



EMMANUEL TAVARES FERREIRA AFFONSO

**IMPACTO DO DESVANECIMENTO NO CANAL DE
RADIOFREQUÊNCIA NA QUALIDADE DO SINAL DE VOZ**

LAVRAS – MG

2017

EMMANUEL TAVARES FERREIRA AFFONSO

**IMPACTO DO DESVANECIMENTO NO CANAL DE RADIOFREQUÊNCIA NA
QUALIDADE DO SINAL DE VOZ**

Projeto de Mestrado apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Demóstenes Zegarra Rodríguez
Orientador

Prof. DSc. Luiz Henrique Andrade Correia
Coorientador

LAVRAS – MG

2017

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Affonso, Emmanuel Tavares Ferreira.

Impacto do Desvanecimento no Canal de Radiofrequência na
Qualidade do Sinal de Voz / Emmanuel Tavares Ferreira Affonso. -
2017.

85 p. : il.

Orientador(a): Demóstenes Zegarra Rodríguez.

Coorientador(a): Luiz Henrique Andrade Correia.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Qualidade de Voz. 2. Degradações. 3. Métricas de Qualidade.
I. Rodríguez, Demóstenes Zegarra. II. Correia, Luiz Henrique
Andrade. III. Título.

EMMANUEL TAVARES FERREIRA AFFONSO

**IMPACTO DO DESVANECIMENTO NO CANAL DE RADIOFREQUÊNCIA NA
QUALIDADE DO SINAL DE VOZ**

Projeto de Mestrado apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de Agosto de 2017.

Prof. DSc. Bruno de Abreu Silva

DCC-UFLA

Prof. DSc. Neumar Costa Malheiros

DCC-UFLA

Prof. DSc. Gabriel Fernando Pivarro Leite da Conceição

CRR-INATEL

Prof. DSc. Demóstenes Zegarra Rodríguez
Orientador

Prof. DSc. Luiz Henrique Andrade Correia
Co-Orientador

**LAVRAS – MG
2017**

Dedico esta monografia primeiramente a Deus, por ter guiado meu destino e permitir que tudo isso seja possível, a meus pais que me deram todo apoio e ajuda necessária para trilhar e conquistar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e forças para superar todas as dificuldades, ter me guiado em todas idas e vindas de minha cidade até a Universidade, ter permitido que tudo acontecesse na hora certa em minha vida. Agradeço aos meus pais por sempre ter me ajudado quando precisava. Minha família por me apoiar e me incentivar nesta luta. Meus amigos que nunca saíram do meu lado. E algumas outras pessoas em especial, que estiveram presente neste momento, me encorajando, me entendendo e sempre do meu lado. Agradeço também ao meu orientador pelos valiosos ensinamentos e dedicação, e à CAPES pelo apoio financeiro.

*Uma mente que se abre a uma nova idéia
jamais volta ao seu tamanho original.
(Albert Einstein)*

RESUMO

Atualmente a Voz sobre IP (VoIP), é um dos serviços de comunicação mais populares. Entretanto, há muitos fatores externos que afetam a qualidade final da comunicação VoIP, a voz pode sofrer vários tipos de degradações, especialmente quando o transporte é feito por canais *wireless*. A perda de pacotes e os desvanecimentos são fatores que afetam significativamente o sinal de voz, tanto em canais de comunicação cabeada ou *wireless*. Por isso métricas para avaliar a qualidade de voz se faz relevante, a fim de garantir um serviço adequado e maximizar a satisfação do usuário. Nesta pesquisa, diferentes cenários de degradações, como perda de pacotes e modelos de desvanecimentos serão aplicados em arquivos de voz. Em seguida, o índice de qualidade de voz, para cada cenário, será determinado por meio das recomendações da ITU-T P.862 e P.563. Primeiramente uma nova métrica, denominada de MOS^p , é proposta com base nos testes experimentais utilizando o P.862 como referência, com ela é possível prever o índice de qualidade de uma determinada comunicação, utilizando parâmetros de radiofrequência como *Doppler*, o modelo de desvanecimento e também parâmetros de rede cabeada como a perda de pacotes. Considerando uma escala MOS de qualidade de 0 a 4,5, a métrica proposta MOS^p teve como maior erro uma diferença valor de 0,3354, representando uma margem de erro de apenas 7,4%. Além do desenvolvimento da métrica proposta MOS^p , também foi efetuado o treinamento de uma Rede Neural Artificial (RNA) que teve como entrada degradações e valores MOS obtidos por meio do P.862, o resultado do treinamento alcançou erro máximo de 0,0843 do esperado e um percentual de somente 1,87% de erro. Posteriormente, por possuir características não intrusivas, o modelo P.563 foi empregado, porém, como os resultados obtidos foram inferiores aos esperados, uma nova métrica denominada $P.563_{MOS}^p$, foi desenvolvida tendo como referência os resultados do modelo P.862. Utilizando também uma escala MOS como referência, os resultados da nova técnica apresentaram um Coeficiente de Correlação de Pearson de 0,94 e erro máximo de 0,49. Com o objetivo de uma melhor representação dos cenários apresentados em ambientes simulados e para identificar se há uma degradação natural de uma transmissão real, experimentos foram efetuados em ambientes *indoor* e *outdoor* com transmissões de diferentes distâncias e modulações, essas transmissões foram feitas com o uso da técnica *Software Defined Radio* (SDR) implementados nos equipamentos *Universal Software Radio Peripheral* (USRP). Dessa forma foi possível obter a melhor representação dos cenários apresentados em ambientes simulados, identificando se há degradação natural em uma transmissão real. Os resultados experimentais validam que não há perda de qualidade em uma transmissão que não sofreu degradação, e utilizando a modulação *Binary Phase Shift Keying* (BPSK), implementada nas USRP, há uma melhor eficiência da transmissão de voz, alcançando o máxima pontuação na escala de qualidade do ITU-T. P.862.

Palavras-chave: Qualidade de Voz. VoIP. Degradação. Wireless. Métricas. P.862. P.563. MOS.

ABSTRACT

Currently, voice over IP (VoIP) is one of the most popular communication services. However, there are many external factors that affect the global quality of a VoIP communication, the voice can suffer various types of degradations, especially when the transport is performed through wireless channels. Packet loss and fading are factors that significantly affect the voice signal, either in wired or wireless communication channels. Therefore, metrics to assess the quality of voice becomes relevant in order to ensure an adequate service and maximize user satisfaction. In this research, different degradation scenarios such as packet loss and fading models will be applied to voice files. Then, the voice quality index for each scenario will be determined by both ITU-T recommendations P.862 and P.563. Firstly, a new metric, called MOS^P , was proposed based on the experimental tests, and using the P.862 as reference, with it is possible to predict the quality index of a given communication, using radio frequency parameters such as Doppler, the fading model and also including wired network parameters such as packet loss rate. Considering a MOS scale of 0 to 4.5, the metric had the largest error of 0.3354, representing a margin of error of only 7.4%. In addition to the development of the proposed MOS^P metric, the training of an Artificial Neural Network (ANN) was also carried out, with the input of degradations and MOS values obtained through P.862, the training result reached a maximum error of 0.0843 and a percentage of only 1.87% of error. Later, because of its non-intrusive characteristics, the P.563 model was used, but its results obtained were lower than expected, then, a new metric denominated $P.563_{MOS}^P$ was developed considering the results obtained by P.862 as reference. The results of the new technique presented a Pearson Correlation Coefficient of 0.94 and a maximum error of 0.49 MOS. For a better representation of the scenarios presented in simulated environments and to identify if there is a natural degradation of a real transmission, experiments were carried out in indoor and outdoor environments with transmissions at different distances and modulations, these transmission were made with the use of Software Defined Radio (SDR) model implemented in Universal Software Radio Peripheral (USRP) devices. Thus, it was possible to obtain the best representation of the scenarios presented in simulated environments, to identify if there is a natural degradation of a real transmission. The experimental results validate that there is no loss of quality in a transmission that has not suffered degradation, and using the Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulation, implemented in the USRP, there is a better efficiency of the voice transmission, reaching the maximum score of ITU-T P.862 quality scale.

Keywords: Voice Quality. VoIP. Degradation. Wireless. Metrics. P.862. P.563. MOS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Multipercursos.	22
Figura 2.2 – Efeito <i>Doppler</i>	22
Figura 2.3 – Classificação dos métodos de avaliação qualidade de voz.	24
Figura 2.4 – Escala de índices MOS utilizado pela recomendação ITU-T P.862 e P.563.	25
Figura 2.5 – Representação da recomendação ITU-T P.862.	26
Figura 2.6 – Representação da recomendação ITU-T P.862.	26
Figura 2.7 – Plataforma SDR.	29
Figura 2.8 – Arquitetura MAC.	31
Figura 2.9 – Representação da modulação BPSK.	33
Figura 2.10 – Representação da modulação QPSK.	34
Figura 2.11 – Constelações de um sinal utilizando 16-QAM e 64-QAM.	35
Figura 2.12 – Modelo de neurônio artificial.	35
Figura 2.13 – Arquitetura de <i>Multi-Layer Perceptron</i>	37
Figura 3.1 – Cenário utilizado para realização dos experimentos.	41
Figura 3.2 – Organização das etapas de degradações.	41
Figura 3.3 – Resultado das degradações com PLR.	42
Figura 3.4 – Resultado das degradações com Rayleigh e Rician.	42
Figura 3.5 – Datagrama UDP.	47
Figura 3.6 – Organização dos blocos do <i>transceiver</i>	48
Figura 3.7 – Execução dos blocos do <i>transceiver</i>	49
Figura 3.8 – Comparação entre arquivos de áudio transmitidos.	51
Figura 3.9 – Realização dos experimentos com USRP.	51
Figura 3.10 – Analisador de espectro na medição da potência do USRP.	52
Figura 3.11 – Realização dos experimentos com USRP em um ambiente outdoor.	54
Figura 3.12 – Captura de pacotes UDP pelo Wireshark.	55
Figura 3.13 – Análise das degradações por perda de pacotes.	56
Figura 4.1 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 0,5%.	59
Figura 4.2 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 1%.	59

Figura 4.3 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 3%.	59
Figura 4.4 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 5%.	60
Figura 4.5 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 10%.	60
Figura 4.6 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 20%.	60
Figura 4.7 – Eficácia da métrica MOS ^P utilizando testes subjetivos remotos.	62
Figura 4.8 – Desempenho no treinamento da RNA.	63
Figura 4.9 – Gráfico MOS por distâncias <i>indoor</i>	71
Figura 4.10 – Gráfico MOS por distâncias <i>outdoor</i>	71
Figura 4.11 – Presença de desvanecimento na transmissão para uma distância de 50m. . .	72
Figura 1 – <i>Script</i> executado no emissor	85
Figura 2 – <i>Script</i> executado no receptor	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Modulações avaliadas.	53
Tabela 3.2 – Distâncias, ganhos e ambientes avaliados.	54
Tabela 3.3 – Softwares utilizados	56
Tabela 4.1 – Cenários que obtiveram os maiores e menores índices de qualidade	61
Tabela 4.2 – Erro do MOS ^P em relação ao P.862	61
Tabela 4.3 – Valores de índices MOS obtidos pelo P.862 e P.563 em cenários com alta e baixa degradação	62
Tabela 4.4 – Desempenho do modelo matemático proposto	63
Tabela 4.5 – Erro do MOS de uma RNA em relação ao P.862	64
Tabela 4.6 – Comparação entre MOS ^P e RNA em relação ao P.862	64
Tabela 4.7 – Análise de transmissão com diferentes tamanhos de pacotes com distância de 1 metro	65
Tabela 4.8 – Resultados das modulações com distância de 1 metro	66
Tabela 4.9 – Resultados das distâncias em um ambiente <i>indoor</i>	68
Tabela 4.10 – Resultados considerando diferentes distâncias em ambiente <i>outdoor</i>	68
Tabela 4.11 – Resultados da modulação QPSK em um ambiente <i>outdoor</i>	73
Tabela 1 – Tabela com todos valores MOS obtidos com os modelos P.862 e P.563 . . .	80

LISTA DE SIGLAS

A-MSDU aggregate MAC protocol data unit

ANN Artificial Neural Network

AIEE American Institute of Electrical Engineers

BPSK Binary Phase Shift Keying

CNN Convolutional Neural Network

CRC Cyclic Redundancy Code

DSRC Dedicated Short-Range Communications

DSSS Direct Sequence Spread Spectrum

RF Radiofrequência

FDM Frequency Division Multiplexing

FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum

Hz Hertz

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IRE Institute of Radio Engineers

ITU-T International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector

IP Internet Protocol

IMS IP Multimedia System

LMS Least Mean Square

LLC Logic Link Control

MAC Medium Access Control

MLP Multi-Layer Perceptron

MOS Mean Opinion Score

MSDU MAC service data unit

OpenBTS GSM Base Transceiver Station

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PLR Packet Loss Rate

PCC Pearson Correlation Coefficient

PESQ Perceptual Evaluation of Speech Quality

PHY Physical Layer

PMD Physical Medium Dependent

QAM Quadrature Amplitude Modulation

QPSK Quadrature Phase Shift Keying

QoS Quality of Service

RBF Radius Basis Function

RTP Real-Time Transport Protocol

RNA Rede Neural Artificial

SOM Self-organizing map

SDR Software Defined Radio

TCP Transmission Control Protocol

USRP Universal Software Radio Peripheral

UDP User Datagram Protocol

UDH USRP Hardware Drive

VAD Voice Activity Detector

VoIP Voice over Internet Protocol

WLAN Wireless Local Area Network

SUMÁRIO

1	Introdução	14
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivos específicos	18
2	Referencial teórico	19
2.1	Fatores de rede que impactam na qualidade de voz	19
2.1.1	Avaliação de qualidade de voz	23
2.1.1.1	Recomendação P.862	24
2.1.1.2	Recomendação P.563	26
2.2	Rádio definido por <i>software</i>	27
2.3	Padrões IEEE 802.11	30
2.3.1	MAC e PHY	30
2.3.2	OFDM	32
2.3.2.1	Modulação BPSK	33
2.3.2.2	Modulação QPSK	34
2.3.2.3	Modulação QAM	34
2.4	Redes neurais artificiais	35
2.5	Estado da arte	36
3	Metodologia	39
3.1	Proposta para experimentos nos ambientes simulados	39
3.1.1	Avaliação de qualidade de voz em ambiente simulado	40
3.1.1.1	Degradações com simulação de uma rede cabeada	43
3.1.1.2	Degradações com simulação de uma rede <i>wireless</i>	43
3.1.2	Modelo de avaliação não intrusivo baseado no P.862	44
3.1.3	Modelo para melhorar o desempenho do P.563	45
3.1.4	Determinação de um modelo de qualidade utilizando RNA	46
3.2	Experimentos em ambientes de transmissão real	46
3.2.1	Arquitetura do ambiente de teste	47
3.2.2	Avaliação de qualidade de voz nos ambientes de transmissão real	49
3.2.2.1	Configuração do equipamento USRP	50

3.3	Base de dados	55
3.4	Materiais	56
4	Resultados	58
4.1	Resultados do modelo matemático para estimação de qualidade de voz baseado no P.862	58
4.2	Resultados do modelo matemático para estimação de qualidade de voz que utiliza o P.563	62
4.3	Resultados do modelo baseado em redes neurais artificiais	63
4.4	Resultados dos experimentos em ambientes reais com a arquitetura SDR .	64
4.4.1	Resultados em ambiente <i>indoor</i>	67
4.4.2	Resultados ambiente <i>outdoor</i>	67
5	Conclusão	74
5.1	Produção científica	75
	REFERÊNCIAS	76
	APENDICE A – MOS P.862 e P563	80
	APENDICE B – <i>Script</i> utilizado para emissão e recepção de pacotes UDP.	85

1 INTRODUÇÃO

Novas tecnologias de comunicação têm surgido nos dias atuais, assim como arquiteturas que possibilitam a implementação dessas tecnologias. Uma arquitetura para transporte de dados que tem ganhado bastante notoriedade é a *IP Multimedia System (IMS)* (LAURETTI, 2004), a qual é uma arquitetura de rede permite que diversos serviços sejam agregados a ela, dessa forma contribui para que novas aplicações sejam criadas, seja por facilidade de uso ou pela redução do custo do serviço.

Segundo Tanenbaum (2011), o conjunto de dispositivos e/ou computadores separados e independentes, mas interligados entre si, por canais de comunicação *wireless* ou cabeados, constituem uma rede. Haykin e Moher (2008) afirmam que em uma comunicação *wireless* se buscam os modos mais eficientes de utilizar o espectro de radiofrequência (RF) para transmissão de dados, no qual um ou ambos os extremos da comunicação podem ser móveis. Para estabelecer esta comunicação entre diversos dispositivos é necessário um protocolo de comunicação, de maneira que o receptor consiga interpretar os dados recebidos.

Uma aplicação bastante utilizada, atualmente, é o *Voice over Internet Protocol (VoIP)* que permite a realização de chamadas de voz em uma infraestrutura de rede para transporte de dados. O uso de tecnologia VoIP pode ser vantajoso, como na redução de custo de tarifas em ligações telefônicas, o que o torna muito atrativo principalmente para as empresas. Essas novas arquiteturas que permitem o transporte de voz em redes de dados, como a rede IMS, faz com que o futuro do serviço VoIP seja promissor.

Entretanto, a voz humana que é um sinal analógico de áudio, para ser transportada por algum meio de comunicação, ela precisa ser digitalizada (SILVA, 2005). Após a sua digitalização, a voz precisa ser encapsulada em pacotes para ser transportada por uma rede de dados, onde é necessário que um ou mais dispositivos previamente troquem mensagens de sinalização para estabelecer uma comunicação.

Entre diversas arquiteturas para transporte de dados em uma rede, o modelo de rede IP com o uso do *Transmission Control Protocol (TCP)* é atualmente o mais popular e utilizado. No entanto, as redes TCP/IP não foram projetadas para aplicações em tempo real, como os serviços de VoIP, devido que suas características de retransmissão de pacotes TCP não trariam benefícios para estas aplicações.

Por outro lado, o *User Datagram Protocol (UDP)* envia os pacotes de forma sequencial, sem a necessidade de uma confirmação de recebimento do pacote no outro extremo. Esta caracte-

terística é adequada para as aplicações em tempo real, porém, o UDP não consegue oferecer um modelo de *Quality of Service* (QoS) confiável (SHANMUGAN, 2009) (SANCHEZ-IBORRA, 2013). Para minimizar essa deficiência na confiabilidade das entregas dos pacotes IP, é utilizado juntamente com o UDP o protocolo *Real-Time Transport Protocol* (RTP) (RFC 3550, 2013) (SILVA, 2006). O RTP apresenta mecanismos que incluem, por exemplo, o número sequencial dos pacotes, possibilitando que perdas de pacotes possam ser detectadas pelo receptor.

Quando o transporte de dados é realizado com o protocolo UDP, como por exemplo o VoIP, há muitos fatores que afetam a qualidade do sinal. Segundo Ribeiro (2003) e Vianna, Moura, Albuquerque, Rebello e Boeres (2006), a perda de pacotes é o fator de maior impacto na qualidade do sinal transmitido em uma rede cabeada. Essas perdas de pacotes estão ligadas ao descarte dos pacotes por roteadores e/ou *switch* congestionados, e também por problemas no meio físico de transporte.

Já em redes *wireless*, que é o foco do presente estudo, novos problemas são encontrados, os quais estão associados às variações da frequência de transmissão, obstáculos, agentes refletores, entre outros, esses fatores degradantes são conhecidos como desvanecimento ou *fading*. Dentre os modelos que caracterizam desvanecimentos em radiofrequência, serão considerados os modelos Rayleigh e Rician. Nesses modelos, o sinal se dispersa por diversos obstáculos e chegam ao receptor diversas amplitudes e variações de fase do sinal. Associado a estes modelos de desvanecimento e também um fator degradante é o efeito *Doppler* (KHARE, 2014), o qual está relacionado à variação da frequência do canal, onde o emissor, receptor ou ambos estão em movimento.

O sinal de voz quando é transportado por uma rede, seja ela cabeada ou *wireless*, está sujeito à degradação da qualidade do sinal de voz e existem diversos métodos para medir e avaliar o impacto dessas degradações. Alguns desses métodos são propostos nas recomendações da *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T),(ITU-T, 2016). Esses métodos de avaliação podem ser divididos em dois grandes grupos: subjetivos e objetivos. Nos métodos subjetivos existe a necessidade de intervenção humana para ouvir e avaliar a qualidade da voz percebida. O método objetivo é implementado por meio de um algoritmo, o qual tem como saída um índice de qualidade e pode ser subdividido em: intrusivos, onde há a necessidade de comparação entre a fala emitida e a recebida; e os não intrusivos, na qual a avaliação da qualidade é somente do sinal final recebido.

A medida utilizada para avaliação da qualidade da voz é a *Mean Opinion Score* (MOS), a qual é uma medida padrão que tem uma escala que vai de 0 até o máximo de 5, onde 0 e 5 representam a qualidade mais baixa e alta, respectivamente. Neste trabalho a avaliação da qualidade da voz foi realizada utilizando os algoritmos disponibilizados pela ITU-T, que são implementações para as métricas não intrusivas e intrusivas descritas nas recomendações P.862 e P.563, (ITU-T, 2007b) (ITU-T, 2007a).

Os arquivos de áudios utilizados neste trabalho são pertencentes à base de dados da recomendação P.862 (ITU-T, 2007b). Nesses arquivos foram aplicados simulações de diversos cenários de degradações, obtendo-se diferentes arquivos de voz degradados, os quais foram avaliados com P.862 e P.563. As degradações foram inseridas, primeiramente, aplicando taxas de perda de pacotes ou *Packet Loss Rate* (PLR) e em seguida, foram aplicados os modelos de *fading*, alternando entre Rayleigh e Rician, com diferentes valores do parâmetro *Doppler*.

Com base nos resultados dos índices MOS obtidos pelo P.862 e o conhecimento de cada cenário de degradação, duas métricas de avaliação não intrusiva são propostas, onde em ambas são avaliadas cada variação de degradação para o cálculo do MOS. A primeira métrica o MOS é calculado por meio de um sistema de equações, já na segunda o MOS é determinado através do uso de Rede Neural Artificial (RNA). Ambas as métricas apresentam bons resultados, porém, o uso de RNA tem uma maior precisão na avaliação de qualidade.

O algoritmo P.563 e suas características não intrusivas possuem qualidades mais apropriadas na avaliação de uma comunicação em tempo real, por não necessitar comparar a voz emitida e recebida. Porém, a falta de eficiência na avaliação de silêncios naturais do orador, faz com que os resultados obtidos pelo algoritmo fornecido pela recomendação, sejam muito abaixo dos valores esperados (NUNES, 2016) (SILVA, 2006). Segundo a ITU-T (2007a), os intervalos de fala superiores a 200 ms, não são considerados naturais, o que pode interferir na pontuação MOS. Assim, a ferramenta intrusiva P.862, que faz uma comparação da voz emitida com a recebida, obteve resultados mais coerentes. Desta maneira, uma métrica foi desenvolvida para aproximar os resultados do P.563 aos resultados do P.862.

Todos os experimentos que envolveram degradações foram efetuados em ambientes simulados, e neles não foram considerados como parâmetros de degradações as modulações de um sinal e também o encapsulamento de pacotes UDP. Dessa maneira, para validar as métricas propostas e não limitar os testes em somente ambientes simulados, a avaliação da qualidade da

voz transmitida com modulação e encapsulamento de pacotes UDP foi efetuada com transmissões reais.

