

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

MARCO AURÉLIO DE OLIVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DA MULTIPLEXAÇÃO OFDM
CONFORME PADRÃO IEEE 802.11P VIA TECNOLOGIA DE
RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE**

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2014

MARCO AURÉLIO DE OLIVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DA MULTIPLEXAÇÃO OFDM CONFORME
PADRÃO IEEE 802.11P VIA TECNOLOGIA DE RADIO DEFINIDO
POR SOFTWARE**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Marco Aurélio de Oliveira**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva

Co-orientador: MSc. Camilo Arturo Rodríguez Díaz

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2014

MARCO AURÉLIO DE OLIVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DA MULTIPLEXAÇÃO OFDM CONFORME
PADRÃO IEEE 802.11P VIA TECNOLOGIA DE RADIO DEFINIDO
POR SOFTWARE**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Marco Aurélio de Oliveira, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 11, de Dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

MSc. Camilo Arturo Rodríguez Díaz
Universidade Federal do Espírito Santo
Co- orientador

Eng. Paulo Roberto Monfrim Canno
Diretor de Tecnologia da Rede Gazeta
Examinador

Prof. Dra. Maria Jose Pontes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

DEDICATÓRIA

A minha mãe Maria do Carmo de Oliveira e minha namorada Diana Rodrigues Sarcinelli Dos Santos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por ter me guiado e me dado força para conclusão deste curso.

Agradeço a minha mãe que, mesmo longe, sempre acreditou em mim, me dando seu apoio incondicional. Aos demais familiares agradeço a torcida que, de alguma forma, me ajudou a chegar até aqui.

Agradeço a minha namorada Diana Rodrigues Sarcinelli dos Santos por todo amor, carinho, companheirismo e incentivo que me ajudou a superar as dificuldades vividas durante o curso.

Agradeço ao meu Orientador Jair Adriano Lima Silva e ao meu Co-orientador Camilo Arturo Rodríguez Díaz pelos conselhos, sugestões e críticas que tornaram este trabalho possível. De forma especial agradeço ao meu Orientador por ter despertado em mim o interesse pela área de Telecomunicações.

Agradeço também ao laboratório do CPID (Centro de Pesquisa Inovação e Desenvolvimento) por disponibilizar toda a infraestrutura (software, hardware, espaço físico e material Humano) necessária à realização deste trabalho.

Por fim agradeço a todos os meus professores por todo conhecimento e experiência de vida que me ensinaram e que levarei durante a minha carreira e a todos os meus amigos e colegas pelas experiências que vivemos juntos.

RESUMO

Realiza-se neste projeto um estudo sobre algumas especificações da camada física do padrão veicular IEEE 802.11p, através da implementação da técnica de multiplexação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), por meio da tecnologia de radio definido por software RDS, comprovando assim sua eficiência, praticidade e reconfigurabilidade. Em um primeiro momento, demonstra-se neste projeto como são formadas as redes veiculares e as especificações de camada física dos dispositivos envolvidos no processo, fazendo-se uma comparação com a camada física do padrão IEEE 802.11a das redes locais de comunicação sem fio. Em seguida são apresentados os dispositivos que formam a tecnologia RDS, tais como o USRP2 (*Universal Software Radio Peripheral*) e o software livre GNU Radio. Na sequência, são mostrados ensaios experimentais com os dispositivos RDS implementando sistemas de comunicação mais simples, como a modulação QPSK, e posteriormente a implementação da multiplexação OFDM com os diferentes modos de modulação e codificação especificados na norma, bem como a análise dos resultados.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Arquitetura VANET.....	19
Figura 2 – Divisão da banda de frequência DSRC nos Estados Unidos da América.	20
Figura 3 – Comparação através de gráficos de tempo versus frequência entre os sistemas uniportadora e multiportadora.	22
Figura 4 - a) Modulação Multiportadora sem sobreposição; (b) Modulação Multiportadora ortogonal.....	23
Figura 5 – Modelo simplificado de um transmissor e um receptor OFDM	24
Figura 6 – Comparação entre as transmissões sem e com extensão cíclica.	25
Figura 7 – Alocação das subportadoras em um símbolo OFDM.....	26
Figura 8 – Tranceptor RDS ideal.....	31
Figura 9 – Transceptor RDS real.	33
Figura 10 – Foto ilustrativa da USRP2.	33
Figura 11 – Interface do software GNU Radio.....	36
Figura 12 – Estrutura universal do RDS.	37
Figura 13 – Montagem da bancada de experimento.	38
Figura 14 – Diagrama de bloco transmissor QPSK.....	39
Figura 15 – Espectro e diagrama de constelação do sinal em banda base no transmissor.....	40
Figura 16 – Diagrama de blocos do receptor QPSK.....	41
Figura 17 – Espectro e diagrama de constelação do sinal em banda base no receptor.	42
Figura 18 – Diagrama de bloco transmissor IEEE 802.11p.	43
Figura 19 – Diagrama de blocos do receptor IEEE 802.11p.....	45
Figura 20 – Diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal recebido utilizando modulação BPSK com codificação 1/2 e a mensagem reconstruída no terminal de comando.....	48
Figura 21 - Diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal recebido utilizando modulação QPSK com codificação 1/2 e a mensagem reconstruída no terminal de comando.....	49
Figura 22 - Diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal recebido utilizando modulação 16QAM com codificação 1/2 e a mensagem reconstruída no terminal de comando.....	50

Figura 23 - Diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal recebido utilizando modulação 64QAM com codificação 2/3 e a mensagem reconstruída no terminal de comando.....	51
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação camada física padrão IEEE 802.11a e IEEE 802.11p.	28
Quadro 2 – Principais placas filhas disponíveis no mercado	34
Quadro 3 – Principais características dos computadores utilizados nos experimentos.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxas de transmissão de dados padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11p.....	29
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

16-QAM	16 <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
64-QAM	64 <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
A/D	<i>Analog-to-Digital converter</i>
Ad Hoc	Redes sem fio que dispensam o uso de um ponto de acesso comum
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
D/A	<i>Digital-to-Analog convertor</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DDC	<i>Digital Down Converter</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
DSRC	<i>Dedicated Short-Rang Communication</i>
DUC	<i>Digital Up Converter</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GNU	<i>Gnus not Unix</i>
ICI	<i>Inter-Channel Interference</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IF	<i>Intermediate Frequency</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
LabTel	Laboratório de Telecomunicações da UFES
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc Network</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PMT	<i>Page Maker Template</i>
QoS	<i>Quality-of-Service</i>
QPSK	<i>Quaternary Phase Shift Keying</i>
RDS	Rádio Definido por Software
RF	<i>Radio Frequency</i>
RSU	<i>Road Site Unit</i>

SD	<i>Secure Digital</i>
UDP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
UHD	<i>Universal Hardware Driver</i>
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
VANET	<i>Vehicular Ad Hoc Networks</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle Communication</i>
VIV	<i>Vehicle to Infrastructure Communication</i>
WAVE	<i>Wireless Access in Vehicular Environment</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Comunicação Veicular	13
1.2	O Padrão IEEE 802.11p	14
1.3	A Modulação/Multiplexação OFDM	14
1.4	A Tecnologia Rádio Definido por Software	14
1.5	Objetivo deste Projeto	16
2	REDES VEICULARES	17
3	CAMADA FÍSICA DO PADRÃO IEEE 802.11P.....	21
3.1	A Técnica de Multiplexação OFDM.....	21
3.2	O Prefixo Cíclico.....	24
3.3	Simplificação da Equalização em Sistemas OFDM.....	25
3.4	Formação do Símbolo OFDM Segundo Padrão IEEE 802.11p.....	26
3.5	Diferença entre os padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11p.....	27
4	A PLATAFORMA RDS: CONCEITOS BÁSICOS	31
4.1	A Parte de Hardware do RDS	32
4.2	Parte de Software do RDS	35
5	IMPLEMENTAÇÃO DA CAMADA FÍSICA DO PADRÃO IEEE 802.11P.....	38
5.1	Transmissão e Recepção QPSK.....	39
5.2	Implementação da multiplexação OFDM segundo padrão IEEE802.11p.....	43
5.3	Resultados Experimentais.....	47
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	52
	BIBLIOGRAFIA.....	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comunicação Veicular

A garantia de maior segurança nas estradas e ruas, a otimização do fluxo de veículos, ao informar as condições de tráfego, e até mesmo o entretenimento dos ocupantes dos veículos têm, nos últimos anos, motivado a comunidade internacional a regulamentar e desenvolver equipamentos para comunicação veicular. A comunicação veicular ocorre através de uma rede de comunicação sem fio formada dinamicamente pelos veículos em movimento e pelas infraestruturas de redes, localizadas em pontos estratégicos nos acostamentos de estradas e ruas. Um dos principais objetivos desta comunicação é o de permitir que condutores de veículos possam tomar decisões rápidas e eficazes a fim de evitar, por exemplo, uma colisão. A comunicação nessas redes deve ocorrer de forma confiável e deve haver garantias de que as mensagens serão de fato encaminhadas e recebidas nos seus destinos em tempo hábil, devido ao curto período que o veículo permanece em uma área onde há conexão (SÁ e GORENTE, 2012), (CAVALCANTI, 2008), (BASSO, 2013).

Entre as vantagens da comunicação veicular destacam-se na área de segurança os avisos prevenindo colisões, avisos de veículos ultrapassando, informações de auxílio para mudança de faixa, informações de contramão e acionamento de serviço de resgate. Em relação aos serviços que a via poderá prestar estão incluídos *download* de mapas, vagas de estacionamento, pontos de pedágio, informações turísticas e propagandas de pontos comerciais locais. No que diz respeito à otimização do tráfego, o condutor poderá saber das condições da via e desse modo seguir por vias alternativas a fim de evitar congestionamentos. A comunicação veicular também poderá oferecer entretenimento e conforto aos usuários devido a possibilidade de oferecer acesso à internet, serviços de telefonia, televisão e rádio (BASSO, 2013) (BARROS, GOMES e COSTA, 2012).

Apesar de grande parte da tecnologia utilizada para comunicação veicular já existir, as condições adversas para esse sistema de comunicação como, por exemplo, os complexos ambientes físicos das vias, as altas velocidades que os veículos podem atingir e a garantia de entrega de informação em tempo hábil estimularam o desenvolvimento de um novo padrão de comunicação com novas especificações de camada física: o padrão IEEE 802.11p (BASSO, 2013).

1.2 O Padrão IEEE 802.11p

No intuito de superar os desafios impostos pelas redes veiculares e ao mesmo tempo promover regras e padrões de operação para essas redes, o instituto IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) criou o padrão IEEE 802.11p, que especifica a camada física e o controle de acesso ao meio para as redes veiculares. Este padrão, também conhecido como WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environment*), foi desenvolvido baseado no padrão de rede local sem fio IEEE 802.11a, que utiliza a moderna técnica de multiplexação/demultiplexação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e opera em uma faixa de frequência pouco utilizada, o que é conveniente, porque apresenta menor possibilidade de interferência (BARROS, GOMES e COSTA, 2012) (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2013).

1.3 A Modulação/Multiplexação OFDM

Entre os grandes avanços tecnológicos dos últimos anos em sistemas de comunicação sem fio, cita-se a implementação da técnica de modulação OFDM na transmissão de sinais como um dos principais. Essa técnica divide a sequência de dados a serem transmitidos em várias subsequências, que são mapeadas e moduladas paralelamente em igual número de portadoras idealmente ortogonais que são transmitidas simultaneamente. A multiplexação e a demultiplexação são realizadas via transformada rápida de Fourier inversa e direta, respectivamente (VIEIRA, 2004) (SILVA, 2006).

A modulação OFDM combinada com artifícios tais como o de intervalo de guarda e a equalização no domínio da frequência é a grande responsável pela elevação das taxas de transmissão em sistemas de comunicação sem fio. Por essa razão é a técnica utilizada, por exemplo, na quarta geração de telefonia celular, nos sistemas de transmissão de TV digital, nas redes locais WLAN (*Wireless Local Area Network*), nas redes metropolitanas WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), entre outros (SILVA, 2006).

1.4 A Tecnologia Rádio Definido por Software

Pode-se entender por rádio definido por software como sendo funções da camada física que são, quase que completamente, realizadas em software, almejando construir um único

transceptor reprogramável capaz de atuar em diferentes funções. Isto exige flexibilidade da arquitetura para que o rádio possa ser configurado, ocasionalmente em tempo real, e assim adaptar-se a vários padrões de comunicação sem fio (ITO e SCHENA, 2006).

As constantes mudanças nos padrões de comunicação sem fio como o tipo de modulação, frequência de operação e protocolos de operação visam maior eficiência do sistema de comunicação de dados, voz e vídeos. Mas por outro lado, essas mudanças acabam deixando os equipamentos utilizados no processo de comunicação rapidamente obsoletos, encarecendo assim o custo das operadoras de redes que muitas vezes não têm a oportunidade de realizar o planejamento sobre o retorno dos investimentos na instalação dos novos dispositivos. Uma alternativa para esse problema seria o uso da tecnologia RDS (rádio definido por software) na construção do transmissor e/ou receptor, já que através de uma simples troca de software seria possível reconfigurar os dispositivos de acordo com os padrões dos sistemas de comunicação vigentes (WAMICHA e WINBERG, 2011).

A tecnologia RDS é atrativa porque fornece solução de baixo custo, já que, uma vez feito o investimento inicial, as atualizações de software não implica em custos elevados. A flexibilidade do RDS é idealmente adequado para atender a QoS (*Quality-of-Service*) obrigatória para padrões de transmissão de dados, voz e vídeo. Hoje muitas estações rádio base empregam arquitetura RDS ou pelo menos algumas tecnologias baseadas em seus princípios. Cada vez mais fornecedores de *Chipsets* estão adotando princípios de RDS em projetos de rádios multi-modo e multi-padrão destinados a realizar pequenos ajustes em dispositivos como celulares e *laptops* (ROUPHEL, 2009) (JANSON, 2012).

Embora o conceito de RDS já exista há algum tempo, apenas recentemente surgiram dispositivos concretos baseados neste conceito devido aos elevados recursos computacionais necessários para implementar as funcionalidades dos rádios em software. Essa tecnologia representa uma grande promessa e envolve um extenso leque de estudo e pesquisa, por isso a grande necessidade de projetos que comprovem a eficiência e a praticidade do RDS (JANSON, 2012).

A fim de comprovar a praticidade e a eficiência do RDS, este projeto utiliza esta tecnologia para a implementação de um moderno sistema de comunicação utilizado nas redes veiculares.

1.5 Objetivo deste Projeto

O objetivo principal deste trabalho é utilizar a tecnologia RDS para implementar a multiplexação OFDM segundo o padrão de comunicação veicular IEEE 802.11p. Para isso foram utilizados dispositivos como o USRP2 (*Universal Software Radio Peripheral*) que, conjuntamente a um computador pessoal equipado com um software livre GNU Radio, formam o rádio definido por software. Com o intuito de mostrar os potenciais da tecnologia RDS e conhecer suas possíveis limitações, foram feitos inicialmente experimentos mais simples, utilizando a modulação QPSK, e na sequência foi construído uma estação de rádio difusão de baixa potência capaz de gerar, modular e transmitir sinais de radio frequência (RF) respeitando a camada física do padrão IEEE 802.11p. Para captar os sinais radiados pelo transmissor foi construído, utilizando equipamentos similares, um receptor capaz de demodular e recuperar os sinais enviados.

