

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAELA SCHROEDER

**IMPLEMENTAÇÃO DA CODIFICAÇÃO ANALÓGICA
PARAMÉTRICA PARA APLICAÇÃO EM REDES DE SENSORES
SEM FIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

RAFAELA SCHROEDER

**IMPLEMENTAÇÃO DA CODIFICAÇÃO ANALÓGICA
PARAMÉTRICA PARA APLICAÇÃO EM REDES DE SENSORES
SEM FIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Engenheiro Eletricista”.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante.

CURITIBA

2017

Rafaela Schroeder

Implementação da Codificação Analógica Paramétrica Para Aplicação em Redes de Sensores Sem Fio

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 20 de novembro de 2017.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de
Curso de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Glauber Gomes de Oliveira Brante, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Glauber Gomes de Oliveira Brante, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme de Santi Peron, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme Luiz Moritz, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Agradeço meu orientador, Glauber Brante, pela sua ajuda e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Rosângela Karger e Volnir Valdemar Schroeder, pelo amor e apoio incondicional que sempre me propiciaram.

Gostaria de registrar minha gratidão a todos os meus amigos, que se tornaram minha segunda família no decorrer dos anos.

E, por último, mas não com menor importância, meus agradecimentos a todos professores que convivi na graduação e que contribuíram para a minha formação profissional.

RESUMO

SCHROEDER, Rafaela. Implementação da Codificação Analógica Paramétrica Para Aplicação em Redes de Sensores sem Fio. 2017. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

Este trabalho apresenta a codificação analógica paramétrica como uma alternativa para superar problemas comuns na transmissão digital. Para isso, o método realiza a codificação conjunta da fonte e canal em apenas uma etapa, de forma que o atraso na comunicação é minimizado, ao contrário do que ocorre em um sistema digital, que utiliza blocos longos de redundância na codificação de canal para aproximar o desempenho do limite teórico. Assim, uma amostra com duas coordenadas é comprimida em apenas uma, que é um ângulo da curva da espiral de Arquimedes. A implementação ocorreu utilizando um sinal de áudio que foi transmitido via placa de som. Esse canal de comunicação apresenta várias adversidades para a transmissão, tais como, as conversões analógico/digitais e o limite de processamento. Para avaliar o desempenho do método proposto, aplicou-se dois valores distintos de frequência de amostragem, a frequência original do sinal e a frequência dividida por dois, devido a compressão. Assim, foi feita uma comparação entre os dois cenários por meio do cálculo da taxa de distorção do sinal e por meio dos espectros de frequência, onde é possível perceber o ruído no sinal recebido.

Palavras-chave: Codificação Analógica.

ABSTRACT

SCHROEDER, Rafaela. Implementation of Parametric Analog Coding to Application in Wireless Sensor Networks. 2017. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

This work presents the parametric analog coding as an alternative to overcome common problems in digital transmission. To achieve this, the method performs the codification together with the adapter and canal in only one stage, so that the delay in communication is minimized – contrary to what happens in a digital system, which uses long blocks of redundancy in the codification of a canal to approximate the theoretical limit performance. Therefore, a sample with two coordinates is compressed in just one, which is an angle of the spiral of Archimedes. The implementation has occurred using an audio signal that was transmitted by sound card. This channel of communication presents several adversities to the transmission, such as the analog-to-digital conversions and the processing limit. To evaluate the performance of the proposed method, two distinct values of sampling frequency were applied: the original frequency of the signal and the frequency divided by two, due to compression. In this way, a comparison was made between the two scenarios through the calculation of the rate of the signal distortion and through the frequency spectrums, where is possible to notice the noise on the received signal.

Keyword: Analog coding.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 TEMA	9
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	10
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo Geral.....	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 JUSTIFICATIVA	12
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	13
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2. REDES DE SENSORES SEM FIO E TRANSMISSÃO DIGITAL	15
3. TRANSMISSÃO ANALÓGICA PARAMÉTRICA	20
3.1 CONCEITOS	20
3.2 CODIFICAÇÃO ANALÓGICA.....	22
3.2.1 Codificação 1:1	22
3.2.2 Codificação 2:1	23
3.3 OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CODIFICAÇÃO.....	25
4. IMPLEMENTAÇÃO	29
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
5.1 TRANSMISSÃO COM FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM ORIGINAL	35
5.2 TRANSMISSÃO COM FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM REDUZIDA	38
6. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de uma RSSF.	15
Figura 2 - Efeitos do desvanecimento em pequena e larga escala na potência do sinal recebido.	17
Figura 3 - Redundâncias inseridas na codificação de canal.....	18
Figura 4 - Diagrama em blocos de uma transmissão sem fio digital.	19
Figura 5 - Mapeamento da amostra $X=(x_1,x_2)$ na curva da espiral de Arquimedes.	24
Figura 6 - Diagrama em blocos da codificação analógica paramétrica em um esquema de codificação 2:1.....	25
Figura 7 - Espiral de Arquimedes. (a) $\Delta= 2$, (b) $\Delta= 4$, (c) $\Delta= 6$ e (d) $\Delta= 8$	26
Figura 8 - Desempenho de uma transmissão sem fio com distribuição Rayleigh em termos de SDR (dB) e CSNR (dB). (a) $\alpha = 2$ (b) $\alpha = 4$	27
Figura 9 - Desempenho da transmissão sem fio com distribuição Rayleigh com e sem o filtro MMSE.	27
Figura 10 - Esquema de comunicação via placa de som simplificado.....	30
Figura 11 - Comunicação via placa de som.....	31
Figura 12 - Recepção do sinal no MATLAB.....	33
Figura 13 - Sistema de comunicação implementado.....	34
Figura 14 - Comparação entre o sinal transmitido e recebido no esquema analógico 2:1.....	35
Figura 15 - Sinal original e dos sinais resultantes para os três casos.	37
Figura 16 –Sinal transmitido e sinais resultantes para os três casos com frequência de amostragem reduzida.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados da codificação analógica para $F_s=8196$ Hz.	36
Tabela 2 - Resultados da codificação analógica para $F_s=4098$ Hz.	38

1. INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Recentemente houve um avanço significativo na área de sistemas microcontrolados e comunicação sem fio. O desenvolvimento de sensores multifuncionais de baixo-custo, baixo consumo de energia e pequena dimensão alavancou redes de sensores sem fio (RSSFs) (AKYILDIZ et al, 2002). O surgimento desta tecnologia propiciou avanços em várias áreas, e, conseqüentemente, despertou um amplo interesse na sociedade e na indústria.

As RSSFs são um tipo de rede *ad hoc*, ou seja, uma rede na qual os dispositivos se comunicam diretamente e de forma colaborativa. São constituídas de nós sensores, que são os responsáveis pelo processamento dos dados, memória e interface de comunicação sem fio. Além disso, têm energia limitada e mecanismos de autoconfiguração que evitam a perda de dados (LOUREIRO et al, 2003).

Os nós coletam dados sobre o fenômeno desejado, realizam o processamento local e podem enviar a informação de forma coordenada para outros nós vizinhos, para o usuário ou para o *data sink* (LOUREIRO et al, 2003). Ao enviar o dado coletado para um nó vizinho, este transmitirá para outro nó próximo e assim por diante, podendo dessa forma prolongar o tempo de vida útil do sensor, considerando que a distância entre os nós é pequena, o transmissor não precisará aumentar a potência do sinal (TAVARES, 2002).

Do ponto de vista comercial e industrial, essa tecnologia apresenta um baixo custo, facilidade de implementação, grande densidade espacial de sensores e cobertura uniforme da área de sensoriamento (MOREIRA, 2006). Além disso, pode-se empregar uma RSSF para diversas aplicações, como por exemplo (AKYILDIZ et al, 2002):

- Aplicações militares;
- Aplicações ambientais;
- Aplicações médicas;
- Aplicações domésticas;
- Outras aplicações comerciais.

Uma das principais vantagens desta tecnologia é o monitoramento de áreas remotas sem o contato humano direto, tendo em vista que este poderia trazer riscos à saúde (RUIZ et al, 2004). Ademais, é usual empregar uma RSSF na área de produção industrial para verificar se as peças da linha de montagem apresentam problemas de aquecimento ou vazamento de gás e para monitorar a extração de petróleo (LOUREIRO et al, 2003).

Apesar de apresentar muitos benefícios, esta tecnologia apresenta impasses na sua utilização, principalmente em relação ao projeto de *hardware* e protocolos de comunicação (MOREIRA, 2006). Um dos principais problemas enfrentados pelos sensores é o próprio meio de comunicação sem fio, que ocasiona flutuações na potência recebida pelos nós. Além disso, a potência de transmissão é limitada, o que somado ao fator anterior, causa erros de transmissão.

Portanto, é preciso aplicar técnicas para aumentar a robustez do sistema de comunicação. Dentre os métodos, pode-se citar a codificação de canal, que insere redundâncias na palavra código transmitida, e a codificação analógica. Devido a fácil aplicação e por corrigir problemas de atraso na comunicação, este trabalho aborda a implementação da codificação analógica paramétrica.

Esta técnica, diferentemente da transmissão analógica tradicional, realiza de forma conjunta a codificação de fonte e codificação de canal, podendo atingir a capacidade teórica do canal de transmissão.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

No sentido fundamental, a comunicação envolve implicitamente a transmissão de uma informação de um ponto a outro, por uma sucessão de processos (HAYKIN, 2004. p.17). No caso de um sistema de comunicação digital os processos são:

- i. Um sinal de mensagem é gerado na fonte.
- ii. No transmissor, no sinal de mensagem é aplicada a codificação de fonte, a codificação de canal e, por último, a modulação apropriada para transmissão através do canal sem fio.

iii. No receptor, o sinal recebido passa pelo processo inverso ao do transmissor. Por fim, o usuário recebe uma estimativa reconhecível do sinal de mensagem original (HAYKIN, 2004).

A codificação da fonte é necessária para tornar a informação (sinal de mensagem) compatível com o processamento do sinal e reduzir informações redundantes. Dependendo do método utilizado, podem ocorrer distorções entre a fonte original e a fonte codificada.

Sendo assim, um dos métodos mais utilizados é o Código de Huffman, visto que este não apresenta os problemas de distorção mencionados acima. A ideia consiste, basicamente, em codificar os símbolos em um dicionário já conhecido. Considerando que os símbolos que ocorrem com mais frequência possuem palavras-código menores, pode-se inferir que este método realiza uma compressão dos símbolos, o que é ótimo do ponto de vista energético (SAYOOD, 2006).

Além disto, a inevitável presença de ruído em um sistema de comunicação, principalmente a comunicação sem fio, causa discrepâncias entre os símbolos transmitidos e recebidos pelo usuário (HAYKIN, 2004). Para melhorar o desempenho do sistema é usual fazer uso da codificação de canal. A codificação de canal introduz redundâncias à informação a ser transmitida, a fim de reconstruir a sequência da fonte original com a maior precisão possível. Dessa forma, pode-se utilizar duas técnicas distintas de codificação de canal, que são a codificação por blocos e a convolucional.

Para aproximar o desempenho do sistema digital da capacidade do canal, na codificação de canal são inseridos blocos muito longos (ou seja, com mais redundância). Como consequência, ocorre atraso na comunicação, tendo em vista que o atraso se relaciona com a quantidade de informação que está inserida entre essa redundância.

