSOCKI, T.; CHICHARO, J. Hidden terminal jamming problems in IEEE 802.11 mobile ad hoc networks. **Communications, 2001. ICC 2001. IEEE** International Conference on, 11 Junho 2001. 261-265.

WILLIAMS S. et.al Specification of the Bluetooth System Version 1.1, 2001.

Wireless Design & Development. (2015). Acesso em 2015, disponível em Wireless Design & Development:

http://www.wirelessdesignmag.com/blogs/2012/09/how-non-line-sight-backhaul really-works.

WOLFF, A.; WIETFELD, C. Performance analysis of 802.11 DCF parameters which support QoS in emergency scenarios. **2011 8th International Symposium on 2011 8th International Symposium on**, Novembro 2011. 629 - 633.

XIAO, Y.; ROSDAHL, J. Throughput and delay limits of IEEE 802.11. **IEEE Communications Letters**, Novembro 2002. 355 - 357.

YANG XIAO, Y. P. (Ed.). Emerging Wireless LANs, Wireless PANs, and Wireless MANs. [S.I.]: Wiley, 2009.

YU, X.; SUN, F.; CHENG, X. Intelligent Urban Traffic Management System Based on Cloud Computing and Internet of Things. **International Conference on Computer Science & Service System (CSSS)**, p. 2169- 2172, Agosto 2012.

YU, X.; SUN, F.; CHENG, X. Intelligent Urban Traffic Management System Based on Cloud Computing and Internet of Things. **2012 International Conference on Computer Science & Service System (CSSS)**, Agosto 2012. 2169 - 2172.

ZHAO, L. et al. Integrated quality-of-service differentiation over IEEE 802.11 wireless LANs. **IET Communications**, Fevereiro 2008. 329 – 335.

ZHENG, L.; LU, N.; CAI, L. Reliable Wireless Communication Networks for Demand Response Control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Março 2013. 133 - 140.

ZHU, Y.-H.; TIAN, X.-Z.; ZHENG., J. Performance Analysis of the Binary Exponential Backoff Algorithm for IEEE 802.11 Based Mobile Ad Hoc Networks. **2011 IEEE** International Conference on Communications (ICC), Junho 2011. 1-6.