

Zilmar de Souza Junior

***AVASS – Ambiente Virtual de
Aprendizagem de Sinais e Sistemas***

São José – SC
Dezembro / 2011

Zilmar de Souza Junior

***AVASS – Ambiente Virtual de Aprendizagem de
Sinais e Sistemas***

Monografia apresentada à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações.

Orientador:

Prof. Marcos Moecke, Dr.

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
ESTADO DE SANTA CATARINA

São José – SC

Dezembro / 2011

Monografia sob o título “AVASS – Ambiente Virtual de Aprendizagem de Sinais e Sistemas”, defendida por Zilmar de Souza Junior e aprovada em 16 de dezembro de 2011, em São José, Santa Catarina, pela banca examinadora assim constituída:

Prof. Marcos Moecke, Dr.
Orientador

Prof. Mário de Noronha Neto, Dr.
IF-SC

Prof. Diego Pereira Botelho, Msc.
IF-SC

*Um pessimista vê a dificuldade em cada oportunidade,
um otimista vê a oportunidade em cada dificuldade.*

Winston Churchill

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos àqueles que me incentivaram e apoiaram durante todo o desenvolvimento desse projeto. Agradeço em especial àqueles mais próximos, que vivenciaram as dificuldades ao meu lado e com certeza foram essenciais para que eu seguisse em frente.

Agradeço também ao meu orientador que sempre incentivou a busca pelo conhecimento e à boa metodologia de pesquisa, além de sempre propor novos desafios. Agradeço ainda aos colegas de laboratório, pois sempre se dispuseram a prestar ajuda e contribuir com novas ideias.

Resumo

O Ambiente Virtual de Aprendizagem de Sinais e Sistemas (AVASS) é um projeto com código aberto que cria um ambiente virtual para aprendizagem autônoma dos conteúdos curriculares desenvolvidos nas ementas da área de Sinais e Sistemas. Ele dispõe de módulos para os seguintes conteúdos e temas: aquisição, amostragem, quantização e codificação de sinais; operações básicas realizadas sobre sinais tais como: multiplicação por escalar, deslocamento no tempo, escalamento temporal, reversão temporal de sinais, multiplicação de sinais e soma de sinais; representação de sinais no domínio do tempo e domínio da frequência; modulações analógicas em AM e FM; modulações digitais em ASK, PSK e FSK; e codificação de sinais em NRZ, RZ, AMI e Manchester.

No AVASS, esses temas são apresentados através de interfaces gráficas padronizadas, que permitem a exploração dos temas pelo usuário em um ambiente interativo e flexível. Além de estudar os temas através da variação dos parâmetros de cada módulo, o ambiente ainda propicia ao usuário uma melhor compreensão dos temas através da observação do código usado em cada módulo. Todo o projeto foi desenvolvido no Matlab, provendo compatibilidade em diferentes sistemas operacionais além de ser uma plataforma de desenvolvimento muito utilizada na área de Telecomunicações.

Espera-se que em futuras etapas do desenvolvimento do ambiente AVASS, os módulos já existentes sejam melhorados e ampliados com novas ferramentas e funções, bem como com a incorporação de novos módulos sobre outros conceitos.

PALAVRAS-CHAVES: ambiente virtual de ensino; sinais e sistemas; modulação; codificação.

Abstract

The Virtual Learning Environment of Signals and Systems (AVASS) is an open source project that creates a virtual environment for autonomous learning of curriculum content developed in Signals and Systems area. It has modules for the following themes and content: acquisition, sampling, quantization and signal coding; basic operations performed on signals such as scalar multiplication, time shifting, time scaling, temporal reversal, signal multiplication and sum, signal representation in time domain and frequency domain; AM and FM analog modulations, ASK, PSK and FSK digital modulations, and signal coding in NRZ, RZ, AMI and Manchester.

In AVASS, these themes are presented through standardized graphical interfaces, which allow the user to explore them in an interactive and flexible way. In addition to studying the themes by varying the parameters of each module, the environment also provides to users a better understanding of them by looking at each module's code. The entire project was developed in Matlab, providing compatibility with different operational systems and is a widely used development platform in the area of Telecommunications.

It is hoped that in future stages of the development, the AVASS environment's already existing modules could be improved and expanded with new tools and functions, as well as the incorporation of new modules on other curriculum content.

KEYWORDS: virtual learning environment; signals and systems; modulation; coding.

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Motivação e justificativa	13
1.2. Organização do texto	14
1.3. Principais contribuições	15
2. Fundamentação teórica.....	16
2.1. Aquisição e amostragem	16
2.2. Operações básicas	17
2.3. Transformada de Fourier.....	21
2.4. Modulações analógicas	23
2.4.1. Modulação AM	23
2.4.2. Modulação FM.....	26
2.5. Modulações digitais	27
2.5.1. Modulação ASK.....	28
2.5.2. Modulação FSK	29
2.5.3. Modulação PSK	31
2.6. Códigos de linha	34
2.6.1. Codificação Unipolar	35
2.6.2. Codificação Polar	36
2.6.3. Codificação Bipolar	37
2.6.4. Codificação Manchester (Bifase).....	38
3. Desenvolvimento	39

3.1. Módulos desenvolvidos	41
3.1.1. Módulo de sinais básicos	42
3.1.2. Módulo de operações básicas.....	44
3.1.3. Módulo de aquisição e reprodução de voz.....	45
3.1.4. Módulo de modulação AM	47
3.1.5. Módulo de modulação FM.....	49
3.1.6. Módulo de modulações digitais	50
3.1.7. Módulo de codificações digitais	51
4. Resultados	53
4.1. Caso 1: Estudo da modulação analógica AM	53
4.2. Caso 2: Estudo do espectro de frequências da codificação digital	56
5. Conclusões e trabalhos futuros	60
Apêndice A – Configuração do dispositivo de áudio do módulo de captura de voz	63
Lista de Abreviaturas	64
Referências Bibliográficas	65

Lista de Figuras

Figura 1- Sinal original, trem de impulsos utilizados e o sinal amostrado.	17
Figura 2 - Multiplicação do sinal $u(t)$ por escalares de valor 2, -2 e 0,75.	18
Figura 3- Degrau unitário com ganho e deslocamento temporal	19
Figura 4 - Sinal $x(t)$ e suas versões comprimida e estendida	19
Figura 5- Assimetria característica de um sinal ímpar e simetria característica de um sinal par.	20
Figura 6 - Soma entre uma senoide de 1000 Hz e outra de 100Hz.	21
Figura 7 - Seno de 100 Hz e seu espectro de frequência mostrado no AVASS.	22
Figura 8 – Modulação AM. Apresenta-se sinal modulante e o sinal modulado.	24
Figura 9 - Espectro de frequências do sinal senoidal de 10 Hz modulado em amplitude por uma portadora de 100 Hz.....	25
Figura 10 - Diagrama de um modulador AM-DSB.	26
Figura 11 – Sinal modulado em frequência e seu espectro de frequências.....	27
Figura 12 - Modulação 4-ASK e seu espectro de frequências.	29
Figura 13 - Modulação 4-FSK e seu espectro de frequências.....	31
Figura 14 - Diagrama de blocos de um modulador QPSK	32
Figura 15 - Modulação 4-PSK e seu espectro de frequências.....	33
Figura 16 - Diagrama de constelação da modulação 4-PSK.....	34
Figura 17 - Codificações de linha mais populares.	35
Figura 18 - Codificação Unipolar NRZ	36
Figura 19 - Codificação Unipolar RZ	36
Figura 20 - Codificação Polar NRZ	37
Figura 21 - Codificação Polar RZ.	37
Figura 22 - Codificação AMI.....	38
Figura 23 - Codificação Manchester.	38
Figura 24 - Diagrama de blocos do uso do sistema AVASS	40
Figura 25 - Projeto da interface de um módulo usando a ferramenta <i>guide do Matlab</i>	41
Figura 26 - Tela inicial do AVASS com seleção dos módulos.....	42