2 REDES VEICULARES

As redes sem fio entre veículos são conhecidas por redes *Ad Hoc* veiculares VANET (*Vehicular Ad Hoc Networks*). As redes veiculares recebem esse nome devido ao fato de não possuírem um terminal centralizador, chamado ponto de acesso, que realiza as funções de roteamento e controle de acesso. Nesses tipos de rede *Ad Hoc*, cada nó da rede se torna um roteador dinâmico, sendo responsável por encaminhar mensagens de um nó para outros que estejam fora da área de alcance, na tentativa de estabelecer uma comunicação (DIAS, ANDRADE e GUEDES, 2010), (CAVALCANTI, 2008).

O principal objetivo da VANET é proporcionar maior segurança e conforto aos passageiros dos veículos, diminuindo assim os riscos de acidentes em vias públicas e tornando as viagens mais agradáveis ao proporcionar acesso a outras redes como a internet, por exemplo. A parte comercial também é algo bem visto nas VANETs, pois a possibilidade de anúncios e propagandas é um atrativo para as empresas (Vanet's - *Vehicular Adhoc Networks*, 2010), (RIBEIRO, COUTINHO e JORDÃO, 2009).

As VANETs são formadas por veículos automotores que possuem um dispositivo de comunicação sem fio embarcado e por equipamentos fixos, instalados possivelmente nos acostamentos das vias, como semáforos, postes de iluminação, postos de gasolinas entre outros. A comunicação na VANET pode ser estabelecida entre os próprios veículos automotores, a chamada comunicação V2V (*Vehicle to Vehicle Communication*); entre os veículos e a infraestrutura, conhecida por comunicação V2I (*Vehicle to Infrastructure Communication*) ou usando a combinação das duas primeiras comunicações, denominada comunicação híbrida (DIAS, ANDRADE e GUEDES, 2010), (Vanet's - *Vehicular Adhoc Networks*, 2010), (RIBEIRO, COUTINHO e JORDÃO, 2009).

Na arquitetura da comunicação V2V não há estruturas fixas de acesso à rede, *Ad Hoc* puro, pois são formadas exclusivamente pelos veículos que trafegam nas vias, veículos estes que, equipados com os dispositivos adequados, se comportam como os nós da rede. Assim, o tráfego da comunicação vai saltando de veículo em veículo até o seu destino final, com cada veículo funcionando tanto como roteador quanto como receptor. Este tipo de comunicação pode ser utilizada para alertar aos condutores sobre perigo de colisão, aviso de aproximação

de carros de resgate, aviso risco de derrapagem na pista, carros parados na via, entre vários outros alertas.

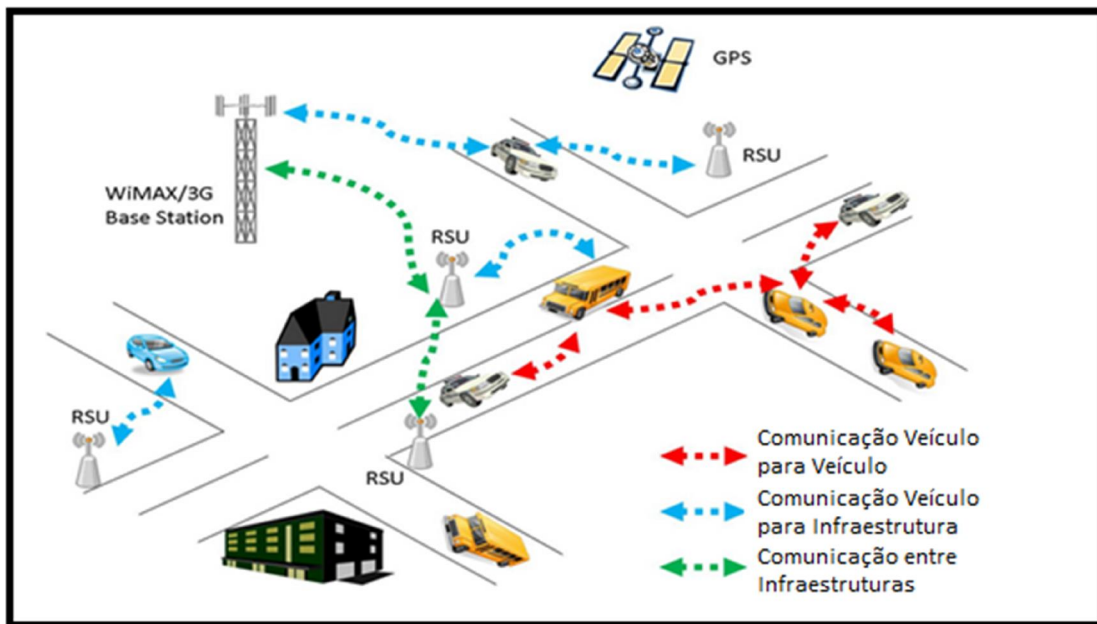
A arquitetura V2V tem problemas quanto à conectividade entre os nós, visto que a quantidade de nós em um determinado local é aleatória, pois não é possível prever a quantidade de veículos transitando na via em um determinado horário, por exemplo. Além disso, não consegue-se prever que a velocidade atingida pelos veículos podem resultar na perda de conexão por não permanecerem em uma área tempo suficiente (Vanet's - *Vehicular Adhoc Networks*, 2010), (EIZA, NI e MIN, 2013), (DIAS, ANDRADE e GUEDES, 2010).

Já a arquitetura da comunicação V2I, diferentemente da arquitetura V2V, possui seus nós nos pontos fixos das estradas, chamados de RSU (*Road Side Unit*), tornando, desse modo, os nós da rede estáticos. Assim, a comunicação fica concentrada nesses pontos fixos o que diminui o problema da conectividade. Quando um veículo quer enviar uma mensagem pública para os veículos daquela área, basta que enviem estas mensagens à RSU, que esta fará o *broadcasting* das mesmas (MENDONÇA, 2012).

A comunicação V2I pode ser usada para informar as condições do tráfego, avisos de cruzamentos e conversões proibidas, vagas de estacionamento, pontos de pedágio, propagandas de pontos comerciais locais, permitir acesso à internet, entre outras possibilidades. Para garantir total usabilidade dessa arquitetura, as estradas deveriam conter um número elevado de pontos fixos em sua extensão, o que acarretaria em um preço muito alto nas instalações dos equipamentos necessários. As RSUs podem pertencer a órgãos governamentais ou a provedores de serviços com fins comerciais (DIAS, ANDRADE e GUEDES, 2010), (Vanet's - *Vehicular Adhoc Networks*, 2010).

Com o objetivo de solucionar os problemas das comunicações V2V e V2I e somar seus benefícios, foi criada uma arquitetura híbrida, onde existem os dois tipos de nós na rede, os formados pelos veículos e os formados pelos pontos fixos nas vias. A Figura 1 mostra a arquitetura de uma VANET com seus diferentes tipos de comunicação. Nela é possível observar veículos equipados com interfaces sem fio comunicando entre si e com os equipamentos de infraestrutura (Vanet's - *Vehicular Adhoc Networks*, 2010).

Figura 1- Arquitetura VANET.



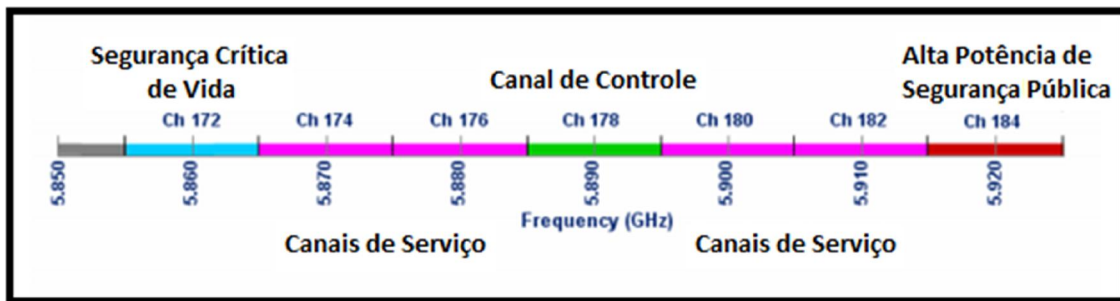
Fonte: EIZA, NI E MIN, (2013).

As VANETs são um caso especial das redes MANETs (*Mobile Ad hoc Network*), que são formadas exclusivamente por dispositivos móveis, ou seja, não possuem uma estrutura de acesso centralizada, o que resulta em alguns desafios. Desafios como o posicionamento e volatilidade arbitrários dos nós são encontrados nas MANETs bem como nas VANETs. Todavia, esse desafio se faz presente nas VANETs com o agravante de que nestas os nós (veículos automotores) da rede podem atingir velocidades relativamente altas, aumentando a complexidade da rede. Entretanto, os nós das VANETs possuem fontes de energia ilimitadas, já que as baterias automotivas são carregadas frequentemente, proporcionando uma maior autonomia dos nós, o que é um ponto positivo. Outra característica positiva das VANETs em relação às MANETs é que aquelas são mais previsíveis, uma vez que os veículos só podem trafegar pelas vias públicas, ao contrário dos nós das MANETs que podem alcançar áreas inacessíveis pelos automóveis (BARBIERI, 2012), (CAVALCANTI, 2008), (MENDONÇA, 2012).

Toda comunicação veicular opera em uma faixa de frequência denominada DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*), sendo que nos Estados Unidos da América essa faixa de frequência se estende de 5,850 GHz até 5,925 GHz, reservado pelo FCC (*Federal Communications Commission*) para uso exclusivo das comunicações V2V e V2I.

Os 75 MHz de largura de banda alocados para comunicação veicular foram divididos em 7 canais de 10MHz cada, conforme ilustrado na Figura 2. Observa-se na Figura 2 que um canal é reservado para controle de uso restrito de segurança, um canal para salvamento de vidas, um para segurança pública e quatro canais para prestação de serviço público ou privado (BASSO, 2013) (JIANG e DELGROSSI, 2008) (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2013).

Figura 2 – Divisão da banda de frequência DSRC nos Estados Unidos da América.



Fonte: JIANG E DELGROSSI, (2008).

A variedade de serviço que pode ser oferecida pela VANET aliada às novas demandas dos usuários tem despertado o interesse da comunidade acadêmica, montadoras de veículos e organizações governamentais em todo o mundo. Com o objetivo de atender a essa nova demanda o IEEE 802.11 começou a desenvolver, em 2004, um padrão de comunicação veicular que pudesse ser aceito internacionalmente, surgindo assim o padrão IEEE 802.11p, também conhecido como WAVE (CAVALCANTI, 2008) (BASSO, 2013).

3 CAMADA FÍSICA DO PADRÃO IEEE 802.11P

O alto grau de confiabilidade aliado às condições adversas impostas pelas redes veiculares exige que a camada física das VANETs tenha alta capacidade de desempenho nos complexos ambientes físicos das vias, garantindo que as informações cheguem ao seu destino em tempo hábil. Levando em consideração essas exigências, o instituto IEEE criou o padrão internacional IEEE 802.11p que, além de descrever as especificações da camada física da rede veicular, também especifica regras de acesso à rede (BASSO, 2013) (SHIVALDORA e GÜRTEL, 2010).

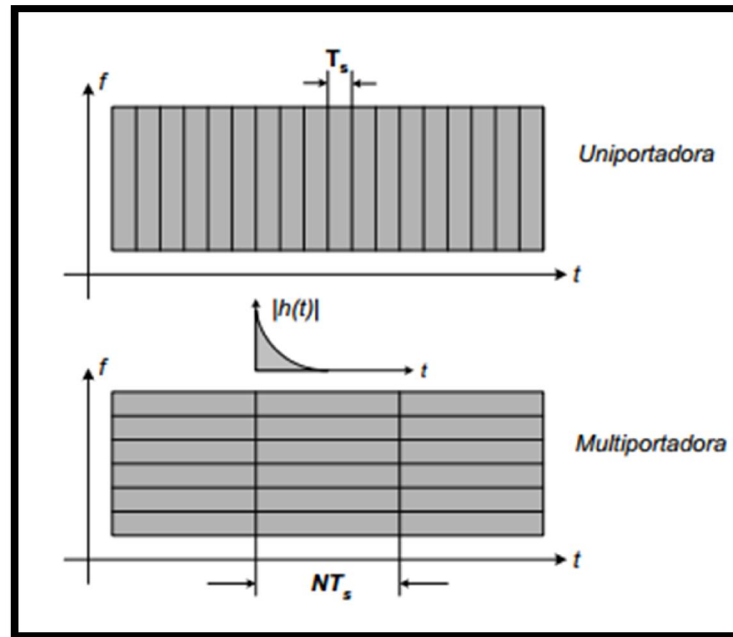
O padrão IEEE 802.11p foi baseado no padrão IEEE 802.11a das redes locais sem fio WLAN (*Wireless Local Area Network*), que inovou a comunicação sem fio ao implementar a técnica de modulação OFDM. Graças a esse feito, foi possível aumentar consideravelmente as taxas de transmissão aproveitando melhor a largura de banda larga disponível para transmissão (BASSO, 2013), (SHIVALDORA e GÜRTEL, 2010).

3.1 A Técnica de Multiplexação OFDM

A técnica de modulação OFDM designa uma maneira digital de implementar sistemas de modulação multiportadora, ao dividir a sequência de dados a serem transmitidos em várias subsequências, que paralelamente moduladas em igual número de portadoras, são transmitidas simultaneamente em subcanais idealmente ortogonais (SILVA, 2006).

A modulação multiportadora surgiu como uma alternativa para combater os fenômenos multipercurso, típicos da transmissão sem fio, que são causados pelos diferentes atrasos do sinal transmitido no percurso até chegar ao receptor. Atrasos estes que, quando maiores que a duração do símbolo transmitido, provocam interferências intersimbólicas ISI (*Inter-Symbol Interference*) que por sua vez provoca o aumento da taxa de erros de bits na recepção, podendo inviabilizar a transmissão dos dados. Para a eficácia da técnica de modulação multiportadora, o número de subcanais N deve ser escolhido de tal forma que o tempo do símbolo em cada subcanal, NT_s , seja maior que o espalhamento ou atraso por multipercurso, $\tau_{\max}$, do canal $h(t)$, conforme ilustra Figura 3 (SILVA, 2006), (SILVA, 2004).

Figura 3 – Comparação através de gráficos de tempo versus frequência entre os sistemas uniportadora e multiportadora.



Fonte: SILVA, (2006).