Neste contexto, a codificação analógica paramétrica torna-se uma solução atrativa porque codifica a fonte e o canal ao mesmo tempo, símbolo a símbolo, gerando um atraso que tende a zero, sendo da ordem de transmissão de um símbolo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O projeto tem como objetivo implementar a codificação analógica paramétrica e a codificação digital. Além disso, será feita uma comparação envolvendo o desempenho da codificação analógica paramétrica em dois cenários e o desempenho ótimo teoricamente atingível (do inglês OPTA).

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar a transmissão digital e avaliar as suas implicações;
- Conhecer a codificação analógica e realizar considerações sobre seu desempenho teórico e dificuldade de aplicação;
- Compreender as diferenças entre a transmissão analógica e a digital;
- Implementar a transmissão digital e analógica em *hardware* e avaliar seus respectivos desempenhos em termos de qualidade de transmissão e SDR (*Signal Distortion Ratio*);
- Comparar o desempenho da transmissão analógica para dois cenários distintos e o desempenho ótimo teoricamente atingível da transmissão analógica.

1.4 JUSTIFICATIVA

Além do setor industrial, outros setores da sociedade têm se interessado em melhorar a transmissão de dados sem fio. Consequentemente, ocorreu o surgimento de diversos estudos sobre o tema, (LORINCZ et al, 2004) e (MAINWARING et al, 2002). Uma das soluções viáveis para otimizar a comunicação sem fio é optar pela codificação analógica paramétrica.

Os sistemas de comunicação sem fio podem ser baseados em dois tipos de transmissão: digital e analógica. Um sistema de comunicação digital baseado na separação entre fonte e codificação de canal pode apresentar desempenho ótimo quando se trata um canal do tipo AWGN (em inglês *Additive White Gaussian Noise*) (SHANNON, 1948). Entretanto, quando esses sistemas são implementados de forma prática ocorre o surgimento de algumas desvantagens. Ao tentar aproximar o desempenho a capacidade limite definida por Shannon, a

complexidade do sistema cresce consideravelmente e ocorre o surgimento de atrasos significativos na comunicação. Além disso, caso seja necessário modificar a taxa de distorção, a única solução seria remodelar todo o sistema digital (FRESNEDO et al, 2011).

Como alternativa, pode-se utilizar a comunicação analógica, considerando que ao contrário dos sistemas de comunicação digitais, o atraso na comunicação é mínimo, tendo em vista que a codificação da fonte e do canal é feita em apenas uma etapa.

Portanto, a ideia consiste em aplicar uma codificação conjunta fonte-canal, assim, o sistema realizará compressão analógica dos símbolos, e, conseqüentemente, o atraso será nulo. Ademais, é importante salientar que a complexidade da codificação dos símbolos é baixa, já que são aplicadas funções simples para isso. Recentemente, foram propostos diversos estudos sobre este tema (BRANTE; SOUZA; GARCIAFRIAS, 2011), (FRESNEDO et al, 2013) e (GARCÍA-NAYA et al, 2011), e, cada vez mais as estratégias de aplicação da codificação analógica paramétrica têm sido aperfeiçoadas.

Devido à importância para a sociedade, busca-se otimizar as formas de transmissão de dados sem fio. Este trabalho tem como objetivo implementar e avaliar o desempenho da codificação analógica paramétrica, com o intuito de fornecer uma solução de caráter inovador para aplicação em RSSF.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

À princípio será realizado um estudo teórico sobre os assuntos que serão abordados ao longo do trabalho, visando aprofundar os conhecimentos sobre a área de estudo. A partir disso, pode-se iniciar simulações utilizando o *software* MATLAB para analisar o desempenho teórico das duas codificações em relação ao limite teórico.

Na implementação, além do ruído gaussiano branco e do desvanecimento (perturbações típicas de uma comunicação sem fio), o desempenho do *hardware* também influencia negativamente o desempenho. Foi feita a transmissão de um sinal de áudio em dois cenários distintos. Para complementar o sistema de comunicação, utilizou-se o MATLAB para as etapas de transmissão e recepção

dos sinais, visto que este apresenta diversas funções na área de processamento de sinais.

Finalmente, os resultados simulados serão comparados para diferentes parâmetros da espiral de Arquimedes, com o intuito de avaliar o desempenho mais eficaz.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso foi dividido em 6 partes, conforme apresentado a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo foram abordados conceitos gerais sobre o trabalho. Além disso, foi feita uma apresentação deste, incluindo tema, delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos, justificativa e procedimentos metodológicos.

Capítulo 2 – RSSF e a Transmissão Digital: Aqui serão discutidos conceitos gerais sobre RSSF, incluindo restrições que levam a necessidade de otimizar a transmissão dos dados. Além disso, a transmissão digital será estudada e o seu desempenho teórico avaliado.

Capítulo 3 – Transmissão Analógica Paramétrica: Apresentação dos conceitos envolvendo a transmissão analógica paramétrica, que codifica o símbolo fonte utilizando a espiral de Arquimedes.

Capítulo 4 – Implementação: Aqui serão mostrados os materiais utilizados e as etapas que ocorreram na implementação do método proposto.

Capítulo 5 – Análise de resultados: Aqui ocorrerá a avaliação do desempenho do esquema analógico.

Capítulo 6 – Conclusão: Discussão sobre o nível de complexidade de aplicação da codificação analógica paramétrica, sugestão de trabalhos futuros e possíveis pontos de otimização na implementação.

2. REDES DE SENSORES SEM FIO E TRANSMISSÃO DIGITAL

Redes de sensores sem fio (RSSFs) são redes formadas por um conjunto de nós sensores, que podem interagir com o ambiente onde estão inseridos, monitorando e controlando parâmetros físicos (LOUREIRO et al, 2003). A utilização desta tecnologia foi possível devido a avanços recentes na área de microprocessadores, que permitiu a criação de nós sensores sem fio que utilizam radiofrequência para se comunicar (LOUREIRO et al, 2003).

Essencialmente, uma RSSF é formada por nós sensores, bateria, transceptor, processador e memória. Os nós sensores são dispositivos autônomos de pequena dimensão que podem ser lançados sob uma área de difícil acesso, e sem intervenção humana, formam uma rede *ad hoc*. Essa rede coleta dados sobre o fenômeno de interesse, processa a informação e pode transmitir para o *data sink* ou para o nó vizinho, que posteriormente irá transmitir para a estação base (RUIZ et al, 2004). A Figura 1 a seguir ilustra o modelo de uma rede de sensores sem fio.

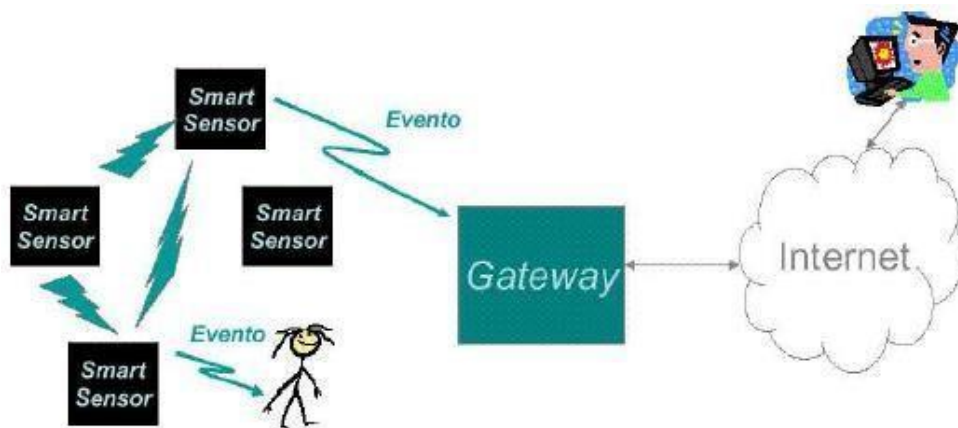


Figura 1 - Modelo de uma RSSF.

Fonte - LOUREIRO et al (2003, p. 11).

O projeto de uma RSSF depende diretamente de sua aplicação, por isso os componentes utilizados devem ser adequados ao monitoramento do fenômeno de interesse. Tendo em vista que o consumo de energia é um fator crítico em uma RSSF, a escolha da bateria ideal é uma etapa importante do projeto. Para isso, deve-se considerar o volume de dados, a capacidade inicial e as condições de temperatura (LOUREIRO et al, 2003).

Apesar de ser uma solução adequada para vários tipos de monitoramento e controle de ambientes, a RSSF apresenta diversos desafios para os projetistas. Além da energia dos sensores, o espectro eletromagnético, que abrange a banda de frequências dos sistemas de comunicação sem fio, também é um recurso escasso e precisa ser alocado para diferentes tipos de aplicações. Por esse motivo, ele é controlado por regulamentos regionais e globais (GOLDSMITH, 2005). No Brasil, a ANATEL tem o dever de disciplinar e fiscalizar o uso do espectro de frequências.

Entretanto, o maior desafio para projetar um sistema de comunicação sem fio são as limitações impostas pela natureza imprevisível do canal. Tendo em vista que normalmente a comunicação sem fio ocorre sem linha visada de propagação, é comum que o sinal sofra perdas de percurso devido a difração e reflexão (RAPPAPORT, 1996). Essas perdas são denominadas desvanecimento e podem ser divididas em duas categorias:

- Desvanecimento em larga escala: Caracteriza a intensidade do sinal em grandes distâncias. Ocorre devido à perda de percurso do sinal e ao sombreamento. A perda de percurso é causada pela dissipação de energia irradiada pelo transmissor, enquanto o sombreamento é provocado por obstáculos entre o transmissor e receptor, que causam atenuações ou reflexões no sinal (GOLDSMITH, 2005).
- Desvanecimento em pequena escala: Descreve a intensidade do sinal em distâncias curtas. Causada por interferências de duas ou mais versões do sinal que chegam no receptor através de caminhos múltiplos e tempos diferentes. Essas ondas se combinam na antena do receptor, resultando em um sinal com grandes variações de amplitude e fase (RAPPAPORT, 1996).

Os efeitos de pequena escala são os responsáveis por flutuações rápidas na potência do sinal recebido, enquanto os efeitos de larga escala causam flutuações mais graduais, como pode ser visto na Figura 2. Esta mostra uma linha mais suave que diminui com a distância, representando o desvanecimento em larga escala, além de uma linha com variações bastante abruptas, que representa as flutuações instantâneas do canal sem fio devido ao desvanecimento de pequena escala. Como consequência, o sinal experimenta flutuações aleatórias

no tempo, que dificultam o projeto de um sistema com desempenho confiável (GOLDSMITH, 2005).