Figura 27 – Interface gráfica do módulo de sinais básicos.	43
Figura 28 – Interface gráfica do módulo de operações básicas.	45
Figura 29 - Interface gráfica do módulo de aquisição de voz.	46
Figura 30 – Interface gráfica do módulo de modulação analógica (opção – AM).	48
Figura 31 – Interface gráfica do módulo de modulação analógica (opção – FM).	49
Figura 32 - Interface gráfica do módulo de modulações digitais.	50
Figura 33 - Interface gráfica do módulo de codificações digitais.	52
Figura 34 - Interface gráfica do módulo de modulações analógicas (opção-AM) com o resultado da configuração para o caso de uso 1.	54
Figura 35 - Fragmento do módulo mostrando a portadora deslocada para seu novo valor de frequência.	54
Figura 36 - Fragmento do módulo mostrando a mudança do sinal de acordo com o novo valor da frequência modulante.	55
Figura 37 - Fragmento do módulo mostrando a mudança do sinal com a variação do valor do índice de modulação.	55
Figura 38 - Interface gráfica do módulo de codificação digital utilizando 20 bits codificados em Unipolar NRZ.	57
Figura 39 - Fragmento do módulo com a codificação Manchester utilizando 20 bits e seu respectivo espectro de frequências.	58
Figura 40 - Fragmento do módulo com a codificação AMI utilizando 20 bits e seu respectivo espectro de frequências.	59

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Mapeamento de símbolo pela amplitude para modulação 4-ASK.....	28
Tabela 2 - Mapeamento de símbolo pela frequência para modulação 4-FSK	30

1. Introdução

Este trabalho tem como objetivo prover um ambiente com o qual os usuários possam desenvolver seus conhecimentos na área de Sinais e Sistemas de forma autônoma e intuitiva. O ambiente também poderá ser utilizado pelos docentes de diversos cursos em suas aulas para explicar e ilustrar conceitos e conteúdos das unidades curriculares que lecionam. O sistema, por ter uma ampla coleção de códigos abertos, possibilita a implementação de novos módulos em versões futuras.

1.1. Motivação e justificativa

As unidades curriculares da área de sinais e sistemas de cursos superiores de tecnologia e engenharias tratam de conceitos e conteúdos que muitas vezes os estudantes têm certa dificuldade de compreender e aplicar. Exemplos desses conteúdos são as operações com sinais, amostragem, modulações analógicas e digitais, codificações digitais, representação de sinais no domínio do tempo e frequência, entre outros.

O sistema proposto não é uma novidade no auxílio ao processo de ensino-aprendizagem, uma vez que se podem encontrar diversos aplicativos disponíveis na internet, tais como o simulador de modulação em frequência (NYACK, 2007), o simulador de amostragem de sinais em várias frequências (CRUTCHFIELD, 1997) ou ainda o simulador que trata sobre a série de Fourier (FALSTAD, 2008). No entanto, esses aplicativos são proprietários e fechados, não permitindo uma adaptação ao conteúdo lecionado, além de serem desenvolvidos independentes uns dos outros, e por isso não terem uma interface padronizada, o que dificulta o seu uso pelos alunos. O Ambiente Virtual de Aprendizagem de Sinais e Sistemas (AVASS) proposto e desenvolvido em sua fase inicial é constituído de um conjunto de módulos que abordam os diversos conteúdos citados, fornecendo ao usuário uma interface gráfica interativa padronizada.

Como proposta inicial para o projeto, tem-se a perspectiva de utilizá-lo em estudos dirigidos nos cursos de CST em Sistemas de Telecomunicações e Engenharia de Telecomunicações do IF-SC, principalmente disciplinas como: Sinais e Sistemas e Telefonia Digital do curso técnico de Telecomunicações; Sinais e Sistemas, Comunicação Digital, Processamento de Sinais Digitais, e Telefonia do Curso Superior em Tecnologia de Sistemas de Telecomunicações.

Em relação as características desejadas para o ambiente virtual de aprendizagem na área de sinais e sistemas, utilizou-se como base a proposta de Sturm e Gibson (2005) que cita como critérios essenciais: i) os conceitos devem ser apresentados de forma clara com o mínimo de informações; ii) os módulos do aplicativo devem ser diretos, flexíveis e rápidos; iii) deve-se explorar o uso de imagens através de gráficos e também o uso do som para demonstrar os conceitos; iv) as demonstrações devem ser interativas e permitir ao aluno liberdade em explorá-las; v) o código deve ser acessível, para que o estudante possa observá-lo e compreendê-lo; vi) as demonstrações devem ser compatíveis com o máximo de plataformas computacionais; vii) os estudantes devem ser capazes de executar os módulos nos seus próprios computadores a um custo mínimo. O AVASS portanto busca atender a esses critérios, implementando os diversos módulos tais com: básico de sinais, aquisição de voz, operações básicas com sinais, modulações analógicas e digitais, e codificação digital.

O sistema implementado deve ser útil tanto para o ensino em sala de aula bem com para o aprendizado autônomo. A partir do uso desse ambiente virtual espera-se que os estudantes tenham uma maior facilidade em assimilar os conceitos envolvidos na área de sinais e sistemas, e também que novos alunos sejam motivados a desenvolver novos módulos para serem incorporados ao sistema AVASS. Além disso, com a característica de poder visualizar e explorar o código fonte usado na implementação, espera-se também que os alunos com isso tenham uma maior facilidade no aprendizado do ambiente de programação do Matlab e da linguagem de programação “.m”.

1.2. Organização do texto

No Capítulo 2 são descritos os conceitos de sinais e sistemas envolvidos no desenvolvimento do AVASS. Nesta descrição são utilizadas figuras ilustrativas e uma redação que visa focar somente nos aspectos abordados no trabalho. Em seguida, no Capítulo 3 são apresentados os módulos desenvolvidos para o AVASS, destacando os

parâmetros de configuração, modos de uso e algumas restrições. Já, no Capítulo 3, são apresentados alguns casos de uso que ilustram o uso dos módulos implementados. Finalmente o Capítulo 4 apresenta as principais conclusões e algumas sugestões de melhorias e novos módulos a serem implementados em trabalhos futuros.

1.3. Principais contribuições

Neste trabalho foi desenvolvido um ambiente virtual visando ilustrar de forma didática os principais tópicos abordados na área de Sinais e Sistemas. A implementação foi realizada com o auxílio da plataforma de desenvolvimento fornecida pelo software Matlab que se mostrou confiável e robusta. O próprio AVASS serve de referência para futuras funcionalidades facilitadoras do processo de ensino-aprendizagem. Os módulos implementados são listados a seguir:

- **Módulo de sinais básicos** – desenvolvido com o intuito de auxiliar nas questões básicas da área de sinais, como amostragem e representação de sinais discretos ou contínuos no domínio do tempo e frequência;
- **Módulo de operações básicas** – através desse módulo é possível realizar operações sobre um sinal ou entre sinais, fornecendo uma gama de configurações possíveis ao usuário, tais como: reversão temporal, deslocamento temporal, multiplicação por escalar, soma e multiplicação de sinais;
- **Módulo de voz** – efetua a gravação do sinal de áudio obtido a partir da entrada de som do sistema, exibindo-o no domínio do tempo e frequência.
- **Módulo de modulações** – com esse módulo é possível observar os processos inerentes às modulações analógicas AM e FM, e também as modulações digitais tais como: ASK, FSK e PSK. No caso das modulações digitais o AVASS permite gerar automática ou manualmente a sequência binária, e mostrar além do espectro correspondente a sequência atual de bits, o seu diagrama de constelação.
- **Módulo de codificações digitais** – possui como opções de codificação: Unipolar, Polar e Bipolar, com codificações NRZ, RZ, AMI e Manchester

2. Fundamentação teórica

Neste capítulo serão apresentados conceitos necessários para compreensão dos módulos implementados no AVASS. Além de servirem de base para pesquisa didática e prover suporte a continuções do projeto, os temas abordados serão os processos de aquisição, amostragem, operações sobre sinais, modulações digitais e analógicas, a Transformada de Fourier e algumas codificações de linha.