Os testes efetuados foram em ambientes fechados (*indoor*) e em ambientes abertos (*outdoor*), sem a presença de objetos entre o emissor e o receptor, evitando ao máximo algum tipo de desvanecimento como colisão dos pacotes, espelhamento e reflexão. Os parâmetros avaliados nas transmissões reais foram distâncias, ganho do transmissor, ganho do receptor, quantidade de pacotes UDP enviados e recebidos. Para todos os novos arquivos degradados, o índice de qualidade MOS foi determinado utilizando a métrica P.862.

Com os resultados obtidos por meio da avaliação de diferentes cenários de degradação, foi possível propor 3 novos métodos para avaliação da qualidade de voz, e todos eles apresentaram boa eficiência em sua avaliação. O primeiro, com o uso de equações matemáticas faz uma avaliação não intrusiva da qualidade de voz baseado nos parâmetros de degradação e os resultados do P.862, já o segundo método também faz uma avaliação não intrusiva baseado nos mesmos parâmetros utilizados no primeiro, porém, é utilizado RNA e apresenta uma melhor eficácia. O terceiro método propõe uma solução para melhorar a avaliação do algoritmo do P.563, utilizando o P.862 como referência. E para validar os métodos propostos e certificar que parâmetros como modulação não afetam na qualidade final de um sinal de voz, transmissões reais foram efetuadas com o uso da arquitetura SDR.

A seguir são apresentados os objetivos deste projeto. O referencial teórico que trata dos métodos de avaliação de qualidade de voz, os fatores de degradação do sinal e o estado de arte da avaliação da qualidade de voz, são apresentados no Capítulo 2. Posteriormente, a metodologia para obtenção do modelo não intrusivo proposto de avaliação de qualidade de voz e os testes efetuados são descritos no Capítulo 3. O Capítulo 4 apresenta os resultados alcançados neste trabalho. Por último, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e a produção científica gerada por meio deste trabalho.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é propor um modelo não intrusivo de avaliação de qualidade de voz, para comunicações VoIP, que considera parâmetros como a perda de pacotes em redes cabeadas e o desvanecimento em redes *wireless*. Os modelos propostos são determinados utilizando um modelo matemático e algoritmos de redes neurais. Também, deve-se destacar que nos testes realizados são considerados ambientes de simulação e ambientes reais,

com o intuito de verificar como a qualidade de voz é afetada. Nos ambientes reais, diferentes parâmetros, como, tipos de modulações, distâncias e ganhos de transmissão são avaliados.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

1. Analisar metodologias e propostas de métricas de qualidade de voz;
2. Analisar os principais parâmetros de degradação tanto em redes cabeadas e *wireless*;
3. Montar um cenário de simulação que considere, degradações de PLR como em uma rede cabeada, e desvanecimento em uma rede *wireless*;
4. Analisar as degradações ocorridas nos cenários simulados com as ferramentas P.862 e P.563 e obter o MOS;
5. Desenvolver uma métrica não intrusiva, baseada em um modelo matemático, com resultados mais próximos aos obtidos pelo P.862, e que supere o desempenho do algoritmo P.563;
6. Desenvolver uma métrica que melhore a precisão do algoritmo P.563, baseando nos resultados obtidos com o P.862;
7. Desenvolver uma métrica com o uso de RNA e validar se há um melhor desempenho quanto ao modelo matemático proposto;
8. Montar cenários de transmissão real, utilizando a ferramenta USRP com o *software* GNU Radio;
9. Analisar qual a modulação e tamanho de *payload* para pacotes UDP tem melhor desempenho para serem usados nos testes em ambientes *indoor* e *outdoor*;
10. Analisar a degradação da transmissão real em ambientes *indoor* e *outdoor*;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo consiste na apresentação dos aspectos conceituais sobre avaliação de qualidade de voz, conceitos básicos de rádio definido por *software*, conceitos relacionados ao padrão IEEE 802.11, conceitos de modulações, definição de redes neurais artificiais, fatores degradantes nas redes cabeadas e *wireless*, além de ferramentas importantes para a devida compreensão da metodologia e dos resultados que foram alcançados. Por fim, o estado da arte apresenta as pesquisas relacionadas atuais.

2.1 Fatores de rede que impactam na qualidade de voz

Os fatores degradantes de uma rede são responsáveis pelo insucesso na comunicação de voz entre um emissor e o receptor. Nas redes cabeadas, a degradação da qualidade de uma transmissão está sempre ligada a fatores físicos, geralmente relacionados ao meio de transporte (cabos), conectores com defeito, e também a equipamentos de comutação sobrecarregados ou danificados.

Um dos problemas que as aplicações em tempo real encontram é que os pacotes de dados não podem ser retransmitidos, no caso de uma retransmissão, os pacotes podem chegar em ordem diferente, conseqüentemente, a voz recebida não seria igual à transmitida. Também deve considerar-se que a presença de silêncios afeta a qualidade da comunicação de voz.

Alguns dos fatores mais relevantes na degradação em comunicações cabeadas são:

- **Perda de pacotes (*Packet Loss Rate*, **PLR**):** Estão ligadas ao descarte dos pacotes por roteadores e/ou *switch* congestionados e, também por problemas no meio físico de transporte. Portanto, em uma comunicação de tempo real como o VoIP, que apresenta perda de pacote, a qualidade da comunicação será degradada.
- **Latência:** A latência ou atraso na comunicação, corresponde ao tempo de propagação do sinal pelo meio até seu destino. O aumento da latência está diretamente associado com a qualidade do serviço, já que o mesmo pode causar uma conversação sem sincronismo.
- **Varição de atrasos (*Jitter*):** O *jitter* está associado ao intervalo de recebimento de cada pacote no receptor. Caso esse intervalo comece se variar, por motivos de latência na transmissão ou até pelos pacotes passarem por outros caminhos diferentes, ocorrerá diminuição na qualidade do serviço.

Nos sistemas *wireless*, diferente das redes cabeadas, são encontrados outros fatores degradantes, chamados de desvanecimento ou *fading*. O desvanecimento,(LEE, 2003) (GARZON, 2014) (CHOUDHURY; GIBSON, 2007) (YUHE; JIE, 2009) pode ocorrer por diversos fatores, como dificuldade de contornar objetos no caminho do sinal, múltiplos percursos formados por refletores das ondas, afastamento, dentre outros. Alguns desses fenômenos podem ser:

- **Multipercursos:** Ocorre quando as irregularidades entre o emissor e receptor, o sinal produz caminhos alternativos até o receptor. O sinal percorre por vários caminhos até seu destino e o sinal emitido é submetido à reflexão, refração e espalhamento devido aos obstáculos que estão em sua frente. Esses obstáculos podem ser árvores, prédios, veículos, dentre outros. Este fator degradante é ilustrado na Figura 2.1.
- **Reflexão:** Quando um sinal emitido se depara com um obstáculo, pode ocorrer uma completa inversão ou parcial de fase da onda. Assim, o sinal refletido encontra com a onda no sentido contrário e pode ocasionar interferência, degradação e dependendo da intensidade o sinal pode ser cancelado pelo receptor.
- **Difração:** Acontece quando o sinal tenta contornar um objeto em seu caminho, provocando a diminuição da intensidade do sinal.
- **Refração:** Esse fenômeno ocorre quando o sinal emitido se propaga por meio de um obstáculo, sofrendo mudança de velocidade e direção. Por exemplo, um sinal que incide sobre uma gota de chuva, água ou um muro.
- **Espalhamento:** Ocorre quando o sinal encontra uma superfície menor que o comprimento da onda, gerando fragmentos do sinal. Muito comum em locais ásperos e folhas pequenas.
- **Absorção:** É quando um objeto absorve totalmente o sinal que chegou até ele. A onda não atravessa, reflete ou contorna o material.
- **Interferências:** Como seu nome já diz, ocorre quando no ambiente há algum outro sinal inibindo ou atrapalhando a onda chegar ao seu destino.

O grande volume das transmissões *wireless* estão centralizados geralmente nas cidades, e o problema encontrado em uma transmissão nestes locais ocorre porque as antenas emissoras

ou receptores muitas das vezes estão em lugares mais baixos que a vizinhança em sua volta. Por sua vez, no que diz respeito quanto ao local no qual o sinal é transmitido, o desvanecimento é dividido em dois grupos: Larga escala e pequena escala (RODRÍGUEZ, 2013) (SILVA, 2004) (RODRIGUEZ, 2014).

Larga escala Este desvanecimento ocorre quando há atenuação do sinal emitido devido a obstáculos no caminho e também quando o sinal perde potência devido a grandes distâncias. Quando o emissor está distante do receptor, a potência média do sinal recebida diminui na medida em que a distância aumenta, este conceito é denominado perda de percurso (*path loss*).

Outro fator conhecido deste desvanecimento é o sombreamento, o sinal recebido sofre atenuação devida obstáculos no seu percurso, que podem ser prédios, vegetações e montanhas. Os fenômenos atmosféricos como chuva, neve, granizo contribuem para este desvanecimento. A atenuação pela distância pode ser calculada por 2.1 (ITU-T, 2007b), onde p corresponde ao coeficiente de atenuação, r a distância do emissor e o receptor, r_o a distância de referência e P_l indica a média em área.

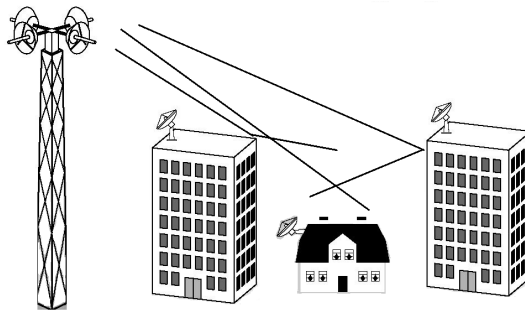
$$P_l = \left(\frac{r}{r_o} \right)^p \quad (2.1)$$

Por meio dos cálculos de atenuação de distância, podemos chegar ao modelo de sombreamento log-normal dado por 2.2 (ITU-T, 2007b), no qual a atenuação segue uma variável aleatória log-normal, onde X_σ é uma variável de média zero e distribuição normal.

$$P_l = P_l + 10_p \log \left(\frac{d}{r_o} \right) + X_\sigma \quad (2.2)$$

Pequena escala Este desvanecimento está associado à variação na amplitude do sinal e nos deslocamentos entre emissor e receptor. Dois fenômenos que contribuem para este desvanecimento são o multipercursos e o efeito *Doppler*. Em multipercursos o sinal sofre espalhamento, refração e reflexão devido a obstáculos. Este fenômeno gera a recepção constante de diversas versões do sinal, apresentando amplitudes e fases diferentes, conforme é ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Multipercursos.



Fonte: Adaptada pelo autor

O outro fator é o *Doppler*, ele está associado à velocidade de movimentação entre o emissor e o receptor, o que está sujeito à variação da frequência do sinal. Um dos parâmetros mais relevantes nos modelos de desvanecimento é o efeito *Doppler*.

O *Doppler*, segundo Pinheiro (2012) e Silva (2004), acontece em sistemas móveis, devido ao deslocamento do receptor e/ou emissor, ocorrendo uma variação da frequência do sinal recebido. Esta alteração pode ser calculada conforme 2.3.

$$f' = f \left(\frac{V \pm V_o}{V \pm V_s} \right) \quad (2.3)$$

Onde: f' é a frequência esperada, f a frequência emitida, V a constante da velocidade de propagação do sinal transmitido, V_o a velocidade do receptor e V_s a velocidade do emissor.

A velocidade do emissor ou receptor, segundo 2.3 pode ser positiva (+) ou negativa (-), de acordo com a direção de deslocamento. O efeito *Doppler* é representado de acordo com a Figura 2.2, onde o ponto vermelho é o emissor do sinal e seu deslocamento é da direita para a esquerda, a figura ilustra que o lado para onde o emissor está se deslocando o comprimento de onda é menor (a frequência aumenta) e o lado oposto à onda é maior e a frequência diminui.

Figura 2.2 – Efeito *Doppler*.

Fonte: (TAVARES, 2016)

Os serviços de comunicações móveis geralmente são utilizados em locais que possuem muitos obstáculos ao seu redor, como nas cidades, inclusive no interior dos prédios. Nestes lugares, a grande dificuldade de se transmitir um sinal se dá pelo fato de que geralmente o receptor está rodeado por edificações e não existe uma comunicação direta com o transmissor. Nestes casos, a comunicação se estabelece por espalhamento das ondas ou por difração sobre e ao redor dos objetos (HAYKIN; MOHER, 2008).

Quando não existe linha de visada entre o emissor e receptor, onde o sinal se espalha entre os diversos obstáculos que os cercam, o sinal chega ao seu destino com diversas amplitudes e fases diferentes, originando a propagação conhecida como modelo de canal de desvanecimento Rayleigh.

Outro modelo de propagação conhecido que também gera degradação é o Rician, porém nele existe uma linha de visada direta entre emissor e receptor, mas também faz com que diferentes fases e amplitudes do sinal cheguem ao seu destino.

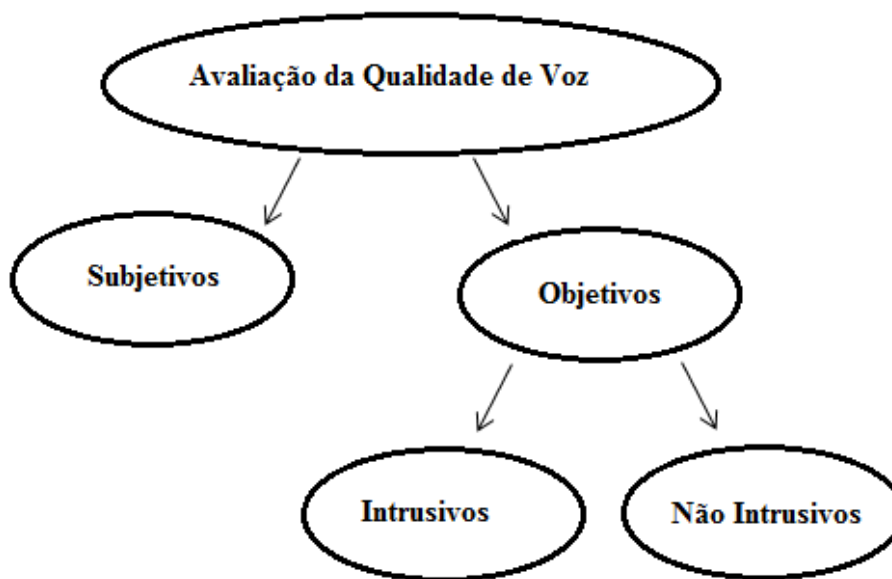
2.1.1 Avaliação de qualidade de voz

Os métodos de avaliação de qualidade de voz mencionados podem ser divididos em dois grupos: métodos objetivos e subjetivos. No método subjetivo a avaliação depende simplesmente das opiniões de usuários para pontuar a qualidade da voz percebida. Nos métodos objetivos é utilizado algum algoritmo para avaliar a qualidade, seja comparando dois sinais ou analisando as características intrínsecas apenas do sinal de interesse.

Os métodos objetivos para avaliação de qualidade de voz, segundo as recomendações da ITU-T, são divididos entre métodos intrusivos e não intrusivos. Nos métodos intrusivos existe a necessidade de comparar o sinal de voz emitido/original com o sinal que chegou ao receptor, após sofrer degradações em seu percurso. Nos métodos não intrusivos há necessidade apenas do sinal de interesse para ser avaliado. A Figura 2.3 ilustra de uma forma geral a classificação dos métodos de avaliação de qualidade de voz.

Nos últimos anos, a avaliação subjetiva tem sido realizada também de forma remota. Este método de avaliação é denominado de *crowdsourcing*, no qual usuários localizados em qualquer parte do mundo e cadastrados em plataformas que oferecem este serviço, realizam diversas tarefas, como a avaliação da qualidade de imagens, vídeos ou áudios, recebendo uma compensação monetária por cada tarefa corretamente concluída. Se comparado aos métodos tradicionais que são realizados em laboratórios, o *crowdsourcing* oferece uma grande redução

Figura 2.3 – Classificação dos métodos de avaliação qualidade de voz.



Fonte: Elaborada pelo autor

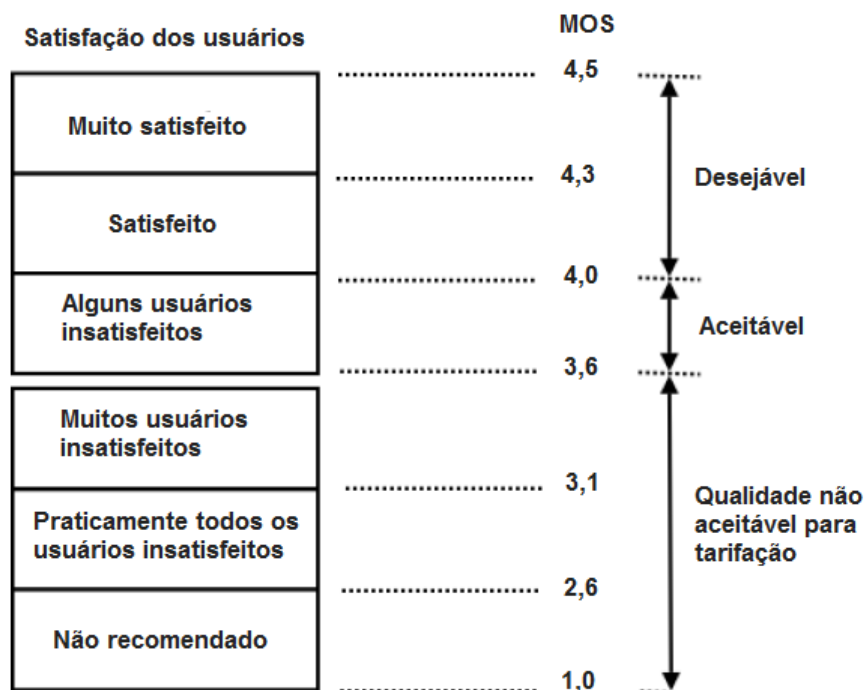
no tempo de execução das avaliações. Esta metodologia de avaliação foi utilizada no presente trabalho para testes de validação de uma métrica proposta, no qual se avaliaram simulações de degradações em arquivos de voz que passam em diferentes redes de transporte de dados.

Dentre as diversas recomendações da ITU-T, foram utilizadas as recomendações P.862 e P.563 para determinar a qualidade dos arquivos de voz. Ambas possuem bastante destaque dentre as recomendações da ITU-T, onde uma possui característica não intrusiva (P.563) e a outra intrusiva (P.862). Como resultado da avaliação se obtém um índice MOS (RODRÍGUEZ, 2009) (RIX, 2006). O valor máximo de MOS atingindo pelos testes objetivos das recomendações ITU-T P.862 e P.563 é de 4,5. Entretanto, algumas outras recomendações podem utilizar um índice em que o máximo valor de escala é de 5,0. Nota-se na Figura 2.4 que o valor mínimo desejável seria de 4,0 e o mínimo aceitável para uma conversação seria 3,6, em uma escala de 0 a 4,5.

2.1.1.1 Recomendação P.862

A recomendação P.862 é um avaliador de qualidade de voz com características intrusivas. Esta ferramenta implementa o algoritmo que é conhecido como avaliação perceptual da qualidade de fala (*Perceptual Evaluation of Speech Quality*, PESQ). O algoritmo compara o arquivo de sinal de voz original com o arquivo degradado, determinando um valor MOS. O PESQ,

Figura 2.4 – Escala de índices MOS utilizado pela recomendação ITU-T P.862 e P.563.



Fonte: (VIANNA, 2006)

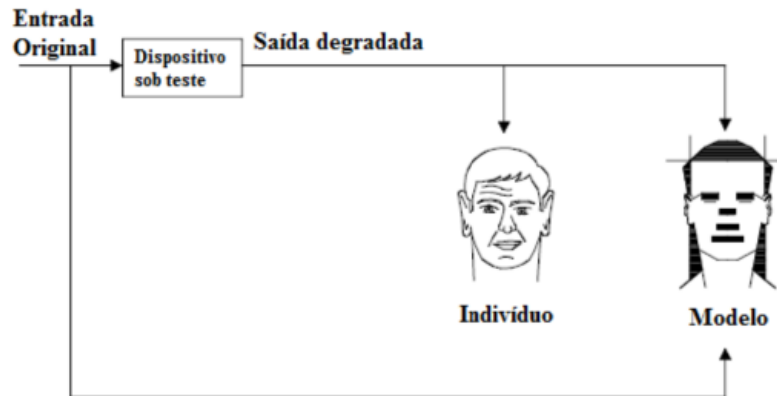
segundo ITU-T (2007b), possui um bom desempenho considerando diversos fatores como distorções de erros, codificações de canal, perda de pacotes, efeito de variação de atraso, dentre outros.

O PESQ é um método objetivo para avaliações terminal-a-terminal, usado para medições de fala em banda estreita de redes telefônicas ou codificadores de voz. A Figura 2.5 apresenta o comportamento esperado, utilizando o modelo objetivo e comparando o sinal original com o degradado, o resultado de saída deve ser igual ou próximo de uma avaliação de um indivíduo analisando somente o sinal degradado.

A ITU-T (2007b) menciona que este algoritmo possui alguns cenários de teste nos quais não é possível obter bons resultados. Suas predições são imprecisas quando, por exemplo: existe perda de sonoridade; eco percebido pelo emissor; comunicação bidirecional, além de possuir codificadores que substituem pelo silêncio todas as seções contínuas de fala que compõem mais de 25% de expressão ativa.

A Figura 2.6 ilustra as etapas do algoritmo P.862. Primeiramente, os atrasos entre o sinal original e degradado são comparados a cada intervalo de tempo, em seguida, os atrasos são computados ainda em silêncios ou durante segmentos de voz ativa. Posteriormente, com os atrasos alinhados, o algoritmo tenta representar o sinal de maneira análoga à representação

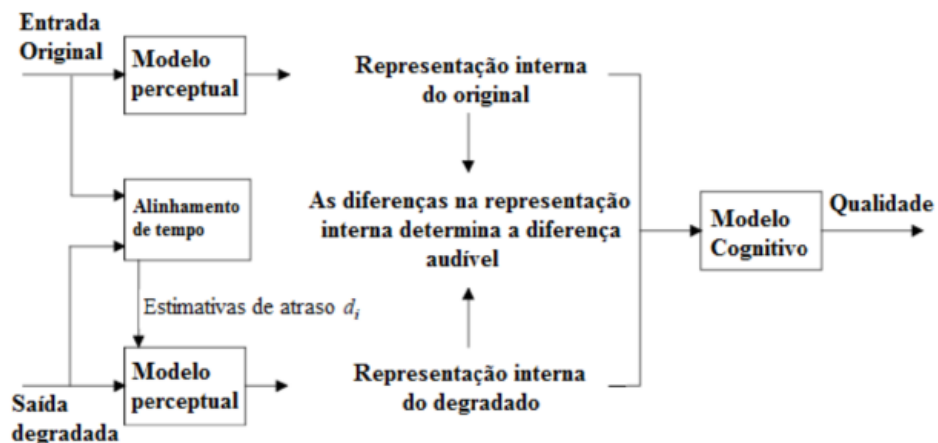
Figura 2.5 – Representação da recomendação ITU-T P.862.



Fonte: (ITU-T, 2007b)

psicofísica do sinal no sistema auditivo humano. No final, o sinal é processado avaliando todos os efeitos de degradação da voz.

Figura 2.6 – Representação da recomendação ITU-T P.862.



Fonte: (ITU-T, 2007b)

2.1.1.2 Recomendação P.563

A recomendação P.563, por ser um método não intrusivo, possui vantagens para avaliar a qualidade do sinal de voz em tempo real, uma vez que não existe a necessidade de comparação com o sinal original (ITU-T, 2007a). Este método apresenta um melhor desempenho na avaliação de aplicações de telefonia que utiliza 3,1 kHz de largura de faixa.