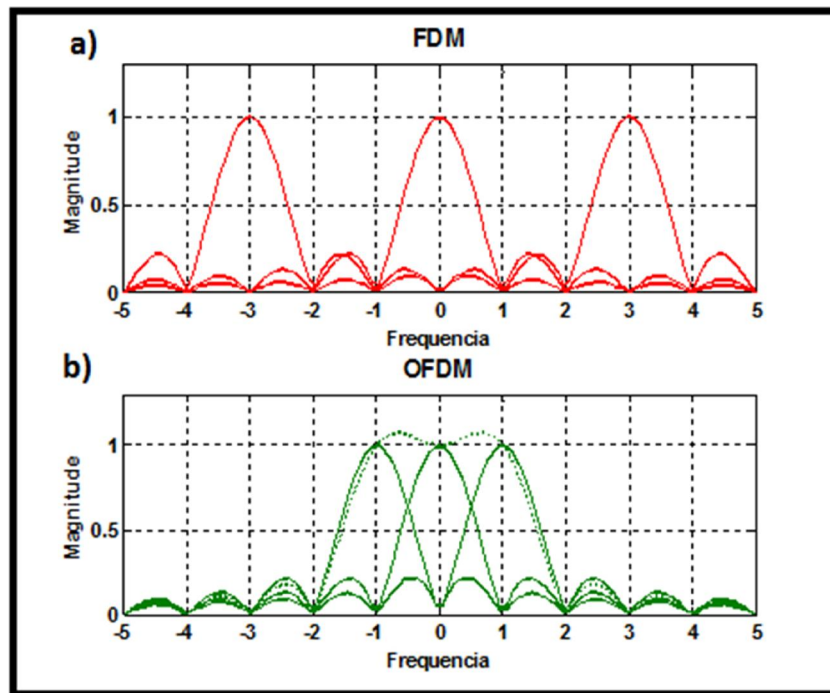
Na Figura 3 é possível observar um sistema multiportadora em que a duração de NTs é maior que o atraso provocado pelo canal, garantindo dessa forma maior robustez à ISI quando comparado com sistemas uniportadora.

Apesar de robusta e eficiente, a modulação multiportadora apresentava alto custo e alto consumo de potência, pois para cada portadora era necessário um modulador e um demodulador, ou seja, em um sistema com N portadoras seria necessário N moduladores e N demoduladores, o que inviabilizava a implementação deste sistema. A solução para esse problema veio com a técnica OFDM em que a multiplexação e a demultiplexação são feitas via transformadas discretas de Fourier inversa e direta respectivamente, ou seja, é aplicado a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) para a multiplexação das subportadoras e a FFT (*Fast Fourier Transform*) na demultiplexação das mesmas (SILVA, 2006) (SILVA, 2004).

Na técnica de modulação multiportadora OFDM as N portadoras, chamadas de subportadoras se sobrepõem, mas é mantida certa relação matemática de modo que não haja interferência entre elas. Como as subportadoras possuem um espectro do formato $\text{sen}(x)/x$, elas são multiplexadas de modo que estejam sempre centradas nos zeros das subportadoras adjacentes,

mantendo, dessa maneira, a ortogonalidade entre elas. Além de facilitar a recepção do sinal, essa técnica apresenta uma melhor eficiência espectral em relação a outras técnicas multiportadoras, como a FDM (*Frequency Division Multiplexing*), onde não há sobreposição das subportadoras. A Figura 4 mostra a diferença entre as técnicas de modulação multiportadora com e sem sobreposição das subportadoras (SILVA, 2006) (SILVA, 2004) (VIEIRA, 2004) (DUTRA, 2010).

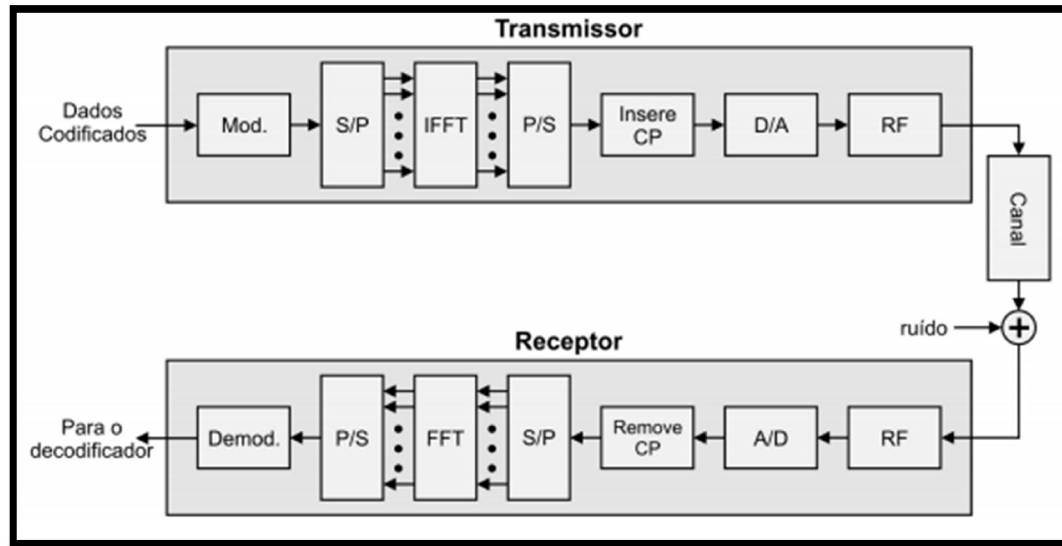
Figura 4 - a) Modulação Multiportadora sem sobreposição; (b) Modulação Multiportadora ortogonal.



Fonte: SILVA, (2006).

Nota-se na Figura 4 que, com a técnica OFDM, é possível reduzir consideravelmente a largura de banda ocupada pelo sinal, garantindo assim uma melhor eficiência espectral. O processo simplificado de transmissão e recepção de sinais OFDM pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Modelo simplificado de um transmissor e um receptor OFDM



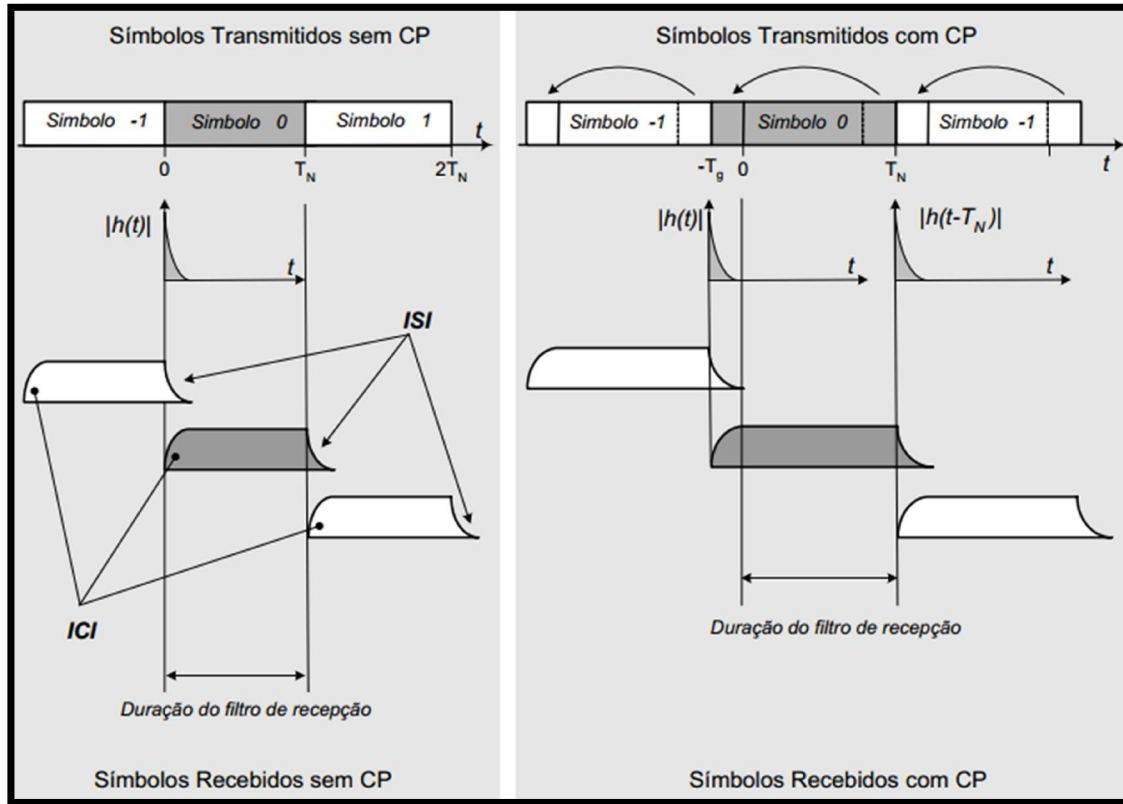
Fonte: Dutra,(2010).

A Figura 5 mostra uma implementação básica da modulação OFDM, onde os dados codificados são mapeados pelo bloco Mod. (modulador) e em seguida a sequência de símbolos é dividida em várias subsequências paralelas pelo bloco S/P (serial paralelo) para então ser aplicada a IFFT. O bloco P/S (paralelo serial) converte as subsequências paralelas no domínio do tempo em um fluxo único, e então é acrescentado um prefixo cíclico a esse fluxo pelo bloco Inserir CP. O bloco conversor D/A converte o sinal digital para o analógico, que é propagado em RF. Na demodulação do sinal ocorre o processo inverso.

3.2 O Prefixo Cíclico

Para eliminar completamente os efeitos da ISI, provenientes do espalhamento causado pelos múltiplos percursos da comunicação sem fio, são usados, em sistemas de comunicação multiportadora, intervalos de guarda entre os símbolos OFDM consecutivos. Em vez de utilizar intervalos de guarda vazios, ou seja, silêncio na transmissão, o símbolo OFDM é estendido ciclicamente ao longo do intervalo de guarda, de modo a eliminar também as interferências entre canais ICI (*Interchannel-Interference*), melhorando assim o desempenho do sistema. A Figura 6 ilustra a utilidade da extensão cíclica, também denominado prefixo cíclico, CP (*Cyclic Prefix*) (SILVA, 2006).

Figura 6 – Comparação entre as transmissões sem e com extensão cíclica.



Fonte: SILVA, (2006).

Nota-se na Figura 6 que a inserção de CP no símbolo faz com que a interferência ISI caia dentro do próprio intervalo de guarda que é removido na recepção. A duração do intervalo de guarda T_g deve ser no mínimo, igual ao máximo atraso do canal $\tau_{\max}$, de forma a impedir que parte da energia de um símbolo OFDM precedente seja "captada" pelo símbolo OFDM corrente (SILVA, 2006).

3.3 Simplificação da Equalização em Sistemas OFDM

A técnica de equalização consiste em realizar, na recepção do sinal, uma estimativa do canal de comunicação e aplicar as devidas compensações para minimizar os efeitos degradantes do canal. Essa técnica é a solução mais empregada em sistemas de comunicação uniportadora para combater fenômenos de multipercurso, porém à medida que o número de percursos do canal aumenta o processo de equalização torna-se extremamente complexo, dificultando sua implementação. Com o uso da multiplexação OFDM foi possível diminuir drasticamente as

complexidades dos equalizadores utilizados nos sistemas de comunicação, já que essa técnica combate os fenômenos multipercurso (SILVA, 2006) (SILVA, 2004).

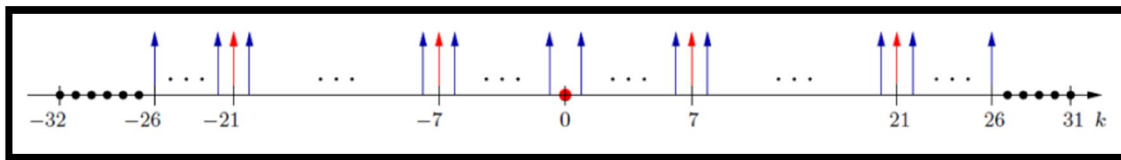
3.4 Formação do Símbolo OFDM Segundo Padrão IEEE 802.11p

Assim como ocorre no padrão IEEE 802.11a, o padrão IEEE 802.11p exige que a transmissão do sinal OFDM seja feita por meio de 64 subportadoras, nas quais apenas 48 são usadas para transporte efetivo de informação. O restante das subportadoras é zerado, sendo que algumas são usadas para transporte de subportadoras pilotos, importantes no processo de reconhecimento do canal e a consequente equalização deste (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2012) (BASSO, 2013).

As subportadoras pilotos transportam um padrão fixo, com valores conhecidos pelo receptor. Estas subportadoras são também usadas pelo receptor para realizar a detecção do deslocamento de magnitude de fase introduzido pelo canal e também para garantir precisas sincronizações no tempo e na frequência, necessárias para manter a ortogonalidade das subportadoras. No total são usadas quatro subportadoras pilotos, que são alocadas nas posições -21, -7, 7 e 21 do símbolo OFDM (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2012) (BASSO, 2013).

Para evitar problemas nos conversores digital-analógicos, a subportadora DC, localizada na posição 0 do símbolo OFDM, possui valor nulo. As extremidades do símbolo OFDM, posições -32 a -27 e 27 a 31, também são zeradas e desempenham o papel de banda de guarda do símbolo, além de prevenirem efeitos provenientes de filtragem do sinal OFDM (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2012), (BASSO, 2013), (SHIVALDORA e GÜRTEL, 2010). A Figura 7 mostra como são alocadas as 64 subportadoras do símbolo OFDM.

Figura 7 – Alocação das subportadoras em um símbolo OFDM



Fonte: SHIVALDORA E GÜRTEL, (2010).

Na Figura 7 é possível observar as 48 portadoras de dados, em azul, as 4 subportadoras pilotos, em vermelho, e as 12 subportadoras nulas, totalizando as 64 subportadoras do símbolo OFDM.

A camada física do padrão IEEE 802.11a e IEEE 802.11p definem 4 formas de modulação para as 48 subportadoras de dados: BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), 16QAM (16 *Quadrature Amplitude Modulation*) ou 64QAM (64 *Quadrature Amplitude Modulation*). Cada modulação possui, respectivamente, 2, 4, 16 e 64 pontos no diagrama de constelação e cada ponto da constelação possui $\log_2(m)$ bits, onde m é o número de pontos no diagrama de constelação. O tipo de modulação é escolhido a partir das limitações impostas pela largura de banda e pela quantidade do ruído inserido pelo canal, ou seja, o número de bits que cada subportadora carregará dependerá da condição do canal (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2012), (SHIVALDORA e GÜRTEL, 2010), (BASSO, 2013).

Para aumentar a confiabilidade do sistema, os bits de informação são codificados utilizando códigos convolucionais, que introduzem redundâncias no fluxo de dados a serem transmitidos. Essas redundâncias são usadas no receptor para detecção e correção de erros, criando assim um sistema mais robusto que combate os efeitos indesejáveis do canal. As normas IEEE 802.11a e IEEE 802.11p estabelecem taxas de codificação de 1/2, 2/3, ou 3/4. Isso significa, por exemplo, que em um sistema com taxa de codificação de 1/2, para cada bit na entrada do codificador são criados 2 bits codificados em sua saída (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2012), (SHIVALDORA e GÜRTEL, 2010), (BASSO, 2013).