2.1. Aquisição e amostragem

Um sinal analógico possui infinitos valores em sua composição e para que um sistema em tempo discreto possa manipulá-lo é necessário submetê-lo ao processo chamado de amostragem. A forma mais simples de amostrar um sinal é multiplicando-o por um trem de impulsos espaçados por um período de amostragem, como mostra a Figura 1.

Esse processo pode causar perdas de informação se a frequência de amostragem não for adequada. Para evitar esse problema o Teorema da Amostragem, também referenciado como Teorema de Nyquist-Shannon (MIAO, 2007) deve ser respeitado, usando uma frequência de amostragem f_s maior que o dobro que a frequência máxima do sinal f_{\max} conforme a Equação (1).

$$f_s \geq 2f_{\max} \quad (1)$$

A frequência de amostragem f_s utilizada na Figura 1 é de 1000 Hz, sendo adequada para o sinal $x(t)$ com frequência f_{\max} igual a 50 Hz, dessa forma é possível reconstruir o sinal analógico através do processo de interpolação que consiste em um filtro passa baixas onde a frequência de corte f_c é maior que f_{\max} ou ainda $f_c = f_s / 2$. Note que caso haja componentes de frequência superiores a frequência de amostragem, ocorrerá uma sobreposição de frequências (*aliasing*).

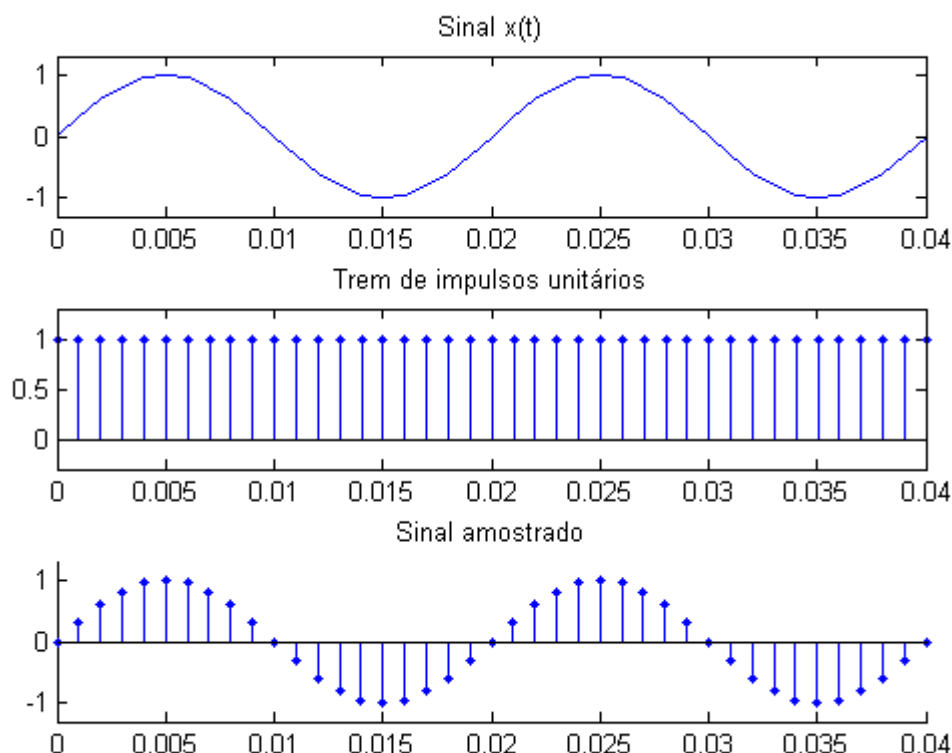


Figura 1- Sinal original, trem de impulsos utilizados e o sinal amostrado.

2.2. Operações básicas

Um aspecto fundamental ao trabalhar com sinais e sistemas é a necessidade de realizar operações específicas sobre os sinais, de forma a modificá-los para satisfazer uma necessidade do sistema. Para isso é possível realizar o seu escalamento temporal e deslocamento temporal, alterar a amplitude, efetuar uma reversão temporal ou ainda somá-lo ou multiplicá-lo por outro sinal, essas operações também podem ser combinadas.

A alteração da amplitude de um sinal $x(t)$ se dá através da multiplicação por um escalar k . Sendo que para valores $k > 1$, $x(t)$ é amplificado e para valores $0 < k < 1$, $x(t)$ é atenuado. Quando $k < 0$, o sinal é invertido em relação a sua amplitude que assume valor igual a k . A Figura 2 mostra essa operação para $k = 2$, $k = -2$ e $k = 0,75$.

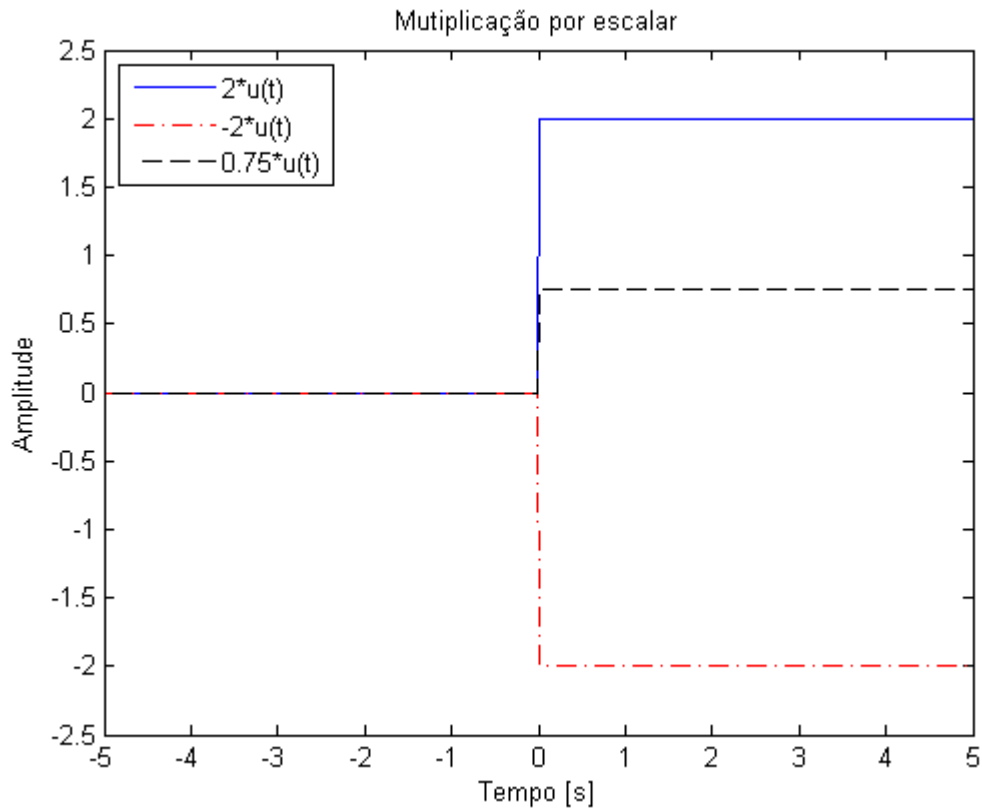


Figura 2 - Multiplicação do sinal $u(t)$ por escalares de valor 2, -2 e 0,75.