Porém, o algoritmo possui algumas desvantagens. Como por exemplo o detrimento na avaliação em áudios que apresentem silêncios, uma vez que a ferramenta não determina se é

uma falha na comunicação, como perda de pacotes ou um intervalo na fala. Essa desvantagem pode interferir na análise e na pontuação MOS.

O algoritmo P.563 foi criado para avaliar a qualidade final de voz como se um ser humano estivesse ouvindo uma chamada real. Para que isso ocorra, alguns pré-processamentos são necessários. Primeiramente, um algoritmo de detecção de atividade de voz (*Voice Activity Detector*, VAD), deve ser aplicado para identificação de segmentos de voz e silêncios. Posteriormente, é efetuado um ajuste do nível da voz para sua avaliação.

Durante essas etapas, alguns processamentos para parametrizações são efetuados, os quais podem ser divididos em três blocos que correspondem às três principais classes de distorções (ITU-T, 2007a):

- Análise vocal e artificialidade da voz, aplica-se em vozes masculinas, femininas ou robóticas;
- Análise de ruídos;
- Interrupções, silêncios e recorte de tempo.

Algumas características que um sinal de voz digitalizado deve possuir para um melhor desempenho do P.563 são listadas a seguir:

- Frequência de amostragem de 8kHz;
- Resolução de amplitude PCM linear de 16 *bits*;
- Atividade mínima da voz de 3 segundos e máxima de 20 segundos;
- Atividade total da fala de no mínimo 25% e máximo de 75%.

2.2 Rádio definido por *software*

Em constante evolução, o rádio definido por *software* (*Software Defined Radio*, SDR), são sistemas de comunicação por radiofrequência em que algumas implementações de rádio, anteriormente realizadas pelo *hardware*, são implementadas pelo *software*. De forma que todos os parâmetros correspondentes a filtros, moduladores, demoduladores, frequência e amplificadores são controlados pela aplicação. Estas soluções possuem baixo custo e são muito utilizadas

na implementação de cenários de testes e como ferramenta de ajuda para aulas didáticas, auxiliando no reforço da teoria com a prática (EL-HAJJAR, 2014).

Atualmente muitos projetos e pesquisas com a arquitetura SDR têm sido desenvolvidos, um deles é o *GSM Base Transceiver Station* ou OpenBTS (OPENBTS, 2016), que é uma solução para cenários de comunicação de aparelhos celulares. Diferentemente de outras soluções, para o seu desenvolvimento é necessário uma pequena alteração nos *hardwares* comumente utilizados, mas a aplicação principal ainda é implementada no *software*.

A *Dedicated Short-Range Communications* (DSRC) é outro exemplo de implementação SDR, foi desenvolvida para canais de comunicação entre pequenas distâncias, especialmente para redes veiculares (RITO, 2011). Há também implementações para os padrões da IEEE 802.15 de comunicação e também da 802.11, que é o padrão avaliado nesses estudos, ambos disponíveis em Bloessl (2016).

Para que seja possível o desenvolvimento de um cenário real utilizando a arquitetura SDR são necessários 3 componentes, um componente físico ou *hardware* para a transmissão e recepção de sinais *wireless*, comumente utilizados as soluções *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) e alguns modelos podem ser encontrados em Ettus (2016). O segundo componente que são os *softwares* para programação e controle dos USRP, que pode ser desenvolvido pelas linguagens Python e C++, há também ferramentas que fornecem blocos de processamento já desenvolvidos, como o GNU Radio. E por último o *USRP Hardware Drive* (UHD), que é um componente de *software* para fazer a comunicação da aplicação desenvolvida com o USRP.

O USRP possui uma conexão USB para comunicação com o computador e antenas de transmissão e recepção de dados. O seu circuito é composto basicamente pela placa mãe, responsável por todas as funções programáveis mais complexas, e pela placa filha, onde fica o módulo de RF (COUTINHO, 2011)(TORRES, 2014)(TONG, 2009).

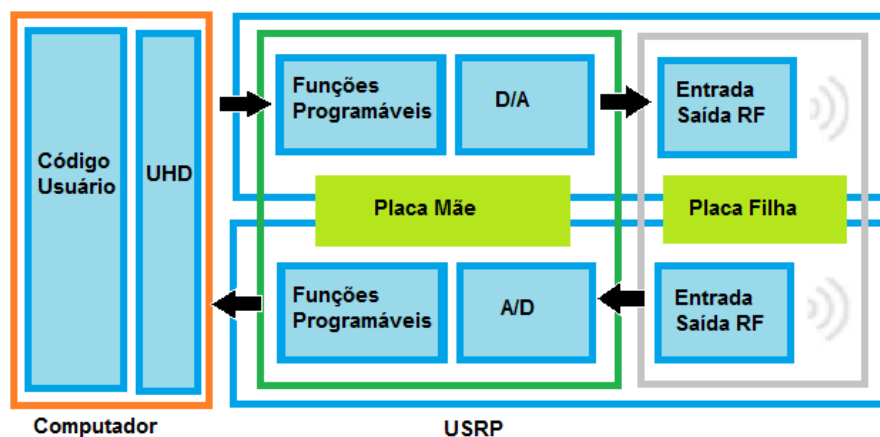
GNU Radio é uma solução *open source* (RADIO, 2016), que provê uma interface gráfica para implementação de códigos e blocos de processamento para o USRP. A solução *software* se estende além da criação de um ambiente que necessita de um componente físico, com ele é possível o desenvolvimento de um cenário simulado sem a comunicação com o mundo real. A documentação, desenvolvimento e blocos dessa ferramenta são suportados pelas linguagens de programação Python e C++.

A junção de ambas as soluções para desenvolvimento de uma plataforma SDR, *software* e *hardware*, é por meio de um módulo UHD. Por meio do UHD é possível a comunicação entre

ambas as partes, sem a necessidade de conhecimento de seus componentes físicos, evitando o desenvolvimento de aplicativos dedicados para cada modelo de placa USRP diferente.

Uma completa visualização de uma plataforma SDR é ilustrada em 2.7, onde o USRP é dividido em placa filha e placa mãe. A placa filha é responsável pelas entradas e saídas de transmissões de RF. A placa mãe cuida das funções mais complexas, programáveis e conversões de sinal analógico para digital e digital para analógico. O USRP é conectado a um computador geralmente por uma conexão USB, que por meio do módulo UHD comunica com código de processamento desenvolvido pelo usuário.

Figura 2.7 – Plataforma SDR.



Fonte: Elaborada pelo autor

Um dos problemas de utilizar as ferramentas como o GNU Radio para desenvolvimento das soluções de comunicação com o uso do USRP em ambiente controlados, é que não há um conjunto de blocos de processamento que permitem uma comunicação através do protocolo TCP/IP. Esse problema ocorre porque não há um suporte nativo para implementações das camadas PHY e MAC para comunicação com os USRP.

Para uma completa comunicação de voz entre dois *hosts* com suporte ao protocolo TCP/IP, diferentes modulações, frequências e outros parâmetros, foi utilizado o conjunto de blocos desenvolvido para o GNU Radio do projeto gr-ieee802.11 (BLOESSL, 2016). Esse projeto implementa as camadas PHY e MAC para comunicação com os USRP e permite efetuar transmissões *wireless* dentro dos padrões da IEEE 802.11 (IEEE, 2016).

2.3 Padrões IEEE 802.11

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), é uma organização dedicada aos avanços tecnológicos, fundada com a junção do *American Institute of Electrical Engineers* (AIEE), e *Institute of Radio Engineers* (IRE). É a maior organização sem fins lucrativos que promove projetos de engenharia para criação, desenvolvimento, integração, compartilhamento e aplicação de conhecimento sobre eletrônica e tecnologias de informação (IEEE, 2016).

Dentre todas as atividades associadas à IEEE, a que recebe maior destaque é a definição de padrões de comunicação entre computadores e outros dispositivos. O padrão 802.11 para comunicação *wireless* está entre eles, com o objetivo de fornecer conectividade entre dispositivos, estações fixas e em movimento, dentro de uma rede *wireless* (802.11 IEEE, 2010).

O 802.11 também propõe normas regulamentadoras para padronizar o acesso entre uma ou mais frequências de comunicação. Definindo assim, o *Medium Access Control* ou controle de acesso ao meio (MAC) e as especificações da *Physical Layer* ou camada física (PHY) para a conectividade entre os emissores e receptores.

2.3.1 MAC e PHY

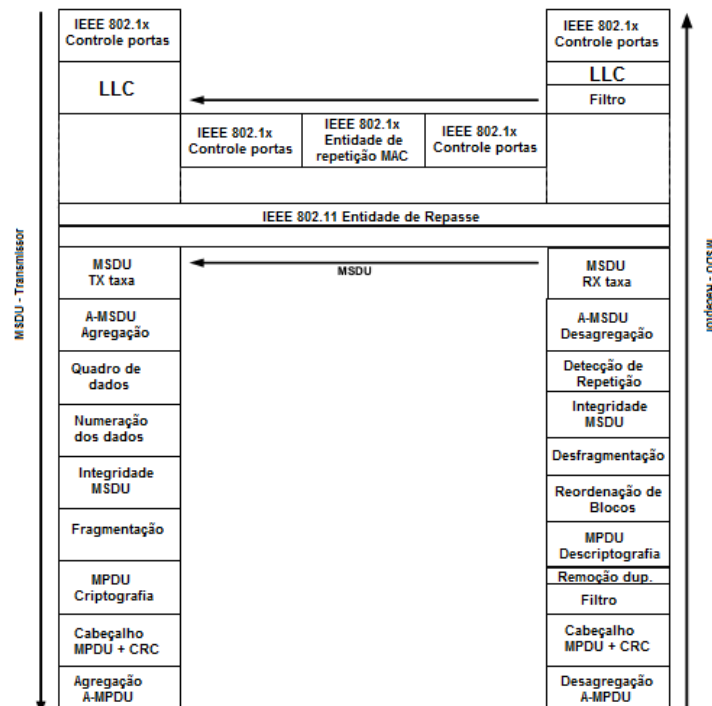
A *Logic Link Control* ou Controle de Enlace Lógico (LLC) é um mecanismo para endereçamento das estações que as permite poder trocar dados dentro de uma mesma rede, a função da camada MAC oferece suporte para este serviço. O MAC usa os serviços de nível PHY para transportar os dados de controle de acesso de uma entidade MAC para outra, onde é entregue ao LLC (802.11 IEEE, 2012). Não há garantia de que os dados enviados serão entregues com êxito.

Os processos da arquitetura MAC que envolvem transporte de toda ou parte de uma *MAC service data unit* ou Unidade de Serviço de Dados MAC (MSDU), pode ser visualizado na Figura 2.8. Na transmissão a unidade de dados primeiro passa pela limitação da taxa de transmissão; agregação da MSDU; modo de economia de energia para entrega dos quadro de dados, numeração da sequência de quadros; criptografia e integridade da unidade de dados; fragmentação; formatação dos dados e adiciona a *aggregate MAC protocol data unit* ou agregação de dados de protocolo MAC (A-MPDU). No padrão IEEE 802.1x pode haver bloqueio dos dados da MSDU na porta controlada.

No receptor, o quadro de dados recebidos passa pela desagregação do A-MPDU; em seguida o cabeçalho MPDU e validação de *Cyclic Redundancy Code* ou Código de Redundância

Cíclica (CRC) é realizada; logo, os seguintes processos são efetuados: filtro de endereço; remoção de duplicado; descritografia e checagem de integridade; possível reordenação dos blocos; desfragmentação; integridade e verificação da MSDU; detecção de repetição; desagregação da MSDU e limitação da taxa da MSDU. É importante destacar que o controle da IEEE 802.1x descarta qualquer MSDU recebido que não representa um padrão IEEE 802.1x. Também a desfragmentação dos dados que chegarem fora de ordem.

Figura 2.8 – Arquitetura MAC.



Fonte: adaptado de (802.11 IEEE, 2012)

A camada PHY é responsável por fornecer uma comunicação entre o meio externo, radiofrequência, com a camada MAC (802.11 IEEE, 2012). Provê uma série de serviços de controle de nível físico para camadas superiores da arquitetura 802.11, como codificação e decodificação dos sinais, recepção e transmissão de *bits*, especificação do meio de transmissão, dentre outros. A PHY pode trabalhar de duas maneiras (802.11 IEEE, 2012):

- A PHY adapta ao meio físico dependente (*Physical Medium Dependent*, PMD), a qual define o método de mapeamento dos dados do protocolo MAC em um formato de enquadramento adequado, para enviar e receber dados de usuário e informações de gerenciamento entre as estações.

- O sistema de PMD cria as características e o método de transmissão e recepção de dados através do ambiente *wireless* de transmissão entre as estações.

Os padrões mais comuns de transmissão e codificação nas comunicações da 802.11 são as *Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)*, *Frequency Hopping Spread Spectrun (FHSS)* e *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*. Como o foco desta pesquisa é o OFDM, este será abordado com mais detalhes na próxima subseção.

2.3.2 OFDM

Com a evolução da técnica convencional de Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM), surge a OFDM ou Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais, que é uma técnica de transmissão de dados que utiliza as subportadoras de um sinal para modulação (ALBUQUERQUE; PINTO, 2002). As subportadoras são divisões da banda do sinal em portadoras paralelas que diminuem a interferência no meio de transmissão.

O sistema de multiplexação consiste em duas funções de comunicação para protocolo PHY (802.11 IEEE, 2012):

1. Uma função de convergência, que adapta as capacidades do sistema PMD ao serviço PHY e em seguida, um método define o mapeamento adequado para enviar e receber dados de usuário e informações das estações do PMD associado.
2. Um sistema PMD define as características e o método de transmissão e recepção de dados através do meio *wireless* entre as estações, cada um utilizando o sistema OFDM.

A OFDM é uma tecnologia muito utilizada pelos padrões de comunicação das *Wireless Local Area Network (WLAN)*, pela sua robustez aos desvanecimentos de múltiplos caminhos e até interferências (DEY, 2012). Essa robustez é pelo fato que a utilização de subportadoras em paralelo diminui a interferência do meio de transmissão.

O sistema OFDM fornece para as WLAN a capacidade de transporte de dados com taxas de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54 Mb/s. Este sistema faz uso de 52 subportadoras que são moduladas em *Binary Phase Shift Keying (BPSK)*, *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)* ou modulações *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)* com 16 ou 64 símbolos (ALBUQUERQUE; PINTO, 2002), (802.11 IEEE, 2012).

O OFDM pode operar em “*half-clocked*”, que o permite operar em um canal de 10 MHz e tem capacidade de comunicação de dados de 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 e 27 Mbps. Também o

OFDM opera em “*quarter-clocked*” que usando um canal de 5 MHz com capacidades de 1.5, 2.25, 3, 4.5, 6, 9, 12 e 13.5 Mbps (802.11 IEEE, 2012).

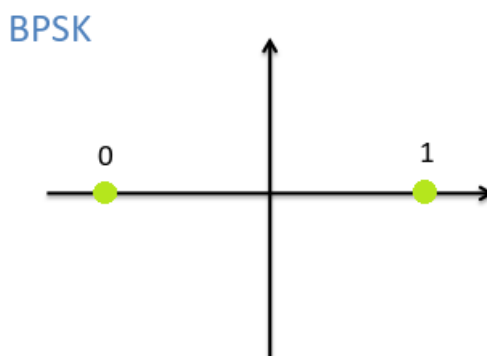
Nas transmissões pelo sistema OFDM há o código de correção de erro (*error correction coding*), que utiliza taxa de codificação de 1/2, 2/3 ou 3/4. Esta taxa tem como princípio a adição controlada de *bits* redundantes na transmissão, para que erros possam ser identificados e corrigidos na decodificação. Assim, para cada bit de informação, um bit de redundância é acrescentado.

A taxa de codificação de 1/2 é empregado nas modulações BPSK, QPSK e QAM16, onde as subportadores devem oferecer taxas de transmissão de 6, 12 e 24 Mbps. A taxa de codificação de 3/4 é utilizada em modulações BPSK, QPSK, QAM16 e QAM64 e as taxas de transmissão são respectivamente iguais a 9, 18, 36 e 54 Mbps. E finalmente a taxa de codificação 2/3 é utilizada na modulação QAM64 com transmissão de 48 Mbps(ALBUQUERQUE; PINTO, 2002).

2.3.2.1 Modulação BPSK

Na modulação BPSK os sinais de dados são embutidos em uma onda portadora, os *bits* podem ser representados por 0 ou 1. A transição dos *bits* de 0 para 1 ou vice-versa faz com que a onda sofra uma alteração de fase de 180°, formando uma constelação de dados como pode ser visualizado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Representação da modulação BPSK.



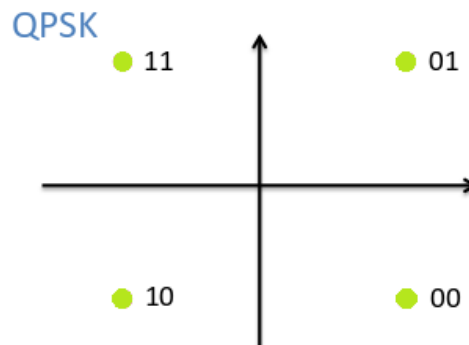
Fonte: Elaborada pelo autor

Nesta modulação a amplitude e frequência do sinal é constante, mudando somente a fase do sinal(802.11 IEEE, 2012). Representando as constelações formadas em um plano cartesiano, o sinal modulado mais à direita são os *bits* de valor 1, com uma alteração da fase em 180° na subportadora, os *bits* ficariam à esquerda e são representados pelo valor 0.

2.3.2.2 Modulação QPSK

É uma modulação com o dobro de eficiência quanto a BPSK, a alteração de fase ocorre em ângulos de 90° e cada quadrante é representado por dois *bits*. A constelação da modulação QPSK é ilustrada na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Representação da modulação QPSK.



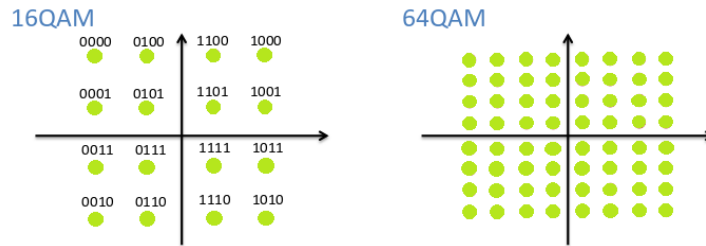
Fonte: Elaborada pelo autor

Na modulação QPSK, a amplitude e frequência do sinal é constante, mudando somente a fase do sinal (802.11 IEEE, 2012). A representação do diagrama das constelações em um plano cartesiano, como apresentado na Figura 2.10, possui o primeiro quadrante com os *bits* representantes como 11, o segundo quadrante com uma alteração da fase em 90° , os *bits* representantes são 01, no terceiro quadrante os conjuntos de *bits* 00, e por último no quarto quadrante os *bits* 10.

2.3.2.3 Modulação QAM

A modulação por amplitude em quadratura (*Quadrature Amplitude Modulation*, QAM) modifica simultaneamente duas características da onda da portadora: amplitude e fase (802.11 IEEE, 2012), essa modulação permite transmissões de dados com alta taxa de transferência. Na modulação QAM, são utilizadas as técnicas de 16 símbolos ou 64 símbolos divididos em $\frac{1}{4}$ de símbolos por quadrante ou repartições de 90° dentro de um diagrama. Na 16-QAM existem 4 símbolos dentro de cada quadrante representando um conjunto de 4 *bits* em cada região. Utilizando 64-QAM existem 16 símbolos dentro de cada quadrante e cada um dos símbolos é representado por 6 *bits*. A Figura 2.11 apresenta as constelações representativas do 16-QAM e 64-QAM.

Figura 2.11 – Constelações de um sinal utilizando 16-QAM e 64-QAM.



Fonte: Elaborada pelo autor

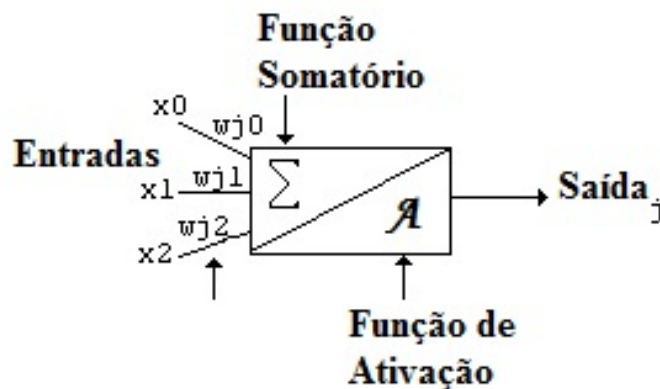
2.4 Redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais (RNA) são modelos matemáticos inspirados nas estruturas neurais biológicas, visam simular a forma, o comportamento e as funções de um cérebro humano (de Carvalho, 2003). As RNA possuem grande capacidade de aprendizado e generalização, o seu aprendizado é feito por meio de exemplos apresentados na etapa de treinamento.

A eficácia da RNA na generalização permite que ela forneça respostas coerentes para dados nunca vistos anteriormente, até mesmo a correção de dados incorretos apresentados a ela em seu treinamento. Elas são amplamente empregadas em tarefas de aproximações de funções, previsão de séries temporais, classificação e reconhecimento de padrões.

O neurônio artificial é a unidade de processamento mais simples desta arquitetura, o conjunto de neurônios artificiais constitui uma RNA. Conforme é ilustrado na Figura 2.12, o neurônio artificial pode ser dividido em três elementos básicos: os valores de entrada e seus pesos, uma função somatório e a função de ativação (HAYKIN, 2000).

Figura 2.12 – Modelo de neurônio artificial.



Fonte: Elaborada pelo autor

As entradas são representadas por um vetor $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, para cada entrada x_i existe um peso w_j . A soma das entradas multiplicadas pelos pesos correspondem à função somatório, onde $t = \sum_i w_j x_i$. A saída j é obtida pela aplicação da função de ativação $f(t)$, indicada por $j = f(t)$.

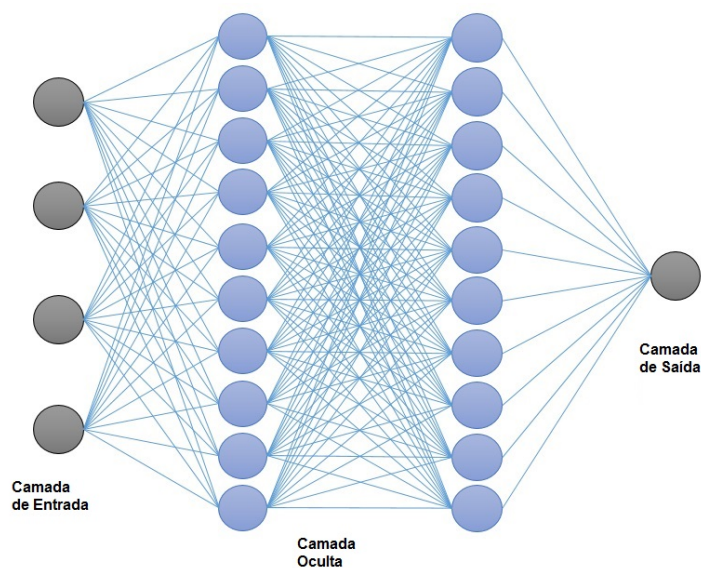
A arquitetura de uma rede de neurônios é definida pela forma que eles estão interconectados e organizados, ou seja, número de neurônios por camada, quantidade de camadas e maneira como estão interligados (BRAGA, 2000). A organização dessas estruturas de RNA originam arquiteturas diferentes, como a *Self-organizing map* (SOM), *Radius Basis Function* (RBF), *Least Mean Square* (LMS), *Convolutional Neural Network* (CNN), *Multi-Layer Perceptron* (MPL), dentre outras.