3.5 Diferença entre os padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11p

Os padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11p diferenciam-se basicamente por suas larguras de banda, quais sejam, 20MHz e 10MHz respectivamente. Porém, essa mudança implica em outras alterações na camada física dos padrões, conforme será mostrado a seguir (BASSO, 2013) (SHIVALDORA e GÜRTEL, 2010).

O espaçamento entre as subportadoras (ΔF) no padrão IEEE 802.11p é

$$\Delta F = \frac{10MHz}{64} = 0,15625 MHz. \quad (3.1)$$

A duração do símbolo OFDM, ou período da transformada IFFT/FFT (T_{FFT}) é

$$T_{FFT} = \frac{1}{\Delta F} = 6,4 \mu s. \quad (3.2)$$

A duração do prefixo cíclico (T_{CP}) é

$$T_{CP} = \frac{T_{FFT}}{4} = 1,6 \mu s. \quad (3.3)$$

Assim, o período de um símbolo OFDM (T_{SYM}) é dado por

$$T_{SYM} = T_{FFT} + T_{CP} = 8,0 \mu s. \quad (3.4)$$

As principais diferenças e semelhanças entre a camada física dos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11p podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação camada física padrão IEEE 802.11a e IEEE 802.11p.

Parâmetro	IEEE 802.11a	IEEE 802.11p
Modulação	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Taxa de codificação	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4
Espaçamento entre as subportadoras	0,3125MHz	0,15625MHz
Duração subportadora	3,2μs	6,4μs
Duração do prefixo cíclico	0,8μs	1,6μs
Duração do símbolo (T_{SYM})	4,0μs	8,0μs

Fonte: SHIVALDORA E GÜRTEL, (2010).

Nota-se pelo Quadro 1 que, a duração de símbolo OFDM no padrão IEEE 802.11p é duas vezes maior que a do padrão IEEE 802.11a. Isso implica em um padrão mais resistente às interferências causadas por multipercurso. Entretanto, a redução da largura de banda do

padrão IEEE 802.11p causou a diminuição da taxa de transmissão de dados DR (*Data Rate*) do sistema de comunicação (SHIVALDORA e GÜRTEL, 2010) (BASSO, 2013). A partir do tipo de modulação e da taxa de codificação empregadas no transmissor, é possível definir a DR como,

$$DR = N_{DS} \times N_{BPSC} \times R \times N_{SYM}, \quad (3.5)$$

onde N_{DS} representa o número de subportadoras de dados (igual a 48 conforme padrão), N_{BPSC} o número de bits transportados por cada subportadora, que corresponde ao número de bits em um ponto da constelação, R a taxa de codificação e N_{SYM} a taxa de símbolos OFDM (igual a $1/T_{SYM}$).

Por exemplo, um sistema de transmissão que utiliza norma IEEE 802.11p com modulação QPSK e taxa de codificação 1/2, possui a seguinte taxa de transmissão de dados,

$$DR = 48 \times 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{8 \times 10^{-6}} = 6 \text{ Mbps}. \quad (3.6)$$

A Tabela 1 mostra as diferenças entre as taxas de transmissão de dados dos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11p para as mesmas modulações e taxas de codificações.

Tabela 1 - Taxas de transmissão de dados padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11p.

Modulação	Taxa de codificação	DR IEEE 802.11a	DR IEEE 802.11p
BPSK	1/2	6 Mbit/s	3 Mbit/s
BPSK	3/2	9 Mbit/s	4,5 Mbit/s
QPSK	1/2	12 Mbit/s	6 Mbit/s
QPSK	3/4	18 Mbit/s	9 Mbit/s
16QAM	1/2	24 Mbit/s	12 Mbit/s
16QAM	3/4	36 Mbit/s	18 Mbit/s
64QAM	2/3	48 Mbit/s	24 Mbit/s
64QAM	3/4	54 Mbit/s	27 Mbit/s

Fonte: SHIVALDORA E GÜRTEL, (2010).

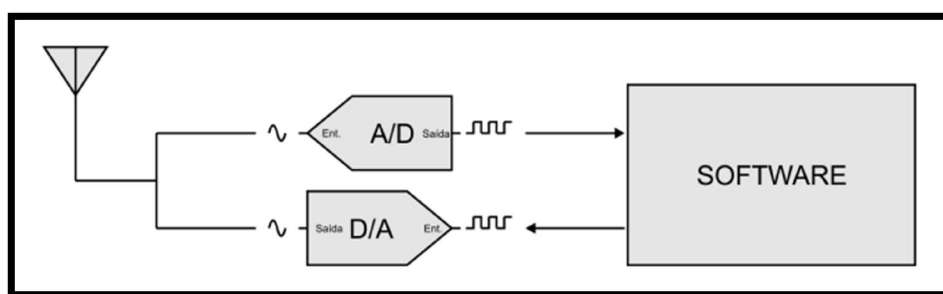
Conforme pode ser observado na Tabela 1, sob as mesmas condições de modulação e taxas de codificação, a taxa de transmissão de dados do padrão IEEE 802.11p é duas vezes menor que a do padrão IEEE 802.11a (BASSO, 2013) (SHIVALDORA e GÜRTEL, 2010) (WAMICHA e WINBERG, 2011).

4 A PLATAFORMA RDS: CONCEITOS BÁSICOS

A tecnologia RDS foi desenvolvida inicialmente pelos sistemas militares do Departamento de Defesa Norte Americana DoD (*Department of Defense*), devido à necessidade de integrar várias funções em um mesmo dispositivo reprogramável que interagissem simultaneamente com duas ou mais interfaces aéreas nas várias faixas de frequência existentes. Além disso, uma simples troca de software deveria modificar o funcionamento desses dispositivos, sem a necessidade de maiores ajustes em hardware, aumentando assim a vida útil dos equipamentos e apresentando uma maior relação custo-benefício (LIMA, 2003).

A arquitetura de um receptor RDS ideal propõe que a digitalização do sinal (conversão A/D) seja feita logo após sua recepção nas antenas, sendo todo o processamento restante realizado via software. De maneira análoga, no transmissor RDS ideal o objetivo é realizar todo o processamento de sinal via software e posteriormente transmitir este sinal em RF, logo após a conversão D/A nas antenas. O modelo RDS ideal deve ser capaz de processar e transmitir qualquer sinal, independente da modulação, faixa de frequência, nível de potência ou largura de banda (DUTRA, 2010), (JANSON, 2012). A Figura 8 mostra a arquitetura ideal de um transceptor RDS.

Figura 8 – Tranceptor RDS ideal



Fonte: DUTRA, (2010).

Limitações tecnológicas impedem que o de modelo RDS ideal seja praticável. O principal fator limitante deste modelo está nos conversores A/D e D/A atualmente existentes, que possuem restrições quanto à taxa de amostragem, à largura de banda e à faixa dinâmica. Outra limitação para este modelo é o alto desempenho exigido pelos processadores para executar o

processamento de sinal, uma vez que não se utiliza hardware com funções específicas neste modelo (DUTRA, 2010) (JANSON, 2012).

Para possibilitar o uso da tecnologia RDS, dispositivos de camada física são acrescentados no modelo de RDS ideal. Estes hardwares têm como finalidade preparar os sinais que chegam ou que saem dos conversores A/D e D/A e assim diminuir as exigências dos processadores. Esse modelo é chamado de RDS real e pode ser dividida em duas partes básicas: a parte de hardware e a parte de software (DUTRA, 2010) (JANSON, 2012).

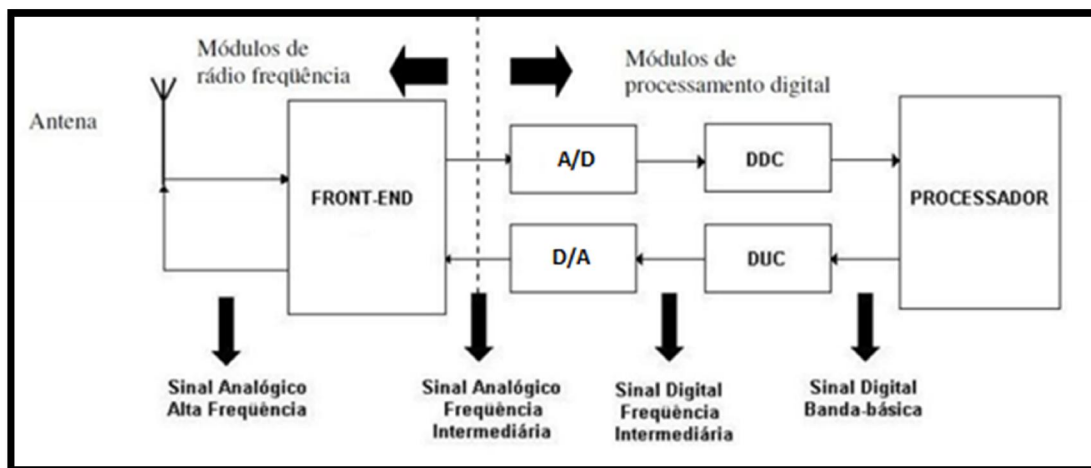
4.1 A Parte de Hardware do RDS

A parte de hardware do RDS é responsável por realizar as funções que vão desde a captação e/ou transmissão de sinais de RF nas antenas até a criação de um fluxo sustentável de dados para a unidade de processamento.

Pode-se dividir a parte de hardware do RDS em dois módulos. O primeiro módulo é responsável por atender as exigências de operação dos conversores A/D e D/A, manipulando o sinal analógico que chega às antenas (no caso de um receptor) ou que saem dos conversores D/A (no caso dos transmissores). Este módulo, também conhecido como *front-end*, realiza funções de amplificação do sinal, controle de ganho, deslocamento para uma frequência intermediária (caso ocorra) e/ou para a frequência original do sinal e filtragem de sinal para eliminar componentes de frequência indesejadas (JANSON, 2012).

O segundo módulo é responsável pelas conversões A/D e D/A e pela manipulação do sinal digital que seguirá para a unidade de processamento. No caso de um receptor, os dados que saem do conversor A/D passam pelo conversor DDC (*Digital Down Converter*) que desloca o sinal digital em frequência intermediária para um sinal digital de banda base (onde a menor frequência do sinal é igual a zero e a maior é igual à largura de banda do sinal) e filtra o sinal digital por meio de um filtro passa baixa e decimador, reduzindo assim a taxa de dados que segue para o processador. O processo inverso ocorre no transmissor, mas com o conversor DUC (*Digital Up Converter*), que realiza a interpolação dos dados para obter maiores taxas. A Figura 9 mostra um transceptor RDS real com os módulos de processamento RF e digital da parte de hardware (JANSON, 2012).

Figura 9 – Transceptor RDS real.



Fonte: JANSON, (2012).

Na Figura 9 é possível observar como são manipulados os sinais digitais e analógicos na parte de hardware do modelo RDS real.

A empresa *Ettus Research LLC*, fundada em 2004 e recentemente adquirida pela empresa *National Instruments*, desenvolve e produz dispositivos de hardware como a USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) que realiza as funções de interface de hardware entre as antenas e a unidade de processamento, formando a parte de hardware do RDS (ETTUS RESEARCH, 2014). Para a realização deste trabalho foi usada a segunda versão da USRP (USRP2) adquirida pelo laboratório de telecomunicação da Universidade Federal do Espírito Santo (LabTel). A Figura 10 mostra uma foto ilustrativa da USRP2.

Figura 10 – Foto ilustrativa da USRP2.



Fonte: Próprio autor.

O hardware da USRP2 é formado por duas partes principais: a placa mãe e as placas filhas. A placa mãe é responsável pelas conversões A/D e D/A e pela manipulação do sinal digital que chegam ou que saem da unidade de processamento. A placa mãe é formada por dois conversores A/D de 14 bits, com taxa de amostragem de 100 MS/s; dois conversores D/A de 16 bits, com taxa de amostragem de 400 MS/s e uma FPGA (*Field Programmable Gate Array*) Xilinx Spartan XC3S2000 com conversores DDC e DUC com taxas de decimação e interpolação programáveis (ETTUS RESEARCH, 2014).

As placas filhas são placas de circuitos que se acoplam à placa mãe realizando a função de *front-end*, ou seja, manipulando os sinais de RF, permitindo que as USRP2 trabalhem desde sinais de banda base até sinais RF de 6 GHz. Cada modelo de placa filha possui a sua faixa de frequência definida e pode ser receptora, transmissora ou transceptora (ETTUS RESEARCH, 2014). O Quadro 2 mostra os principais modelos de placas filhas existentes e suas faixas de frequência de operação.

Quadro 2 – Principais placas filhas disponíveis no mercado

Modelos de Placas filhas	Função	Faixa de frequências
BasicRX	Receptora	1 – 250 MHz
BasicTX	Transmissora	1 – 250 MHz
LFRX	Receptora	DC – 30 MHz
LFTX	Transmissora	DC – 30 MHz
TVRX	Receptora	50 – 860 MHz
DBSRX2	Receptora	800 MHz – 2,3 GHz
WBX	Transceptora	50 MHz – 2,2 GHz
SBX	Transceptora	400 MHz – 4,4GHz
RFX900	Transceptora	750 – 1050 MHz
RFX1800	Transceptora	1,5 – 2,1 GHz
RFX2400	Transceptora	2,3 – 2,9 GHz
XCVR2450	Transceptora	2,4 – 2,5 GHz e 4,9 – 5,9 GHz
CBX	Transceptora	1,2 – 6 GHz

Fonte: ETTUS RESEARCH, (2014).

Além das funções e das faixas de frequência de operação, as placas filhas também se diferenciam pelos seus custos e pelos seus ganhos de potências. Cada placa mãe pode trabalhar com até duas placas filhas, desde que estas sejam uma transmissora e uma receptora, ou apenas uma placa filha transceptora, daí a importância da escolha da placa filha mais adequada para cada tipo de projeto (ETTUS RESEARCH, 2014). Para realização deste trabalho foi utilizado a placa filha transceptora XCVR2450, disponível em laboratório.

A comunicação entre a unidade de processamento e a USRP2 é feita através de um cabo UDP (*Unshield Twisted Pair*) com conectores RJ45 que permite um fluxo de informação de 1 Gb/s em *full-duplex* (isto é, em comunicação bidirecional simultânea). A unidade de processamento de dados (parte de software do RDS) pode ser um computador pessoal de uso geral (também chamado de computador hospedeiro) equipado com um software adequado. De acordo com o software com o qual se deseja trabalhar no computador hospedeiro, é necessário carregar um firmware na FPGA da USRP2 compatível com a versão do software instalado no computador hospedeiro. Isto é feito de forma prática por meio de um cartão SD (ETTUS RESEARCH, 2014), (COUTINHO, 2011).