O deslocamento temporal pode ser um avanço ou um atraso do sinal. O atraso de $x(t)$ é dado por um deslocamento de T segundos para a direita, representado na forma $x(t - T)$. O chamado avanço é feito de forma inversa, deslocando o sinal $x(t)$ para a esquerda em T segundos, ou seja, $x(t + T)$. A Figura 3 ilustra um ganho de amplitude e um avanço temporal sobre um degrau unitário

$$u(t) \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

e a combinação dessas duas operações.

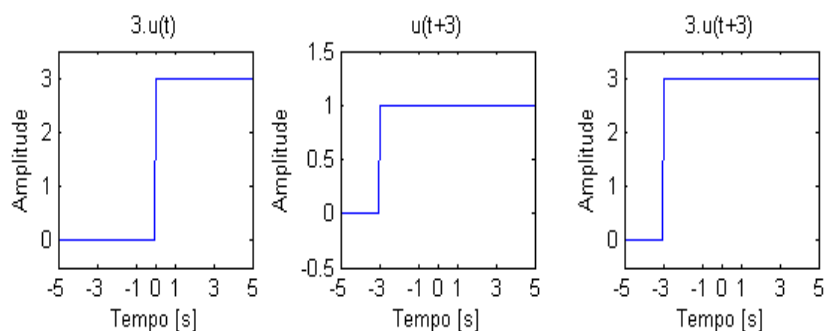


Figura 3- Degrau unitário com ganho e deslocamento temporal

Em algumas situações é interessante comprimir ou expandir o sinal, essa operação é chamada de escalamento temporal. Para um sinal $x(rt)$ onde $r > 1$, diz-se que ele foi comprimido no tempo, no caso de um fator $0 < r < 1$ obtém-se uma expansão temporal, também representada por $x(t/r)$, onde $r > 1$. A Figura 4 apresenta um sinal comprimido e estendido por um fator $r = 2$, verifica-se que houve alteração somente no eixo do tempo e que a amplitude do sinal permanece igual.

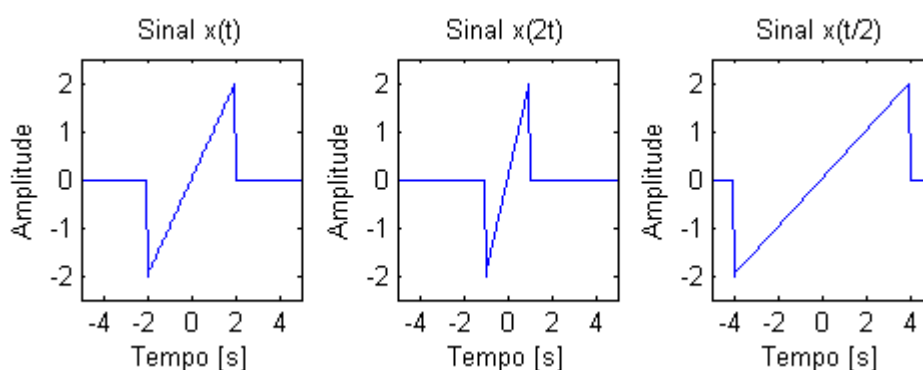


Figura 4 - Sinal $x(t)$ e suas versões comprimida e estendida

Outra operação fundamental é a reversão temporal, que reverte um sinal no eixo do tempo. Um sinal $x(t)$ tem sua versão revertida através da forma $x(-t)$. Uma aplicação dessa operação pode ser para determinar o tipo da paridade do sinal, que será par caso $x(t) = x(-t)$ para todo t . O sinal será ímpar quando $x(t) = -x(-t)$ para todo t . Dessa forma, todo sinal $x(t)$ pode ser descrito como sendo a soma das suas componentes pares e ímpares (LATHI, 2007)

$$\begin{aligned}x(t) &= x_{\text{par}}(t) + x_{\text{ímpar}}(t) \\x_{\text{par}}(t) &= \frac{1}{2}[x(t) + x(-t)] \\x_{\text{ímpar}}(t) &= \frac{1}{2}[x(t) - x(-t)]\end{aligned}\tag{3}$$

Com o auxílio da Figura 5 a análise pode ser feita graficamente, onde se constata que o sinal par possui simetria em relação ao eixo vertical na origem e o sinal ímpar possui assimetria.

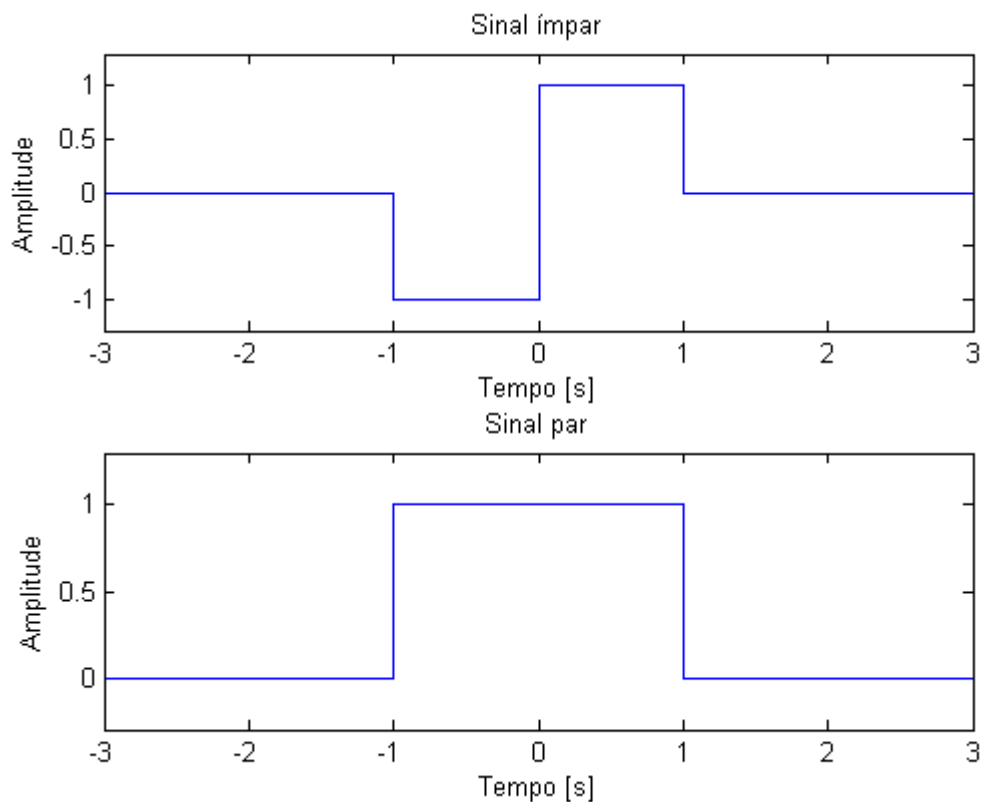


Figura 5- Assimetria característica de um sinal ímpar e simetria característica de um sinal par.

As operações de soma e multiplicação possuem uma similaridade em relação aos elementos que compoem suas lógicas. Em ambos, os valores utilizados na operação são referenciados de acordo com o instante t , resultando numa saída $s_3(t) = s_1(t) \cdot s_2(t)$ ou $s_3(t) = s_1(t) + s_2(t)$. Para exemplificar, a Figura 6 mostra a realização de uma soma entre um sinal de 1000 Hz e outro de 100 Hz.