Uma MLP, representada pela Figura 2.13, possui grande notoriedade em problemas de classificação e segundo Braga, Carvalho e Ludermir (2000) é um dos modelos neurais mais utilizados e conhecidos. Esta arquitetura é subdividida basicamente em três camadas:

- **Camada de entrada:** É uma camada não computacional, nela não há processamento e é responsável pela recepção e propagação das informações de entrada para camada seguinte.
- **Camadas ocultas ou intermediárias:** Pode existir uma ou mais camadas ocultas, compostas por nós. São camadas computacionais, efetuam processamento e nelas são transmitidas as informações por meio das conexões entre as unidades de entrada e saída. Essas conexões guardam os pesos que serão multiplicados pelas entradas, garantindo o conhecimento da rede.
- **Camada de saída:** Camada composta por neurônios computacionais, recebem as informações das camadas ocultas fornecendo a resposta.

2.5 Estado da arte

Até o presente momento, poucas soluções foram encontradas para avaliação de comunicações VoIP, utilizando métricas não intrusivas ou intrusivas em ambientes *wireless*. Desse material, nenhum deles apresenta soluções para análise de qualidade não intrusiva ou intrusiva em comunicações de voz considerando um ambiente completo e real de um sistema de comunicação, no qual a transmissão passa por uma codificação digital, transportada por um meio físico,

Figura 2.13 – Arquitetura de *Multi-Layer Perceptron*.

Fonte: Elaborada pelo autor

modularizada e transmitida por um canal *wireless*, sofrendo desvanecimento até o receptor, e em seguida, passando por um processo de demodulação, filtragem e decodificação até obter o sinal de voz final no dispositivo de comunicação.

Dentre os algoritmos de avaliação da qualidade de voz, estão o P.862 e P.563, sendo que alguns autores afirmam que o P.563 não é um modelo muito confiável (NUNES, 2015), (ITU-T, 2007a). Este fato é afirmado principalmente pela sua dificuldade em diferenciar silêncios de falhas na comunicação. No entanto, o algoritmo P.563 continua sendo o modelo não intrusivo mais utilizado e o único padronizado pela ITU-T.

Portanto, se faz necessário um estudo que melhore o desempenho do P.563 ou uma nova aplicação que forneça características não intrusivas. Grande parte das pesquisas encontradas para avaliação da qualidade de voz que utilizaram o P.563, foram medições de qualidade em comunicações cabeadas (SILVA, 2005)(SILVA, 2006)(NUNES, 2015).

Em ambientes *wireless*, muito do que é abordado são pesquisas com diferentes tipos de redes e adaptação da taxa de transmissão (YUHE; JIE, 2009) (SHANMUGAN, 2009) (YUHE; JIE, 2009) (CHOUDHURY; GIBSON, 2007). Diferente dos demais trabalhos, onde é avaliado somente diferentes topologias de redes *wireless*, os experimentos de (RODRÍGUEZ, 2009) apresentam diferentes codificadores de voz e sua influência na capacidade da rede.

De forma análoga a pesquisa proposta neste trabalho, o estudo descrito em Sanchez-Iborra, Cano e Garcia-Haro (2013) e Garcia-Haro, Cano e Sanchez-Iborra (2013) faz uma ava-

liação do desvanecimento em comunicações de VoIP, mas não utiliza testes objetivos descritos nas recomendações da ITU-T, que já foram citados no conteúdo desde projeto. Já em Pivaro, Rodríguez e Bressan (2011), apresenta um estudo do impacto de diferentes desvanecimentos em uma comunicação VoIP e com o uso de testes objetivos P.862 para avaliação, mas não é avaliado a degradação de uma comunicação cabeada. Desta maneira, um estudo que apresente a avaliação da qualidade de uma comunicação de voz em ambientes *wireless* e cabeado com diferentes desvanecimentos e modulações é relevante.

Usando como base (RODRIGUEZ, 2014), alguns modelos matemáticos podem ser utilizados para propor novas métricas e para melhorar a performance de algoritmos, por exemplo, o método de mínimos quadrados. Porém só estas soluções não são suficientes, assim, novos modelos para melhorar a avaliação de qualidade serão apresentados, como uso de redes neurais artificiais (RIBEIRO, 2003)(LARIJANI; RADHAKRISHNAN, 2010).

Devido aos testes serem realizados em degradações por técnicas de simulação de *fading*, houve a necessidade de avaliar se existem degradações de voz decorrentes de uma simples transmissão *wireless* real. Foi necessário avaliar se a própria modulação e transmissão dos dados em ambientes *indoor* ou *outdoor* afetam a qualidade final da voz.

Essas comunicações e transmissões reais são possíveis com o uso de algumas ferramentas, uma delas é o *Universal Software Radio Peripheral* (USRP). O USRP possibilita a elaboração de um completo cenário de comunicação (TONG, 2009) (TORRES, 2014). Os dados a serem transmitidos, que podem ser áudio ou vídeo, passam por etapas de modulação e transmissão em um canal *wireless*. No receptor se realiza o processo inverso de recebimento e demodulação, no qual a transmissão não é simulada.

Em geral, os USRP são ferramentas que ajudam a montar cenários de comunicação *wireless* que possibilita ao operador definir como o *hardware* vai operar. O usuário por meio de uma aplicação como GNU Radio (RADIO, 2016), define como o sinal vai ser modulado, a frequência de transmissão, dentre outras configurações (TORRES, 2014) (TONG, 2009).

A voz a ser transmitida passa por um processo de encapsulamento no protocolo UDP (UDP, 1980), em seguida modulada nas técnicas BPSK, QPSK e QAM. Esta transmissão é efetuada usando os padrões 802.11 (802.11 IEEE, 2010) de comunicação *wireless*. Desta maneira, com a transmissão real dos arquivos de voz a métricas propostas puderam ser validadas.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado a metodologia utilizada para realização desta pesquisa, a qual pode ser dividida em duas etapas, experimentos em ambientes de simulação e experimentos em ambiente real. Na primeira etapa, foram aplicadas simulações de degradações que ocorrem em redes cabeadas e *wireless*. Para realizar estas degradações, a ferramenta Wav2Rtp (WAV2RTP, 2017) foi empregada para simular PLR em um ambiente cabeado, e algoritmos implementados em MATLAB foram utilizados para simular o efeito do *fading* em ambientes *wireless*.

Para a realização dessas degradações, uma base de arquivos de áudio foi utilizada, correspondentes à ITU-T P.862, nesta base foram aplicadas as degradações como se houvesse uma transmissão entre dois diferentes *hosts*. Para esses arquivos degradados, seus índices MOS foram avaliados utilizando os algoritmos das recomendações ITU-T P.862 e P.563.

Para todos os resultados obtidos após avaliação com os algoritmos P.862 e P.563, dois modelos matemáticos para avaliação de qualidade de voz foram propostos, um referente a um modelo de qualidade paramétrico baseado no P.862 e outro para melhorar a eficácia do P.563. Adicionalmente, com o vasto número de arquivos degradados e seus índices MOS, um modelo baseado em RNA foi desenvolvido. Dessa forma, a eficácia dos modelos matemáticos propostos pode ser comparado com um modelo baseado em RNA.

Em uma segunda etapa, transmissões reais foram efetuadas com os arquivos de áudio. Estes testes foram aplicados com o objetivo de certificar se há uma existência de degradação natural da voz em transmissões reais, e avaliar se em alguma etapa da comunicação como, por exemplo, na modulação, o sinal sofre alguma degradação. A fim de atingir o objetivo, a arquitetura SDR foi empregada. A ferramenta GNU Radio foi utilizada para montagem dos cenários via *software* e o USRP para transmissão. Foi utilizado o protocolo UDP e também variação de diferentes modulações na transmissão. Todas estas metodologias aplicadas serão discutidas neste capítulo.

3.1 Proposta para experimentos nos ambientes simulados

Inicialmente todos os testes efetuados foram utilizando simulações, como se houvesse uma comunicação semelhante à de um ambiente real. O cenário criado para avaliação dispõe de diferentes tipos de desvanecimentos como em uma transmissão *wireless* e perdas de pacotes em ambientes cabeados.

Para a realização da primeira etapa, com perda de pacotes, a ferramenta Wav2rtp foi utilizada para simular essas taxas de perda em redes cabeadas, o qual é um *Software open source* disponível em (WAV2RTP, 2017). Esta ferramenta também foi testada em outras pesquisas Nunes, Pereira, Rosa, Oliveira e Rodríguez (2015). Segundo sua comunidade de desenvolvimento, o Wav2rtp é uma aplicação desenvolvida para fins de estudos na simulação de cenários de transferência de áudio. É capaz de converter um arquivo *.wav* em um fluxo de dados RTP, gerando um novo arquivo degradado. Além de perda de pacote, ele é capaz de simular também atrasos na entrega.

Na segunda etapa, algoritmos implementados no MATLAB foram utilizados na simulação de canais de desvanecimento Rayleigh e Rician. Com esses desvanecimentos, foi possível gerar diferentes sinais de voz degradada, e aplicando também diferentes desvios *Doppler*, gerando uma saída coerente com fenômenos do mundo real em comunicações *wireless* (MATLAB, 2016).

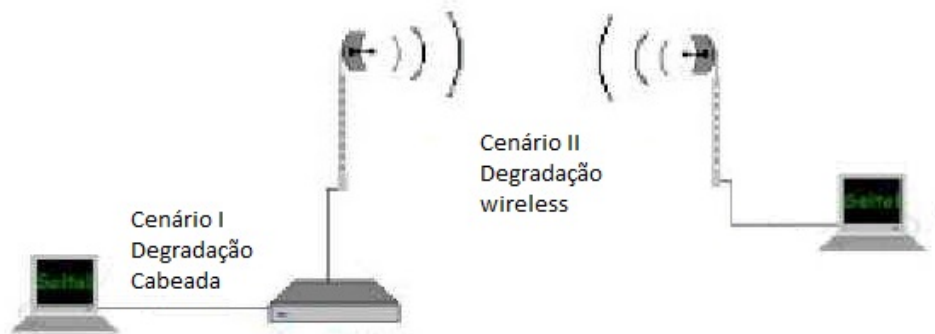
Nos experimentos em ambientes simulados houve a tentativa de avaliar diferentes modulações nos arquivos de áudio, para isso foram utilizadas as modulações propostas na ferramenta Matlab. Após a execução da modulação e demodulação, os novos arquivos gerados foram avaliados e não apresentaram bons resultados, ficando inaudíveis. Para poupar tempo descobrindo a causa deste problema e como já havia uma proposta de efetuar transmissões reais para validar os experimentos, as diferentes modulações foram avaliadas durante a etapa de transmissão real.

3.1.1 Avaliação de qualidade de voz em ambiente simulado

Os cenários de degradações para os experimentos foram projetados para a simulação de uma transmissão de sinal voz, o qual será degradado em duas etapas, uma etapa de degradação em uma rede cabeada e a outra em uma rede *wireless*. A Figura 3.1 ilustra a organização do cenário de teste.

Na primeira etapa, a transmissão sofre PLR, com as taxas de 0,5%, 1%, 3%, 5%, 10% e 20% de perda. Esta simulação foi repetida 10 vezes para cada arquivo, calculando-se em seguida o índice MOS para cada arquivo degradado. No final havia 10 repetições de cada variação de PLR, onde foram extraídos os índices MOS de todos os arquivos degradados e a média foi calculada para todos os arquivos de um mesmo valor de PLR. Os arquivos degradados, com o índice MOS que mais se aproximam de suas respectivas médias, foram separados e serão denominados de arquivos médios, e eles foram utilizados na seguinte etapa.

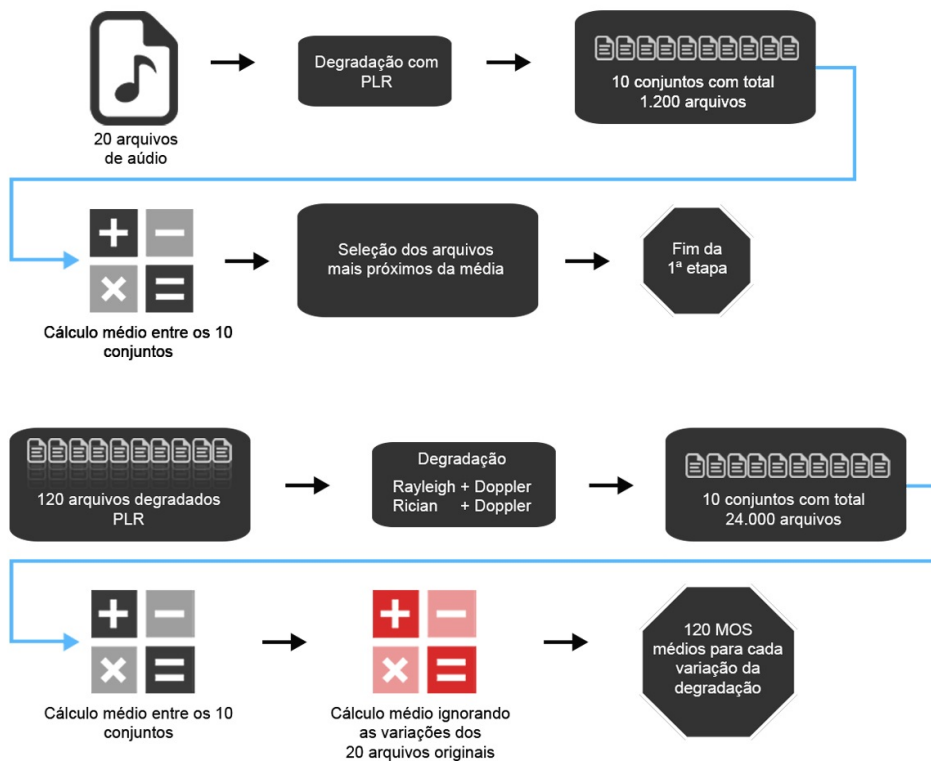
Figura 3.1 – Cenário utilizado para realização dos experimentos.



Fonte: Elaborada pelo autor

Na segunda etapa, os arquivos médios resultantes foram expostos a novas degradações dos modelos de Rayleigh e Rician com diferentes variações do desvio de *Doppler*, para cada variação de *fading* foi aplicada desvios de 0Hz, 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz, 50Hz, 75Hz, 100Hz, 150Hz e 200Hz de *Doppler* e posteriormente os testes foram repetidos. As variações de taxas e quantidades de repetições podem ser visualizadas na Figura 3.2, os MOS obtidos foram com testes objetivos P.862 e P.563, todos os resultados serão apresentados nas próximas subseções.

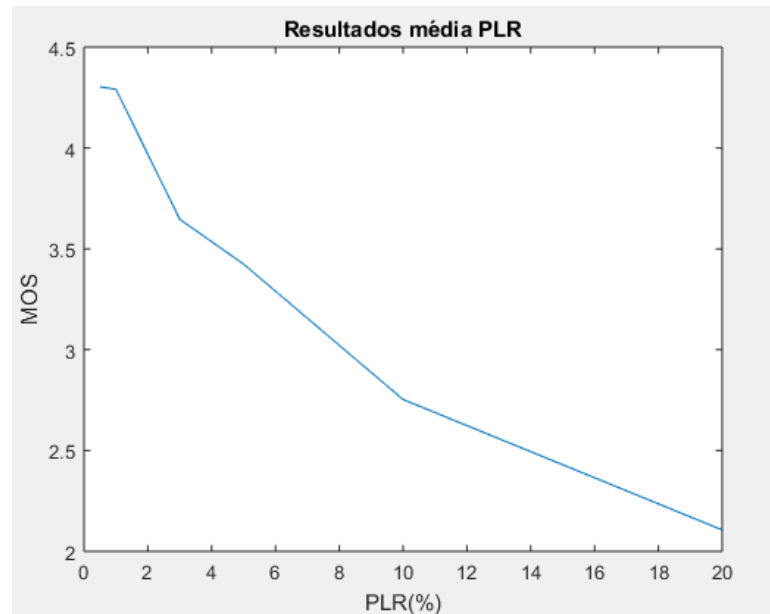
Figura 3.2 – Organização das etapas de degradações.



Fonte: Elaborada pelo autor

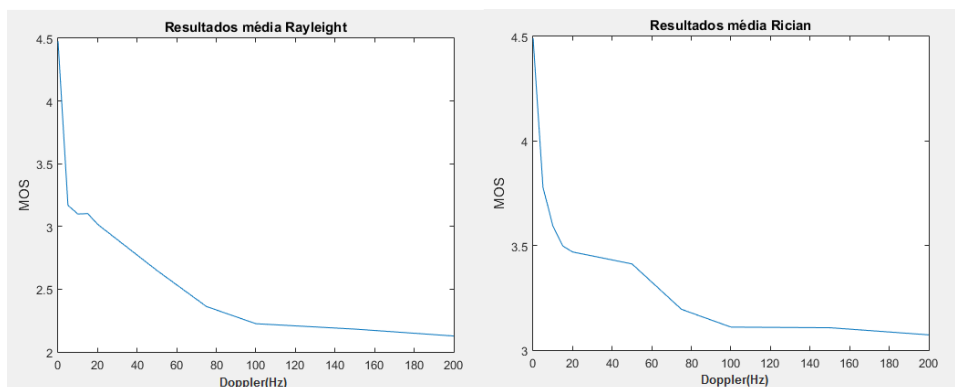
As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam alguns resultados preliminares de degradações aplicadas separadamente utilizando as técnicas descritas, variando os valores de *Doppler* para *Fading* e o percentual de perda de pacotes.

Figura 3.3 – Resultado das degradações com PLR.



Fonte: Elaborada pelo autor, publicada em (TAVARES; RODRIGUEZ, 2016)

Figura 3.4 – Resultado das degradações com Rayleigh e Rician.



Fonte: Elaborada pelo autor, publicada em (TAVARES; RODRIGUEZ, 2016)

Com o cenário definido e todas as degradações aplicadas na base de arquivos de áudio, as soluções de avaliação da qualidade de voz proposta nas recomendações P.862 e P.563 foram utilizadas. Consequentemente, com o conhecimento de todas as variações de *fading*, PLR e seus índices MOS, novas métricas baseadas nos modelos P.862 e P.563 foram propostas.

Na primeira etapa somente os MOS com o P.862 foram extraídos, com os valores foi possível montar um sistema de equações e determinar um primeiro modelo, nomeado MOS^P,

que pelas suas características seria um modelo de qualidade paramétrico, com o qual é possível prever o MOS resultante com o conhecimento das variáveis do cenário. Posteriormente, na segunda etapa, com a avaliação dos resultados do P.563, os valores MOS foram muito abaixo do esperado, para minimizar este problema foi desenvolvido um segundo modelo matemático, nomeado $P.563_{MOS}^P$, o qual utiliza o resultado do mesmo P.563, para melhorar o seu desempenho aproximando seus resultados MOS com os obtidos pelo P.862.

Não limitando somente aos dois modelos matemáticos propostos (MOS^P e $P.563_{MOS}^P$), utilizou-se como base os mesmos resultados obtidos com P.862, tais resultados foram usados como dados de um treinamento de uma RNA. Assim, foi desenvolvido um método não intrusivo que se assemelhe ao modelo matemático proposto para prever a degradação em uma comunicação. O uso de RNA empregado e sua avaliação foi comparada aos resultados do modelo matemático não intrusivo. Nestes testes, foi utilizado o algoritmo de treinamento *backpropagation* e duas camadas ocultas com 10 neurônios cada. O algoritmo de treinamento, número de camadas ocultas e neurônios utilizados foi escolhido por ter apresentado melhor desempenho e precisão na etapa de treinamento, onde foram testados outros algoritmos de treinamento, números de camadas ocultas e neurônios.

3.1.1.1 Degradações com simulação de uma rede cabeada

Em cada um dos 20 arquivos originais foram executados 6 diferentes taxas de perda de pacote: 0,5%, 1%, 3%, 5%, 10% e 20%. Assim, 120 arquivos degradados foram criados. Para cada um desses arquivos, 10 repetições foram efetuadas, originando 1200 novos arquivos, e o resultado MOS de cada arquivo foi determinado pelo P.862.

Para as 10 repetições de cada arquivo com cada PLR, uma média foi determinada. O arquivo mais próximo de cada média foi separado, e foi usado na próxima etapa. Assim, 120 arquivos foram separados para serem usados nas etapas subsequentes.

3.1.1.2 Degradações com simulação de uma rede *wireless*

Com os 120 arquivos resultantes da primeira etapa, foram aplicados 10 valores diferentes de *Doppler*, que foram: 0Hz, 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz, 50Hz, 75Hz, 100Hz, 150Hz e 200Hz. E para cada valor de *Doppler*, um modelo diferente de desvanecimento foi empregado: Rayleigh e Rician.

Cada cenário de degradação foi repetido 10 vezes, igual que na primeira etapa, totalizando 24000 novos arquivos de áudio. Assim, para cada 10 repetições de cada um dos 20 arquivos degradados, a média aritmética foi calculada ignorando cada diferente arquivo original, usando como base somente as variações de degradações. Para finalizar, 120 resultados MOS médios foram determinados.

Ao finalizar as duas etapas(cabeada e *wireless*), cada índice MOS é relacionado com os parâmetros: PLR, modelo de desvanecimento com um valor de *Doppler*.

3.1.2 Modelo de avaliação não intrusivo baseado no P.862

Baseado em modelos matemáticos propostos em Rodríguez, Abrahão, Begazo, Rosa e Bressan (2013), uma métrica, denominada MOS^p , foi definida com base nos parâmetros de *fading*, valor *Doppler* e PLR. O modelo proposto é uma relação linear ente os parâmetros mencionados e o índice MOS, o qual é representada em 3.1.

$$MOS^p = \alpha A + \beta B + \gamma C + \Omega D \quad (3.1)$$

Onde, A e B representam os modelos de desvanecimento de Rayleigh e Rician, respectivamente; C representa o valor de *Doppler*, D o valor do PLR, as incógnitas α, β, γ e Ω representam os pesos de degradação dos parâmetros associados.

A fim de minimizar mais ainda a margem de erro da métrica proposta, a função exponencial foi tomada como modelo e μ seu respectivo peso, a qual é representada por 3.2:

$$MOS^p = \mu * exp(-(\alpha A + \beta B + \gamma C + \Omega D)) \quad (3.2)$$

Neste trabalho, 120 cenários foram gerados. A partir destes resultados um sistema de equações lineares foi determinado, o qual é representado a seguir 3.3:

$$\begin{bmatrix} 1 & A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & A_n & B_n & C_n & D_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ln(\mu) \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln(MOS_1) \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \ln(MOS_n) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Onde, todos os cenários testados estão representados na equação. O método de mínimos quadrados foi empregado para resolver o sistema, assim, os valores das incógnitas α, β, γ e Ω foram obtidos e serão apresentados no capítulo 4. Finalmente, a métrica MOS^P foi definida e pode ser utilizada para análise de outros diferentes cenários.

3.1.3 Modelo para melhorar o desempenho do P.563

A comparação prévia dos índices MOS resultante da avaliação com P.862 e P.563, ficou notável o melhor desempenho na avaliação com P.862 e a necessidade de melhorar o P.563. Com os mesmos parâmetros utilizados na etapa anterior, foi proposto um modelo para melhorar a avaliação de qualidade de voz com o P.563, o qual foi nomeado como $P.563_{MOS}^P$ e que é apresentado em 3.4:

$$P.563_{MOS}^P = C * P.563_{MOS} * exp(a_1 * F_1 + a_2 * F_2 + b * D + c * P) \quad (3.4)$$

Onde, C é uma constante; a_1 e a_2 são os fatores binários relacionados com os modelos de *fading*. F_1 e F_2 são os fatores de pesos de desvanecimento Rayleigh e Rician, respectivamente; b o valor do *Doppler* e D o peso relacionado com o *Doppler*, c o valor do PLR e o P seu peso. É interessante notar em 3.4 que é restrita aos dois modelos de *fading*, mas outros podem ser adicionados. Além disso, outras funções exponenciais e lineares foram testadas, a função apresentada em 3.4 obteve o menor erro.