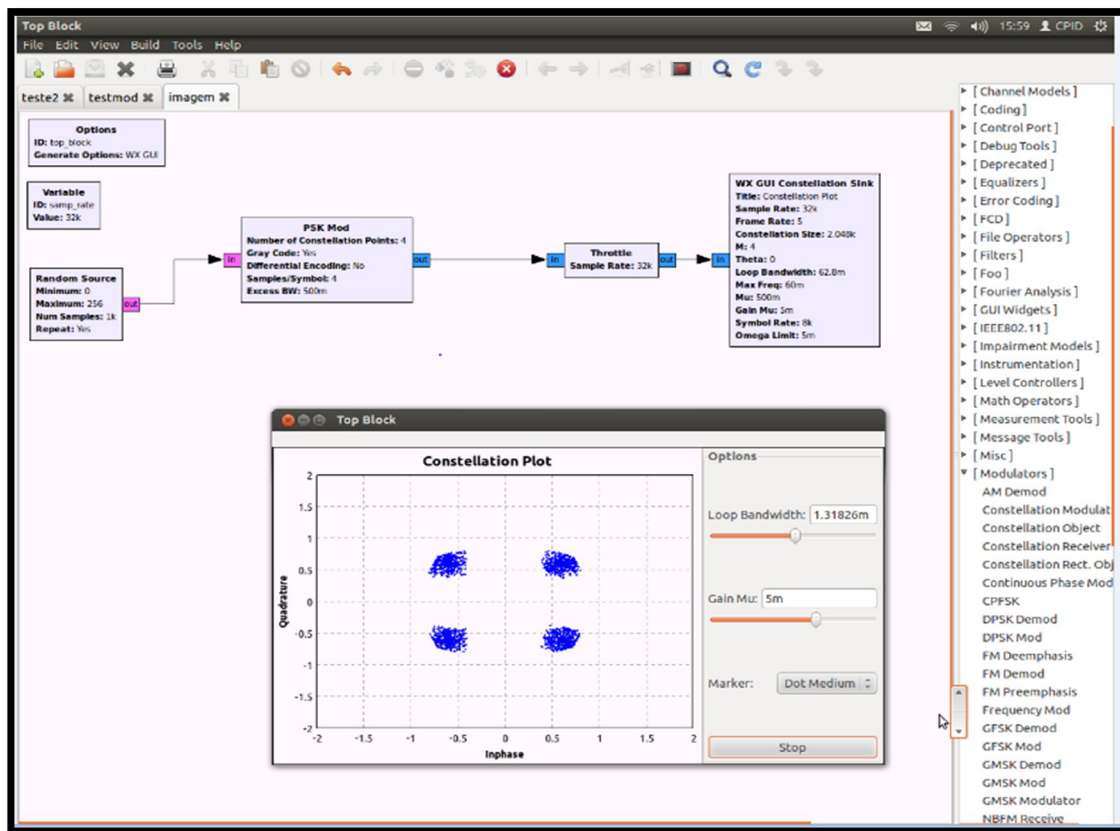
4.2 Parte de Software do RDS

A parte de software do RDS, como seu próprio nome já diz, realiza o processamento de sinal via software dispensando o uso de hardware para essa finalidade. Para executar esse processamento é necessário um software compatível com as USRPs e que possa ser executado em um computador de uso geral. Atualmente, existem vários softwares, criados ou adaptados para essa finalidade, como o LabView, da *National Instruments*; MatLab, da *MathWorks*; GNU Radio, da *GNU Radio-Companion*, entre outros menos populares. Por motivos que serão explanados a seguir, optou-se pelo software da *GNU Radio-Companion* para compor este trabalho.

O software GNU Radio foi criado com o objetivo de fornecer uma interface de programação de aplicativos para a USRP e a USRP2. Entre os vários softwares de RDS existentes o GNU Radio se destaca, pois oferece as seguintes vantagens em relação aos demais: possui interface gráfica amigável com vários blocos de processamento e geração de sinais que se conectam formando um diagrama de blocos; caso haja necessidade é possível criar novos blocos de

processamento utilizando as linguagens de programação C++ e Python; é um software livre. Assim, o GNU Radio não gera custos para o projeto e ainda permite trabalhar em tempo real transmitindo e/ou recebendo dados instantaneamente (GNU RADIO COMPANION, 2006). A Figura 11 mostra o ambiente gráfico do GNU Radio com a implementação de uma modulação digital.

Figura 11 – Interface do software GNU Radio.



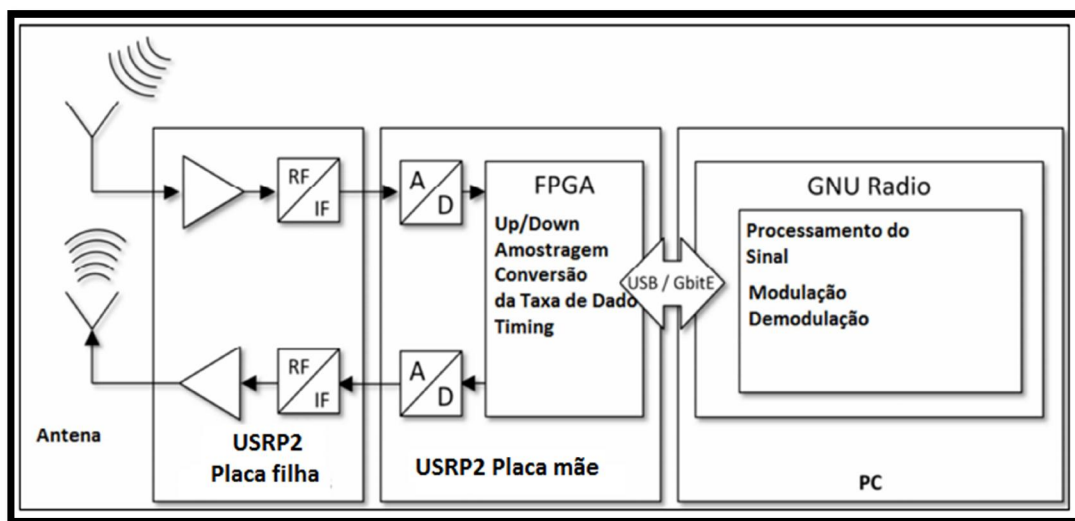
Fonte: Próprio autor.

À direita da Figura 11 é possível observar as bibliotecas do GNU Radio, organizadas em diferentes grupos como modulação, filtros, operadores matemáticos entre outros. Cada grupo contém blocos com finalidades específicas.

Apesar das vantagens do GNU Radio, ele possui algumas limitações e desvantagens como o funcionamento limitado no sistema operacional Windows, devido às restrições de controle de hardware, e a falta de documentação dos blocos, já que, na maioria das vezes, os diferentes desenvolvedores não se preocupam em documentá-los (GNU RADIO COMPANION, 2006).

A estrutura universal do rádio definido por software com hardware USRP2 e o software GNU Radio são mostrados na Figura 12.

Figura 12 – Estrutura universal do RDS.



Fonte: FÄHNLE, (2010).

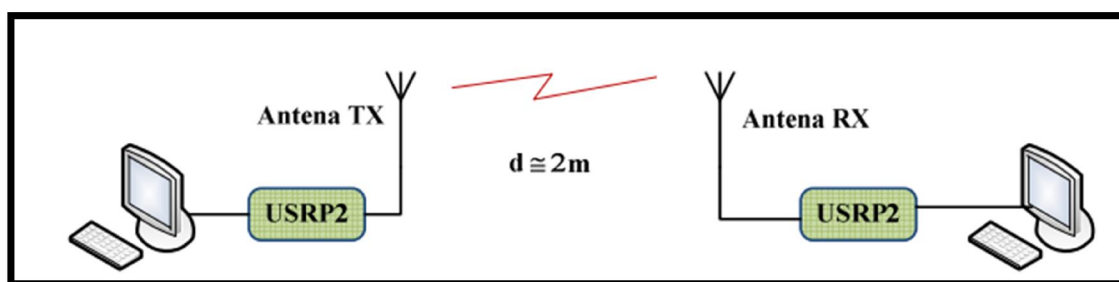
A estrutura do RDS da Figura 12 é dividida em três grandes blocos. O primeiro bloco representa a placa filha responsável pela entrada e saída de sinais de rádio frequência (RF) servindo como interface para o domínio analógico de RF, realizando as devidas amplificações e conversões de sinais de RF para a frequência intermediária (IF) ou de IF para RF. O segundo bloco representa a placa mãe da USRP2 que realiza a interface entre o mundo analógico e o digital, criando um fluxo sustentável de dados entre o terceiro bloco. O processamento do sinal digital é realizado no terceiro bloco em um computador hospedeiro (FÄHNLE, 2010).

5 IMPLEMENTAÇÃO DA CAMADA FÍSICA DO PADRÃO IEEE 802.11P

Antes de realizar a implementação da multiplexação OFDM, segundo o padrão IEEE 802.11p via RDS, foram feitos alguns experimentos em laboratório com o intuito de demonstrar as potencialidades da tecnologia RDS e a familiarização com o USRP2 e o software GNU Radio. Um destes experimentos foi a modulação digital QPSK.

Para realização dos ensaios foram utilizados dois computadores equipados com a versão 3.7.4 do GNU Radio, sendo um para transmissão e outro para recepção. Cada computador trabalhava em conjunto com um kit USRP2 e a distância entre eles era de aproximadamente dois metros, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13 – Montagem da bancada de experimento.



Fonte: CELINO, 2012.

A Quadro 3 mostra as principais características dos computadores utilizados nos ensaios.

Quadro 3 – Principais características dos computadores utilizados nos experimentos.

Função	Processamento	Memória RAM	Velocidade
Transmissor	Intel i7 core™ CPU	8GB	3,40GHz
Receptor	Intel core™ 2 Dou	2GB	2,66GHz

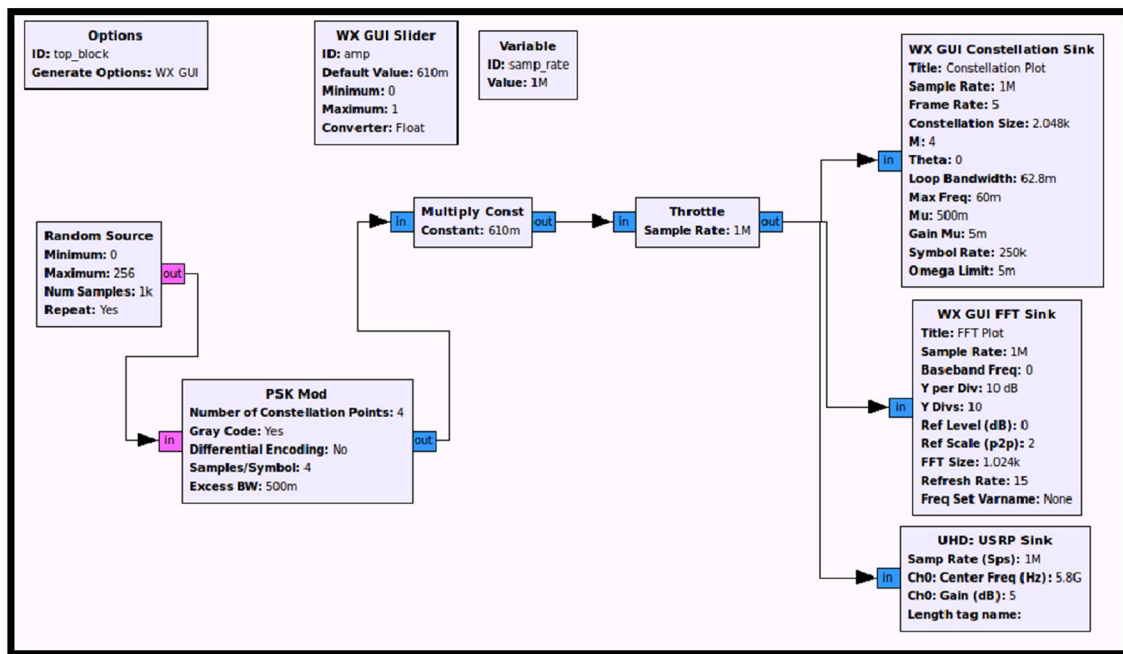
Fonte: próprio autor.

Todos os testes foram feitos em torno da frequência de operação de 5 GHz e por isso a placa filha utilizada na USRP2 foi a XCVR2450, disponível em laboratório.

5.1 Transmissão e Recepção QPSK

O primeiro experimento usando a USRP2 e o GNU Radio, para a transmissão e recepção de sinais de RF, foi a modulação digital QPSK. Para gerar o sinal no transmissor foi usado uma fonte aleatória de dados, denominado bloco *Random Source* do GNU Radio, que posiciona em sua saída uma sequência aleatória de bytes com o valor mínimo e máximo, definido pelo usuário, assim como a quantidade de amostras nesse intervalo. Para a modulação dos dados foi usado o bloco *PSK Mod*. Neste bloco é possível definir o tipo de modulação de fase (BPSK, QPSK e 8PSK) pelo número de pontos no diagrama de constelação, o uso ou não do código *Gray*, o uso ou não da codificação diferencial, a quantidade de amostras por símbolo e a largura de banda excessiva. A Figura 14 mostra o diagrama de blocos deste sistema uniportadora, contendo os blocos de geração, modulação e transmissão do sinal QPSK, assim como os parâmetros usados em cada um.

Figura 14 – Diagrama de bloco transmissor QPSK



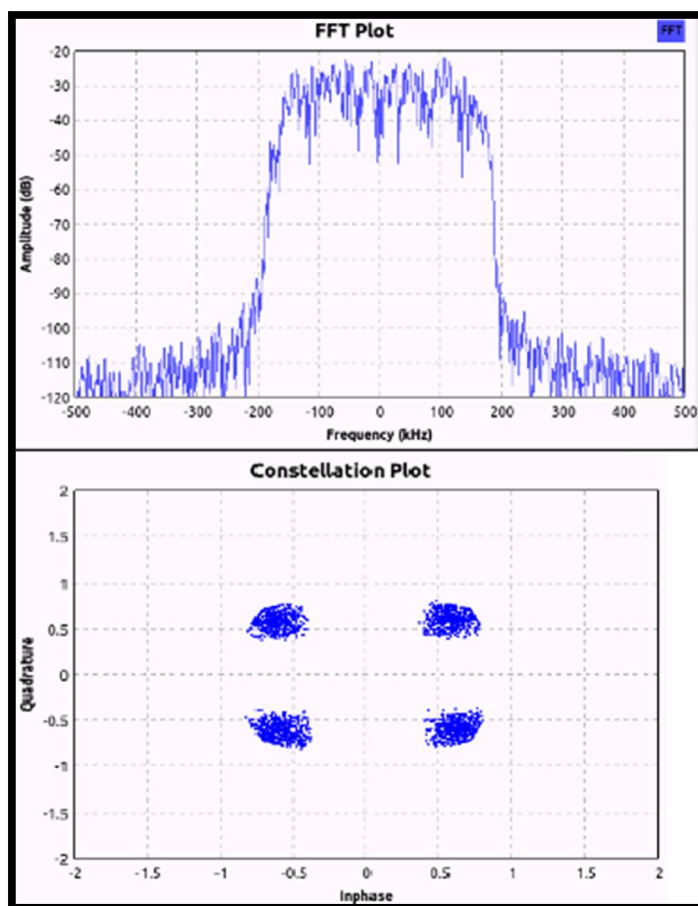
Fonte: Próprio autor.