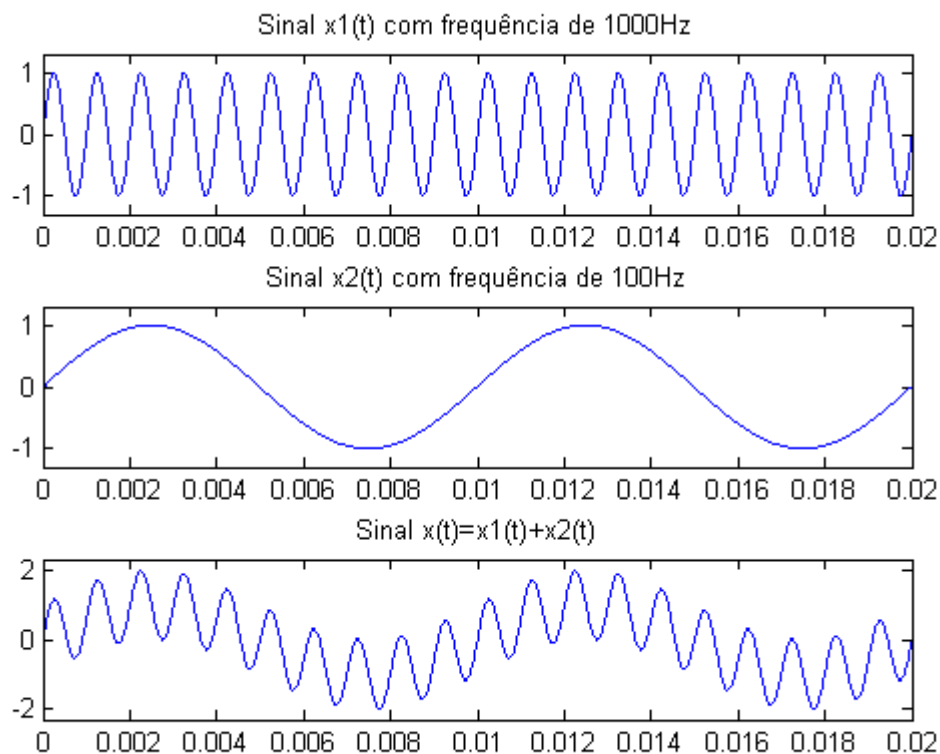


Figura 6 - Soma entre uma senoide de 1000 Hz e outra de 100Hz.

É possível perceber claramente que o sinal resultante da operação possui as duas frequências dos sinais que o constituem e a recuperação de um ou de outro poderia ser feita através do uso de um filtro passa baixas ou passa altas.

2.3. Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é uma operação matemática que possibilita a decomposição de um sinal $x(t)$ em seus componentes de frequência $X(\omega)$. Cada componente possui um valor de amplitude e fase, esses valores representam o espectro de frequências do sinal.

Essa transformada possui ainda a sua forma inversa, que possibilita que um sinal no domínio da frequência $X(\omega)$ possa ser representado no domínio do tempo $x(t)$. A Figura 7 representa um sinal com 100 Hz. Através do seu espectro de frequências é possível verificar a presença de um componente na frequência do sinal utilizado. As oscilações laterais à frequência mostrada devem-se ao fato do uso de janelamento que objetiva minimizar as

margens de transição das amostras truncando as formas de onda, além de prover melhor aproveitamento espectral.

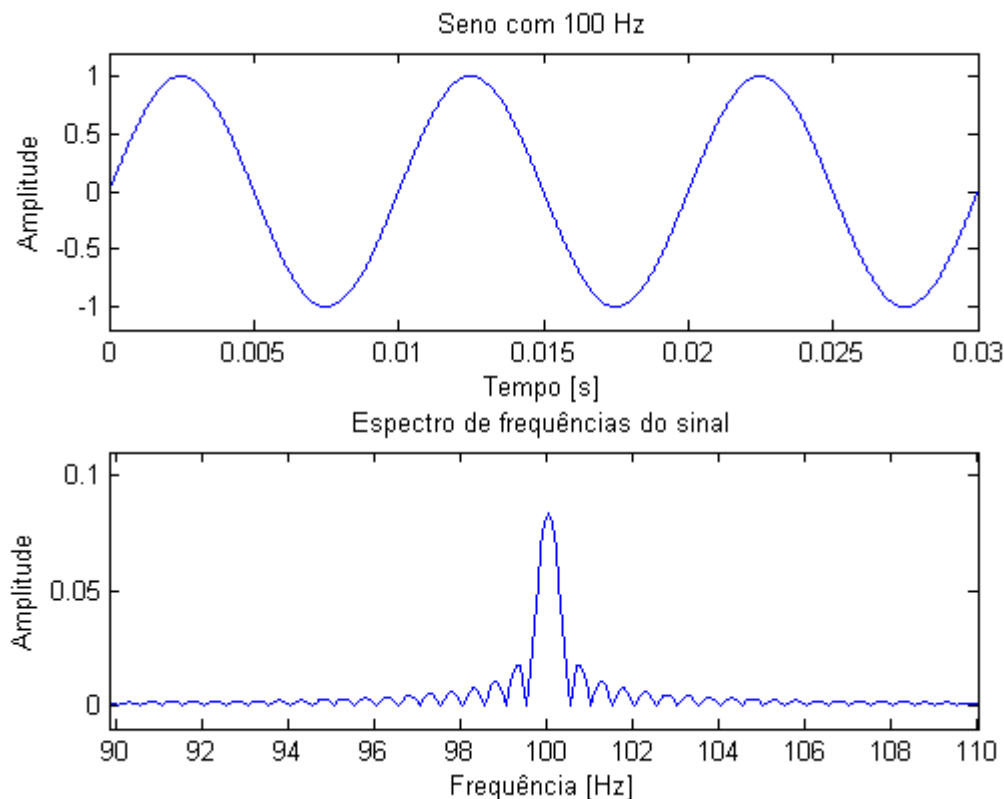


Figura 7 - Seno de 100 Hz e seu espectro de frequência mostrado no AVASS.

Levando em consideração que um computador digital pode apenas processar dados discretos é necessário que a transformada de Fourier também seja discreta. Nesse caso, utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\Omega n} \quad (4)$$

O problema é que o número de cálculos necessários para realizar essa transformada é muito alto, com o auxílio do algoritmo chamado transformada rápida de Fourier (*fast Fourier transform – FFT*) (COOLEY ET AL, 1965) o número de operações é drasticamente reduzido. Para isso, o cálculo da FFT de um sinal é tratado como a soma de segmentos desse mesmo sinal em menores durações (LATHI, 2007).

Essa operação é amplamente utilizada na área de Telecomunicações, auxiliando principalmente na análise de sinais e sistemas lineares. Tendo em vista que o software Matlab possui a implementação de uma função que calcula *FFT*, utilizou-se esse algoritmo para

computar a Transformada de Fourier em todos os módulos do AVASS. Sobre o espectro aplicou-se uma operação definida por Lathi (2007) como preenchimento nulo (*Zero Padding*), que consiste em adicionar amostras com valor nulo entre as amostras do sinal a fim de melhorar a sua resolução de frequência.

A densidade espectral de energia (*energy density spectrum* - EDS), segundo Lathi (2008), pode ser calculada como

$$EDS = |X(\Omega)|^2. \quad (5)$$

Outra possibilidade de cálculo é através da função de autocorrelação $R_x(\tau)$ definida por Sklar (2001) como

$$R_x(T) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} x(t)x(t+T)dt, \quad (6)$$

onde T é o deslocamento e τ é o período do sinal.

2.4. Modulações analógicas

Um sistema de comunicação tem por objetivo entregar uma informação a um destino o qual está fisicamente separado da origem. O processo de modulação é utilizado para realizar esse procedimento que consiste na modificação do sinal de mensagem em um formato que seja compatível com o canal a ser utilizado, variando um sinal de onda portadora de acordo com o sinal de mensagem, chamado de modulante. (HAYKIN, 2004).