Conforme dito anteriormente, o P.862 é altamente relacionado com testes subjetivos. Assim, nos testes, o P.862 foi utilizado como referência, então, $P.563_{MOS}^P$ em 3.4, usa os valores MOS de P.862. Com o conjunto de cenários com cada variação de degradação, representado em 3.4, foi possível representar em um sistema de equações lineares, o qual é exibido por 3.5.

$$\begin{bmatrix} 1 & a_1^{S1} & a_2^{S1} & b^{S1} & c^{S1} \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & a_1^{S120} & a_2^{S120} & b^{S120} & c^{S120} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ln(C) \\ F_1 \\ F_2 \\ D \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{P862}{P563}\right)^{S1} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \ln\left(\frac{P862}{P563}\right)^{S120} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Onde: S_i representa o cenário i . Para resolver 3.5, o método de mínimos quadrados foi empregado, utilizando a matriz pseudo-inversa. Finalmente, os valores da constante C e os pesos foram obtidos, e serão apresentados no capítulo 4.

3.1.4 Determinação de um modelo de qualidade utilizando RNA

Os mesmos cenários de degradações e índices MOS obtidos do algoritmo P.862, com a combinação de *fading*, valor *Doppler* e PLR, foram utilizados como parâmetros de treinamento para uma RNA. Onde cada fator de degradação foi utilizado como entrada da RNA, e os resultados MOS do P.862 foram empregados como saídas desejadas.

Uma representação de como os parâmetros de degradação foram organizados para o treinamento da RNA pode ser visualizada na matriz 3.6. Assim, cada linha são os parâmetros A , B , C e D de degradações, onde: A um valor binário que representa se o *fading* é o Rayleigh ou não, B representa se é Rician, C representa o percentual do PLR e o D valor de *Doppler*. E seu respectivo MOS é visualizado na coluna à direita, assim a RNA pode comparar o resultado obtido com o esperado e retroceder as mesmas entradas inúmeras vezes até obter um resultado mais próximo do esperado.

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_n & B_n & C_n & D_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} MOS_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ MOS_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

O conjunto de todas as variações de degradações utilizadas como entrada para a RNA, foi dividido em 60% dos dados para treinamento, 20% para validação e 20% para os testes. Desta forma, a RNA foi ajustada com diferentes números de camadas ocultas e quantidades de neurônios por camada, as RNA foram testadas com 1 e 2 camadas ocultas e variações de 5, 10, 25 e 50 neurônios por camada. Considerando os melhores resultados e performance, a RNA foi montada com 2 camadas ocultas e 10 neurônios em cada camada.

3.2 Experimentos em ambientes de transmissão real

Nesta etapa de testes, é utilizada uma arquitetura SDR, e com ela a montagem de um cenário com transmissão em ambiente real. Como parte da solução lógica da arquitetura SDR, a ferramenta GNU Radio foi utilizada para montagem via *software* de um cenário completo para transmissão, onde a modulação, demodulação, ganhos do transmissor, ganhos do receptor e frequência do canal de comunicação podem ser alteradas e controladas pelo usuário em tempo real.

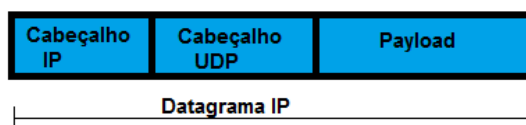
Com todos os blocos devidamente organizados no GNU Radio, os arquivos de áudio foram enviados de um *host* a outro, por meio do *hardware* USRP. Estes procedimentos foram realizados em ambientes *indoor* e *outdoor*.

3.2.1 Arquitetura do ambiente de teste

Utilizando a implementação de um cenário completo com arquitetura SDR, placas USRP e uma aplicação desenvolvida através do GNU Radio, foi montado um ambiente de testes para avaliar principalmente diferentes modulações, distâncias e ganhos na transmissão.

O protocolo UDP foi utilizado para o transporte dos dados entre as placas USRP. Este protocolo, além dos dados de cabeçalho que indicam o emissor, receptor e tamanho, também possui a área onde estão armazenados os dados do arquivo ou a carga a ser transmitida, conhecida também como *payload*, conforme ilustra a Figura 3.5.

Figura 3.5 – Datagrama UDP.



Fonte: Elaborada pelo autor

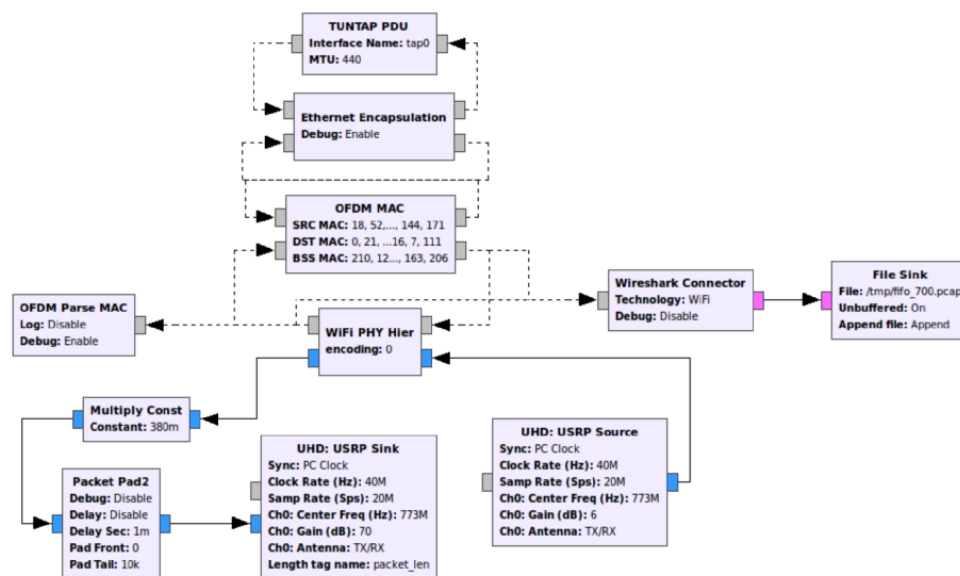
O protocolo UDP tem como característica o envio sequencial dos pacotes, sem considerar um mecanismo de retransmissão em caso de erros no transporte, fazendo dele o protocolo mais aceito em transporte de voz, uma vez que a retransmissão poderia inserir atrasos e áudio assíncrono, degradando a qualidade da comunicação.

A aplicação responsável pelo encapsulamento para transporte, permite que o tamanho do *payload* seja configurável, sendo que, de acordo com o seu tamanho pode gerar aumento ou diminuição de banda de transmissão ou ainda, a possibilidade de ocorrência de colisões entre os pacotes transmitidos. Desta maneira, o ajuste no tamanho ideal do pacote UDP pode trazer benefícios na transmissão entre USRP.

A estrutura utilizada para comunicação entre dois USRP e com transporte pelo protocolo UDP, foi possível com o projeto *gr-ieee802.11* (BLOESSL, 2016). Esse projeto já fornece uma estrutura de blocos organizados na linguagem Python que possui uma implementação de camadas PHY e MAC, permitindo uma completa comunicação entre dois *hosts* distintos com os USRP.

O *transceiver*, estrutura de blocos do projeto gr-ieee802.11, ilustrado na Figura 3.6, permite uma transmissão OFDM com uso dos padrões IEEE 802.11 (IEEE, 2016), com ele se tem suporte a diversas modulações, diferentes tamanhos de quadros ou *frames* na comunicação, variação de diversos canais, completa funcionalidade para TCP/IP, suporte a monitoramento de tráfego com Wireshark e reconfiguração dos parâmetros *online*. Experimentos e testes utilizando o projeto gr-ieee802.11 podem ser encontrados em Santos (2015)Bloessl (2016).

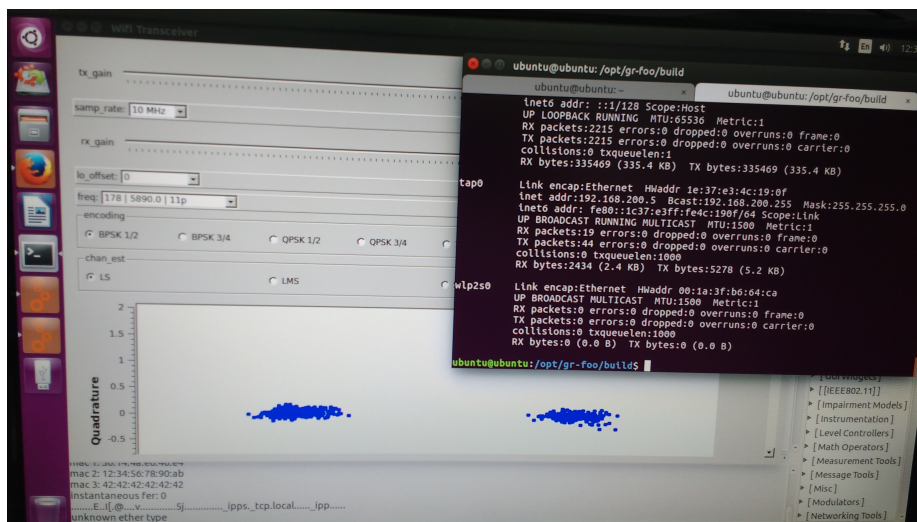
Figura 3.6 – Organização dos blocos do *transceiver*.



Fonte: Captura de tela da organização dos blocos do projeto (BLOESSL, 2016)

Inicialmente, na estrutura representada pela Figura 3.6, o bloco TUNTAP PDU é responsável por enviar e receber mensagens do GNU Radio para o USRP, através da interface virtual na qual ele é atribuído. Por meio da associação com a interface virtual, geralmente chamada de tap0 nos sistemas Linux, é possível atribuir um endereço IP, permitindo a comunicação entre os *hosts*. Nos blocos seguintes os pacotes são encapsulados, de acordo com as configurações de MAC e IP, para utilizarem o USRP na transmissão. Por fim, os blocos USRP *Sink* e USRP *Source* estão ligados diretamente nas placas USRP onde estão definidos os parâmetros de transmissão.

Após a execução do *transceiver*, ilustrado na Figura 3.7, é possível ver a interface que mostra a constelação formada pela modulação BPSK, assim como as opções para mudança de frequência, modulação, ganhos do receptor e transmissor, dentre outras opções. Na janela à direita da Figura 3.7, é possível ver a interface virtual tap0 e seu IP atribuído.

Figura 3.7 – Execução dos blocos do *transceiver*.

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.2 Avaliação de qualidade de voz nos ambientes de transmissão real

O objetivo da avaliação da qualidade em um ambiente real é verificar se há uma degradação natural da comunicação, em termos do índice MOS, considerando-se apenas o processo de modulação, transmissão em um canal *wireless* e demodulação.

Com a necessidade de uma solução que permita o controle ao usuário de parâmetros como modulação, frequência de transmissão e ganhos das antenas, a arquitetura SDR foi empregada para efetuar essa transmissão. Por meio dessa arquitetura o sinal foi transmitido de um *host* para outro e o arquivo final degradado foi analisado com o modelo P.862.

Dessa maneira, foi possível efetuar uma transmissão real e avaliar degradações na sua qualidade final. Os testes foram feitos com diferentes parâmetros e utilizando as estruturas de blocos montadas no GNU Radio para esta transmissão, a organização dos blocos empregada foi com base do modelo gr-ieee802.11, uma vez que ele permitiu a utilização de diferentes modulações, ganhos na transmissão e a possibilidade de ajustar a USRP como apenas um ponto de acesso, permitindo o usuário colocar diferentes aplicações e efetuar a comunicação por protocolo IP.

Com os parâmetros devidamente ajustados para a transmissão, a comunicação foi efetuada aplicando as variações de modulação, distância, variação do ganho no transmissor e receptor, entre outros fatores. Para a transmissão o padrão IEEE 802.11 foi utilizado nesses experimentos e as modulações foram: BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM.

O IEEE 802.11 por ser um padrão desenvolvido para comunicações em pequenas distâncias e limitado também à baixa potência do equipamento USRP, os experimentos foram empregados em pequenas distâncias nas comunicações de teste e utilizado as modulações disponíveis pelo modelo gr-ieee802.11, essas transmissões foram aplicadas em ambientes *indoor* e *outdoor*.

Antes de efetuar os experimentos com diferentes distâncias e ganhos, que é o foco principal desta etapa, testes preliminares foram feitos para avaliar a melhor configuração na transmissão de maneira que pudesse haver confiança nos experimentos principais. Estes testes consistem em avaliar o tamanho ideal dos pacotes UDP e qual modulação mais estável utilizando USRP.

As degradações desta etapa ocorreram naturalmente, sem forçar alguma degradação, como colocar um objeto entre os USRP; assim, os pacotes UDP com o sinal da voz trafegou livremente entre o emissor e o receptor. Nesta transmissão a frequência utilizada manteve-se constante, e um número menor de arquivos da base de dados de voz foram transmitidos utilizando as USRP com o aplicativo GNU Radio.

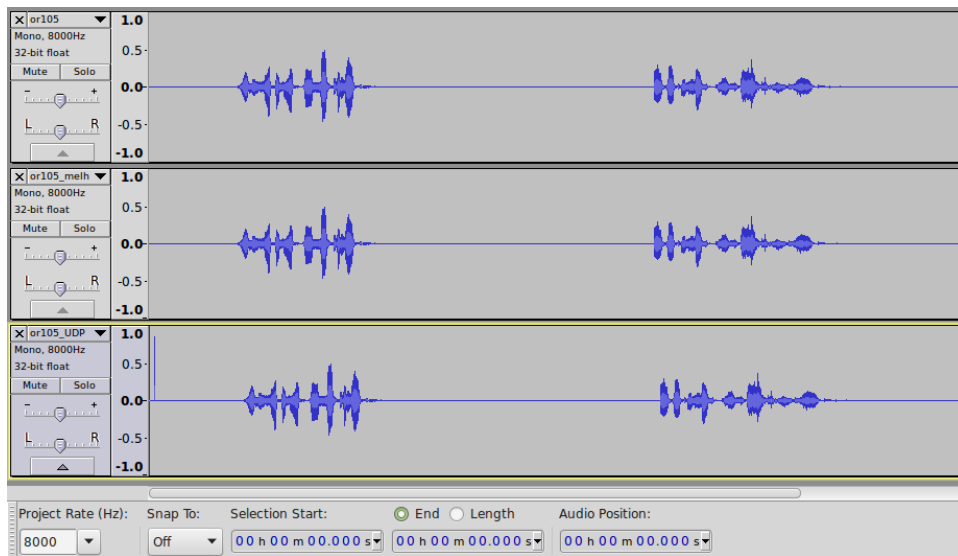
Cada arquivo de voz transmitido, dentro de cada variação dos parâmetros de transmissão teve seu MOS calculado com o algoritmo P.862. Cada um destes cenários de transmissão foram repetidos 5 vezes, por arquivo, assim o valor do índice do MOS médio foi calculado e será apresentado no próximo capítulo. Detalhes referentes aos ganhos do equipamento USRP, distâncias e diferentes ambientes como *indoor* e *outdoor* empregados nos experimentos serão descritos na próxima subseção.

Para uma análise visual de como os arquivos de áudios ficavam após uma transmissão, alguns foram plotados, ouvidos e comparados sem o emprego do MOS, ilustrado na Figura 3.8, onde são três diferentes arquivos de áudio, o primeiro é o original e os dois subsequentes são os resultados de duas transmissões usando a modulação BPSK e distâncias de 3 e 5 metros em um ambiente *indoor*. Este teste foi efetuado inicialmente para avaliar se a transmissão foi bem sucedida e aplicar uma avaliação subjetiva antes de utilizar o algoritmo P.862.

3.2.2.1 Configuração do equipamento USRP

Inicialmente para o ajuste dos equipamentos e configuração dos blocos no GNU Radio, os testes foram feitos com os equipamentos bem próximos, ilustrado na Figura 3.9. Os equipa-

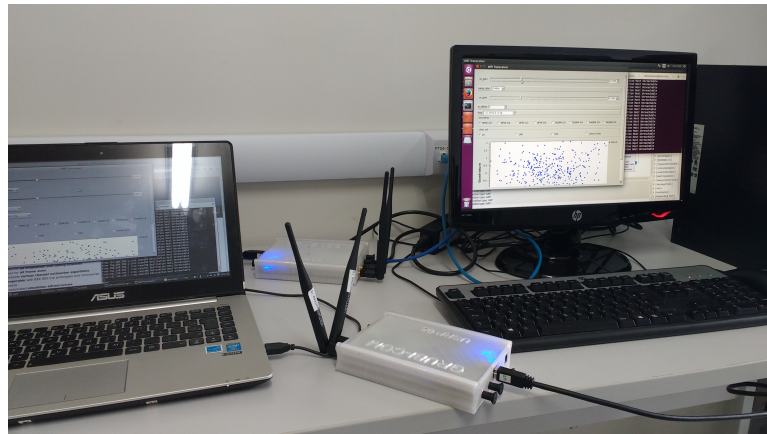
Figura 3.8 – Comparação entre arquivos de áudio transmitidos.



Fonte: Elaborada pelo autor

mentos utilizados foram dois USRP modelo B210 com antenas omnidirecionais de frequência de transmissão e recepção de 2.45GHz e com 3 dBi de ganho.

Figura 3.9 – Realização dos experimentos com USRP.

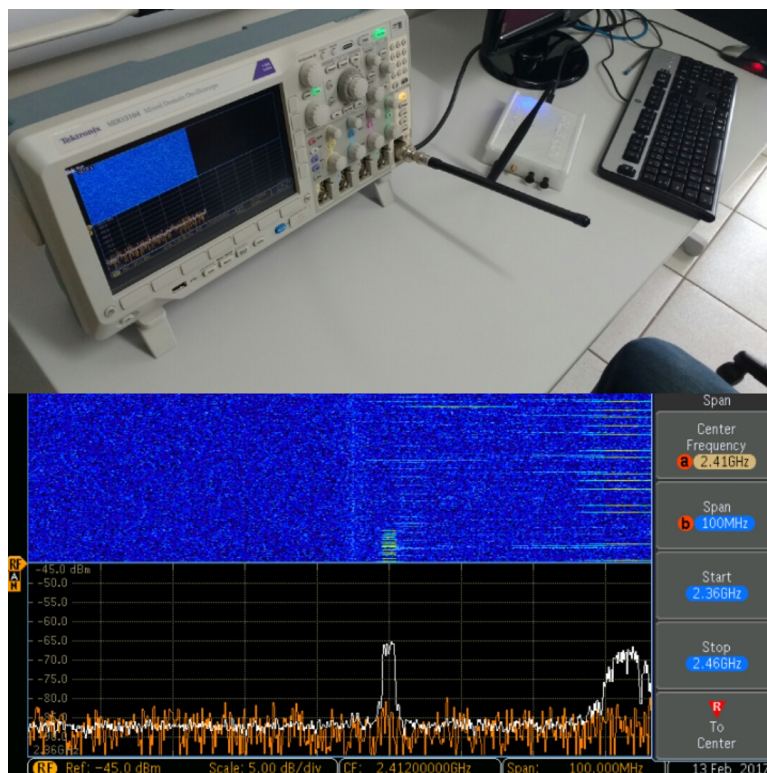


Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando a documentação do USRP modelo B210 diretamente do site do fornecedor, (RESEARCH, 2017), o valor de potência de transmissão informado é acima de 10 dBm, por este valor informado não ser muito preciso, um analisador de espectro foi utilizado para medir essa potência. Na Figura 3.10 pode ser visualizado a utilização de um analisador de espectro, onde o valor obtido em uma transmissão de curta distância, aproximadamente de 10 cm, foi de até -65 dBm.

Os endereços MAC e IP foram devidamente ajustados nas interfaces virtuais do sistema operacional e também nos blocos de configuração do *script transceiver*. A frequência

Figura 3.10 – Analisador de espectro na medição da potência do USRP.



Fonte: Elaborada pelo autor

de transmissão também foi ajustada para ficar igual a das antenas conectadas ao equipamento, 2.45GHz.

Antes de obter êxito nas transmissões, foi observado que havia muito ruído na formação das constelações, impedindo estabelecer uma conexão entre as USRP. Para resolução desse problema o *clock rate* foi ajustado para 40 MHz. Segundo Santos (2015), esse problema ocorre nos equipamentos B210 porque ele trabalha com uma taxa de amostragem de 20 MHz, e com o *clock* padrão ajustado em 32 MHz há uma enorme dificuldade no processamento.

Com um enlace entre os dois equipamentos ajustado, um *script* desenvolvido em Python foi criado para encapsulamento e transmissão de um arquivo .wav utilizando o protocolo UDP, a Figura 3.9 ilustra a utilização dos equipamentos para transmissão e uma cópia do *script* utilizado para encapsulamento UDP pode ser visualizada no Apêndice B. Posteriormente com um cenário devidamente configurado para transmissão de pacotes UDP, os testes foram efetuados.

Na primeira etapa de testes, os diferentes tamanhos de pacotes UDP e tipos de modulações foram avaliados, para uma melhor configuração e segurança. Os tamanhos avaliados foram de 128, 256, 384 e 512 bytes por *payload*, tamanhos superiores fizeram com que as USRP não

conseguissem estabelecer um enlace e com tamanhos inferiores havia muita degradação, os resultados podem ser visualizados no capítulo 4.

Após os testes preliminares para avaliar o melhor tamanho de pacote para transporte na comunicação *wireless* entre as USRP, foram avaliadas as diferentes modulações e suas taxas de codificação. A relação das modulações avaliadas nas transmissões pode ser visualizada na Tabela 3.1 e seus resultados no capítulo 4. Para cada tamanho diferente de pacote UDP, tipo de modulação e taxa de codificação apresentado, os testes foram repetidos 5 vezes cada e de aproximadamente 1 metro de distância, sem nenhum obstáculo entre o transmissor e receptor.

Tabela 3.1 – Modulações avaliadas.

Modulação	Taxa de Codificação	Distância(metro)
BPSK	1/2	1
BPSK	3/4	1
QPSK	1/2	1
QPSK	3/4	1
QAM16	1/2	1
QAM16	3/4	1
QAM64	2/3	1
QAM64	3/4	1

Nos testes posteriores, foi utilizado o tamanho de pacote UDP com melhor qualidade, ou seja que possuía o melhor índice MOS. Nesta etapa os parâmetros avaliados foram: diferentes distâncias, ganhos do transmissor, ganhos do receptor e diferentes ambientes, *indoor* e *outdoor*. Os testes foram repetidos 5 vezes cada e finalmente para obter os resultados, o valor do índice MOS de cada cenário foi avaliado usando o algoritmo P.862.