O bloco *UHD* designado de *USRP Sink* mostrado na Figura 14 representa a parte de transmissão da USRP2. Neste podem ser definidos critérios como a frequência central de operação, ganho na antena, taxa de amostragem, entre outros. Para evitar que o nível do sinal modulado sature o nível permitido na entrada do bloco *UHD USRP Sink*, é utilizado o bloco

Multiply Const, que multiplica o sinal modulado por uma constante menor que um. O bloco *Throttle* é utilizado apenas para melhorar o desempenho do computador evitando que o software trave. O *WX GUI Slider* permite a variação de parâmetros durante a execução do ensaio, como por exemplo, os valores de ganhos e ajustes fino de frequência. A coloração nas entradas e saídas dos blocos indica o formato dos sinais que ali trafegam (rosa para byte e azul para complexo), podendo ser alterada pelo usuário.

Através dos blocos *WX GUI FFT Sink* e *WX GUI Constellation Sink* é possível visualizar o espectro e o diagrama de constelação do sinal modulado conforme mostra a Figura 15. Apesar de úteis, estes blocos consomem muitos recursos do processador e não funcionam de maneira adequada com altas taxas de amostragem.

Figura 15 – Espectro e diagrama de constelação do sinal em banda base no transmissor.

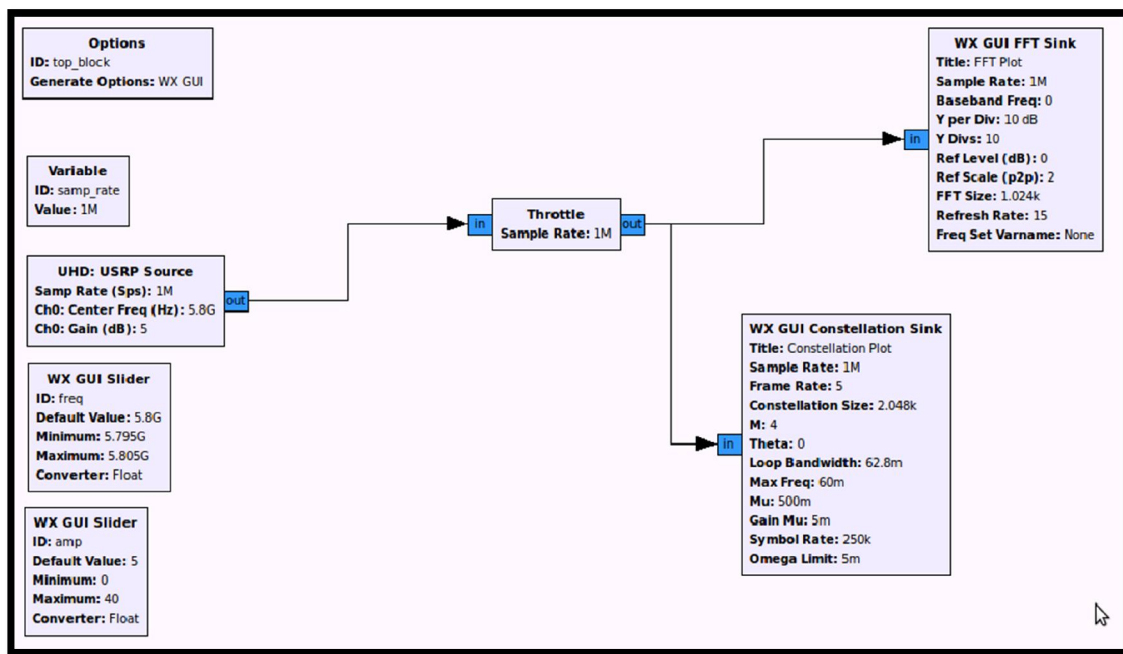


Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar na Figura 15 o espectro do sinal modulado centrado em 0 Hz (banda base), ocupando uma banda de $-200 + 200$ KHz, e seus quatro pontos bem definidos no diagrama de constelação. O tamanho da janela do espectro de visualização é definido pela taxa de amostragem do sistema. Portanto, para a taxa de amostragem de 1 MS/s a janela de visualização do espectro estende-se de -500 KHz a 500 KHz.

A Figura 16 mostra o diagrama de blocos usado para a recepção do sinal modulado. O bloco *UHD* chamado de *USRP Source* representa a parte de recepção da USRP2, e é responsável por captar o sinal de RF (em 5.8 GHz) e por deslocá-lo de volta para banda base.

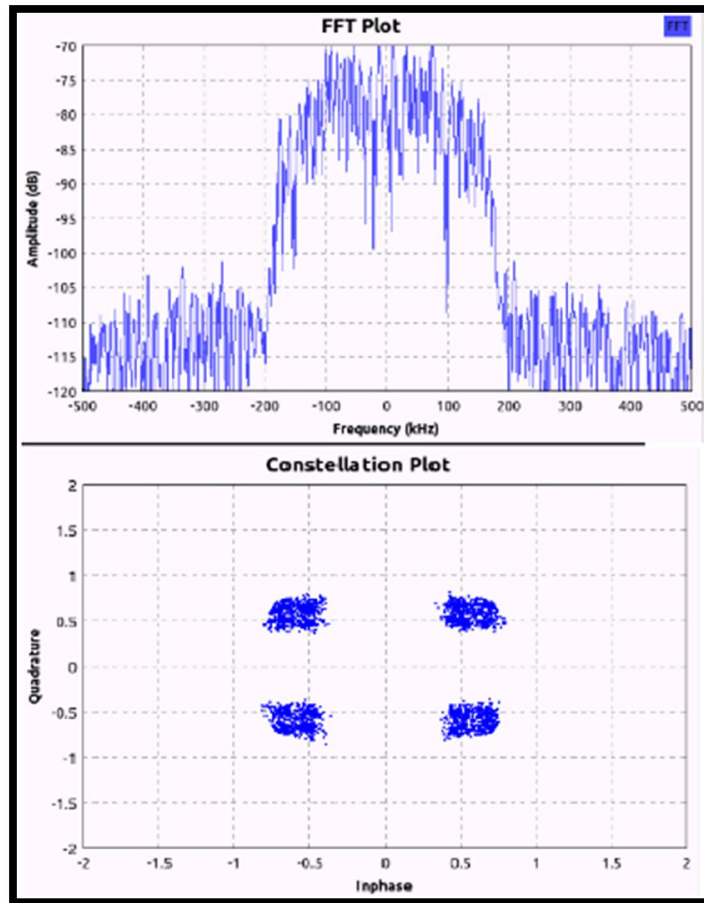
Figura 16 – Diagrama de blocos do receptor QPSK.



Fonte: Próprio autor.

Para que não houvesse erros na recepção do sinal e para uma melhor identificação dos pontos no diagrama de constelação, foram feitos ajustes de ganho e de frequência no bloco *UHD* (*USRP Source*) durante o ensaio. A Figura 17 mostra o espectro e o diagrama de constelação do sinal recebido para o ganho de 19.2 dB e um ajuste fino de frequência de menos 20 KHz para centralizar o espectro em 0 Hz.

Figura 17 – Espetro e diagrama de contelação do sinal em banda base no receptor.



Fonte: Próprio autor.

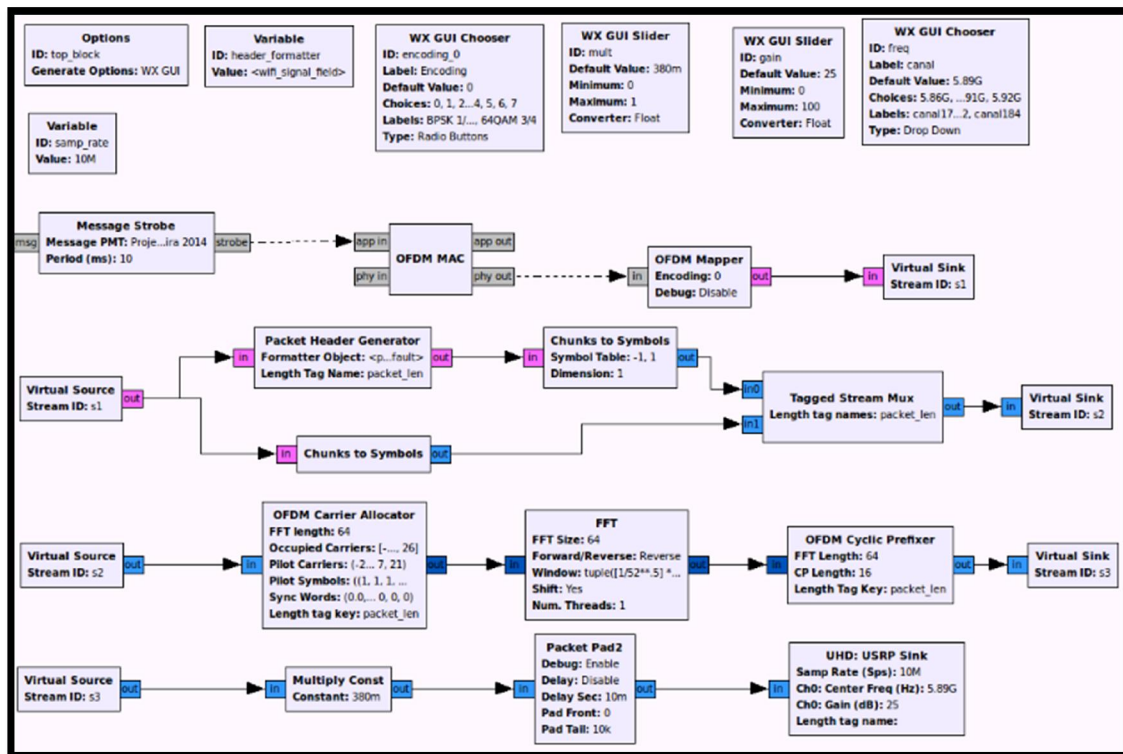
Comparando os espectros das Figuras 15 e 16 é possível observar que há perdas da ordem de 40 dB nos sinais recebidos após trafegar em canal sem fio com antenas distantes de aproximadamente 2 metros. Apesar desta perda o diagrama de constelação da Figura 16 mostra que a qualidade do sinal recebido permite a recepção de símbolos QPSK sem erros. Tais resultados foram úteis para estimar as condições do canal no instante da transmissão, para a familiarização com os dispositivos envolvidos e para avaliar o desempenho dos rádios em sistemas de comunicação mais simples.

5.2 Implementação da multiplexação OFDM segundo padrão IEEE802.11p

Para implementar a multiplexação OFDM segundo padrão IEEE802.11p, foi necessário instalar alguns novos blocos de processamento que não fazem parte da versão 3.7.4 do GNU Radio. Estes blocos estão disponíveis em (GITHUB, 2013).

Neste experimento uma mensagem de texto PMT (*Page Maker Template*) foi convertida em bits, mapeada e codificada nos diferentes modos de operação do padrão IEEE 802.11p. Em seguida foi aplicado a IFFT nos símbolos e adicionado prefixo cíclico. A Figura 18 mostra o diagrama de blocos do transmissor.

Figura 18 – Diagrama de bloco transmissor IEEE 802.11p.



Fonte: Próprio autor.

A mensagem “Projeto de Graduação Marco Aurelio de Oliveira 2014” foi inserida no bloco *Message Strobe* da Figura 18, junto com o período de repetição da mensagem. O bloco *OFDM MAC* adiciona endereço MAC à mensagem e realiza a interface entre os blocos *OFDM Mapper* e *Message Strobe*.

O bloco *OFDM Mapper* mapeia e codifica o fluxo de dados possibilitando alterar esses parâmetros durante o experimento conforme as condições do canal. Assim, se as condições do canal não forem favoráveis, é utilizada a codificação mais robusta e o mapeamento com menos bits por símbolo. No entanto, a primeira sequência de dados desse bloco sempre será codificada e mapeada com um padrão fixo, 1/2 e BPSK respectivamente, pois essa primeira sequência carrega importantes informações dos dados subsequentes tais como, o tipo de codificação e mapeamento utilizado, o tamanho do pacote etc. Afim de não haver problemas na reconstrução dos dados na recepção, para cada pacote que sai do *OFDM Mapper* é criado um cabeçalho através do bloco *Packet Header Generation*, sendo que o bloco *Tagged Stream Mux* acrescenta os cabeçalhos nos pacotes.

O bloco *OFDM Carrier Allocator* é responsável por transformar o fluxo de símbolos complexos em vetores escalares, alocando as portadoras de dados e portadoras pilotos, conforme descrito na Seção 3.3. Antes de posicionar as 64 portadoras em sua saída, o bloco *OFDM Carrier Allocator* posiciona uma sequência de valores definidos em norma para formar o preâmbulo do símbolo OFDM. Este preâmbulo é dividido em duas sequências de treinamento, a curta e a longa. A sequência de treinamento curta, usada para detecção do sinal na recepção e sincronização de frequência, é formada por 10 símbolos iguais de 16 amostras cada; já a sequência de treinamento longa é formada por dois símbolos iguais de 64 amostras cada mais um prefixo cíclico de 32 e é essencial para o alinhamento dos quadros. No total o preâmbulo possui 320 amostras, sendo 160 para sequência de treinamento curta e 160 para sequência de treinamento longa (IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2012), (CÂMARA, 2010).