Neste projeto, foram implementadas modulações analógicas em amplitude e frequência, para as quais são apresentadas uma breve introdução nas próximas seções. Também foram implementadas as modulações digitais por chaveamento de frequência, chaveamento de amplitude e chaveamento de fase que também serão abordadas no decorrer deste capítulo.

2.4.1. Modulação AM

A Modulação de Amplitude (*Amplitude Modulation* - AM) foi a primeira técnica de modulação a ser concebida sendo seu conhecimento fundamental para o entendimento de diversos conceitos na área de Telecomunicações, tais como: multiplexação, amostragem,

misturadores de frequência, projetos de antenas, rádio difusão, entre outros. Na modulação AM, a amplitude de um sinal de portadora de alta frequência é variada de acordo com a amplitude instantânea do sinal da mensagem modulante (RAPPAPORT, 2009). Para uma portadora $A_p \cos(2\pi f_p t)$ e um sinal modulante $m(t)$ o sinal modulado em AM-DSB s_{AM} pode ser representado como

$$s_{AM}(t) = A_p[1 + m * m(t)]\cos(2\pi f_p t), \quad (7)$$

onde m é o índice de modulação, f_p é a frequência da portadora e A_p é a amplitude da portadora.

O índice de modulação indica quanto será a variação de amplitude do sinal da portadora em relação ao sinal modulante, sendo que a razão entre as amplitudes de pico do sinal modulante e do sinal da portadora é definido tanto como índice de modulação quanto modulação percentual (RAPPAPORT, 2009). A diferença entre essas definições é que se for tratada como índice de modulação teremos $0 < m < 1$, considerando como modulação percentual esse valor poderá variar entre 0% e 100%. Ocorrerá a inversão de fase no sinal se esse índice m for maior que 1. Na Figura 8 é mostrado o sinal modulante no domínio do tempo e o sinal modulado em AM com a envoltória em azul, destacando a informação modulada. Neste caso foi utilizado um índice de modulação $m = 1$.

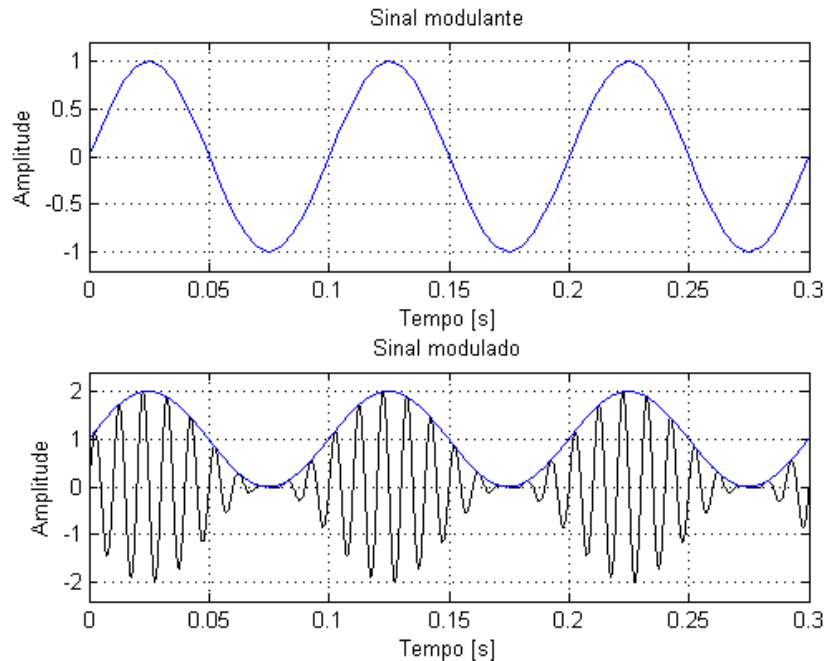


Figura 8 – Modulação AM. Apresenta-se sinal modulante e o sinal modulado.

O espectro do sinal modulado em amplitude possui algumas características que proporcionam uma análise da operação de modulação. Através da Figura 9, onde foi modulado um sinal de 10 Hz com uma portadora de 100 Hz, é possível afirmar que de fato o sinal modulado $s_{AM}(t)$ foi deslocado para a frequência portadora f_p . Existem ainda duas bandas laterais que variam de acordo com a frequência do sinal modulante f_m , sendo que a banda lateral inferior f_{bi} é determinada por $f_p - f_m$ e a banda lateral superior f_{bs} tem o valor igual a $f_p + f_m$, ou seja, $f_{bi} = f_p - f_m = 100 - 10 = 90\text{Hz}$ e $f_{bs} = f_p + f_m = 100 + 10 = 110\text{Hz}$, essa diferença é a mesma entre zero e f_m . Novamente as oscilações laterais às frequências mostradas são causadas pelo uso de uma janela retangular, já citada na Seção 2.3.

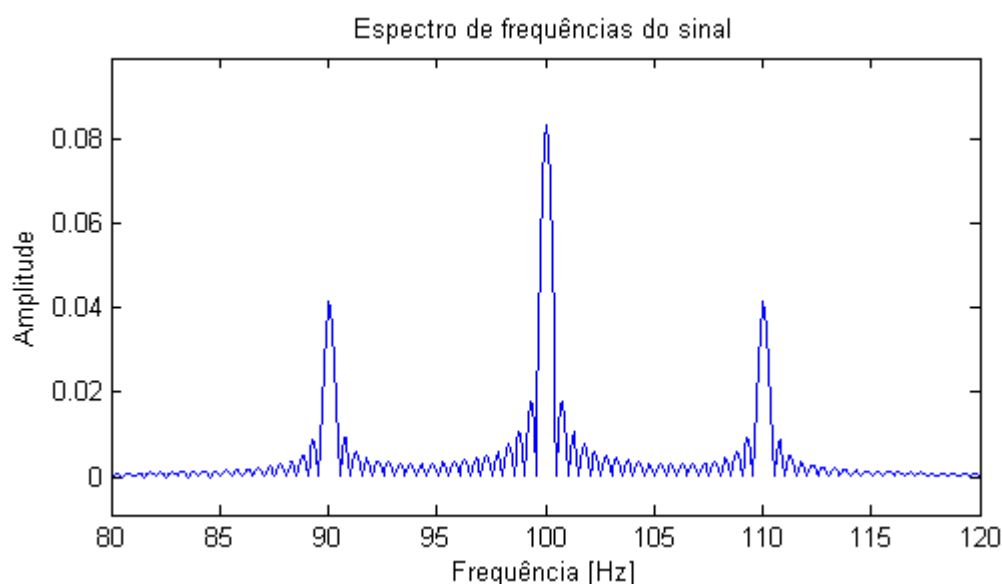


Figura 9 - Espectro de frequências do sinal senoidal de 10 Hz modulado em amplitude por uma portadora de 100 Hz.

Um modulador AM-DSB consiste num bloco com uma entrada para o sinal modulante adicionado de uma componente contínua, uma entrada para a portadora e uma saída apresentando o sinal modulado, um diagrama desse conceito pode ser observado na Figura 10.

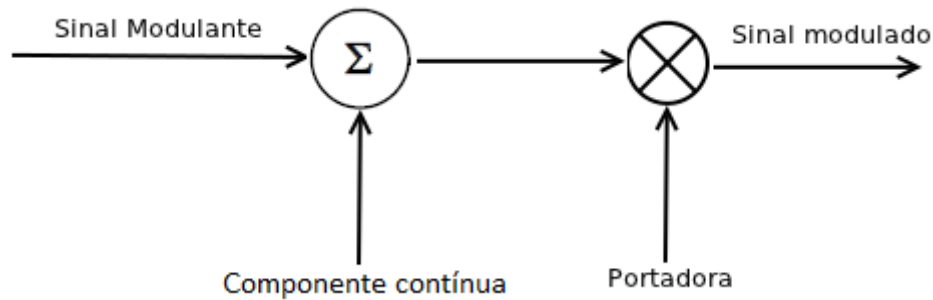


Figura 10 - Diagrama de um modulador AM-DSB.