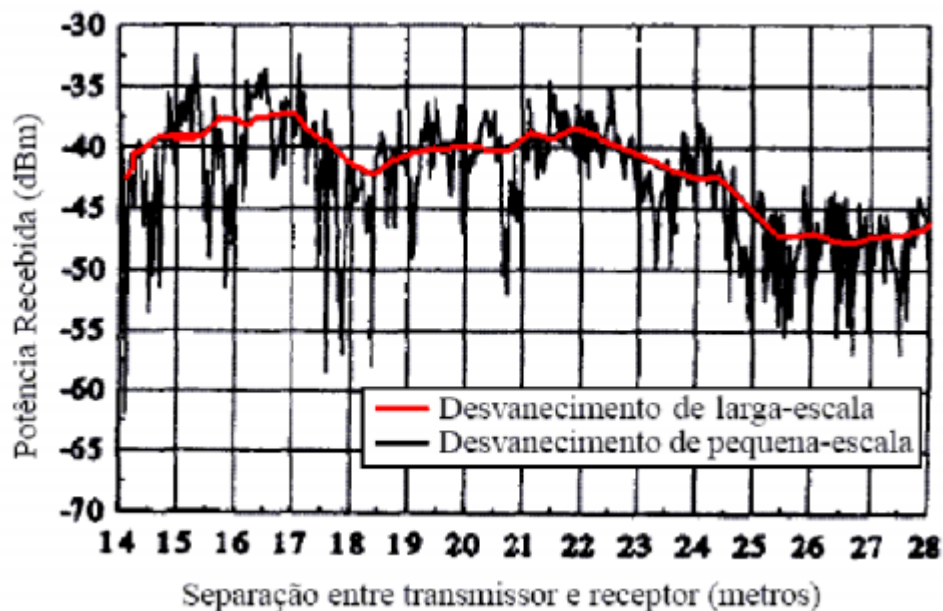


Figura 2 - Efeitos do desvanecimento em pequena e larga escala na potência do sinal recebido.

Fonte: RAPPAPORT (1996, p.106, adaptado).

Em um sistema de comunicação existem três elementos essenciais: o transmissor, o canal e o receptor. No caso de uma RSSF, o sensor coleta amostras sobre determinada região. Em seguida, o transmissor realiza a codificação da fonte, que consiste em converter os dados para uma forma adequada à transmissão e reduzir redundâncias. Ainda no transmissor, deve-se escolher a forma adequada de modulação, que é o meio de transporte do sinal, para então, transmitir os dados através do canal sem fio. Quando o sinal chega no receptor, é realizado o processo inverso, e, por fim, é feita uma estimativa do sinal recebido (HAYKIN, 2004).

No entanto, devido aos efeitos citados anteriormente, e a inevitável presença de ruído, o sinal que chega no receptor apresenta distorções. Considerando que a premissa fundamental de um sistema de comunicação é transferir dados de um dispositivo para outro com total precisão (FOROUZAN, 2009), deve-se aplicar artifícios para tornar a comunicação confiável.

Em uma transmissão digital, uma das técnicas mais utilizadas é a codificação de canal, que se subdivide em codificação de blocos e convolucional. Essencialmente, o método consiste em inserir redundâncias no codificador de

canal para detectar divergências entre símbolos enviados e recebidos. Assim, são inseridos *bits* adicionais na sequência, que são descartados logo após a verificação dos dados de transmissão.

A Figura 3 mostra o fluxo de dados do transmissor até o receptor. Inicialmente, os dados passam por um dispositivo que seleciona as redundâncias apropriadas. Em seguida, esses *bits* são inseridos na sequência de dados. Nessa etapa, são utilizados blocos longos com muita redundância com o intuito de aproximar o desempenho do máximo teórico. Em seguida, é feita a transmissão através do canal sem fio, e, ao chegar no receptor é aplicada uma função de detecção de erros. Caso o fluxo de dados passe por todas etapas de verificação com êxito, a informação redundante é descartada e os dados originais são aceitos como íntegros (FOROUZAN, 2009).

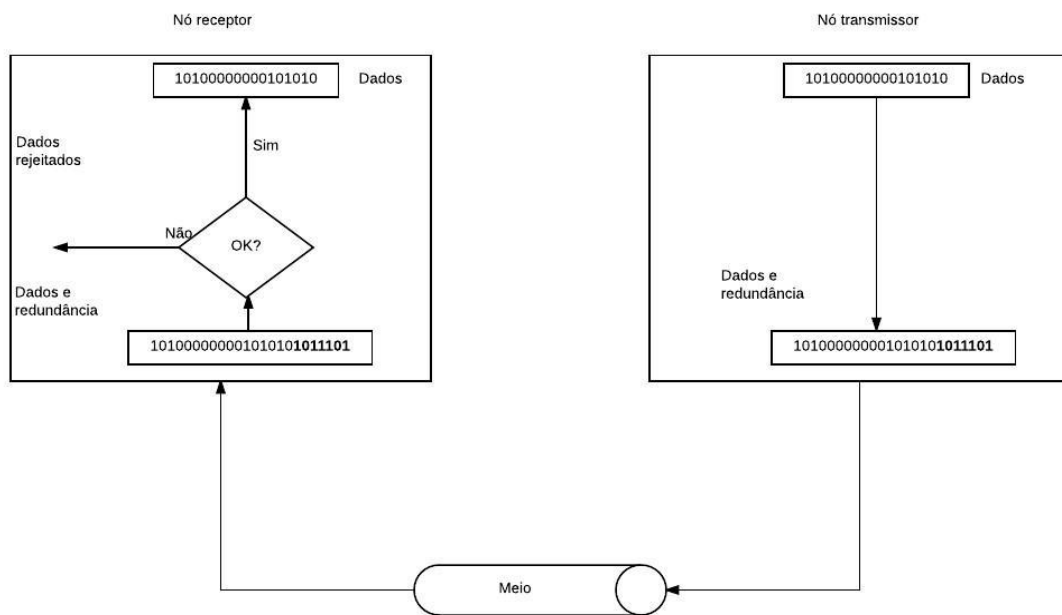


Figura 3 - Redundâncias inseridas na codificação de canal.

Fonte: FOROUZAN (2009, p.235, adaptado).

A transmissão digital, incluindo a codificação de fonte e canal, é exemplificada por meio do diagrama de blocos da Figura 4:

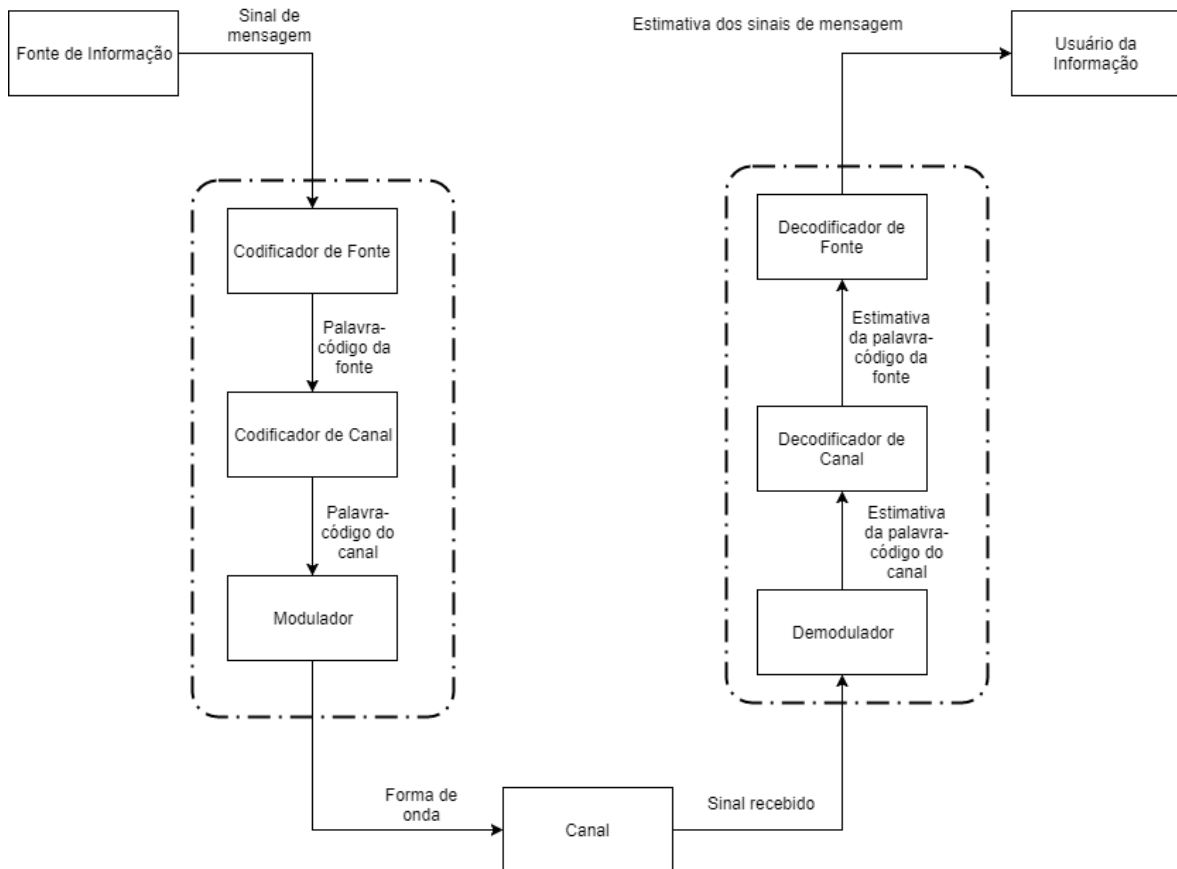


Figura 4 - Diagrama em blocos de uma transmissão sem fio digital.

Fonte: HAYKIN (2004, p.39, adaptado).

Entretanto, ainda que seja eficaz para melhorar o desempenho do sistema, a codificação de canal gera atrasos na comunicação pois são utilizadas sequências bastante longas. Além disso, um sistema digital é difícil de ser remodelado, caso ultrapasse os valores estipulados no projeto inicial. Ao contrário do método analógico, que pode ser remodelado facilmente alterando os parâmetros de codificação. Posto isso, este trabalho sugere a implementação da codificação analógica paramétrica, que será abordada no capítulo posterior.

3. TRANSMISSÃO ANALÓGICA PARAMÉTRICA

3.1 CONCEITOS

Considerando as adversidades da transmissão digital, que foram mencionadas no capítulo 2, a transmissão analógica pode ser empregada como uma alternativa para manter a robustez do sistema de comunicação. Além disso, outro fator benéfico neste método, é que ele opera símbolo a símbolo, tornando o atraso na transmissão dos dados mínimo.

Esta técnica consiste em codificar analogicamente N símbolos fonte i.i.d. (independentes e identicamente distribuídas) em K símbolos do canal, e, em seguida, transmitir através do canal sem fio. Quando os dados chegam ao receptor, é feita uma estimativa (denominada \hat{X}) do vetor fonte (X), utilizando o vetor de observações recebidas (Y). No entanto, o canal sem fio é um meio complexo e aleatório, por isso, o sinal recebido sofre o efeito do desvanecimento h . Tendo em vista que se trata de uma transmissão sem linha visada, o modelo mais indicado para modelar o desvanecimento é a distribuição de Rayleigh. Esse assunto é tratado com mais detalhes em (RAPPAPORT, 1996) e (TSE, 2005).

Além disso, a presença indesejada do ruído pode distorcer o sinal transmitido. Em um sistema de comunicação, idealiza-se o ruído como um ruído Gaussiano branco, cuja densidade espectral de potência é independente da frequência de operação (HAYKIN, 2004). Sendo assim, pode-se equacionar o sinal recebido (Y) da seguinte forma:

$$Y = X \cdot h + W, \quad (1)$$

onde X é o vetor de amostras fonte, h é o desvanecimento do canal sem fio e W é o ruído branco.