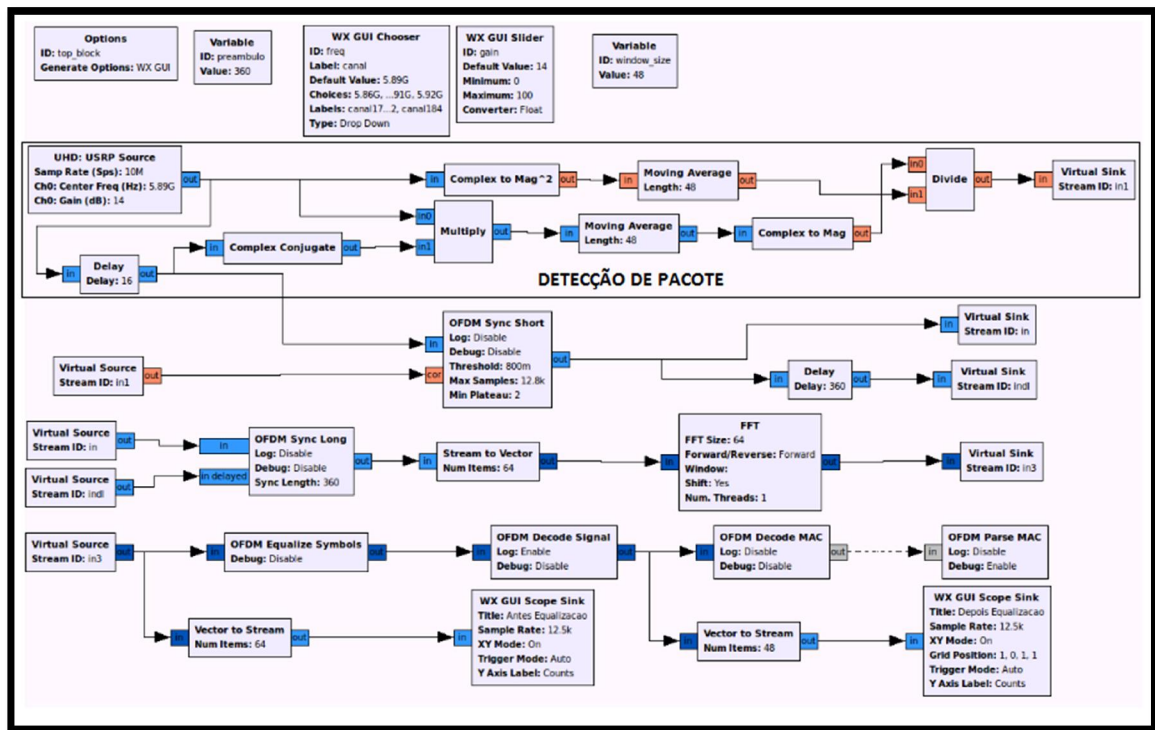
O bloco *FFT* pode aplicar tanto a IFFT quanto a FFT. No caso do transmissor, é usado a IFFT de 64 pontos para transformar os 64 vetores de dados complexos em sinais temporais discretos. Em seguida o bloco *OFDM Cyclic Prefixer* converte o fluxo paralelo em um fluxo em série e adiciona o prefixo cíclico a esse fluxo. O bloco *Packet Pad2* é útil quando não há uma quantidade contínua de amostra ajudando a estabilizar o fluxo de amostras. O sinal OFDM segue para o bloco *UHD (USRP Sink)* onde ocorre a transmissão em RF. O canal de transmissão RF pode ser alterado durante o ensaio entre os 7 canais reservados para transmissão veicular. Assim como no experimento anterior os ganhos também foram alterados

durante o ensaio. Para uma banda de 10 MHz foi necessária uma taxa de amostragem de 10 MS/s, o que limita o funcionamento dos blocos de visualização gráfica.

Para captar o sinal transmitido, foi construído um receptor de sinal baseado em um receptor genérico descrito em (BLOESSL, SEGATA, *et al.*, 2013). Este receptor é capaz de captar sinais de RF que seguem o padrão IEEE 802.11p, realizando as funções básicas de um receptor, quais sejam, a detecção de sinal, o ajuste de frequência, o alinhamento de quadro, a equalização, a demodulação, entre outras.

A primeira etapa de um receptor é detectar a presença de pacotes. Isto é feito normalmente por meio de algoritmos de autocorrelação, que utiliza a sequência de treinamento curta. Como os símbolos curtos tem uma periodicidade de 16 amostras, ao realizar uma autocorrelação do sinal com ele mesmo deslocado em 16 amostras será obtido um sinal que indica a presença de pacotes. A Figura 19 mostra o diagrama de blocos do receptor usado no experimento.

Figura 19 – Diagrama de blocos do receptor IEEE 802.11p.



Fonte: Próprio autor.

A parte de detecção de pacotes da Figura 19 realiza o cálculo dos coeficientes $c[n]$ da autocorrelação do sinal fazendo,

$$c[n] = \sum_{k=0}^{N_{jan}-1} s[n+k] \bar{s}[n+k+16], \quad (5.1)$$

onde $s[n]$ é o sinal recebido, $\bar{s}[n]$ é o conjugado do sinal recebido e N_{jan} é o tamanho da janela de autocorrelação. De forma a tornar o resultado independente da potência recebida, o coeficiente de autocorrelação é normalizado pela potência do sinal envolvido na janela de correlação conforme,

$$c^{nor}[n] = \frac{c[n]}{\sum_{k=0}^{N_{jan}} s[n+k] \bar{s}[n+k]}. \quad (5.2)$$

Quando o coeficiente de autocorrelação normalizado atinge um valor próximo a um (valor de disparo) e permanece perto deste valor por duas amostras, significa que o receptor detectou a presença de pacotes, então o block *OFDM Sync Short* captará as amostras, caso contrário, as amostras são descartadas (BLOESSL, SEGATA, *et al.*, 2013), (CÂMARA, 2010).

O desvio de frequência provocado pela diferença existente entre a frequência do oscilador do transmissor e a do receptor podem destruir a ortogonalidade entre as subportadoras. Por isso é necessário determinar e corrigir este desvio. Isto é feito no bloco *OFDM Sync Long* utilizando a sequência de treinamento curta que, após encontrar o desvio de frequência, aplica esse desvio a cada amostra. Ainda no bloco *OFDM Sync Long*, utilizando a sequência de treinamento longa, é feito o alinhamento do quadro (sincronismo temporal) para identificar o tempo de início de cada símbolo. Após a sincronização temporal, o preâmbulo é retirado junto com o prefixo cíclico de cada símbolo OFDM e as 64 subportadoras restantes são convertidas de serial para paralelo pelo bloco *Stream to Vector* e, em seguida, é feita a transição do domínio do tempo para o domínio da frequência pelo bloco *FFT*.

O bloco *OFDM Equalize Symbols* realiza a estimativa de canal e correções de fase para uma precisa sincronização temporal. Esse processo é feito utilizando as subportadoras pilotos que

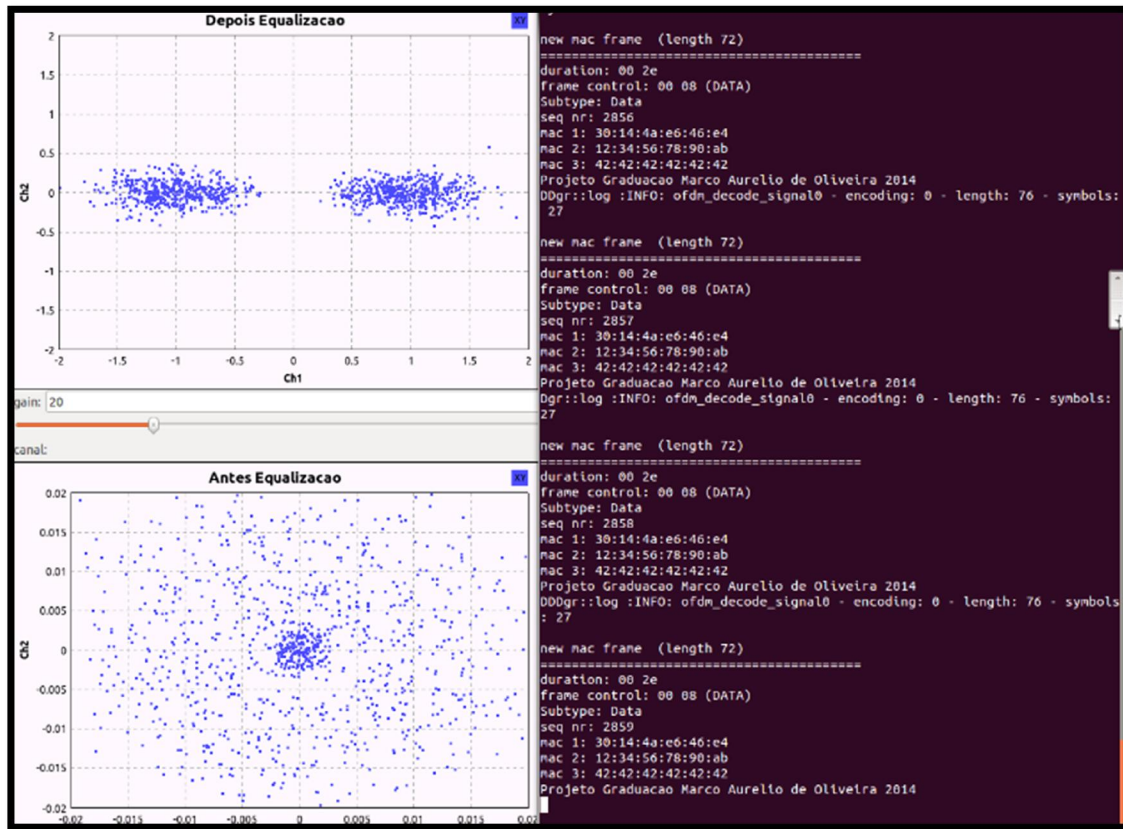
têm um padrão fixo conhecido pelo receptor. Depois do bloco *OFDM Equalize Symbols* ter aplicado as devidas correções, as portadoras pilotos são retiradas junto com as subportadoras DC e as subportadoras de intervalo de guarda, restando apenas as 48 subportadoras de dados, que seguem para o bloco *OFDM Decode Signal*. Neste bloco a primeira sequência de dados transmitida após o preâmbulo é decodificada, informando ao receptor o tipo de modulação e a codificação que foram usados na transmissão dos símbolos subsequentes.

O próximo bloco do diagrama é o *OFDM Decode MAC*. Nele, as 48 subportadoras do símbolo OFDM são decodificadas, demapeadas e reconstruídas, criando um fluxo de mensagem assíncrono para o bloco *OFDM Parse MAC*. Este bloco por sua vez mostra a mensagem recebida no terminal de comando junto com o endereço MAC associado ao transmissor, o número de símbolos OFDM utilizados e a quantidade de vezes que a mensagem foi enviada.

5.3 Resultados Experimentais

Mesmo com o funcionamento limitado dos blocos de visualização gráfica, foi possível visualizar o diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal para os diferentes tipos de modulação utilizados. A Figura 20 mostra o diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal recebido para modulação BPSK com codificação 1/2 e o terminal de comando com as informações da mensagem recebida.

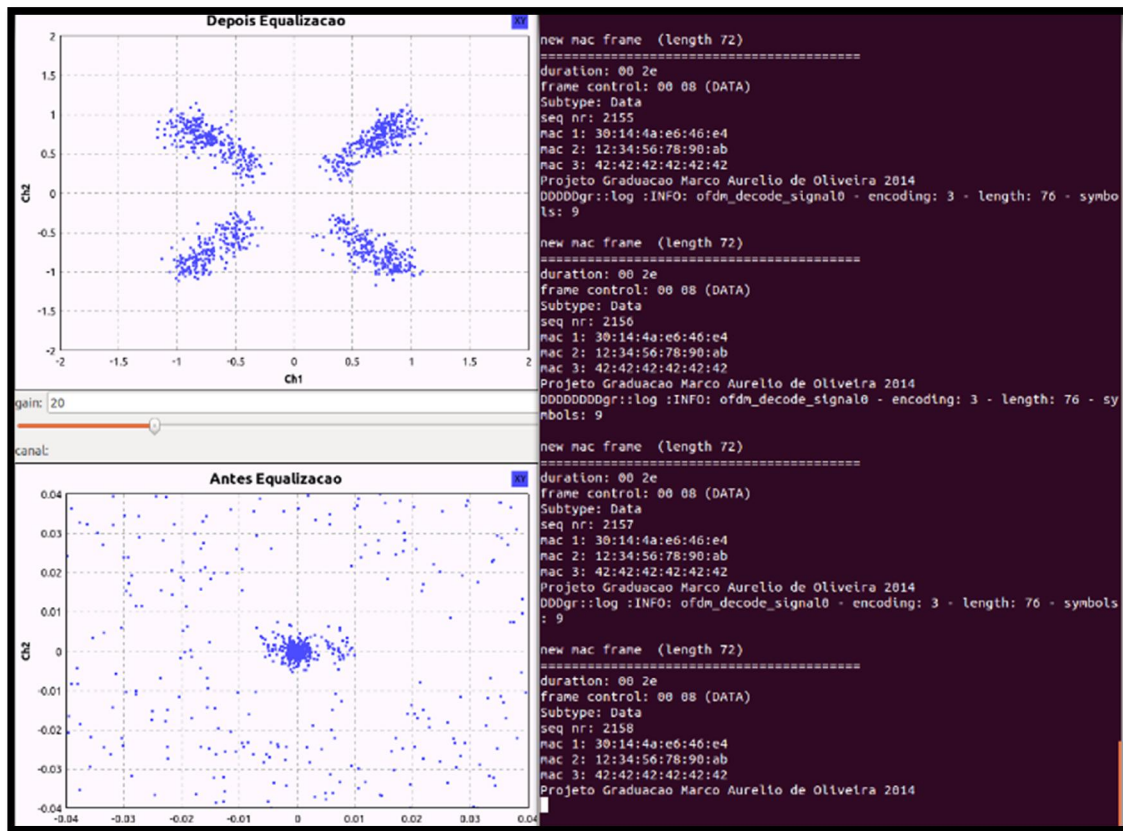
Figura 20 – Diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal recebido utilizando modulação BPSK com codificação 1/2 e a mensagem reconstruída no terminal de comando.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 20 é possível observar que, após a equalização do sinal recebido, os pontos do diagrama de constelação assumem posições bem definidas, possibilitando a reconstrução deste sinal sem erro, conforme é mostrado no terminal de comando. A mesma análise foi feita para as modulações QPSK com codificação 1/2, 16QAM com codificação 1/2 e 64QAM com codificação de 2/3, mostrados nas Figuras 21, 22 e 23 respectivamente.

Figura 21 - Diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal recebido utilizando modulação QPSK com codificação 1/2 e a mensagem reconstruída no terminal de comando.

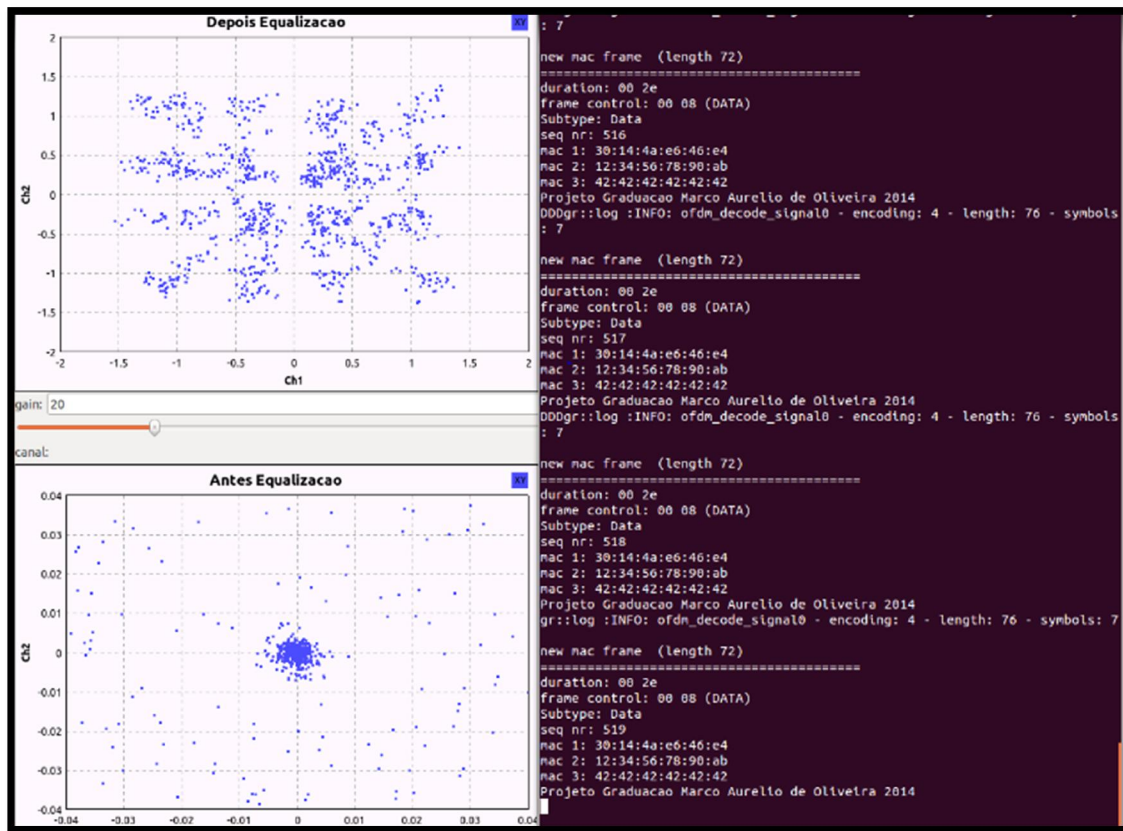


Fonte: Próprio autor.