2.4.2. Modulação FM

A modulação em frequência (*Frequency Modulation* – FM) é mais complexa que a modulação AM, no entanto seu estudo também se faz importante pois ela é utilizada em diversas áreas de sinais e sistemas, como transmissão de rádio e síntese de áudio utilizada em placas de som de computadores.

Segundo Rappaport (2009) na modulação FM a frequência instantânea do sinal da portadora é variada linearmente com o sinal da mensagem de banda base. Para um sinal modulante $m(t)$ igual a $A_p \sin(2\pi f_p t)$ o sinal modulado em FM pode ser representado por

$$s_{\text{FM}}(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + k_f \sin(2\pi f_m t)), \quad (8)$$

onde k_f é a constante de modulação, f_p é a frequência da portadora, A_p é a amplitude da portadora e f_m é a frequência máxima do sinal modulante.

A constante de modulação em frequência k_f é dada em Hz/V e representa a conversão da variação de amplitude do sinal modulante em variações de velocidade angular instantânea (MOECKE, 2004). Dependendo do seu valor, é possível diferenciar a modulação em dois tipos: i) FM de banda estreita, para valor de k_f baixo comparado a um radiano; ii) FM de banda larga, para valor de k_f alto se comparado a um radiano (HAYKIN, 2004).

Na Figura 11 pode-se observar o sinal modulado em FM e seu espectro de frequências, neste caso o sinal da portadora possui 100 Hz, a modulante 10 Hz e índice de modulação igual a quatro.

A modulação em frequência é muito mais complexa, mas proporciona o benefício de uma potência de saída constante independente da mensagem que está sendo enviada (ATMEL, 2009).

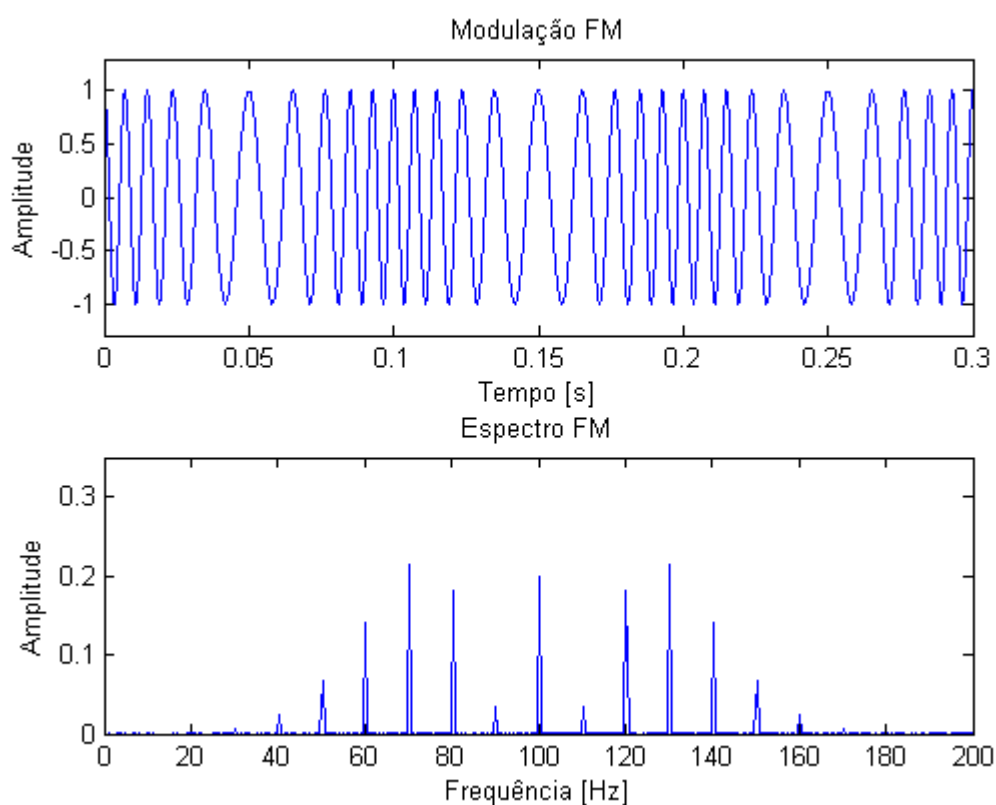


Figura 11 – Sinal modulado em frequência e seu espectro de frequências.

2.5. Modulações digitais

As modulações digitais vêm adquirindo grande uso por serem mais eficientes em alguns aspectos em relação às modulações analógicas. Pode-se citar, por exemplo, a maior tolerância a ruídos e interferência, e o fato de poderem ser implementados utilizando circuitos digitais, que possuem um custo menor em relação ao uso de modulações feitas com o uso de circuitos analógicos. E ainda, a recuperação do sinal transmitido é mais fácil pelo fato do sinal digital possuir símbolos definidos que são conhecidos pelo transmissor e receptor. De forma que para que esses símbolos sejam comprometidos deve haver uma perda significativa durante a transmissão.

Na modulação digital, uma portadora analógica é modulada por um sinal discreto. Os métodos de modulação digital podem ser considerados como uma conversão digital-analógica e sua demodulação como conversão analógica digital. As mudanças no sinal da portadora são definidas de acordo com um número de símbolos finitos, também chamados de alfabeto de modulação. (WIKIPEDIA, 2010). A seguir são apresentadas as modulações que foram utilizadas neste projeto.

2.5.1. Modulação ASK

A modulação por chaveamento de amplitude (*Amplitude Shift Keying* - ASK) tem um conceito simples, no qual os símbolos são representados por diferentes amplitudes. O ASK foi uma das formas pioneiras de modulação digital, utilizada principalmente no telégrafo durante o início do século XX (SKLAR, 2001).

Quando há um número de símbolos maior que dois, o ASK é chamado de ASK-M-ária onde M é o número de símbolos. O número de *bits* transmitidos por cada símbolo é dado por $\log_2(M)$, de modo que M deve ser uma potência de dois diferente de zero. Quando são utilizados apenas dois símbolos o ASK pode ser tratado como *On-Off keying* (OOK). Um mapeamento de símbolos e amplitudes também é feito, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Mapeamento de símbolo pela amplitude para modulação 4-ASK

Símbolo	Amplitude
0 0	1
0 1	1.5
1 0	2
1 1	2.5

Na Figura 12 pode-se visualizar a modulação ASK e seu respectivo espectro de frequências utilizando os valores apresentados na Tabela 1. A partir da Figura 12 percebe-se que tanto a fase quanto a frequência do sinal são constantes.