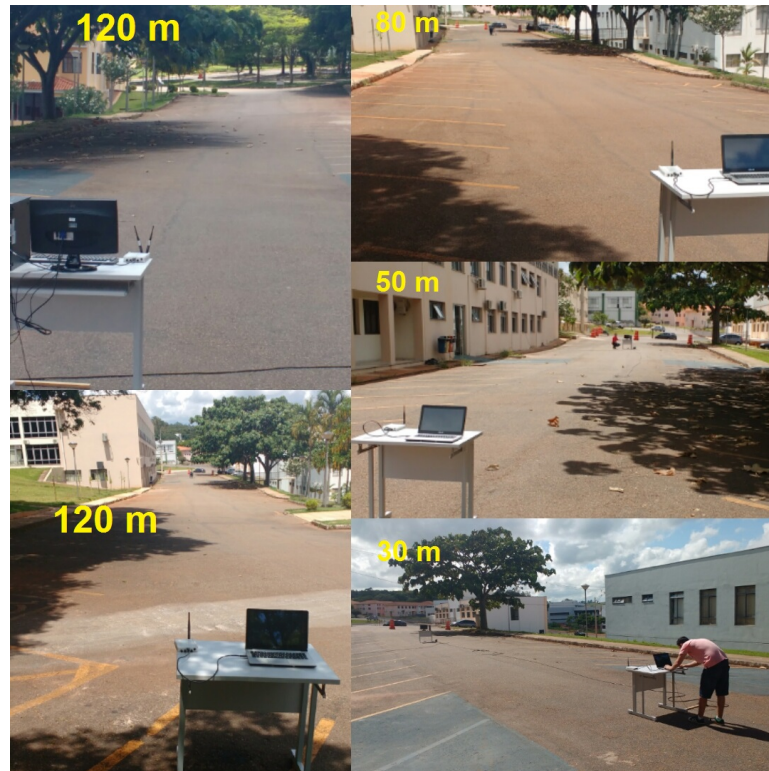
Na Tabela 3.2 é apresentado todas as distâncias, ganhos do transmissor, ganhos do receptor nos ambientes *indoor* e *outdoor*. Em uma transmissão em ambiente *indoor* a distância acima de 10 metros não obteve um enlace que possibilitou a comunicação, este problema ocorreu devido à presença de cadeiras e mesas perto do receptor e transmissor, em um outro local é possível estabelecer uma comunicação em uma distância superior. Os experimentos variando as distâncias em ambiente *indoor* são semelhantes à Figura 3.9, mas efetuado em diferentes distâncias da exibida.

Já em um ambiente *outdoor* a maior distância avaliada foi de 120 metros, transmissões com distâncias maiores não foram efetuadas devido aos obstáculos como carros, árvores e também uma variação do relevo. O espaço onde foram realizadas as transmissões em ambiente *outdoor* pode ser visualizado na Figura 3.11.

Tabela 3.2 – Distâncias, ganhos e ambientes avaliados.

Ambiente	Gan. Transmissão(%)	Gan. Recepção(%)	Distâncias(metros)
Indoor	50, 75 e 100	75 e 100	1, 3, 5, 8 e 10
Outdoor	50, 75 e 100	75 e 100	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120

Figura 3.11 – Realização dos experimentos com USRP em um ambiente outdoor.



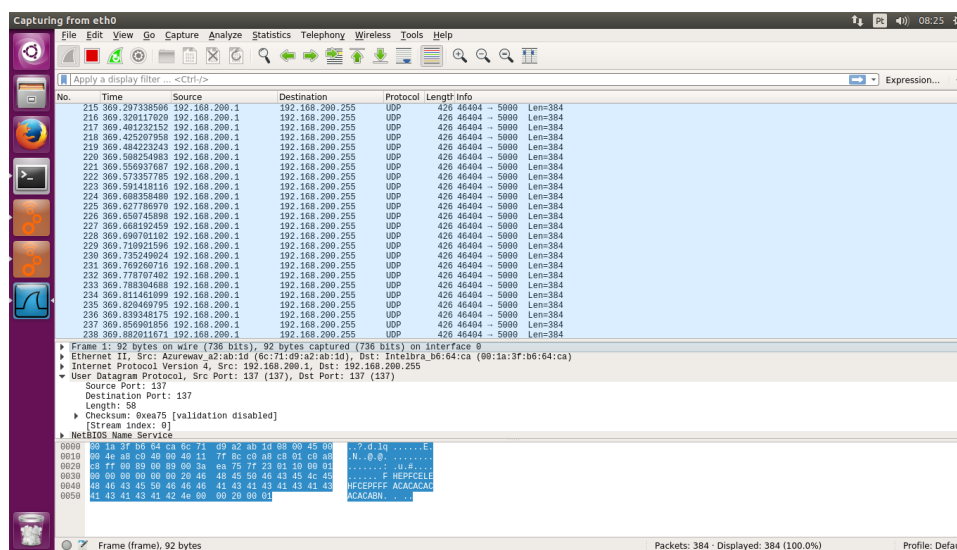
Fonte: Elaborada pelo autor

Juntamente com os testes em diferentes ambientes e distâncias, foram empregados diferentes valores de ganhos no transmissor e receptor dos USRP. A escala de ganhos de transmissão(Tx) foi de 50, 75 e 100 por cento e taxa de recepção(Rx) de 75 e 100 por cento. Os valores para Tx inferiores a 50 por cento não permite o estabelecimento de um enlace, mesmo para curtas distâncias, com valor inferior a 75 por cento na taxa de Rx não se consegue estabelecer uma comunicação.

Com o intuito de uma melhor análise dos resultados, o Wireshark foi utilizado para a captura dos pacotes recebidos e enviados. Assim, ao se transmitir um arquivo, os pacotes enviados foram contabilizados no transmissor e também no receptor. A contagem e recebimentos desses pacotes podem ser visto na Figura 3.12.

A importância de analisar a quantidade de pacotes UDP recebidos e também o MOS no arquivo final após sua transmissão, é que o índice MOS é quem determina a qualidade do áudio

Figura 3.12 – Captura de pacotes UDP pelo Wireshark.



Fonte: Elaborada pelo autor

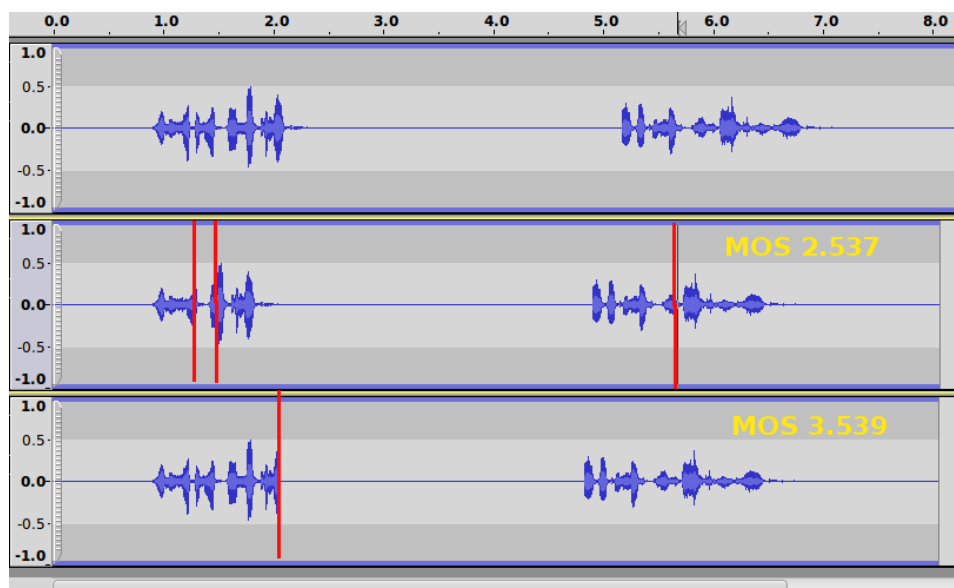
percebido. Após uma transmissão, um arquivo que recebeu uma quantidade maior de pacotes, se comparar com outro que tenha recebido uma quantidade menor, não necessariamente o arquivo que recebeu menos pacotes tem um índice MOS inferior. O arquivo que teve uma quantidade de recebimento menor de pacotes pode ter maior qualidade no áudio percebido, isso está associado se as perdas foram sequenciais ou se foram diferentes pontos da voz transmitida.

A afirmação do parágrafo anterior é percebida na Figura 3.13, onde o primeiro arquivo de voz é o original e os outros dois arquivos foram degradados após a transmissão. Se compararmos com o arquivo original, o primeiro arquivo degradado é notável os 3 pontos em que houve perdas de pacotes, já no segundo arquivo degradado houve uma quantidade maior de pacotes perdidos, porém, foi em apenas em um ponto, as perdas foram sequenciais. O valor do índice MOS para cada arquivo apresentando na Figura 3.13 mostra que o segundo arquivo degradado apresentou uma melhor qualidade de áudio, mesmo com uma quantidade maior de perda.

3.3 Base de dados

Uma base de dados é de grande importância para o processo de testes, experimentos e validação de resultados. Assim, para este processo foram utilizados os 20 arquivos de áudio disponibilizados pela ITU-T, na recomendação P.862. Estes arquivos possuem todas as características de uma fala em uma comunicação telefônica.

Figura 3.13 – Análise das degradações por perda de pacotes.



Fonte: Elaborada pelo autor

Com a aplicação dos testes em cada cenário previamente definido para os experimentos, novos arquivos correspondentes a áudios degradados foram gerados para a modelagem, avaliação e validação das novas métricas propostas.

3.4 Materiais

Para a realização da pesquisa, diversos *softwares* foram utilizados, os quais são listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Softwares utilizados

Software	Versão	Função
Matlab	2015b	Aplicação de <i>fading</i>
Python	2.7	Escrita de blocos de código no GNU Radio
GNU Radio	3.7.9.2	Montagem de blocos para comunicação entre dois <i>host</i>
P.862	10/2010	Avaliação de MOS intrusiva
P.563	10/2010	Avaliação de MOS não intrusiva
Wav2rtp	0.9.1	Simulação de perda de pacotes

Com exceção do Matlab cuja licença foi utilizada no laboratório da Universidade Federal de Lavras (UFLA), todas as outras ferramentas são gratuitas.

Os *hardwares* utilizados foram:

- Duas placas USRP modelo B210, para comunicação e transmissão *wireless* com antenas para frequências de 2.4 GHz.

- Um notebook ASUS, com processador I5 e 8Gb de memória, utilizado para testes e experimentos, assim como a montagem dos ambientes de comunicação, uso do wav2rtp, P.862, P.563 e GNU Radio.
- Um computador *desktop*, com processador Athlon 64 e 4Gb de memória, para GNU Radio e para recepção da voz.

4 RESULTADOS

Como descrito anteriormente, os experimentos iniciais foram efetuados em ambientes simulados, após a voz ser degradada os índices MOS foram obtidos com a métrica intrusiva P.862, com estes resultados um modelo matemático foi proposto cujos resultados são apresentados na primeira subseção. Em seguida a métrica P.563, que é uma métrica não intrusiva, também foi utilizada para avaliar os arquivos de áudio degradado, como o algoritmo disponibilizado para essa métrica de avaliação possui alguns problemas como na interpretação de silêncios e falha na comunicação, sua eficácia na avaliação foi baixa se comparado com o P.862, e esses resultados são exibidos na subseção 4.2. Desta maneira, um modelo matemático para melhorar o desempenho do P.563 em relação ao P.862 foi proposto. Todos os resultados de erros, PCC (*Pearson Correlation Coefficient*) e índices MOS de ambos os experimentos também são apresentados.

Posteriormente, com todos os resultados dos experimentos previamente obtidos, os parâmetros de degradações e índices MOS foram utilizados para um treinamento de uma RNA. Assim, uma nova métrica não intrusiva pode ser desenvolvida cujos resultados são comparados com o modelo matemático para P.862 proposto. Esses resultados são apresentados na subseção 4.3 deste capítulo.

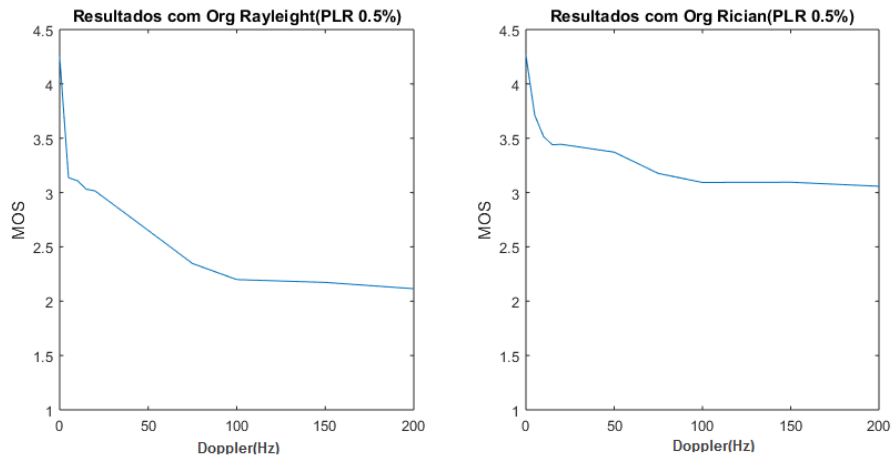
Finalmente, testes em ambiente real foram efetuados empregando a arquitetura SDR e com transmissão no padrão IEEE 802.11. Antes de fazer as transmissões em maiores distâncias, os testes foram feitos em uma distância curta e sem objetos no caminho. O objetivo é definir os parâmetros que permitissem uma comunicação com o mínimo de degradação.

Posteriormente, a modulação de melhor qualidade definida nos USRP e com o tamanho de pacote UDP que obteve a menor taxa de perda de pacotes, os testes prosseguiram no ambiente *indoor* com variações de distâncias e diferentes ganhos do transmissor e receptor. Os mesmos testes realizados em ambiente *indoor* também foram aplicados em ambientes *outdoor*. Os resultados podem ser observados na última subseção deste capítulo.

4.1 Resultados do modelo matemático para estimação de qualidade de voz baseado no P.862

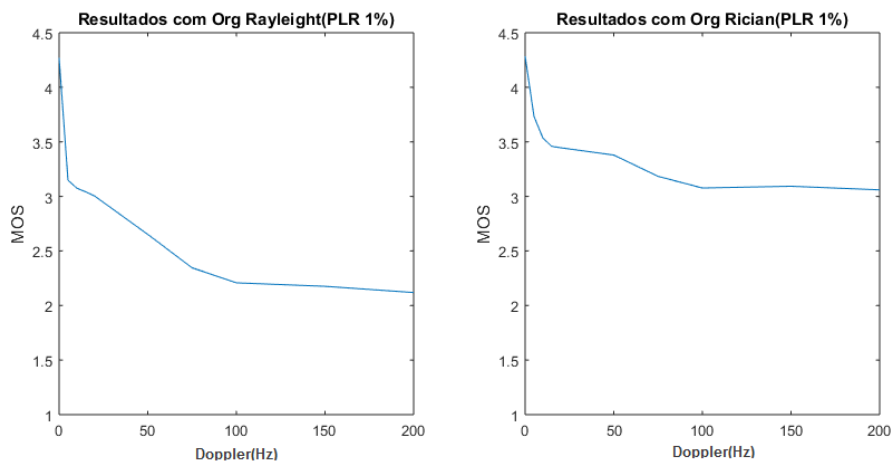
Os valores obtidos ao resolver o sistema de equações apresentado em 3.3, são: $\mu = 0.5943$; $\alpha = 1.8417$; $\beta = 1.6625$; $\gamma = -0.0017$ e $\Omega = -2.5999$. As Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os resultados que consideram os parâmetros de *Fading*, PLR e *Doppler*.

Figura 4.1 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 0,5%.



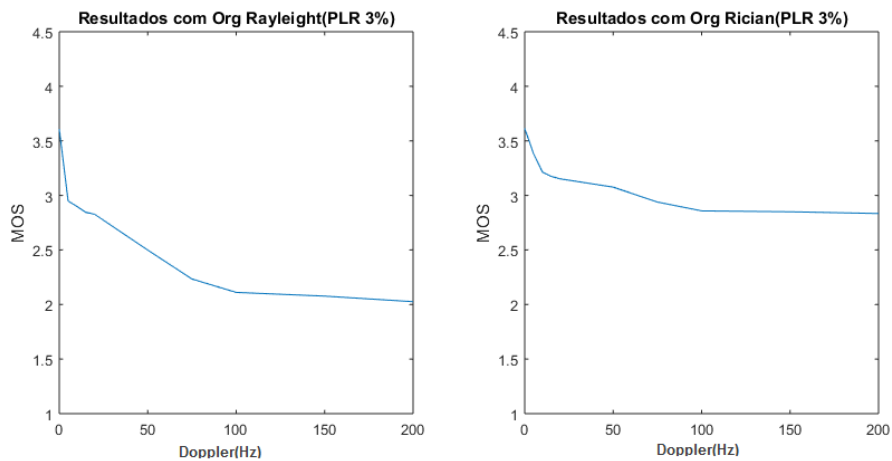
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.2 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 1%.



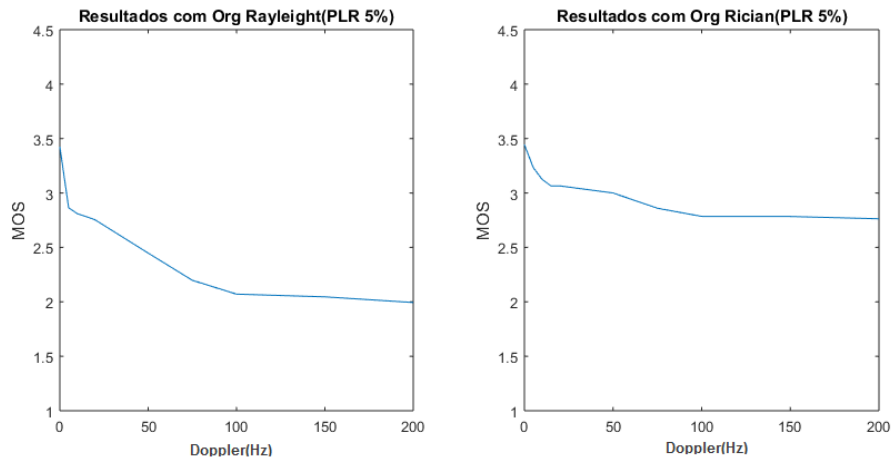
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.3 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 3%.



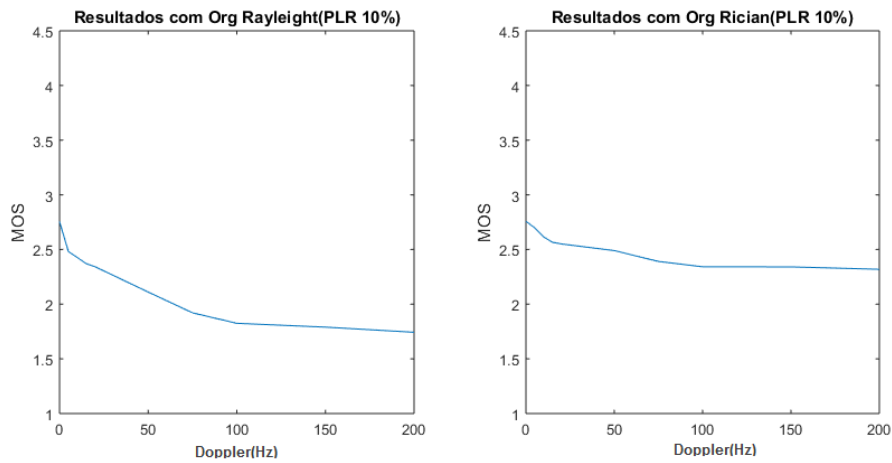
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.4 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 5%.



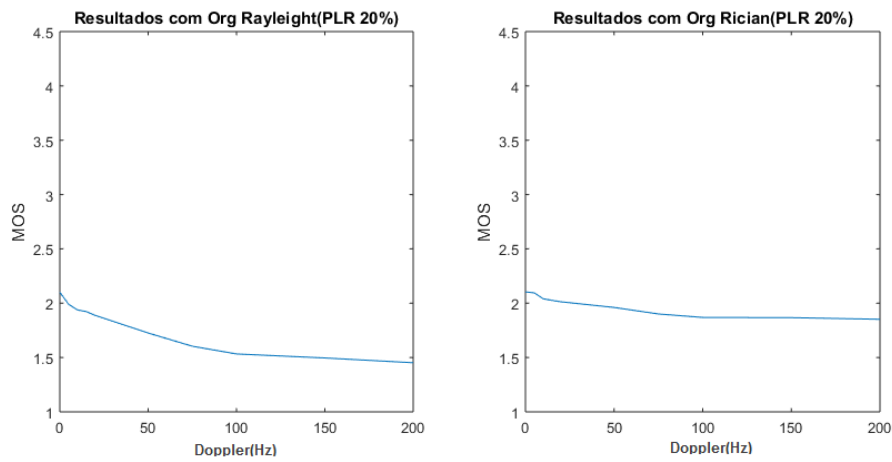
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.5 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 10%.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.6 – Degradação de qualidade de voz para os efeitos dos desvanecimentos e PLR 20%.



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 4.1, os cenários nos quais se obtiveram os maiores e menores valores de índices MOS são apresentados para uma análise mais detalhada. No Apêndice A está apresentado a tabela completa, com todos os cenários de degradações e índices MOS.

Tabela 4.1 – Cenários que obtiveram os maiores e menores índices de qualidade

	Doppler	PLR(%)	MOS
Rayleigh	0	0,5	4,251
Rayleigh	200	0,5	2,115
Rician	0	0,5	4,266
Rician	200	0,5	3,058
Rayleigh	0	20	2,101
Rayleigh	200	20	1,452
Rician	0	20	2,104
Rician	200	20	1,852

A Tabela 4.2 apresenta: o erro máximo, o erro médio e o erro mínimo entre o resultado da métrica MOS^P e o índice MOS obtido com o P.862. Pode-se observar que o maior erro foi de 0,3354, o qual representa um erro de 7,4% considerando uma escala MOS de 0 até 4,5.

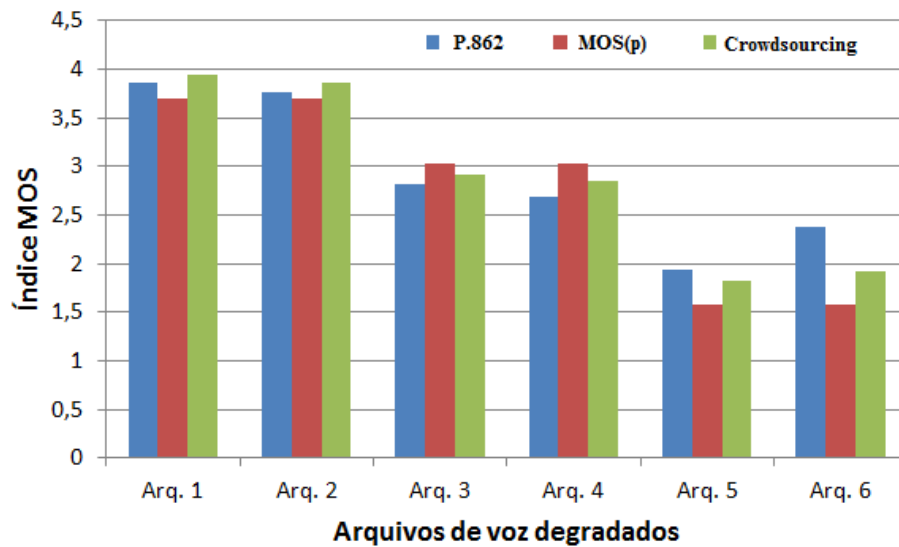
Tabela 4.2 – Erro do MOS^P em relação ao P.862

Erro mín.	Erro médio	Erro máx.
0,0009	0,0638	0,3354

Com a finalidade de validar a métrica MOS^P com resultados de testes subjetivos, foram utilizados 6 arquivos de voz degradados escolhidos aleatoriamente, os quais foram avaliados utilizando uma plataforma comercial de *crowdsourcing*. O *crowdsourcing* utiliza usuários remotos para a realização de testes subjetivos e outras tarefas, os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.7. Também, o valor do PCC entre os índices obtidos por MOS^P e os resultados obtidos nos testes subjetivos foi de 97,52% e o erro máximo alcançado foi de 0,3337.