Quando o sinal chega ao receptor, é necessário decodificar os símbolos recebidos e fazer a estimativa das amostras. Neste processo, pode-se empregar dois tipos de decodificadores: O ML (em inglês *Maximum Likelihood*) e o MMSE (em inglês *Minimum Mean Squared Error*), que serão abordados em detalhes na seção 3.2. Após esta etapa, é importante determinar a distorção entre o vetor de

amostras transmitidas e as estimativas feitas no receptor, para tanto, utiliza-se o MSE (em inglês *Mean Squared Error*), de acordo com

$$MSE = \frac{\{\|x-\hat{x}\|^2\}}{N}, \quad (2)$$

sendo que $\|\cdot\|$ denota a distância Euclidiana entre a amostra X e a estimativa \hat{X} . Conseqüentemente, é possível avaliar a qualidade da transmissão sem fio em termos de SDR (em inglês *Signal-to-Distortion Ratio*) e CSNR (em inglês *Channel Signal-to-Noise Ratio*), definidas como

$$SDR = \log_{10} 10 \left(\frac{\sigma_x^2}{MSE} \right) \quad (3)$$

e

$$CSNR = \log_{10} 10 \left(\frac{\sigma_h^2}{\sigma_w^2} \right) \quad (4)$$

onde σ_x^2 é a energia dos símbolos a serem transmitidos, σ_h^2 é a variância do desvanecimento que segue distribuição Rayleigh, e, por fim, σ_w^2 é a variância do ruído Gaussiano branco.

A CSNR define a relação entre a potência do sinal e do ruído. Sendo assim, entende-se que uma transmissão com bom desempenho apresenta uma relação sinal ruído elevada. Um exemplo prático deste conceito é a dificuldade de conversar com pessoas próximas em uma festa, onde existem diversas fontes de ruído, como a música alta. Em um ambiente assim, o ruído é tão elevado que prejudica a qualidade da comunicação, logo, a relação sinal ruído é baixa.

O desempenho ótimo teoricamente atingível (em inglês *OPTA*) de uma transmissão pode ser obtido igualando a capacidade do canal (C) à função de taxa de transmissão (R_s) (BERGER,1967). A capacidade do canal é definida como a capacidade máxima de transmissão deste. Tendo em vista que se trata de um canal sem fio com distribuição Rayleigh e perfeito estado de conhecimento de canal no receptor, a equação de C é:

$$C = K \int_h \log_2 \left(1 + \frac{h^2}{\sigma_w^2} \right) p(h) dh, \quad (5)$$

sendo que $p(h)$ representa a função densidade de probabilidade do canal.

Sabendo que existe um limite de distorção máximo no receptor, R_s é a taxa que a comunicação pode ocorrer sem exceder esse limite. Em um sistema real, essa taxa depende da CSNR. Por exemplo, quando a CSNR está baixa, é

necessário diminuir a taxa de transmissão para evitar uma distorção muito alta. A função de taxa de distorção é expressa por

$$R_s = N \log_2 \left(\frac{\sigma_x^2}{MSE} \right) \quad (6)$$

Igualando as duas equações e realizando uma troca de base logarítmica para a base 10 definida por:

$$N \log_{10} \left(\frac{\sigma_x^2}{MSE} \right) = K \int_h \log_2 \left(1 + \frac{h^2}{\sigma_w^2} \right) p(h) dh \quad (7)$$

A codificação analógica visa otimizar a transmissão de dados sem fio, e, além disso, apresenta uma implementação simples. Entretanto, existem detalhes primordiais para que a performance desta se aproxime do OPTA. A próxima seção trata detalhadamente do equacionamento da codificação analógica. Além disso, é demonstrada a influência dos parâmetros de codificação no desempenho da transmissão e os prós e contras dos decodificadores ML e MMSE.

3.2 CODIFICAÇÃO ANALÓGICA

A codificação analógica é uma alternativa atrativa por fazer uso de funções simples na codificação de $N:K$, onde N são os símbolos fonte e K são os símbolos de canal. O mais usual na literatura são esquemas 2:1, 3:1 ou 4:1, como pode ser visto no trabalho de (FLOOR; RAMSTAD, 2006). Na implementação, inicialmente, será aplicado o esquema de codificação 1:1, bem como o esquema de codificação 2:1 detalhado na subseção 3.2.2.

3.2.1 Codificação 1:1

No esquema de codificação 1:1, um símbolo fonte é codificado em um símbolo de canal, que é transmitido através do canal sem fio. Neste esquema não é preciso aplicar função de mapeamento, ao contrário do esquema 2:1, que será visto na subseção 3.2.2. Essa é uma vantagem importante que torna implementação desse sistema mais fácil. Sendo assim, o símbolo recebido é designado por (CHUNG, 2000)

$$y = x \cdot h + w \cdot \sqrt{\gamma}, \quad (8)$$

sendo $\sqrt{\gamma}$ um fator utilizado para normalizar o vetor fonte em energia unitária. No receptor, a decodificação pode ser feita utilizando o método MMSE, da seguinte maneira (BRANTE; SOUZA; GARCIA-FRIAS, 2013)

$$\hat{x} = E\{x|y\} = \frac{h}{h^2 + \gamma \cdot \sigma_w^2} \cdot y, \quad (9)$$

onde h é o desvanecimento, γ é o fator utilizado para normalizar a energia unitária, σ_w^2 é a variância do ruído Gaussiano branco e y é o vetor de amostras recebidas.

3.2.2 Codificação 2:1

Nesta subseção será abordado o esquema de compressão 2:1, ou seja, dois símbolos fontes serão codificados em um único símbolo de canal. Basicamente, neste esquema analógico, o codificador consiste em uma função $M_\Delta(\cdot)$, que mapeia o vetor fonte X na superfície de uma curva chamada espiral de Arquimedes e é limitada por Δ (distância entre os braços da espiral), uma função inversível $T_\alpha(\cdot)$ e o fator $\frac{1}{\sqrt{\gamma}}$ utilizado para normalizar o vetor fonte em energia unitária.

Sendo assim, uma fonte gera amostras com distribuição de probabilidade Gaussiana ou normal. Desse modo, uma amostra $X = (x_1, x_2)$ tem as suas coordenadas codificadas na espiral definida por (HEKLAND; FLOOR; RAMSTAD, 2009)

$$\begin{cases} x_{\theta,1} = \text{sign}(\theta) \frac{\Delta}{\pi} \theta \text{sen} \theta \\ x_{\theta,2} = \frac{\Delta}{\pi} \theta \text{cos} \theta \end{cases} \quad \text{para todo } \theta \in \mathbb{R} \quad (10)$$

onde Δ é a distância entre os braços da espiral e θ é o ângulo da origem até o ponto $X_\theta = (x_{\theta,1}, x_{\theta,2})$, que é a versão mapeada de X na curva da espiral.

Após essa etapa, é feito o mapeamento do vetor fonte X de acordo com

$$M_\Delta = \min(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2) \quad (11)$$

sendo que $\hat{\theta}_1$ e $\hat{\theta}_2$ representam o mapeamento de X nos braços positivos e negativos da espiral, respectivamente:

$$\hat{\theta}_1 = \underset{\theta > 0}{\text{argmin}} \left\{ \left(x_1 - \frac{\Delta}{\pi} \theta \text{sen} \theta \right)^2 + \left(x_2 - \frac{\Delta}{\pi} \theta \text{cos} \theta \right)^2 \right\}, \quad (12)$$

$$\hat{\theta}_2 = \operatorname{argmin}_{\theta < 0} \left\{ \left(x_1 + \frac{\Delta}{\pi} \theta \operatorname{sen} \theta \right)^2 + \left(x_2 - \frac{\Delta}{\pi} \theta \operatorname{cos} \theta \right)^2 \right\}$$

Portanto, as amostras geradas pela fonte serão alocadas em pares, por exemplo, (x_1, x_2) . Cada par representa um ponto em \mathbb{R}^2 , que é denominado X . Assim, ao realizar o mapeamento na curva da espiral de Arquimedes, busca-se encontrar o ponto mais próximo de X , chamado de X_θ .

Como consequência, ocorre uma distorção entre a amostra fonte e a que foi mapeada na espiral, tendo em vista que é impossível mapear a amostra exatamente no mesmo ponto de X , pois a espiral é representada apenas por ângulo. A Figura 5 mostra um exemplo da distorção que ocorre entre as duas amostras, onde “*” representa a versão mapeada.

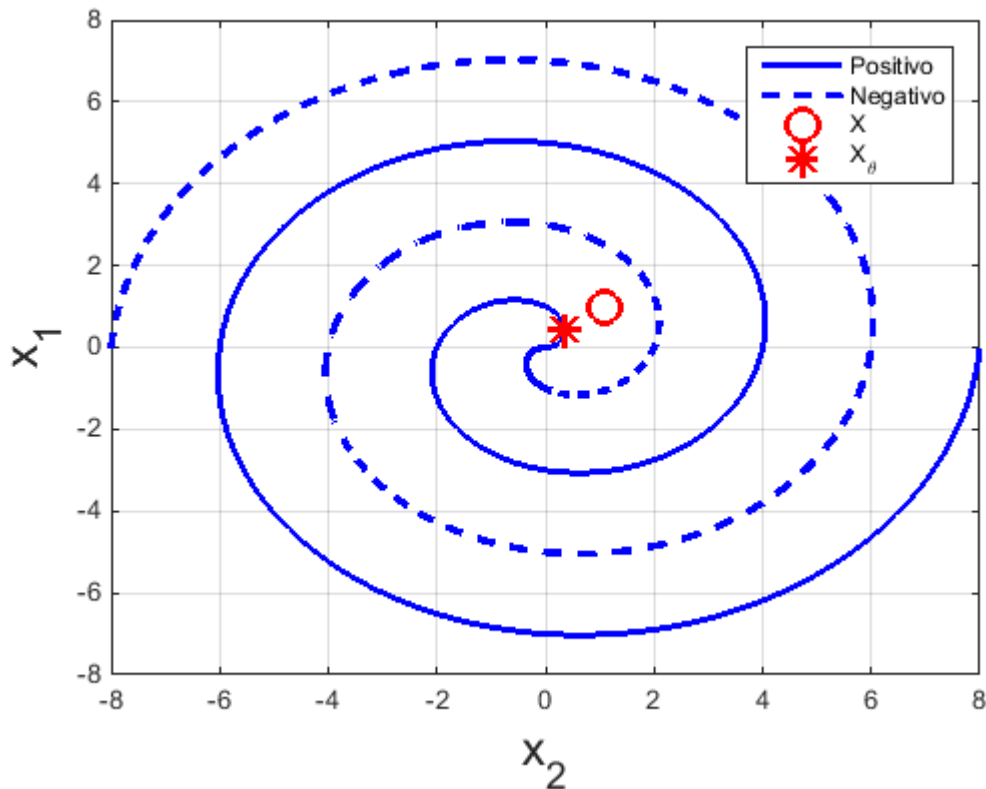


Figura 5 - Mapeamento da amostra $X=(x_1,x_2)$ na curva da espiral de Arquimedes.

Além disso, devido a limitação de potência de transmissão é aplicada uma função inversível T_α , expressa por (HU;GARCIA-FRIAS;LAMARCA, 2011)

$$T_\alpha = \operatorname{sign}(x)|x|^\alpha. \quad (13)$$

E, por fim, é feita a normalização da potência aplicando o fator $\frac{1}{\sqrt{\gamma}}$. Dessa forma, o símbolo de canal normalizado é transmitido através do canal sem fio e sofre os

efeitos do ruído Gaussiano branco e do desvanecimento. Ao chegar no receptor, o símbolo é desnormalizado, de forma que

$$Y = T_\alpha(M_\Delta(X))h + w\sqrt{\gamma}. \quad (14)$$

Em seguida, finalmente, deve-se utilizar o decodificador adequado para finalizar a transmissão dos dados. O esquema analógico é resumido no diagrama em blocos da Figura 6.