A Figura 21 mostra o diagrama de constelação do sinal recebido modulado em QPSK antes e depois da equalização. Nota-se, pela divisão dos pontos no diagrama de constelação, que o processo de equalização foi, mais uma vez, bem sucedido. Como o tamanho da mensagem enviada é constante, uma quantidade menor de símbolos OFDM é exigida nesta modulação em relação a anterior.

Os desvios na amplitude das subportadoras observado no diagrama de constelação da Figura 21 podem ser corrigidos com métodos de controle automático de ganho mais robustos. Além disso, acredita-se que esquemas de estimação de canal mais robustas, baseados na transmissão de símbolos de treinamento, podem melhorar a recepção, apesar da recepção sem erros que ocorreram nos ensaios com mapeamento QPSK.

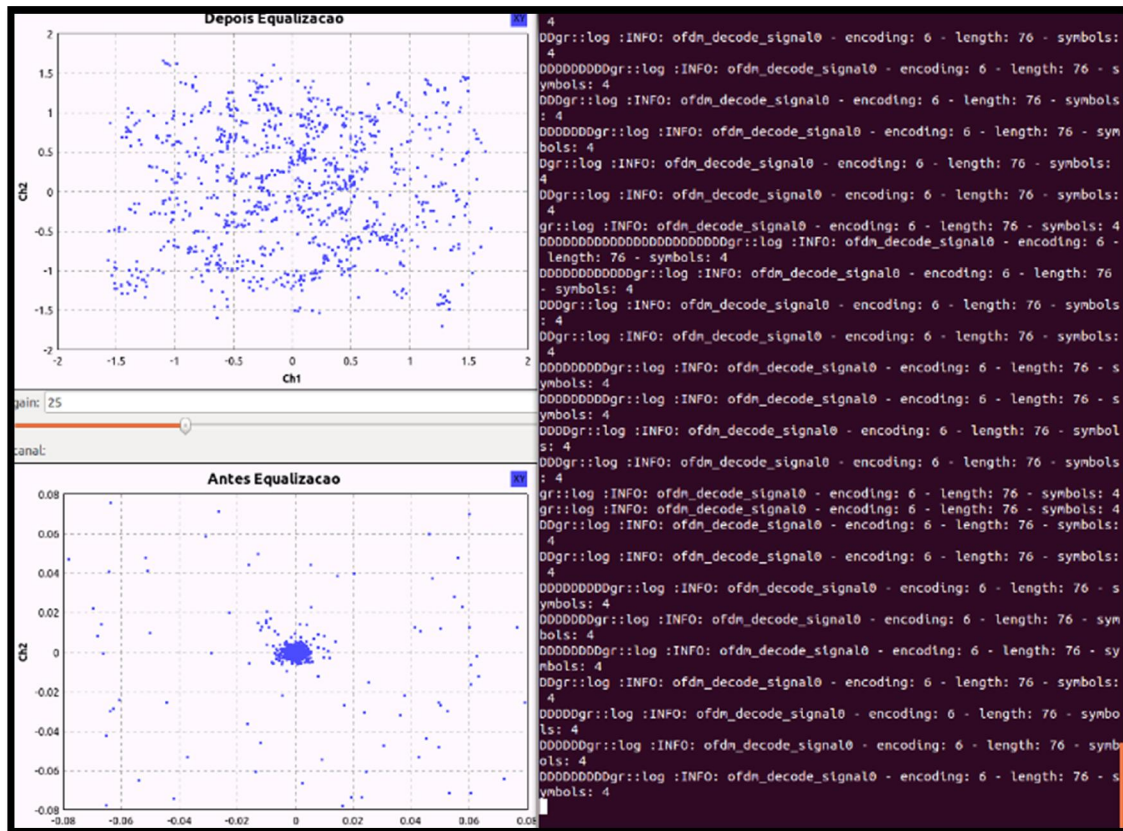
Figura 22 - Diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal recebido utilizando modulação 16QAM com codificação 1/2 e a mensagem reconstruída no terminal de comando.



Fonte: Próprio autor.

Ao contrário dos resultados anteriores, o da Figura 22, que ilustra as transmissões com portadoras mapeadas em 16 QAM, não apresenta uma divisão bem definida dos dezesseis pontos no diagrama de constelação depois de aplicada a equalização no sinal. Isso se deve à limitação do bloco *OFDM Equalize Symbols* em corrigir a magnitude e a fase do sinal recebido. Apesar desse empecilho, foi possível reconstruir a mensagem transmitida utilizando apenas sete símbolos OFDM. O mesmo não ocorreu com a modulação 64 QAM, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Diagrama de constelação antes e depois da equalização do sinal recebido utilizando modulação 64QAM com codificação 2/3 e a mensagem reconstruída no terminal de comando.



Fonte: Próprio autor.

A condição do canal, no momento da realização do experimento, aliada à deficiência do bloco *OFDM Equalize Symbols*, inviabilizou, por completo, a transmissão da mensagem modulada na modulação 64 QAM, mesmo utilizando a codificação mais robusta para essa modulação, como mostra Figura 23.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como principal contribuição a implementação da multiplexação por divisão de frequências ortogonais OFDM, seguindo a norma de comunicação veicular IEEE 802.11p via tecnologia de radio definido por software RDS. Análises de desempenho desta tecnologia frente a um padrão de comunicação moderno foram feitas mediante resultados experimentais para diferentes tipos de modulação/mapeamento nas subportadoras, bem como de taxa de transmissão e taxas de codificação.

Para alcançar os objetivos propostos, foram realizados inicialmente, com o auxílio dos periféricos USRP2 e o software livre GNU Radio, ensaios com transmissões em canais sem fio de sistemas de comunicação uniportadoras como a modulação QPSK. Posteriormente foi construída, utilizando os mesmos equipamentos, uma estação de rádio difusão de baixa potência capaz de radiar sinais que respeitam a camada física do padrão veicular e uma estação para recepção dos sinais radiados.

Os resultados experimentais obtidos foram satisfatórios, uma vez que foi possível implementar em software parte da camada física do moderno padrão de comunicação IEEE 802.11p. Com exceção da modulação 64 QAM, foi possível recuperar os sinais transmitidos sem erros para os diferentes modos de operação do padrão IEEE 802.11p, mesmo com perdas da ordem de 40 dB nos sinais recebidos após trafegar em canal sem fio com antenas distantes de aproximadamente 2 m. Tais resultados comprovam a eficiência, a praticidade e a reconfigurabilidade da tecnologia RDS, até mesmo em complexos sistemas de comunicação.

Um dos desafios encontrados na realização deste projeto foi encontrar e instalar novos blocos, uma vez que o GNU Radio não possui todas as bibliotecas necessárias. Além disso, a falta de documentação a respeito das funcionalidades dos blocos deste software dificultou a identificação dos mesmos. Para contornar esta situação foram realizados testes individuais com vários blocos utilizando vários parâmetros.

Como trabalhos futuros, sugere-se aqui a implementação de algoritmos de Controle Automático de Ganho (CAG) mais robustos de forma a auxiliar melhor o processo de decisão nos demapeamentos. Além disso, outros esquemas de reconhecimento e equalização de canal

devem ser testados de forma a melhorar a recepção e consequentemente aumentar os alcances e também as taxas de transmissão através do aumento do nível de modulação nas subportadoras.

BIBLIOGRAFIA

- BARBIERI, W. R. **Proposta e Modelagem de Comunicação Segura para Redes Veiculares (VANETs)**. Dissertação (Mestrado em Ciência de Computação) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. São José do Rio Preto. 2012.
- BARLELOS, V. P. et al. Sistema de monitoramento de Veículos Usando Dispositivos no Padrão IEEE 802.11p. **Anais do 32º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, Florianópolis, Maio 2014. 939-951.
- BARROS, M. T.; GOMES, R. C. M.; COSTA, A. F. B. F. Routing Architecture for VehicularAd-Hoc Networks. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS**, v. 10, p. 1411-1419, Janeiro 2012.
- BASSO, D. O. **IEEE 802.11p: ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES SEM FIO VEICULARES**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.
- BLOESSL, B. et al. An IEEE 802.11a/g/p OFDM Receiver for GNU Radio. **Second Workshop of Software Radio Implementation Forum (SRIF 2013)**, Hong Kong, Agosto 2013.
- CÂMARA, A. M. **Sincronização de Redes de Pacotes OFDM**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010.
- CAVALCANTI, S. R. **VEER: Um Algoritmo de Seleção de Pares em Redes AD HOC Veiculares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.
- COUTINHO, P. S. **Deteção de Energia para Rádio Cognitivos usando GNU Rradio e USRP2**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia da Computação e informação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2011.
- DIAS, B. C.; ANDRADE, R.; GUEDES, M. A. D. C. **Comunicação Inter-Veicular e entre Veículos-Infra-Estrutura com o Estudo do Protocolo DSRC**. Monografia (Curso de Tecnologia em eletrônica Automotiva) - Centro Paula Souza Faculdade Santo André. Santo André. 2010.

- DUTRA, R. B. **Avaliação do Desempenho da Modulação OFDM em Canais HF para Rádios Cognitivos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.
- EIZA, M. H.; NI, Q.; MIN, G. Investigation of Routing Reliability of Vehicular. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Network**, London, n. Springer, 2013.
- ETTUS RESEARCH. Daughterboards. **Informações Técnicas sobre Placa Filhas**, 2014. Disponível em: <<https://www.ettus.com/product/category/Daughterboards>>. Acesso em: 2 Setembro 2014.
- ETTUS RESEARCH. USRP Networked Series. **Informações Técnicas sobre USRP2**, 2014. Disponível em: <https://www.ettus.com/content/files/07495_Ettus_N200-210_DS_Flyer_HR_1.pdf>. Acesso em: 2 Setembro 2014.
- FÄHNLE, M. **Software-Defined Radio with GNU Radio and USRP/2 Hardware Frontend: Setup and FM/GSM Application**. Bachelor Thesis - Hochschule Ulm University of Applied Sciences Institute of Communication. Ulm. 2010.
- GITHUB. bastibl/gr-ieee802-11. **Download Blocos de Processamento de GNU Radio v.3.7**, 2013. Disponível em: <<https://github.com/bastibl/gr-ieee802-11>>. Acesso em: 20 Julho 2014.
- GNU RADIO COMPANION. **Introdução ao software GNU Radio**, 2006. Disponível em: <<http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>>. Acesso em: 20 Setembro 2014.
- IEEE STANDARDS ASSOCIATION. **Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications**. IEEE Computer Society. New York. 2012.
- IEEE STANDARDS ASSOCIATION. **IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Architecture**. IEEE Vehicular Technology Society. New York. 2013.
- ITO, M. S.; SCHENA, R. GNU Radio e Independência do Hardware em Sistemas Embarcados: Considerações Sobre a Aplicabilidade de SCA como Alternativa em Busca de Maior Flexibilidade. **Revista Digital Online - www.revdigonline.com**, v. 6, Abril 2006.
- JANSON, J. **Radio Definido por Software: Estudo e Realização de Teste com uma Plataforma Livre**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Sistemas de Telecomunicação) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. São Jose. 2012.

- JIANG, D.; DELGROSSI, L. IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments. **Mercedes-Benz Research & Development North America, Inc. IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE**, 2008. 2036-2040.
- LIMA, A. G. M. Radio Definido por Software: O Próximo Salto no Mundo das Telecomunicações e Computação, 2003. Disponível em: <http://www.revdigonline.com/artigos_download/art_13.pdf>. Acesso em: 29 Agosto 2014.
- MENDONÇA, T. F. D. VANETs: Vehicular Ad-Hoc Networks. **IME USP**, 2012. Disponível em: <http://grenoble.ime.usp.br/~gold/cursos/2012/movel/mono-1st/1105-1_ThiagoFurtado.pdf>. Acesso em: 20 Julho 2014.
- RIBEIRO, E. G.; COUTINHO, R. V.; JORDÃO, T. C. VANETs - Redes Ad-Hoc Veiculares. **GTA/UFJR**, 2009. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/vanet/>. Acesso em: 20 Julho 2014.
- ROUPHEL, T. J. **RF and Digital Signal Processing for Software-Defined Radio: A Multi-Standard Multi-Mode Approach**. Burlington: Newnes, 2009.
- SÁ, M.; GORENTE, S. Monitoramento inteligente de estados de comunicação para aplicações sobre redes veiculares. **LBD UFMG**, 2012. Disponível em: <<http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/enia/2012/0023.pdf>>. Acesso em: 5 Agosto 2014.
- SHIVALDORA, V.; GÜRTEL, L. **Implementation of IEEE 802.11p Physical Layer Model in SIMULINK**. Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Wien. 2010.
- SILVA, J. A. L. **Análise de Desempenho de um Sistema COFDM para Comunicação via Rede Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2006.
- SILVA, M. L. D. **Análise de Desempenho de Sistemas Multiportadora Utilizando Modulação M-QAM não Quadradas em Canais com Ceifamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Nacional de Telecomunicações. Santa Rita do Sapucaí. 2004.
- VANET'S - Vehicular Adhoc Networks. **GTA/UFRJ**, 2010. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2010_2/lemos/arquitetura.html>. Acesso em: 20 Julho 2014.
- VIEIRA, D. L. F. G. IEEE 802.11. **Ravel UFRJ**, 2004. Disponível em: <http://www.ravel.ufrj.br/sites/ravel.ufrj.br/files/publicacoes/tutorial_padrao_ieee_802.11_2.pdf>. Acesso em: 25 Junho 2014.

WAMICHA, J.; WINBERG, S. IEEE 802.11 OFDM Software Defined Radio Beacon Transmission. **IEEE Africon 2011**, Linvigstone, Setembro 2011.