Cabe destacar que o MOS^P é uma métrica não intrusiva e conseqüentemente poderia ser aplicável em cenários reais de comunicação de voz. Os valores de *Doppler* e *PLR* poderiam ser calculados por uma aplicação no dispositivo do usuário. E para os desvanecimentos, ambos podem ser calculados, uma vez que o custo computacional é baixo, exibindo assim, os resultados para ambos ou somente o resultado do desvanecimento escolhido pelo usuário através da aplicação.

Figura 4.7 – Eficácia da métrica MOS^P utilizando testes subjetivos remotos.



Fonte: Elaborada pelo autor, publicada em (TAVARES; RODRIGUEZ, 2016)

4.2 Resultados do modelo matemático para estimação de qualidade de voz que utiliza o P.563

Para poder comparar os algoritmo P.563 e P.862, todos os arquivos avaliados pelo P.862, foram também avaliados com o P.563. Para uma apresentação mais sucinta dos resultados, na Tabela 4.3 são apresentados os cenários de testes que obtiveram os índices MOS mais altos e baixos. Por meio da tabela, é possível observar o impacto do desvanecimento e PLR nos índices de qualidade P.862 e P.563. Já no Apêndice A a tabela completa é exibida, nela é possível visualizar todos os índices MOS do P.862, P.563 e a diferença entre eles.

Tabela 4.3 – Valores de índices MOS obtidos pelo P.862 e P.563 em cenários com alta e baixa degradação

Técnica	Doppler	PLR(%)	P.862(MOS)	P.563(MOS)
Rayleigh	0	0,5	4,251	1,949
Rayleigh	200	20	1,452	1,000
Rician	0	0,5	4,266	2,268
Rician	200	20	1,852	1,016

Para resolver o sistema de equações 3.5, os pesos obtidos foram, $F_1=0,649$, $F_2=0,500$, $b=-0,007$ e $c=0,0008$. Com estes resultados, a comparação do desempenho entre P.563 e a métrica proposta, $P.563_{MOS}^P$, é apresentado na Tabela 4.4.

Como pode ser observado na Tabela 4.4, a melhora da precisão do $P.563_{MOS}^P$, é muito significativa, especialmente no erro máximo obtido.

Tabela 4.4 – Desempenho do modelo matemático proposto

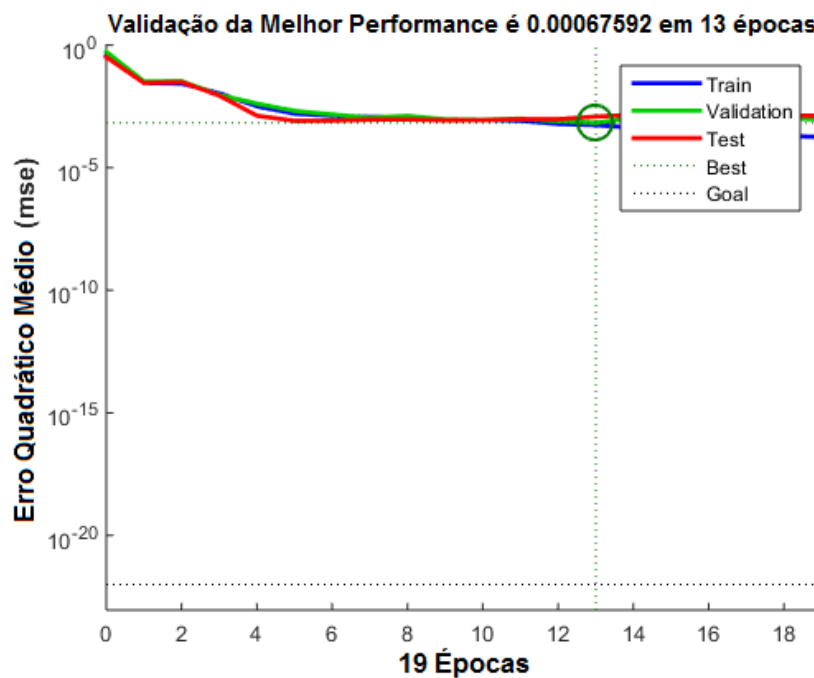
Parâmetros	PCC	Máx. Erro
P.563 vs. P.862	0,87	2,83
$P.563_{MOS}^P$ vs. P.862	0,94	0,49

4.3 Resultados do modelo baseado em redes neurais artificiais

Usando como base os resultados de todos os cenários avaliados com P.862 uma RNA foi treinada para avaliação da qualidade da voz. Foi utilizado quatro parâmetros de entradas para o treinamento, onde cada entrada representava um parâmetro de degradação, que foram: Rayleigh com entradas binárias, Rician com entradas binárias, percentual do PLR e valor do *Doppler*.

As entradas binárias para Rayleigh e Rician representa qual desvanecimento foi empregado naquele cenário, onde 0 representa a não utilização do modelo e 1 representa a sua utilização. Após o treinamento é possível observar na Figura 4.8 o alto desempenho da RNA, convergindo bem próximo a um valor zero de erro em apenas 13 épocas na etapa de treinamento. O conjunto de todas as variações de degradações informadas à RNA foi dividido em 60% dos dados para treinamento, 20% para validação e 20% para os testes.

Figura 4.8 – Desempenho no treinamento da RNA.



Fonte: Elaborada pelo autor, obtida pelo MATLAB.

A Tabela 4.5 apresenta o erro máximo, o erro médio e o PCC entre os índices MOS obtidos com a RNA e os obtidos com o P.862. Pode-se observar que o maior erro foi de 0,0843, o qual representa um erro de 1,87% considerando uma escala MOS de 0 até 4,5. Na Tabela 4.6 é possível observar a comparação do erro médio e máximo entre as métricas MOS^P e RNA.

Tabela 4.5 – Erro do MOS de uma RNA em relação ao P.862

PCC	Erro médio	Erro max.
99,88%	0,0195	0,0843

Tabela 4.6 – Comparação entre MOS^P e RNA em relação ao P.862

Métrica	Erro médio	Erro max.
MOS ^P	0,0638	0,3354
RNA	0,0195	0,0843

Com a finalidade de validar os resultados para uma nova métrica para obter o índice MOS de maneira não intrusiva utilizando rede neural artificial, nota-se um erro máximo de 0,0843 em relação da avaliação intrusiva com o P.862. Esta pequena diferença poder estar relacionado à variabilidade de ambiente onde está ocorrendo à degradação, uma vez que aplicando as mesmas taxas de *fading* ou PLR ocorrem sempre diferentes degradações.

4.4 Resultados dos experimentos em ambientes reais com a arquitetura SDR

Utilizando a arquitetura SDR para uma real transmissão dos arquivos de áudio da base de dados, a ferramenta GNU Radio foi empregada para montagem do cenário via *Software*, podendo assim enviar dados para outro *host* receptor por meio do *hardware* USRP, variando diferentes tipos de modulações, distâncias, ganhos do transmissor e do receptor.

Inicialmente, antes efetuar transmissões em ambientes *indoor* e *outdoor*, testes foram efetuados para definir qual o melhor tamanho de pacote UDP a ser transportado e qual o melhor tipo de modulação, e só então, dar continuidade em testes com os diferentes ambientes e com variações de distância. Os testes com diferentes tamanhos de pacotes foram feitos através de um *script* desenvolvido em Python para encapsulamento e transmissão dos arquivos via protocolo UDP, conforme mencionado no capítulo 3. O motivo para os diferentes tamanhos de *payload* testados, é que de acordo com seu tamanho pode haver aumento ou diminuição de banda de transmissão ou chances de ocorrer colisões nos pacotes transmitidos.

As transmissões foram feitas sem nenhum objeto entre as USRP e a uma distância de 1 metro. A Tabela 4.7 apresenta os resultados dos testes efetuados com *payload* de 128, 256, 384 e 512 bytes. Outros parâmetros avaliados foram os ganhos do transmissor e do receptor, quantidade de pacotes que foram transmitidos e a quantidade recebida. Os índices MOS foram avaliados com o algoritmo do P.862 após a transmissão.

As transmissões UDP com um *payload* de 384 bytes obtiveram 100% de qualidade em quase todos os testes, entretanto houve uma grande degradação da qualidade utilizando o ganho máximo em uma curta distância, que será justificada nos próximos resultados apresentados.

Tabela 4.7 – Análise de transmissão com diferentes tamanhos de pacotes com distância de 1 metro

Tamanho(bytes)	Ganho Tx	Ganho Rx	Qtd Transmitidos	Qtd Recebidos	MOS
128	50	75	1052	801	2,848
128	75	75	1052	823	1,954
128	100	75	1052	88	1,217
128	50	100	1052	903	3,6
128	75	100	1052	398	1,522
128	100	100	1052	0	0
256	50	75	531	490	2,926
256	75	75	531	515	3,246
256	100	75	531	86	1,758
256	50	100	531	531	4,5
256	75	100	531	371	2,217
256	100	100	531	0	0
384	50	75	352	352	4,5
384	75	75	352	352	4,5
384	100	75	352	105	2,611
384	50	100	352	352	4,5
384	75	100	352	352	4,5
384	100	100	352	0	0
512	50	75	264	0	0
512	75	75	264	0	0
512	100	75	264	0	0
512	50	100	264	0	0
512	75	100	264	0	0
512	100	100	264	0	0

Posteriormente foi avaliada a qualidade do sinal de voz com diferentes modulações, onde as modulações avaliadas foram BPSK, QPSK e QAM. Para cada modulação, diferentes taxas de codificação também foram testadas, maiores detalhes sobre taxa de codificação estão

no capítulo 2. Os resultados das qualidades obtidas podem ser visualizadas na Tabela 4.8. Os testes com diferentes modulações foram feitos a uma distância de 1 metro e sem nenhum objeto entre o emissor e receptor para minimizar a degradação na propagação do sinal.

Tabela 4.8 – Resultados das modulações com distância de 1 metro

Modulação	Taxa de Codificação	Bits por Subportadoras	MOS
BPSK	1/2	1	4,5
BPSK	3/4	1	4
QPSK	1/2	2	3,5
QPSK	3/4	2	1,5
QAM16	1/2	4	0
QAM16	3/4	4	0
QAM64	2/3	6	0
QAM64	3/4	6	0

As modulações QAM obtiveram uma quantidade muito baixa de dados transmitidos, de maneira que o arquivo transmitido ficou inaudível após ser salvo no receptor, impossibilitando o cálculo do seu índice MOS. Essa diminuição na desempenho ocorre devido ao aumento do número de *bits* combinados para formar um símbolo, algumas pesquisas como em Dey (2012) Pandey e Singh (2014) Sharma, Shrivastav, Jain e Panday (2012) apresentam resultados nos quais o QAM foi inferior em comparação com BPSK e QPSK. E com base nos experimentos de Santos (2015), as transmissões com modulação QAM não obtiveram sucesso na recepção dos pacotes com o modelo gr-ieee802.11 para cenários com SDR.

Por haver uma perda de qualidade em testes feitos em uma pequena distância, sem nenhum objeto obstruindo o sinal e a baixa confiabilidade na transmissão com as modulações QPSK, QAM16 e QAM64, a modulação BPSK com pacotes UDP de 384 bytes foi utilizada para os testes com maiores distâncias. Esses testes foram em ambientes *indoor* e *outdoor*. Os parâmetros avaliados foram: distância entre *hosts*, ganho do transmissor, ganho do receptor e a quantidade de pacotes perdidos na transmissão.

A variação de distância foi feita manualmente afastando o emissor do receptor. O valor de ganho do transmissor e receptor foi ajustado na própria aplicação, na lateral esquerda da Figura 3.7 é possível notar os valores "tx_gain" e "rx_gain" os quais o usuário pode alterá-los. A quantidade de pacotes perdidos foi monitorada com o auxílio do Wireshark, conforme está ilustrado na Figura 3.12, essa quantidade perdida foi determinada pela comparação da quantidade de pacotes transmitidos e a quantidade que chegaram ao receptor.

Em ambos os ambientes, os parâmetros de ganho do transmissor (Tx) e receptor (Rx) foram variados entre 50%, 75% e 100% do ganho para Tx, para Rx foram entre 75% e 100%. No transmissor, um percentual abaixo de 50% não consegue estabelecer enlace, e o mesmo acontece no receptor quando o valor de Rx está abaixo de 75%.

4.4.1 Resultados em ambiente *indoor*

Em ambientes *indoor* conforme já mencionado, os parâmetros avaliados foram distâncias, ganhos do transmissor, ganhos do receptor, pacotes enviados e pacotes recebidos. As distâncias para este ambiente foram de 1, 3, 5, 8 e 10 metros.

Os resultados podem ser observados na Tabela 4.9 e para uma melhor compreensão é apresentada a Figura 4.9. Essas transmissões foram efetuadas em um corredor do Departamento de Ciência da Computação (DCC) na Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde suas dimensões são de aproximadamente 50 metros de distância, 2 metros de largura, 3 metros de altura e com paredes de 30 centímetros de espessura.

Analisando os resultados, com o ganho do transmissor em 100% até 8 metros há uma transmissão de alta qualidade, a partir dessa distância o sinal já começa sofrer degradações. Com 10 metros ou superior não se estabeleceu mais nenhum enlace, os equipamentos não conseguiram estabelecer uma conexão entre eles. Mas esses valores podem variar para diferentes ambientes *indoor*, devido ao tamanho de salas, espessura de paredes e até objetos encontrados ao longo da transmissão.

4.4.2 Resultados ambiente *outdoor*

Com base nos mesmos parâmetros utilizados nos experimentos *indoor*, os mesmos testes foram aplicados em um ambiente *outdoor*, porém com distâncias bem superiores. As distâncias avaliadas foram de 1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 metros.

Na Tabela 4.10 apresenta as variações de distâncias, o número de pacotes transmitidos e recebidos e o índice MOS, onde a maior distância foi de 120 metros com uma qualidade de 100%. Distâncias maiores não puderam ser testadas, o problema ocorreu devido a presença de árvores e carros que ficariam entre as USRP, o que obstruiria o sinal. A Figura 4.10 apresenta graficamente os resultados alcançados.

Tabela 4.9 – Resultados das distâncias em um ambiente *indoor*

Distância	Ganho Tx	Ganho Rx	Pacotes Tx	Pacotes Rx	MOS
1	50	75	352	352	4,5
1	75	75	352	352	4,5
1	100	75	352	105	2,611
1	50	100	352	352	4,5
1	75	100	352	352	4,5
1	100	100	352	0	0
3	50	75	352	9	0
3	75	75	352	326	3,065
3	100	75	352	352	4,5
3	50	100	352	138	1,025
3	75	100	352	348	3,978
3	100	100	352	352	4,5
5	50	75	352	0	0
5	75	75	352	38	1,237
5	100	75	352	352	4,5
5	50	100	352	0	0
5	75	100	352	158	2,273
5	100	100	352	352	4,5
8	50	75	352	0	0
8	75	75	352	0	0
8	100	75	352	322	3,053
8	50	100	352	0	0
8	75	100	352	0	0
8	100	100	352	343	3,993
10	50	75	352	0	0
10	75	75	352	0	0
10	100	75	352	0	0
10	50	100	352	0	0
10	75	100	352	0	0
10	100	100	352	0	0

Tabela 4.10 – Resultados considerando diferentes distâncias em ambiente *outdoor*

Distância	Ganho Tx	Ganho Rx	Pacotes Tx	Pacotes Rx	MOS
5	50	75	352	352	4,5
5	75	75	352	352	4,5
5	100	75	352	105	2,611

Continua na próxima página

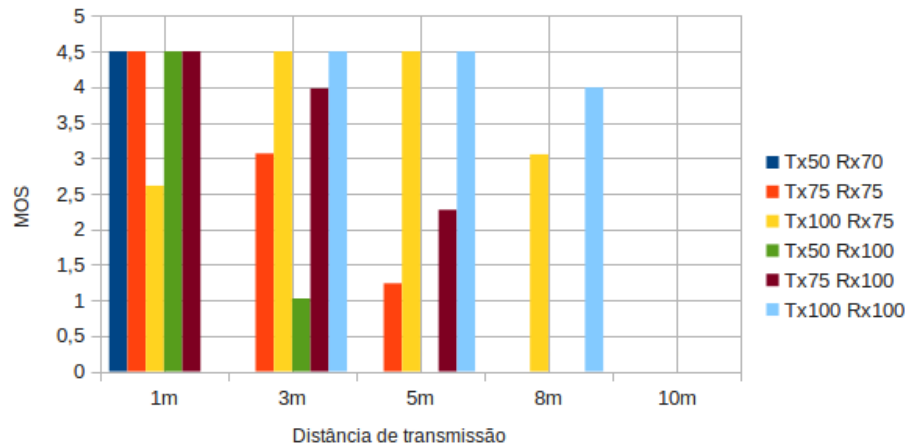
Tabela 4.10 *Continuação da página anterior*

Distância	Ganho Tx	Ganho Rx	Pacotes Tx	Pacotes Rx	MOS
5	50	100	352	352	4,5
5	75	100	352	352	4,5
5	100	100	352	0	0
10	50	75	352	9	0
10	75	75	352	326	3,065
10	100	75	352	352	4,5
10	50	100	352	138	1,025
10	75	100	352	348	3,978
10	100	100	352	352	4,5
20	50	75	352	0	0
20	75	75	352	38	1,237
20	100	75	352	352	4,5
20	50	100	352	0	0
20	75	100	352	158	2,273
20	100	100	352	352	4,5
30	50	75	352	0	0
30	75	75	352	0	0
30	100	75	352	322	3,053
30	50	100	352	0	0
30	75	100	352	0	0
30	100	100	352	343	3,993
40	50	75	352	352	4,5
40	75	75	352	352	4,5
40	100	75	352	105	2,611
40	50	100	352	352	4,5
40	75	100	352	352	4,5
40	100	100	352	0	0
50	50	75	352	9	0
50	75	75	352	326	3,065

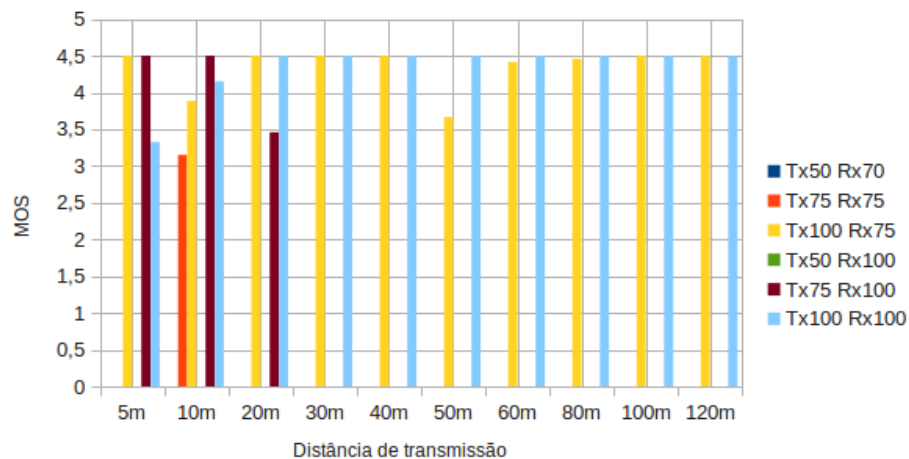
Continua na próxima página

Tabela 4.10 *Continuação da página anterior*

Distância	Ganho Tx	Ganho Rx	Pacotes Tx	Pacotes Rx	MOS
50	100	75	352	352	4,5
50	50	100	352	138	1,025
50	75	100	352	348	3,978
50	100	100	352	352	4,5
60	50	75	352	0	0
60	75	75	352	38	1,237
60	100	75	352	352	4,5
60	50	100	352	0	0
60	75	100	352	158	2,273
60	100	100	352	352	4,5
80	50	75	352	0	0
80	75	75	352	0	0
80	100	75	352	322	3,053
80	50	100	352	0	0
80	75	100	352	0	0
80	100	100	352	343	3,993
100	50	75	352	0	0
100	75	75	352	38	1,237
100	100	75	352	352	4,5
100	50	100	352	0	0
100	75	100	352	158	2,273
100	100	100	352	352	4,5
120	50	75	352	0	0
120	75	75	352	0	0
120	100	75	352	322	3,053
120	50	100	352	0	0
120	75	100	352	0	0
120	100	100	352	343	3,993

Figura 4.9 – Gráfico MOS por distâncias *indoor*.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.10 – Gráfico MOS por distâncias *outdoor*.

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando os resultados alcançados nos ambientes *indoor* e *outdoor* existe uma correlação entre a distância e o ganho de transmissão. Um ganho do transmissor muito alto em pequenas distâncias gera uma saturação do sinal que ocasiona em baixa ou nenhuma qualidade, a partir de uma certa distância, a transmissão ocorre perfeitamente para um alto ganho e os baixos ganhos perdem qualidade.

Na transmissão *outdoor* com 50 metros entre o emissor e o receptor houve uma pequena queda na qualidade. Pode ser observado que em 60 metros ou superior se estabilizou e a transmissão voltou a ter qualidade máxima na escala MOS. Na Figura 4.11 as árvores podem ser notadas, elas estão muito próximo do emissor, gerando uma degradação na transmissão a 50 metros. Deve-se destacar que nos testes, o receptor se mantinha no mesmo lugar e o transmissor se afastava à distância requerida.

Um outro fator de grande importância em uma transmissão de voz é o valor MOS de qualidade, a quantidade de pacotes recebidos nem sempre está associado com a qualidade percebida pelo ouvinte, ou seja, receber menos pacotes as vezes pode ter mais qualidade que receber uma quantidade superior, e isso está associado se as perdas foram sequenciais ou em diferentes pontos da transmissão.

Este caso pode ser facilmente observado na transmissão *outdoor* em 5 metros, onde com parâmetros Tx de 100, Rx de 75 e 105 pacotes recebidos, seu MOS foi de 2,611. Em 10 metros o Tx de 50 e Rx de 100, foram 138 pacotes recebidos, porém seu MOS foi de apenas 1,025.

Outro caso notável foi nos testes para definir o tamanho ideal de *payload*, com pacotes de tamanho de 128 bytes com Tx e Rx de 75 foram recebidos 823 pacotes e com MOS de 1,954, já para Tx de 50 e Rx de 75 foram recebidos 801 pacotes e seu MOS foi de 2,848. Uma representação visual dessa afirmação pode ser encontrado na Figura 3.13.

Figura 4.11 – Presença de desvanecimento na transmissão para uma distância de 50m.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os experimentos efetuados para verificar qual das modulações haveria maior qualidade foram efetuados em um ambiente *indoor*, para certificar a baixa qualidade que ocorreu nas transmissões com as modulações QKPS e QAM, testes também foram efetuados no ambiente

outdoor. As transmissões com a modulação QAM, igual ao ambiente *indoor*, houve pouca quantidade de pacotes transmitidas, de forma que o arquivo final ficou inaudível e com MOS 0. Com a modulação QPSK a qualidade também foi baixa e pode ser visualizada na Tabela 4.11. Desta forma, a modulação BPSK mesmo no ambiente *outdoor* oferece maior qualidade.