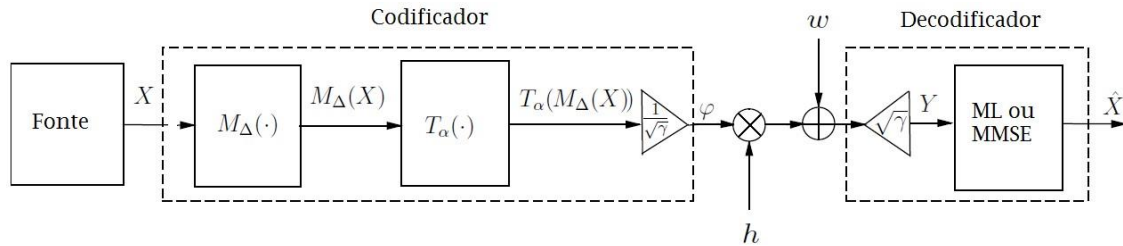


Figura 6 - Diagrama em blocos da codificação analógica paramétrica em um esquema de codificação 2:1.

Como foi dito anteriormente, é necessário utilizar o ML ou MMSE para decodificar. Entretanto, existem diferenças importantes entre eles que devem ser consideradas. O MMSE apresenta desempenho superior, porém, o nível de complexidade é mais elevado.

Por outro lado, o decodificador ML é consideravelmente menos complexo e seu desempenho pode ser muito próximo ao desempenho do decodificador MMSE quando aplica-se um estimador linear MMSE antes da decodificação por ML, conforme proposto em (FRESNEDO, 2013). Dessa forma, este decodificador realiza uma estimativa X_{ML} , que pertence a espiral de Arquimedes, utilizando o sinal recebido Y . Para isso, o ângulo estimado ($\hat{\theta}$) é calculado, e, por fim, realiza-se o mapeamento inverso, de acordo com

$$\hat{\theta} = T_\alpha^{-1}\left(\frac{y}{h}\right) = \text{sign}\left(\frac{y}{h}\right) \left|\frac{y}{h}\right|^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (15)$$

$$X_{ML} = M_\Delta^{-1}(\hat{\theta}) \quad (16)$$

3.3 OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CODIFICAÇÃO

Para obter um melhor desempenho, pode-se otimizar os parâmetros Δ e α para obter uma SDR mais elevada. Devido à importância na codificação e decodificação dos símbolos, escolher de forma inadequada estes parâmetros

pode comprometer o desempenho do sistema. As Figuras 7a, 7b, 7c e 7d ilustram os resultados na curva da espiral de Arquimedes de escolhas de Δ diferentes.

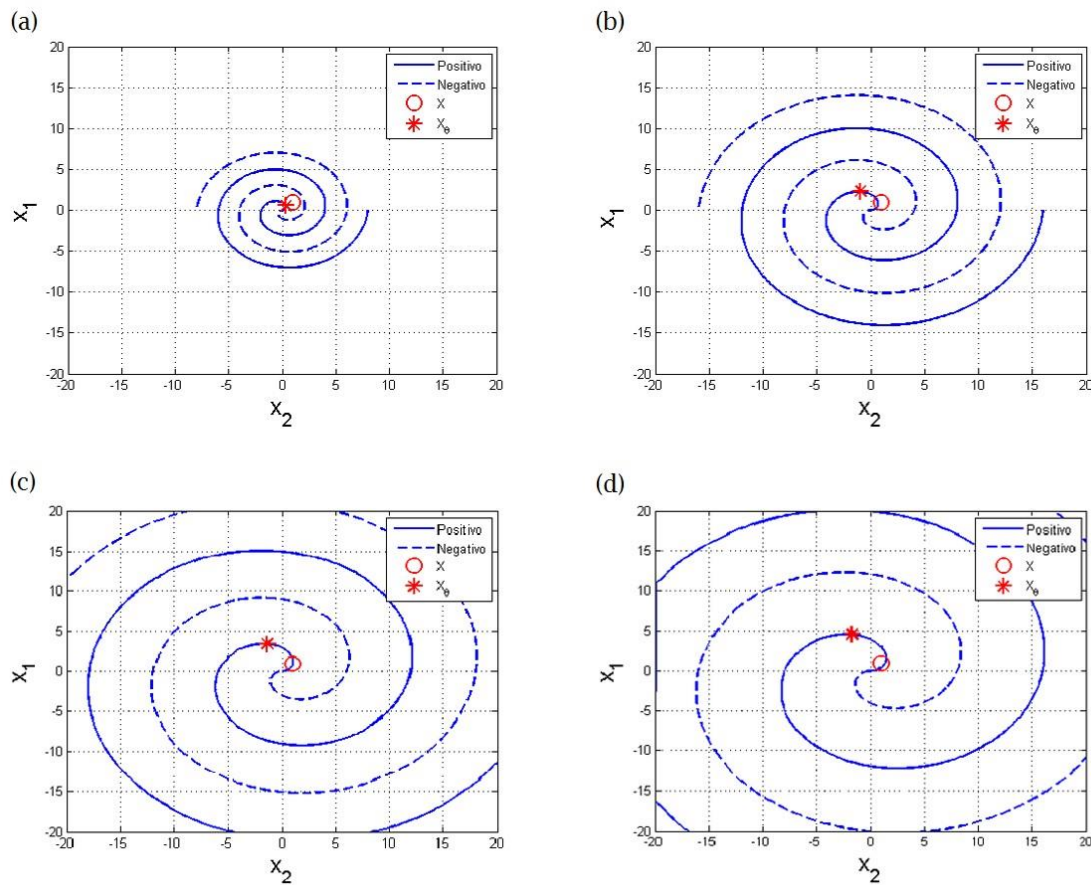


Figura 7 - Espiral de Arquimedes. (a) $\Delta= 2$, (b) $\Delta= 4$, (c) $\Delta= 6$ e (d) $\Delta= 8$.

Ao comparar as Figuras 7a,7b,7c e 7d, percebe-se que dependendo da CSNR para transmissão, pode ser mais conveniente que a espiral seja mais aberta (Δ maior) ou mais fechada (Δ menor). Além disso, o fator α muda levemente a distribuição dos símbolos do canal. Sendo assim, são duas variáveis que quando otimizadas podem melhorar o desempenho da comunicação.

Em uma transmissão analógica, com fonte Gaussiana, discreta no tempo, sem memória e de amplitude contínua, pode-se analisar o seu desempenho em termos de SDR e CSNR e comparar com o OPTA. Considerando conhecimento médio do canal, Δ pode ser determinado de acordo com (CHUNG, 2000) e (HEKLAND; OIEN; RAMSTAD, 2005)

$$\Delta^* = 2\pi \sqrt[4]{\frac{6.0,16^2}{CSNR}} . \quad (17)$$

As Figuras 8(a) e 8(b) ilustram o desempenho teórico de uma transmissão sem fio para valores diferentes de α , Δ é obtido aplicando a Equação (17).

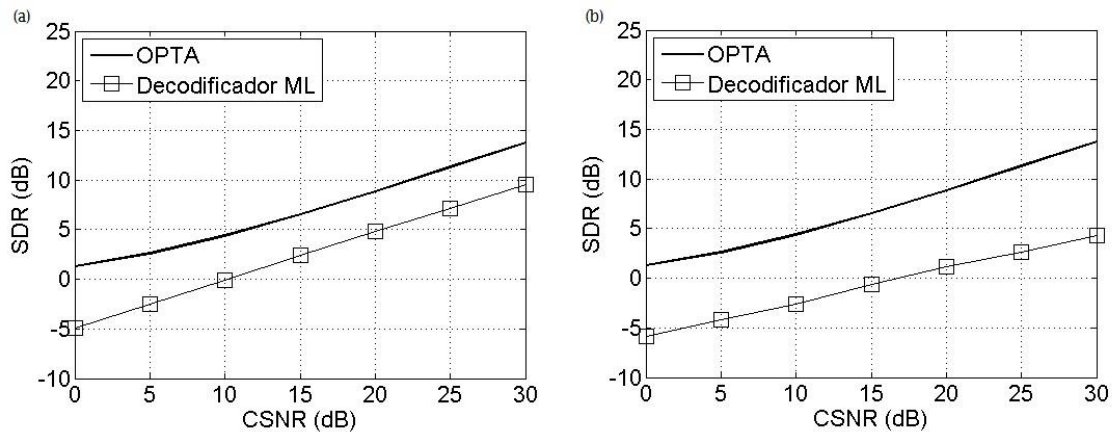


Figura 8 - Desempenho de uma transmissão sem fio com distribuição Rayleigh em termos de SDR (dB) e CSNR (dB). (a) $\alpha = 2$ (b) $\alpha = 4$.

Além disso, conforme dito anteriormente, para obter um desempenho mais próximo da curva do OPTA, pode-se utilizar um estimador MMSE (FRESNEDO, 2013). O estimador é colocado antes da decodificação, dessa forma os símbolos recebidos são filtrados, reduzindo a distorção e permitindo que o ML realize uma estimativa mais condizente com as informações que foram transmitidas. Este filtro é de fácil aplicação e tem influência significativa no desempenho do sistema, principalmente quando a CSNR está baixa, como indica a Figura 9, onde $\alpha = 2$.

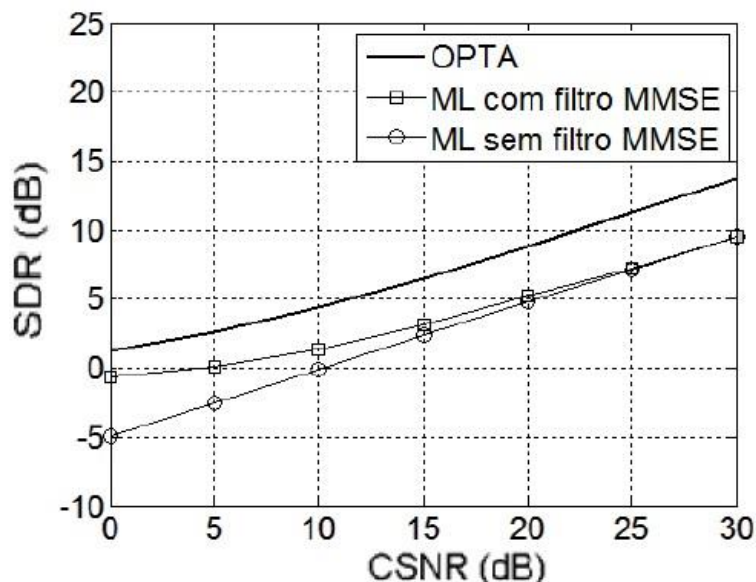


Figura 9 - Desempenho da transmissão sem fio com distribuição Rayleigh com e sem o filtro MMSE.

O capítulo 4 trata da implementação em hardware da transmissão digital, onde serão expostas as dificuldades iniciais e resultados prévios que foram obtidos.

4. IMPLEMENTAÇÃO

Inicialmente, pretendia-se utilizar a USRP (do inglês *Universal Software Radio Peripheral*), que é um tipo de plataforma SDR (do inglês *Software Defined Radio*), para implementar a codificação analógica. Porém, apesar de apresentar inúmeras vantagens, a USRP não apresentava padrões de modulação que pudessem ser facilmente utilizáveis em conjunto com a codificação analógica, tais como a modulação AM (em inglês *Amplitude Modulation*) e PAM (em inglês *Pulse Amplitude Modulation*), de forma que a implementação em si dessas modulações ou a adaptação a partir de implementações disponíveis para GNU rádio, estavam fora do escopo deste trabalho.