Tabela 4.11 – Resultados da modulação QPSK em um ambiente *outdoor*

Distância	Ganho Tx	Ganho Rx	Pacotes Tx	Pacotes Rx	MOS
1	50	75	352	0	0
1	75	75	352	341	3,508
1	100	75	352	58	2,899
1	50	100	352	0	0
1	75	100	352	242	2,826
1	100	100	352	184	1,489
3	50	75	352	0	0
3	75	75	352	53	1,256
3	100	75	352	320	3,121
3	50	100	352	0	0
3	75	100	352	339	3,391
3	100	100	352	214	1,45
5	50	75	352	0	0
5	75	75	352	202	2,538
5	100	75	352	335	3,028
5	50	100	352	0	0
5	75	100	352	340	3,176
5	100	100	352	230	1,383
10	50	75	352	0	0
10	75	75	352	0	0
10	100	75	352	274	2,492
10	50	100	352	0	0
10	75	100	352	4	0
10	100	100	352	335	3,689

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram estudados diferentes cenários de comunicações VoIP, nos quais diversos parâmetros foram modificados para avaliar o impacto deles na qualidade da comunicação. Assim, foi apresentado um estudo de comunicação VoIP que utiliza uma rede cabeada e *wireless*; destacando-se que atualmente são poucos os estudos que tratam sobre as degradações causadas na interface *wireless*. As recomendações ITU-T P.862 e P.563 foram utilizadas para avaliar a qualidade do sinal de voz.

Com os resultados de testes de simulação, uma nova métrica foi proposta e com ela a intenção de quantificar as degradações sofridas em uma comunicação VoIP de uma forma não intrusiva, está nova métrica é chamada de MOS^P. Observando os valores de erros atingidos, a métrica MOS^P teve um desempenho satisfatório. A métrica proposta, por ser não intrusiva, pode ser utilizada em aplicações reais de comunicação de voz, como uma ferramenta de planejamento de rede. O erro máximo encontrado na avaliação de desempenho do MOS^P foi de 0,3354, e um valor do PCC de 97,52%.

Também, com base nos resultados obtidos com o P.862, uma RNA foi utilizada para prever o índice MOS dado um cenário de degradação. Com o uso de RNA os resultados foram mais promissores, com o erro máximo de 0,0843 em uma escala MOS, representando um erro de 1,87% do resultado esperado. Entretanto, o uso de RNA se torna mais dispendioso, uma vez que necessita de um novo *software* instalado no computador para fazer essa análise.

Com o objetivo de melhorar os resultados das avaliações do P.563, uma solução de aproximação do índice MOS foi apresentada, e foram utilizados os resultados do P.862 como referência. Considerando os valores de erros atingidos, o método proposto para melhorar o desempenho do P.563, apresenta como satisfatório. Comparando o índice MOS do P.563 com o P.862 antes da aplicação proposta, há um erro máximo de 2,03. Com aplicação da solução, uma margem de erro máximo entre ambos diminuiu para 0,49.

Em uma segunda etapa a arquitetura SDR foi empregada, com ela foi possível efetuar uma transmissão real dos arquivos de voz em diferentes ambientes (*indoor* e *outdoor*), considerando parâmetros como o tipo de modulação, tamanhos de pacotes UDP, ganho do transmissor e receptor, e distância entre *hosts*.

Com o protocolo UDP, os pacotes de 384 Bytes conseguiu uma transmissão de boa qualidade e sem perdas. Os resultados não foram satisfatórios para as técnicas que transportam maiores quantidades de *bits*, quanto mais complexa a modulação e maior a quantidade de *bits*

transmitidos, maiores as perdas. A única modulação que teve boa qualidade nas transmissões foi a BPSK e por este motivo ela foi empregada em testes com maiores distâncias e ganhos.

As transmissões com variações de distâncias e ganhos, tanto para ambientes *indoor* quanto para *outdoor*, apresentaram resultados semelhantes. Valores de ganhos muito alto no transmissor em curtas distâncias degradam a qualidade da comunicação; nestes cenários a transmissão ideal é com aproximadamente 75% do ganho. Afastando o emissor do receptor e utilizando ganhos acima de 75% se consegue uma melhor qualidade e se mantém estável; por exemplo, a uma distância de 120 metros em ambiente outdoor se obteve uma qualidade máxima na comunicação.

5.1 Produção científica

Diante das pesquisas apresentadas, resultados alcançados e métricas propostas, alguns trabalhos puderam ser desenvolvidos e apresentados em congressos.

O primeiro deles, baseado na métrica para melhora do algoritmo P.862, oferecendo um modelo matemático para prever o índice MOS sofrido em uma comunicação de voz, foi no XXXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES(SBrt2016), 2016, Santarém, PA. Com título: Impacto do Desvanecimento do Sinal na Qualidade de uma Comunicação VoIP, (TAVARES; RODRIGUEZ, 2016).

O segundo, utilizando o algoritmo P.563. onde é oferecido uma métrica matemática para melhora da eficácia do P.563 baseando nos índices MOS do P.862. Foi publicado no IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), 2016, São Paulo. Com título: Voice quality assessment in mobile devices considering different fading models, (TAVARES, 2016).

As pesquisas e conhecimento contribuiu para o minicurso ministrado no congresso XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES(SBrt2016), 2016, Santarém, PA. Com título: Uso de métricas objetivas para avaliação de qualidade de voz com diferentes degradações.

Participação na publicação na revista International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDIWC), em 2016. Com o título: ASSESSMENT OF QUALITY-OF-EXPERIENCE IN TELECOMMUNICATION SERVICES, (RODRIGUEZ, 2016). Contribuição também no Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação, 2017, Lavras-MG. Com o título: Information System for the Improvement of Telecommunication Service Quality, (ASSIS, 2017).

REFERÊNCIAS

- 802.11 IEEE. IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments. *IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009)*, p. 1–51, July 2010.
- 802.11 IEEE. *IEEE 802.11 Wireless LANs*. 2012. [Http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html](http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html). Acessado:07/11/2016.
- ALBUQUERQUE, C. P. de; PINTO, E. L. A Técnica de Transmissão OFDM. **Revista Científica Periódica - Telecomunicações**, v. 05, n. 01, p. 2338, jun. 2002. ISSN 1516-2338.
- ASSIS, E. K. de; TAVARES, E.; ZEGARRA RODRÍGUEZ, D.; LOPES ROSA, R. Information System for the Improvement of Telecommunication Service Quality. **Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação**, p. 452–455, 2017.
- BLOESSL, B. **Wireless Measurement and Experimentation**. 2016. [Http://www.wime-project.net/](http://www.wime-project.net/). Acessado:11/12/2016.
- BRAGA, A.; CARVALHO, A. de; LUDERMIR, T. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e aplicações**. 1. ed. [S.l.]: LTC, 2000.
- CHOUDHURY, S.; GIBSON, J. D. Payload length and rate adaptation for multimedia communications in wireless LANs. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 25, n. 4, p. 796–807, May 2007. ISSN 0733-8716.
- COUTINHO, P. S. **DETECÇÃO DE ENERGIA PARA RÁDIOS COGNITIVOS USANDO GNU RADIO E USRP2**. Dissertação (Mestrado) — Politécnica/COPPE, mar. 2011.
- de Carvalho, A. P. d. L. F.; LUDERMIR, T. B.; BRAGA, A. d. P. **SISTEMAS INTELIGENTES**. 1. ed. [S.l.]: Manole, 2003.
- DEY, M. R. Performance Analysis of PAPR reduction for OFDM-BPSK, -QPSK and -QAM using Forward Error Correcting Code. **2012 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering**, dez. 2012.
- EL-HAJJAR, M.; NGUYEN, Q. A.; MAUNDER, R. G.; NG, S. X. Demonstrating the practical challenges of wireless communications using USRP. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 5, p. 194–201, May 2014. ISSN 0163-6804.
- ETTUS. **Ettus Research**. 2016. [Https://www.ettus.com/](https://www.ettus.com/). Acessado:30/11/2016.
- GARCIA-HARO, J.; CANO, M. D.; SANCHEZ-IBORRA, R. On the effect of the physical layer on VoIP Quality of user Experience in wireless networks. In: **2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1036–1040. ISSN 2164-7038.
- GARZON, N. V. O. **Análise de Desempenho de uma Proposta de Transmissão Oportunista sem fio em Canais com Desvanecimento Rayleigh e na Presença de Interferência de Co-Canal para Diferentes Esquemas de Modulação**. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, 2014.

- HAYKIN, S. **REDES NEURAIIS PRINCIPIOS E PRÁTICAS**. 2. ed. [S.l.]: Bookman, 2000.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas Modernos de Comunicações Wireless**. [S.l.]: Bookman, 2008. 580 p.
- IEEE. **IEEE Standard**. 2016. <https://www.ieee.org/>. Acessado:07/11/2016.
- ITU-T. **ITU-T Recommendation-P.563**. 2007. <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.563/en>.
- ITU-T. **ITU-T Recommendation-P.862**. 2007. <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862/en>.
- ITU-T. **ITU-T Telecommunication Standardization Sector**. 2016. <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index.aspx?ser=T>.
- KHARE, A.; TRIVEDI, K.; DIXIT, S. Effect of Doppler frequency and ber in FFT based OFDM system with Rayleigh fading channel. In: **Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2014 IEEE Students' Conference on**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- LARIJANI, H.; RADHAKRISHNAN, K. Voice Quality in VoIP Networks Based on Random Neural Networks. In: **Networks (ICN), 2010 Ninth International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 89–92.
- LAURETTI, S. R. **Evolução das Redes de Telecomunicação: Arquitetura IMS**. [S.l.], 2004.
- LEE, H.; BYEON, S.; KIM, B.; LEE, K. B.; CHOI, S. Enhancing Voice over WLAN via Rate Adaptation and Retry Scheduling. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, 2003.
- MATLAB. **Fading Channels**. 2016. <http://mathworks.com/help/comm/ug/fading-channels.html>. Acessado:01/14/2016.
- NUNES, R. D.; PEREIRA, C. H.; ROSA, R. L. Real-Time Evaluation of Speech Quality in Mobile Communication Services. **Universidade Federal de Lavras**, 2016.
- NUNES, R. D.; PEREIRA, C. H.; ROSA, R. L.; OLIVEIRA, T. C. d. A.; RODRÍGUEZ, D. Z. Improving the performance of a non-intrusive metric of voice quality assessment considering IP network parameters. **XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, 2015.
- OPENBTS. **GSM base transceiver station**. 2016. <http://www.openbts.org/>. Acessado:30/11/2016.
- PANDEY, V.; SINGH, N. K. BER performance simulation in a multi user MIMO TAS/MRC Nakagami-m channel using BPSK, QPSK and QAM. **International Conference on Communication and Signal Processing**, abr. 2014.
- PINHEIRO, J. C. d. M. **Caracterização de canais sem fio em ambientes generalizados de desvanecimento**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, jun. 2012.
- PIVARO, G. F.; RODRÍGUEZ, D.; BRESSAN, G. Avaliação da Qualidade de uma Comunicação VoIP em uma rede WLAN real com diferentes Modelos de Desvanecimento. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, XXIX**, out. 2011.
- RADIO, G. **THE FREE AND OPEN SOFTWARE RADIO ECOSYSTEM , USRP Motherboard**. 2016. <http://gnuradio.orf/redmine/projects>.

RESEARCH, E. **Ettus USRP 200/210 series**. 2017. https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf. Acessado:10/03/2017.

RFC 3550. **RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications**. 2013. <https://tools.ietf.org/html/rfc3550>. Acessado:30/08/2017.

RIBEIRO, M. V. Técnicas de Reconstrução de Pacotes Aplicadas à Codificadores de Forma de Onda para VoIP. **IEEE Latin America Transactions**, out. 2003.

RITO, P. F. **Recetor SDR para comunicações DSRC**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2011.

RIX, A. W.; BEERENDS, J. G.; KIM, D.-S.; KROON, P.; GHITZA, O. Objective Assessment of Speech and Audio Quality. **IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing**, v. 14, nov. 2006.

RODRÍGUEZ, D. Z. **Algoritmo para determinação da taxa de transmissão em uma rede IP**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2009.

RODRÍGUEZ, D. Z.; ABRAHÃO, J.; BEGAZO, D. C.; ROSA, R. L.; BRESSAN, G. Quality Metric to Assess Video Streaming Service over TCP considering Temporal Location of Pauses. **IEEE Transactions on consumer electronics**, 2013.

RODRIGUEZ, D. Z.; ROSA, R.; NUNES, R. D.; TAVARES, E. F. A. ASSESSMENT OF QUALITY-OF-EXPERIENCE IN TELECOMMUNICATION SERVICES. **International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDIWC)**, v. 61, n. 4, p. 241–259, out. 2016.

RODRIGUEZ, D. Z.; ROSA, R. L.; BRESSAN, G. Improving a Video Quality Metric with the Video Content Type parameter. **IEEE Latin America Transactions**, v. 12, n. 4, p. 740–745, June 2014. ISSN 1548-0992.

SANCHEZ-IBORRA, R.; CANO, M. D.; GARCIA-HARO, J. Performance evaluation of QoE in VoIP traffic under fading channels. In: **Computer and Information Technology (WCCIT), 2013 World Congress on**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.

SANTOS, J. P. P. dos. **Evaluation of IEEE 802.11a/g/p Transceiver for SDR**. Dissertação (Mestrado), jul. 2015.

SHANMUGAN, K. S. Simulation-Based Estimate of QoS for Voice Traffic over WCDMA Radio Links. In: **2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–4. ISSN 2161-9646.

SHARMA, V.; SHRIVASTAV, A.; JAIN, A.; PANDAY, A. BER performance of OFDM-BPSK,-QPSK,- QAM over AWGN channel using forward Error correcting code. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 2, n. 3, p. 1619–1624, jun. 2012.

SILVA, A. M. d. **Avaliação de voz em redes Peer-to-Peer**. 84 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, dez. 2005.

SILVA, V. A. **Modelagem Computacional de Canais de Comunicação Móvel**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

SILVA, V. d. Proposta de Metodologia para Avaliação de Redes de Voz sobre IP. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2006.

TANENBAUM, A. S. **Redes Computadores**. [S.l.]: Editora Campus, 2011. 632 p.

TAVARES, E. A.; RODRÍGUEZ, D. Z.; SILVA, R. L. Voice quality assessment in mobile devices considering different fading models. p. 21–22, Sept 2016.

TAVARES, E. F. A.; RODRIGUEZ, D. Z. Impacto do Desvanecimento do Sinal na Qualidade de uma Comunicação VoIP. **XXXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES**, SBrT 2016, p. 578–582, 2016.

TONG, Z.; ARIFANTO, M. S.; LIAU, C. F. Wireless transmission using universal software radio peripheral. In: **2009 International Conference on Space Science and Communication**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 19–23. ISSN 2165-4301.

TORRES, M. D.; VACAS, C. S.; ALTAMIRANO, C. D.; BERNAL, C. P. Design and implementation of a communications system for streaming real-time voice using SDR technology in USRP E110 and N210 devices. In: **Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV), 2014 IEEE**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.

UDP. **User Datagram Protocol**. [S.l.]: Internet Engineering Task Force, 1980. <https://tools.ietf.org/html/rfc768>. Acessado:02/11/2016.

VIANNA, B. d. A.; MOURA, N. T.; ALBUQUERQUE, C. V. N. de; REBELLO, V. E. F.; BOERES, C. adaMOS: Algoritmo MOS-Adaptativo para Fontes VoIP. **Universidade Federal Fluminense**, 2006.

WAV2RTP. **A tool to generate RTP data packets**. 2017. [Http://wav2rtp.sourceforge.net](http://wav2rtp.sourceforge.net). Acessado:14/01/2016.

YUHE, S.; JIE, X. New Solutions of VoIP on Multi-hop Wireless Network. In: **Control, Automation and Systems Engineering, 2009. CASE 2009. IITA International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 199–202.

APÊNDICE A – MOS P.862 e P563

Tabela 1 – Tabela com todos valores MOS obtidos com os modelos P.862 e P.563

Desvanecimento	PLR(%)	Doppler	P.563(MOS)	P.862(MOS)	Diferença(MOS)
Rayleigh	0,5	0	1,949	4,251	2,302
Rayleigh	0,5	5	1,742	3,137	1,395
Rayleigh	0,5	10	1,674	3,110	1,436
Rayleigh	0,5	15	1,58	3,031	1,451
Rayleigh	0,5	20	1,546	3,015	1,469
Rayleigh	0,5	50	1,163	2,652	1,489
Rayleigh	0,5	75	1,049	2,347	1,298
Rayleigh	0,5	100	1,064	2,199	1,135
Rayleigh	0,5	150	1,113	2,173	1,060
Rayleigh	0,5	200	1,066	2,115	1,049
Rician	0,5	0	2,268	4,266	1,998
Rician	0,5	5	2,399	3,710	1,311
Rician	0,5	10	2,331	3,516	1,185
Rician	0,5	15	2,3	3,440	1,140
Rician	0,5	20	2,282	3,444	1,162
Rician	0,5	50	1,995	3,372	1,377
Rician	0,5	75	1,62	3,176	1,556
Rician	0,5	100	1,538	3,093	1,555
Rician	0,5	150	1,501	3,095	1,594
Rician	0,5	200	1,465	3,058	1,593
Rayleigh	01	0	1,739	4,270	2,531
Rayleigh	01	5	1,714	3,149	1,435
Rayleigh	01	10	1,693	3,075	1,382
Rayleigh	01	15	1,618	3,042	1,424
Rayleigh	01	20	1,547	3,004	1,457
Rayleigh	01	50	1,147	2,652	1,505
Rayleigh	01	75	1,042	2,346	1,304

Continua na próxima página

Tabela 1 *Continuação da página anterior*

Desvanecimento	PLR(%)	Doppler	P.563(MOS)	P.862(MOS)	Diferença(MOS)
Rayleigh	01	100	1,05	2,208	1,158
Rayleigh	01	150	1,125	2,176	1,051
Rayleigh	01	200	1,07	2,119	1,049
Rician	01	0	2,41	4,285	1,875
Rician	01	5	2,374	3,733	1,359
Rician	01	10	2,324	3,536	1,212
Rician	01	15	2,309	3,459	1,150
Rician	01	20	2,292	3,446	1,154
Rician	01	50	1,983	3,379	1,396
Rician	01	75	1,645	3,184	1,539
Rician	01	100	1,517	3,077	1,560
Rician	01	150	1,515	3,093	1,578
Rician	01	200	1,475	3,060	1,585
Rayleigh	03	0	1,782	3,608	1,826
Rayleigh	03	5	1,666	2,949	1,283
Rayleigh	03	10	1,551	2,899	1,348
Rayleigh	03	15	1,479	2,845	1,366
Rayleigh	03	20	1,446	2,827	1,381
Rayleigh	03	50	1,091	2,499	1,408
Rayleigh	03	75	1,026	2,234	1,208
Rayleigh	03	100	1,024	2,111	1,087
Rayleigh	03	150	1,085	2,077	0,992
Rayleigh	03	200	1,047	2,026	0,979
Rician	03	0	2,23	3,614	1,384
Rician	03	5	2,312	3,382	1,070
Rician	03	10	2,271	3,214	0,943
Rician	03	15	2,225	3,174	0,949
Rician	03	20	2,24	3,152	0,912

Continua na próxima página

Tabela 1 *Continuação da página anterior*

Desvanecimento	PLR(%)	Doppler	P.563(MOS)	P.862(MOS)	Diferença(MOS)
Rician	03	50	1,901	3,076	1,175
Rician	03	75	1,574	2,939	1,365
Rician	03	100	1,485	2,858	1,373
Rician	03	150	1,481	2,850	1,369
Rician	03	200	1,42	2,834	1,414
Rayleigh	05	0	1,777	3,425	1,648
Rayleigh	05	5	1,64	2,864	1,224
Rayleigh	05	10	1,52	2,809	1,289
Rayleigh	05	15	1,453	2,783	1,330
Rayleigh	05	20	1,377	2,753	1,376
Rayleigh	05	50	1,089	2,448	1,359
Rayleigh	05	75	1,014	2,198	1,184
Rayleigh	05	100	1,027	2,071	1,044
Rayleigh	05	150	1,055	2,046	0,991
Rayleigh	05	200	1,042	1,994	0,952
Rician	05	0	2,269	3,445	1,176
Rician	05	5	2,311	3,233	0,922
Rician	05	10	2,261	3,125	0,864
Rician	05	15	2,22	3,065	0,845
Rician	05	20	2,197	3,065	0,868
Rician	05	50	1,908	3,000	1,092
Rician	05	75	1,587	2,860	1,273
Rician	05	100	1,481	2,785	1,304
Rician	05	150	1,478	2,784	1,306
Rician	05	200	1,446	2,763	1,317
Rayleigh	10	0	1,565	2,755	1,190
Rayleigh	10	5	1,411	2,481	1,070
Rayleigh	10	10	1,298	2,427	1,129

Continua na próxima página

Tabela 1 *Continuação da página anterior*

Desvanecimento	PLR(%)	Doppler	P.563(MOS)	P.862(MOS)	Diferença(MOS)
Rayleigh	10	15	1,261	2,371	1,110
Rayleigh	10	20	1,181	2,343	1,162
Rayleigh	10	50	1,019	2,111	1,092
Rayleigh	10	75	1,002	1,921	0,919
Rayleigh	10	100	1,004	1,825	0,821
Rayleigh	10	150	1,025	1,790	0,765
Rayleigh	10	200	1,005	1,743	0,738
Rician	10	0	1,918	2,758	0,840
Rician	10	5	2,02	2,698	0,678
Rician	10	10	1,989	2,616	0,627
Rician	10	15	1,939	2,566	0,627
Rician	10	20	1,923	2,551	0,628
Rician	10	50	1,605	2,490	0,885
Rician	10	75	1,317	2,391	1,074
Rician	10	100	1,265	2,342	1,077
Rician	10	150	1,278	2,341	1,063
Rician	10	200	1,222	2,319	1,097
Rayleigh	20	0	1,264	2,101	0,837
Rayleigh	20	5	1,093	1,990	0,897
Rayleigh	20	10	1,061	1,938	0,877
Rayleigh	20	15	1,042	1,923	0,881
Rayleigh	20	20	1,024	1,888	0,864
Rayleigh	20	50	1,001	1,726	0,725
Rayleigh	20	75	1	1,604	0,604
Rayleigh	20	100	1	1,533	0,533
Rayleigh	20	150	1	1,496	0,496
Rayleigh	20	200	1	1,452	0,452
Rician	20	0	1,45	2,104	0,654

Continua na próxima página

Tabela 1 *Continuação da página anterior*

Desvanecimento	PLR(%)	Doppler	P.563(MOS)	P.862(MOS)	Diferença(MOS)
Rician	20	5	1,451	2,095	0,644
Rician	20	10	1,392	2,041	0,649
Rician	20	15	1,356	2,026	0,670
Rician	20	20	1,322	2,013	0,691
Rician	20	50	1,191	1,961	0,770
Rician	20	75	1,05	1,901	0,851
Rician	20	100	1,041	1,869	0,828
Rician	20	150	1,029	1,867	0,838
Rician	20	200	1,016	1,852	0,836

APÊNDICE B – *Script* utilizado para emissão e recepção de pacotes UDP.

Figura 1 – *Script* executado no emissor

```

import socket, sys
#ajusta a rede em broadcast e tamanho do payload
buf =384
dest = ('192.168.1.255', 5000)
s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
s.setsockopt(socket.SOL_SOCKET, socket.SO_BROADCAST, 1)
#le o arquivo e envia
f=open("or105.wav", "rb")
data = f.read(buf)
cont = 1
s.sendto(data, dest)
while (data):
    if(s.sendto(data, dest)):
        data = f.read(buf)
        cont = cont + 1

f.close()
s.close()
print cont

```

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 2 – *Script* executado no receptor

```

import socket

#ajusta porta e conexao
host= ""
port = 5000
s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
s.bind((host, port))
buf=384
#escreve o nome do arquivo com o nome do original
#modulacao, TX, RX, quantidade de pacote e distancia
f = open('./or105_bpsk_tx_rx_384_dist.wav', 'wb')
data, addr = s.recvfrom(buf)
f.write(data)
#escreve o arquivo recebido
while True:
    data, addr = s.recvfrom(buf)
    f.write(data)
    print "Received File:", data.strip()

```

Fonte: Elaborado pelo autor