Por esse motivo, optou-se por substituir a USRP por uma comunicação via placa de som. Visto que o MATLAB dispõe de várias funções para transmissão e recepção de sinais, utilizou-se tais funções para complementar o sistema de comunicação.

A implementação ocorreu utilizando apenas um computador. Portanto, empregou-se duas instâncias do MATLAB, uma para atuar como transmissor e outra como receptor.

Assim, o sinal de entrada foi transmitido para a placa de som por intermédio das funções referentes ao processamento de sinais do MATLAB. Em seguida, foi convertido para o formato digital, de forma que os dados pudessem ser lidos pela placa de som. Após o processamento, foi feita mais uma conversão, desta vez digital/analógica, e, finalmente, o sinal foi transmitido para o receptor através de um cabo de áudio, que conecta a entrada e saída da placa de som. A Figura 10 ilustra de forma simplificada a arquitetura do sistema de comunicação que foi implementado.



Figura 10 – Arquitetura do sistema implementado.

Fonte: (INACIO, 2011, pg. 20, adaptado).

Os procedimentos de conversão ADC (em inglês *Analog-to-Digital Converter*) ou DAC (em inglês *Digital-to-Analog Converter*) e as limitações de processamento da placa de som, causam distorções do sinal original. Dessa forma, o canal através da placa de som pode ser visto como um canal quase-estático com forte atenuação. Ou seja, as características do sinal mudam lentamente em relação a transmissão de um símbolo, como consequência, durante a transmissão de um bloco de símbolos, o canal pode ser considerado estático. Essa alteração é justificável porque a metodologia teve de ser adaptada, visto que a USRP apresentou obstáculos trabalhosos na implementação.

A Figura 12 demonstra o funcionamento desta comunicação via placa de som.

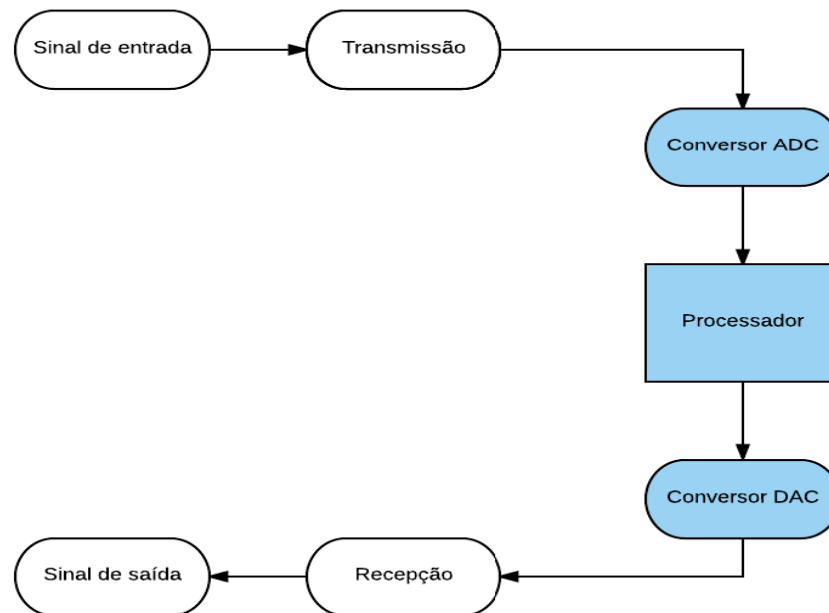


Figura 12 - Comunicação via placa de som.

Tendo em vista que para que esta comunicação ocorra é preciso transformar o sinal de tempo contínuo em sinal de tempo discreto, a frequência de amostragem, denominada F_s , torna-se uma grandeza importante. Esta realiza amostragens do sinal contínuo para tentar reconstruir totalmente o sinal (OPPENHEIM, 2010). É uma transformação necessária para que o sinal possa ser processado pela placa de som. Portanto, quanto mais elevada for a F_s , mais preciso será o sinal discreto reproduzido por ela.

Por outro lado, outro fator relevante é que a placa de som apresenta limites de frequência de amostragem. No caso deste trabalho, a placa de som apresenta as seguintes características:

- Frequência de Amostragem: 44100 Hz;
- Resolução: 16 bits.

O sinal de áudio utilizado no trabalho tem frequência de amostragem de 8196 Hz e 73113 amostras. Assim, a ideia é comprimir as amostras em um esquema 2:1 e realizar a comunicação por meio da placa de som. Sabendo disso, primeiramente, a implementação ocorreu utilizando a taxa de amostragem original para transmitir os símbolos comprimidos.

Em seguida, a transmissão é feita com metade da taxa de amostragem (4098 Hz), dessa forma, o sistema opera como se estivesse em um esquema 1:1.

Em ambos os casos, foi utilizado um cabo para conectar a entrada e saída da placa de som, atuando como o enlace de comunicação entre elas. Portanto, as etapas a seguir foram implementadas para este sinal nos dois casos analisados:

- 1) O áudio é importado para o MATLAB através da função *load*;
- 2) Codificação;
- 3) Adição de uma sequência de treinamento;
- 4) Transmissão;
- 5) Recepção;
- 6) Sincronização;
- 7) Normalização do sinal;
- 8) Decodificação;
- 9) Comparação com o sinal original.

A transmissão e recepção ocorrem em instâncias diferentes do MATLAB. Então, inicialmente, a função *load* é empregada para importar o áudio para o *script* do transmissor, a fim de utilizá-lo na implementação. Sendo assim, primeiro o sinal foi transmitido com a taxa de amostragem original, e, em seguida, foi implementada a transmissão com a taxa de amostragem reduzida.

Além disso, ainda no transmissor, foi adicionada uma sequência de treinamento com valores já conhecidos. Essa sequência foi transmitida juntamente com os dados codificados para que possa auxiliar o sincronismo do receptor.

As funções do MATLAB responsáveis por transmitir o sinal são, respectivamente, *audioplayer* e *play*. A primeira, basicamente, é aplicada para criar um objeto com a frequência de amostragem desejada. Este objeto é usado na função *play*, que é responsável pela transmissão juntamente com a frequência de amostragem do sinal.

Após isso, o sinal é transmitido para a placa de som via cabo e passa pelo processamento. No receptor, foi estipulado um tempo de espera de 7 segundos para a recepção do sinal. Assim, caso não ocorra transmissão, aparecerá um erro na tela. Quando a transmissão é bem-sucedida, é preciso aplicar, respectivamente, as funções *audiorecorder*, *recordblocking* e *getaudiodata* para receber adequadamente o sinal. Estas são as funções utilizadas pelo MATLAB para a configuração da placa de som e podem ser modificadas dependendo da aplicação visada.

Por fim, obteve-se as amostras recebidas, que foram armazenadas na variável *msg_recebida*, como pode ser visto na Figura 13:

```
%Configuracao da placa de som.
duration = 7;
tempo_espera = duration+20;
SampleRate=Fs;

% Recepcao do sinal
fprintf('Aguardando transmissao do sinal... [%d s]\n', tempo_espera);
recObj = audiorecorder(SampleRate, 8, 1);
recordblocking(recObj, tempo_espera);
data = getaudiodata(recObj);
msg_recebida = data;
msg_recebida = msg_recebida';
```

Figura 13 - Recepção do sinal no MATLAB.

Logo na fase inicial da implementação, foram detectados problemas de sincronismo no receptor. Isso significa que além do sinal original, o receptor recebia amostras adicionais causadas por uma série de fatores, como, por exemplo, os sinais parasitas oriundos da placa de som ou da fonte de alimentação do computador (FERNANDES; ZANATTA FILHO, 2007).

Para resolver esse impasse, foi adicionada uma sequência de treinamento no transmissor. A estratégia adotada é descrita abaixo:

- a. Um bloco de 10000 símbolos com valores conhecidos é inserido no transmissor;
- b. Este bloco é salvo e repassado para o receptor;
- c. No receptor, essa sequência é detectada e todas as amostras anteriores a ela são descartadas;
- d. Para finalizar o sincronismo, o ponto final do sinal é determinado por meio de uma comparação com o tamanho do sinal original (sem a sequência de treinamento).

Como resultado, obteve-se um sinal recebido do mesmo tamanho do transmitido, apresentando apenas diferenças de amplitude causadas por atenuações do sinal, que são inerentes na maioria dos sistemas de comunicação.

Posto isso, o último ajuste foi normalizar a energia do sinal. Esta etapa é imprescindível para que a decodificação ocorra adequadamente, pois, é necessário corrigir as distorções causadas no processo da comunicação.

Portanto, o sinal foi normalizado de acordo multiplicando o vetor de amostras recebidas pelo quociente da energia dos símbolos recebidos pelos transmitidos.

Finalmente, após a normalização do sinal, este foi decodificado utilizando o decodificador ML. O diagrama em blocos da Figura 14 mostra o sistema de comunicação implementado.

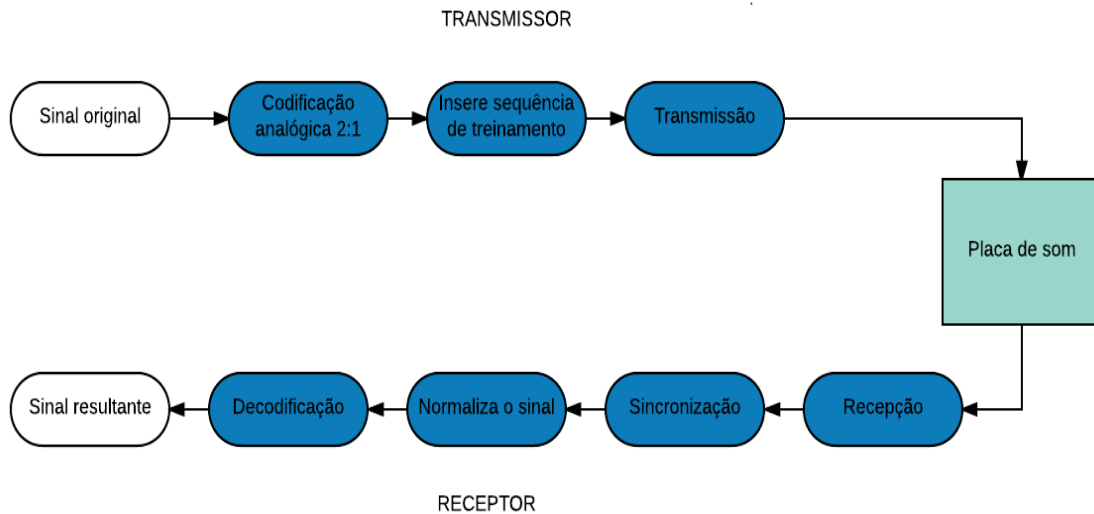


Figura 14 - Sistema de comunicação implementado.

Na segunda etapa da implementação foi transmitido o mesmo áudio, mas com uma frequência de amostragem proporcional a compressão realizada para analisar o efeito no sinal resultante, como será descrito no capítulo subsequente.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 TRANSMISSÃO COM FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM ORIGINAL

Inicialmente, a implementação do método proposto apresentou impasses devido, principalmente, a mudanças nas funções do MATLAB e ao sincronismo do sinal. A fim de favorecer a transmissão, de forma empírica, foram feitos ajustes no ganho do microfone, e, por fim, o ganho de entrada foi fixado em 36 dB.

Apesar destas melhorias, o sinal imediatamente recebido, ou seja, o sinal que antecede os processos de normalização e decodificação, ainda apresentou uma forte atenuação em relação ao sinal transmitido, como pode ser visto na Figura 15:

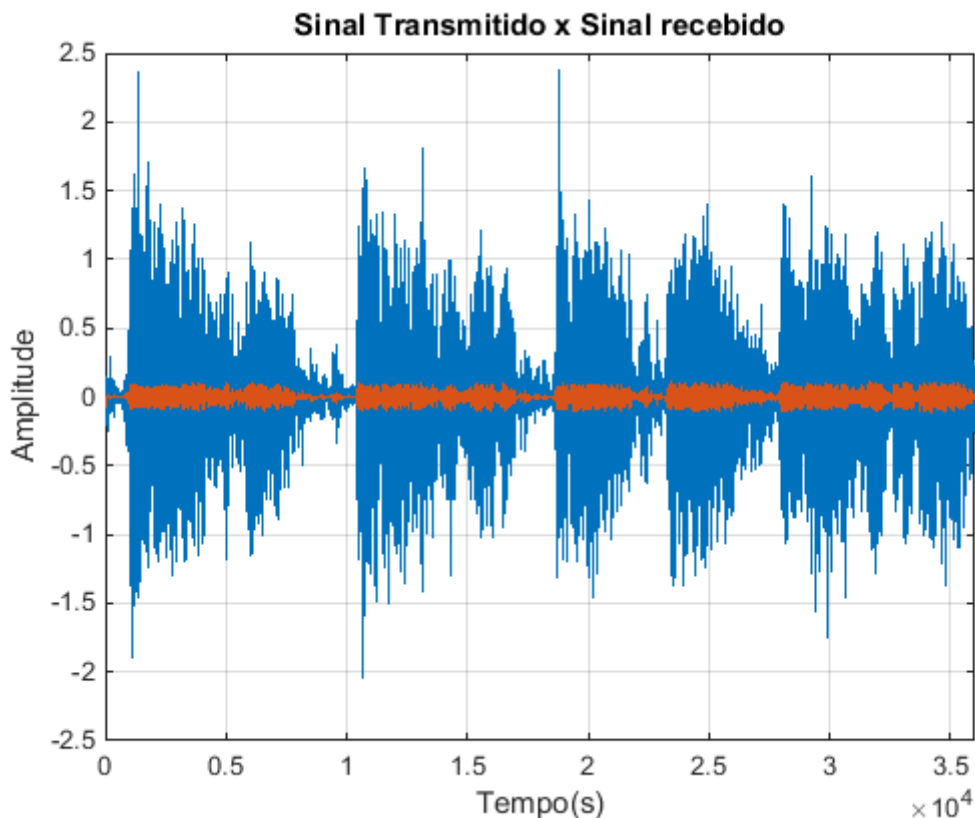


Figura 15 - Comparação entre o sinal transmitido e recebido no esquema analógico 2:1.

A análise do desempenho da codificação analógica foi feita a partir da CSNR. Esta é definida como a relação entre a potência do sinal e do ruído, porém, neste caso, não é possível determinar a potência do ruído. Portanto, foi feita uma

estimativa tendo como base a energia do sinal transmitido e recebido, conforme a equação a seguir:

$$CSNR = \log_{10} 10 \left(\frac{E_{receptor}}{E_{transmissor}} \right) \quad (18)$$

A partir disso, pode-se calcular o MSE, SDR, e, por fim, o limite teórico, denominado OPTA, a partir das equações (2), (3) e (5), respectivamente. Os resultados obtidos para três pares distintos de parâmetros α e Δ , podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados da codificação analógica para $F_s=8196$ Hz.

Δ	α	CSNR (dB)	OPTA (dB)	MSE (dB)	SDR (dB)
1.5	2.0	-20.1056	0.0211	0.0582	-1.7931
2.5	2.0	-18.8264	0.0283	0.0591	-1.8617
4.0	2.0	-17.9566	0.0345	0.0458	-0.7521

Nota-se que os resultados obtidos da SDR e do MSE são próximos para estes pares de parâmetros, considerando F_s igual a 8196 Hz. Isso ocorre porque o canal de comunicação apresenta baixíssima CSNR, dessa forma, a distância em relação ao OPTA é pequena, o que significa que o desempenho se aproxima do ótimo. Sendo assim, pode-se inferir que embora o desempenho audível aparente ser ruim, é o mais razoável tendo em vista as limitações impostas pelo meio de comunicação.

Na implementação, notou-se que quando a distância entre os braços da espiral é alterada para um valor muito grande, ocorrem erros na transmissão que impossibilitam a conclusão desta. E, por outro lado, para $\Delta < 1.5$, a codificação acaba distorcendo demais o sinal e tornando sua amplitude muito baixa. Este fato associado a atenuação sofrida, prejudica a recepção dos símbolos. Por esses motivos, considerou-se apenas $\Delta=1.5$, $\Delta=2.5$ e $\Delta=4$ e o parâmetro α não foi alterado. Em (VAZQUEZ-ARAUJO et al, 2014), são descritos os valores ótimos de Δ para determinadas faixas de CSNR que foram usados como base para a implementação do trabalho. Porém, como o canal de comunicação utilizado apresenta uma relação sinal ruído bastante ruim, os parâmetros sofreram alterações em relação ao teórico. Neste contexto, pode-se concluir que $\Delta=4$ é o valor ótimo, visto que apresenta a menor SDR.

Além dos resultados numéricos, a análise pode ser aprofundada por meio da comparação entre o sinal original e os resultantes, como pode ser visto a seguir:

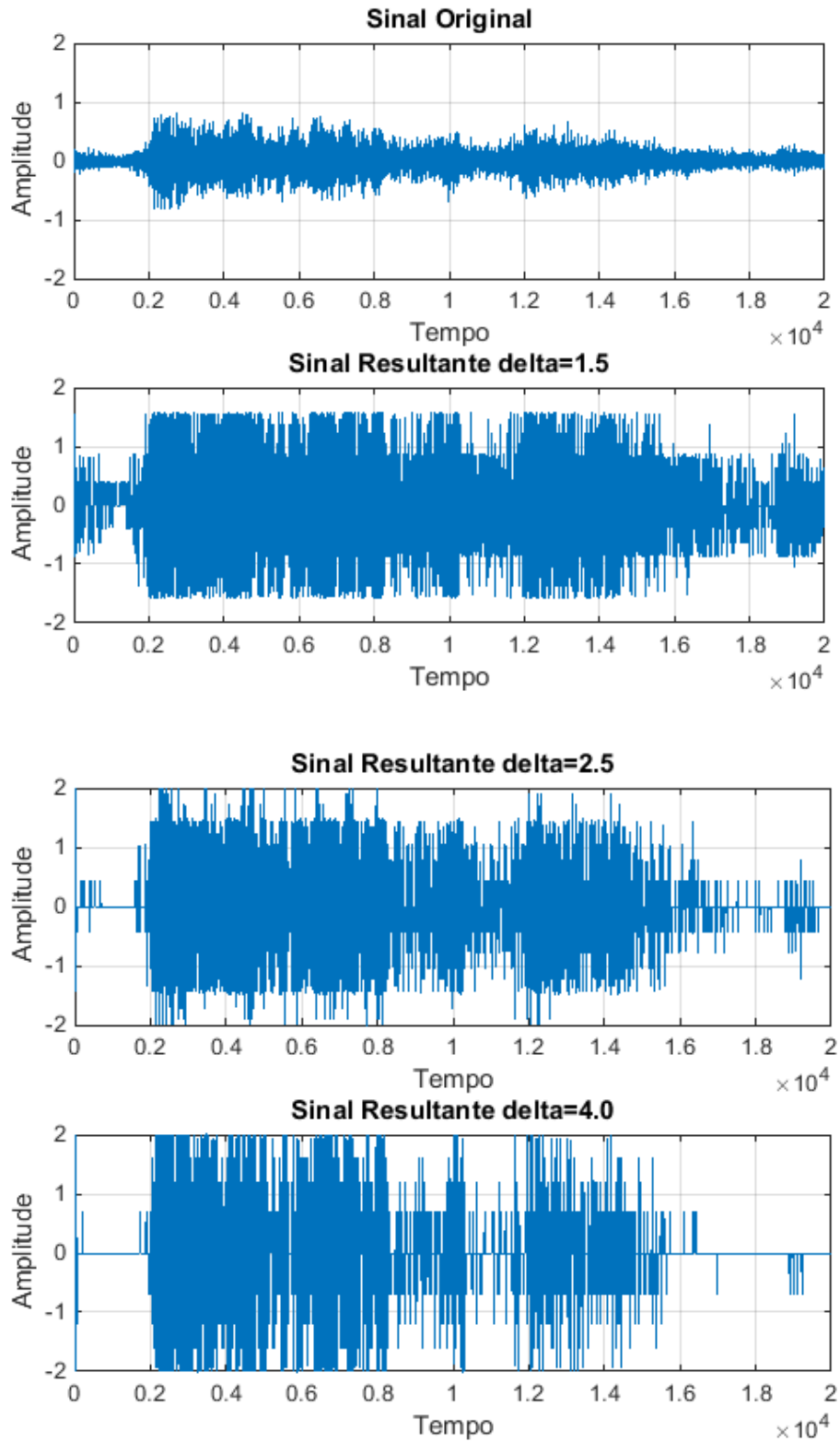


Figura 16 - Sinal original e dos sinais resultantes para os três casos.

Nota-se uma presença significativa de ruído no sinal resultante (depois da decodificação) em todas situações. Infelizmente, é um fator inevitável, visto que existem várias conversões analógico-digitais, a limitação de processamento e os sinais parasitas, que acabam gerando este efeito no sinal. Os três casos analisados são semelhantes, entretanto, o sinal resultante com menor conformidade com o original é o primeiro, onde $\Delta = 1.5$. Este fato condiz com os resultados obtidos da Tabela 1, visto que este apresenta a maior taxa de distorção do sinal.

Assim, pode-se inferir que apesar das distorções sofridas, o método proposto funcionou como o esperado.

5.2 TRANSMISSÃO COM FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM REDUZIDA

A segunda etapa da implementação tem o intuito de comparar o efeito da redução da frequência de amostragem sob o sinal resultante. Com essa alteração, é como se o sistema operasse em um esquema 1:1, considerando que as amostras e a taxa de amostragem são reduzidas pela metade. Novamente, de forma empírica, o ganho de entrada do microfone foi ajustado para 36 dB.

Em seguida, para tornar a análise válida, foram feitos os mesmos procedimentos da seção anterior. Inicialmente, foi feita uma estimativa da CSNR, e, mais tarde, obteve-se o OPTA, MSE e SDR para os diferentes pares de parâmetros da espiral. A Tabela 2 aponta os resultados numéricos obtidos.

Tabela 2 - Resultados da codificação analógica para $F_s=4098$ Hz.

Δ	α	CSNR (dB)	OPTA (dB)	MSE (dB)	SDR (dB)
1.5	2.0	-20.8673	0.0177	0.0413	-0.3077
2.5	2.0	-19.1214	0.0597	-1.9070	0.0264
4.0	2.0	-18.8155	0.0283	0.0418	-0.3534

Sendo assim, os resultados numéricos são bastante semelhantes com o cenário anterior. Este fato é comprovado por meio da análise da Figura 15.

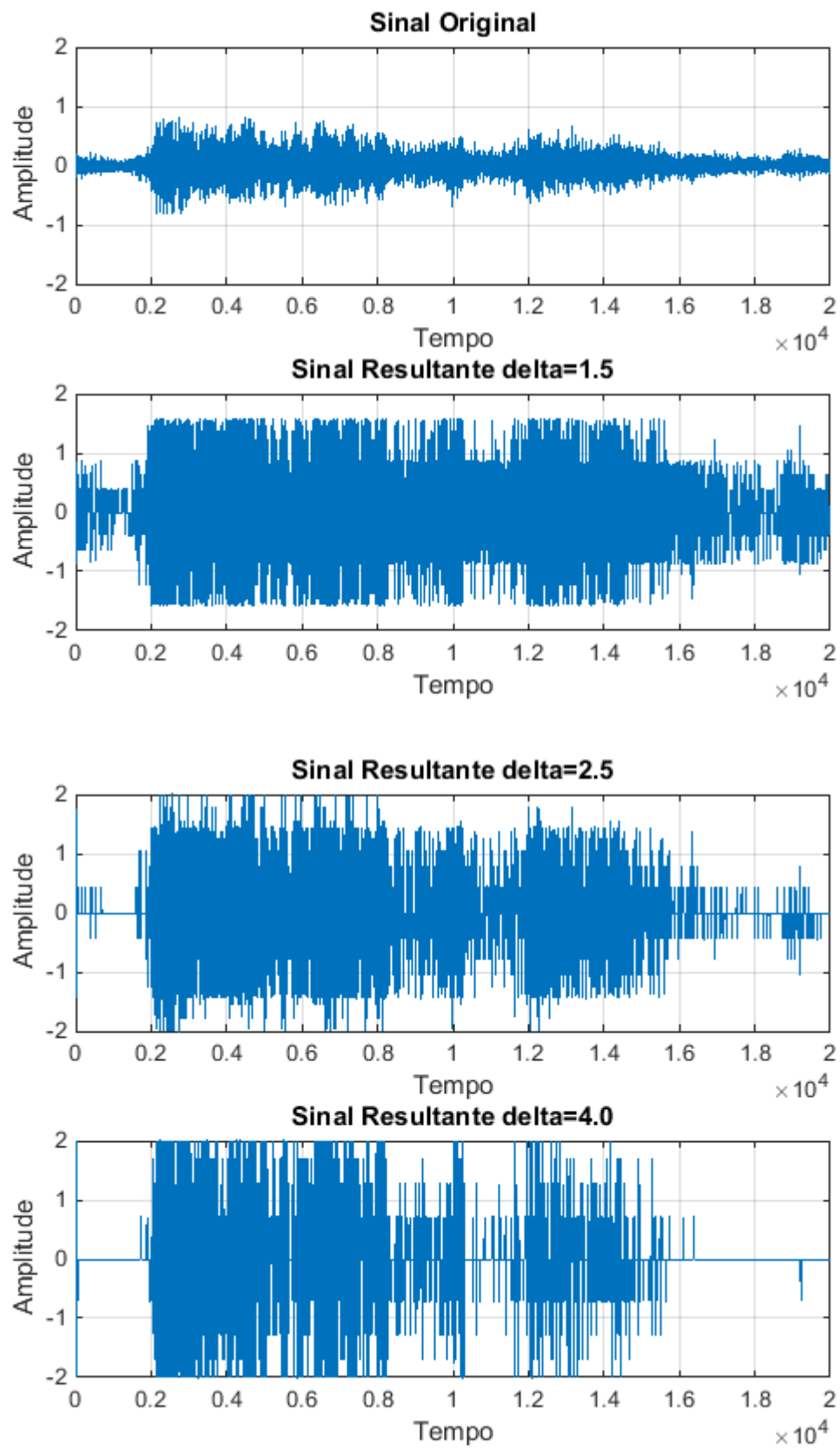


Figura 17 –Sinal transmitido e sinais resultantes para os três casos com frequência de amostragem reduzida.

Tendo em vista que os resultados foram relativamente semelhantes, pode-se concluir que a melhor estratégia é utilizar o segundo, visto que ao empregar uma frequência de amostragem menor, o processamento torna-se simplificado pois não é preciso realizar tantas operações sob o sinal transmitido.

6. CONCLUSÃO

No decorrer do trabalho, notou-se que a implementação seria mais trabalhosa do que o esperado. Na etapa inicial foram feitas tentativas para usar a USRP, mas depois de uma série de alterações, notou-se que corrigir os problemas de sincronismo no receptor seria uma tarefa penosa e o ideal era adotar uma nova metodologia. A partir disso, surgiu a ideia de utilizar a placa de som e após um estudo de alguns trabalhos nessa área, pode-se começar a usá-la.

Portanto, optou-se por transmitir somente o áudio em dois cenários distintos. Para isso, foi necessário empregar alguns ajustes devido as distorções sofridas por causa do canal de comunicação. Mas, como o assunto tratado apresentado já apresenta um nível de complexidade respeitável, optou-se por utilizar métodos simples de ajuste, com a finalidade de facilitar a compreensão e fluidez do texto.

Apesar das limitações, o método proposto apresentou bom desempenho nos dois cenários. Pode-se analisar a influência da variação da distância entre os braços da espiral, visto que nos dois cenários o melhor resultado foi para o valor mais alto de Δ . Além disso, a comparação entre os resultados dos dois cenários propostos mostrou-se relevante para compreender a importância da frequência de amostragem no cenário de conversão analógico/digital.

Por fim, como sugestão de futuros trabalhos na área seria interessante realizar as modificações necessárias para utilizar o método analógico com a USRP e ampliar a implementação para transmissão de imagens.

Além disso, outro ponto importante seria empregar a codificação analógica paramétrica para amostras reais coletadas por uma RSSF, por exemplo, temperatura ou umidade, que apresentam distribuição de probabilidade diferente da distribuição do canal, o que implica em ajustes no transmissor. E, finalmente, estimar precisamente o efeito das conversões ADC e DAC sob o método analógico.

REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, Ian F. et al. Wireless sensor networks: a survey. **Computer networks**, v. 38, n. 4, p. 393-422, 2002.

Analog Devices. Disponível em <<http://www.analog.com/en/index.html>>. Acesso em: 13 mai 2016 às 18:56.

BERGER, Toby; TUFTS, D. Optimum pulse amplitude modulation--I: Transmitter-receiver design and bounds from information theory. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 13, n. 2, p. 196-208, 1967.

BRANTE, Glauber Gomes; SOUZA, Richard Demo; GARCIA-FRIAS, Javier. Analog joint source-channel coding in Rayleigh fading channels. In: **Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference on. IEEE**, 2011. p. 3148-3151.

BRANTE, Glauber; SOUZA, Richard Demo; GARCIA-FRIAS, Javier. Spatial diversity using analog joint source channel coding in wireless channels. **IEEE Transactions on Communications**, v. 61, n. 1, p. 301-311, 2013.

CHUNG, Sae-Young. On the construction of some capacity-approaching coding schemes. 2000.

COIMBRA, Thyago Rodrigues. **Regulação do espectro de radiofreqüências: uma análise técnica do modelo brasileiro**. 2010. Disponível em <<http://www.teleco.com.br/pdfs/tutorialespeccradio.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2016 às 23:23.

DE PAIVA JUNIOR, Nilson Maciel et al. Introdução ao Desenvolvimento de Rádios Definidos por Software para Aplicações de Defesa. Disponível em <http://sbrt.org.br/sbrt2012/publicacoes/99644_1.pdf>. Acesso em: 13/05/2016, horário 19:00.

FERNANDES, Fábio G.; PANAZIO, Cristiano M.; ZANATTA FILHO, Danilo. Implementação de um Software-Defined Radio com processamento em tempo real usando sinais acústicos e MATLAB. XXV **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, 2007.

FOROUZAN, Behrouz A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. AMGH Editora, 2009.

FLOOR, Pål Anders; RAMSTAD, Tor A. Dimension reducing mappings in joint source-channel coding. In: **Proc. NORISIG**. 2006.

FRESNEDO, O. et al. Comparison between analog joint source-channel coded and digital bpcm systems. In: **Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on**. IEEE, 2011. p. 1-5.

FRESNEDO, Oscar et al. Low-complexity near-optimal decoding for analog joint source channel coding using space-filling curves. **Communications Letters, IEEE**, v. 17, n. 4, p. 745-748, 2013.

GARCÍA-NAYA, José Antonio et al. Experimental evaluation of analog joint source-channel coding in indoor environments. In: **Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on**. IEEE, 2011. p. 1-5.

GOLDSMITH, Andrea. **Wireless communications**. Cambridge university press, 2005.

HAYKIN, Simon. **Sistemas de Comunicações: Analógicos e Digitais**. Bookman, 2004.

HEKLAND, Fredrik; OIEN, Geir E.; RAMSTAD, Tor A. Using 2: 1 Shannon mapping for joint source-channel coding. In: **Data Compression Conference**. IEEE, 2005. p. 223-232.

HEKLAND, Fredrik; FLOOR, Pal Anders; RAMSTAD, Tor A. Shannon-kotel-nikov mappings in joint source-channel coding. **IEEE Transactions on Communications**, v. 57, n. 1, p. 94-105, 2009.

HU, Yichuan; GARCIA-FRIAS, Javier; LAMARCA, Meritxell. Analog joint sourcechannel coding using non-linear curves and MMSE decoding. **IEEE Transactions on Communications**, v. 59, n. 11, p. 3016-3026, 2011.

INACIO, J. **Implementação de um Rádio Definido por Software usando MATLAB e um par Transmissor/Receptor FM**. [S.l.]: Instituto Federal de Santa Catarina - campus São José, 2011.

LORINCZ, Konrad et al. Sensor networks for emergency response: challenges and opportunities. **Pervasive Computing, IEEE**, v. 3, n. 4, p. 16-23, 2004.

LOUREIRO, Antonio AF et al. Redes de sensores sem fio. In: **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)**. sn, 2003. p. 179-226.

MAINWARING, Alan et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: **Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications**. ACM, 2002. p. 88-97.

MOREIRA, M. D. **Introdução as redes de sensores sem fio. 2006.** Disponível em < http://www.gta.ufrj.br/grad/06_1/rssf>. Acesso em: 13/05/2016, horário: 19:35.

RAPPAPORT, Theodore S. et al. **Wireless communications: principles and practice.** New Jersey: Prentice Hall PTR, 1996.

RUIZ, Linnyer Beatrys et al. **Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio1.** 2004.

SAYOOD, K. **Introduction to Data Compression.** 3.Ed. [S.I.] : Morgan Kauffman, 2006.

SHANNON, C.E. A mathematical theory of communications. **Bell Systems Tech. Journal**, v.27, p.379-423; 623-656, 1948.

TAVARES, Pedro Lemos. **Redes de Sensores Sem-fio. UFRJ - Rio de Janeiro,** 2002. Disponível em <www.gta.ufrj.br/grad/02_2/Redes%20de%20sensores/Redes%20de%20Sensores%20Sm-fio.htm>. Acesso em: 13/05/2016, horário 19:36.

TSE, David; VISWANATH, Pramod. **Fundamentals of wireless communication.** Cambridge university press, 2005.

VAZQUEZ-ARAUJO, Francisco J. et al. Analog joint source-channel coding over MIMO channels. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2014, n. 1, p. 25, 2014.