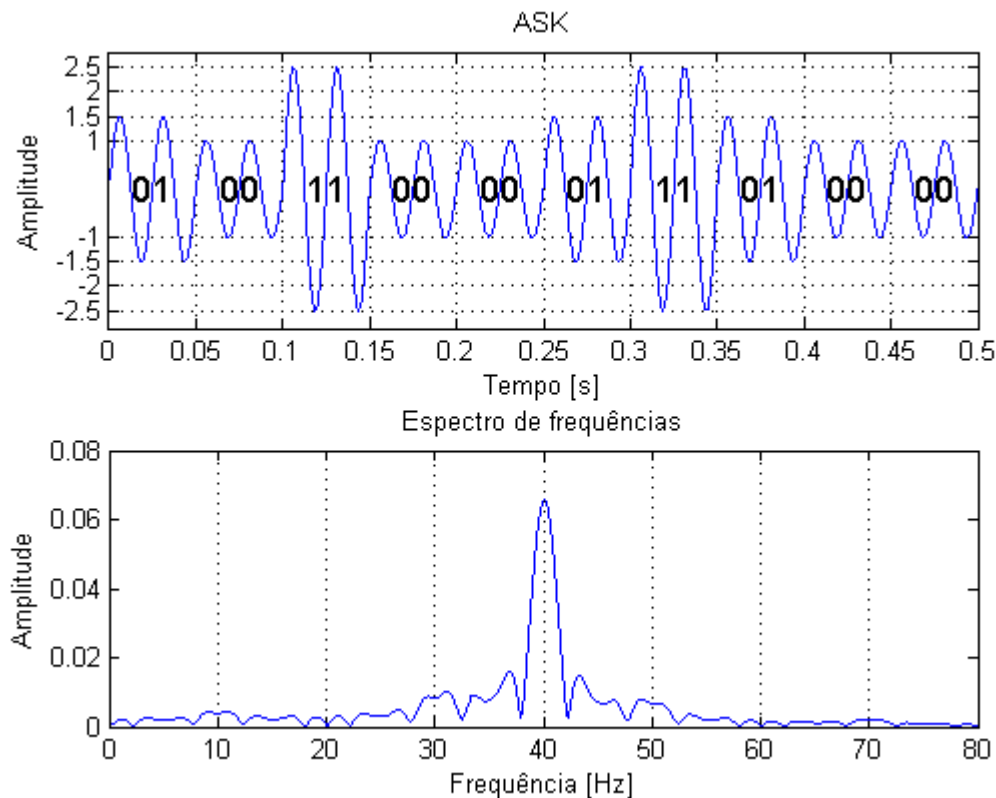


Figura 12 - Modulação 4-ASK e seu espectro de frequências.

Embora existam formas mais eficientes de modulação, como a modulação de amplitude e quadratura (*Quadrature Amplitude Modulation* - QAM), o ASK tem algumas aplicações como detectores de potência de radiofrequência (MAXIM, 2009), ou ainda moduladores OOK na faixa de 60 GHz, que podem auxiliar na transmissão sem fio de dados a uma taxa na ordem de *gigabits* (IEEEEXPLORE, 2011).

2.5.2. Modulação FSK

Na modulação por chaveamento de frequência (*Frequency Shift Keying* – FSK), diferentes símbolos são representados por diferentes frequências, ao passo que a amplitude é sempre constante. Similar a modulação ASK, a nomenclatura muda quando existe mais de dois símbolos sendo utilizados, sendo chamada de FSK M-ária. No caso de apenas dois símbolos a nomenclatura mais comum é BFSK. A Tabela 2 ilustra um simples mapeamento de símbolos para suas respectivas frequências no caso de um 4-FSK.

Tabela 2 - Mapeamento de símbolo pela frequência para modulação 4-FSK

Símbolo	Frequência (Hz)
0 0	50
0 1	100
1 0	150
1 1	200

No caso de uma modulação FSK podem ocorrer mudanças de fase devido à mudança brusca de frequência entre os símbolos. Segundo Sklar (2001) a continuidade de fase não é um requisito, mas quando a fase do sinal modulado é contínua ele é chamado de CPFSK (*Continuous Phase FSK*).

Um sinal modulado em FSK utilizando o mapeamento apresentado na Tabela 2 é representado na Figura 13 sendo possível perceber que cada símbolo possui um componente de frequência. Além disso, esse sinal é um exemplo de CPFSK, porque não há mudanças de fase na intersecção de símbolos.

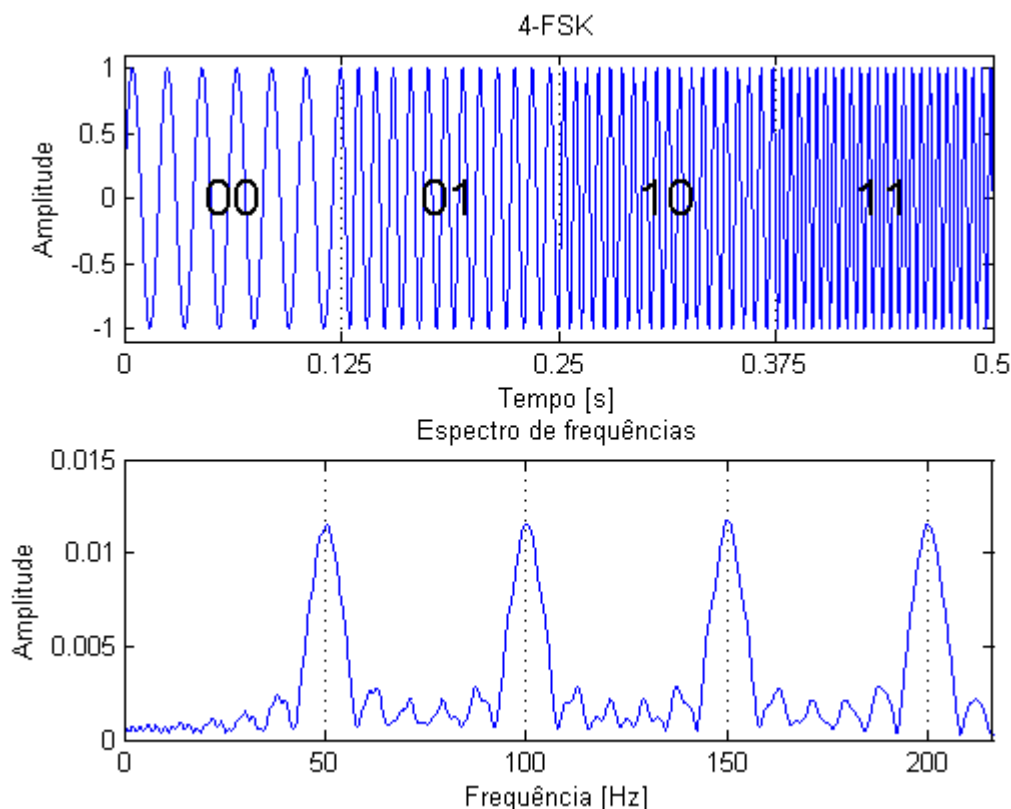


Figura 13 - Modulação 4-FSK e seu espectro de frequências.

2.5.3. Modulação PSK

Na modulação por chaveamento de fase (*phase shift keying* - PSK) a amplitude e frequência do sinal são mantidas constantes enquanto a fase do sinal é deslocada de acordo com o *bit* a ser transmitido. No caso de um BPSK quando há incidência de *bit* 0 a fase permanece em 0° e para *bit* 1 a fase é deslocada em 180° . Essa é a forma mais simples de uso do PSK, além de ser mais eficiente que o ASK pelo fato de ser menos suscetível a ruído. Isso ocorre porque o ruído é mais propenso a degradar a amplitude que a fase.

Como nas outras modulações, o PSK também pode ser usado com mais de dois símbolos. Os tipos mais difundidos são o QPSK ou 4-PSK, e o 8-PSK que é utilizado na rede de dados EDGE (UMTSWORLD, 2011). O QPSK consiste na utilização de dois moduladores BPSK operando em quadratura de fase entre si (HAYKIN, 2008). A sequência de *bits* a ser transmitida $s(t)$ é dividida por um demultiplexador resultando em duas sequências $s_1(t)$ e $s_2(t)$. Essas sequências passam por seus respectivos moduladores BPSK,

assumindo um dos dois valores de fase possíveis, sendo que $s_2(t)$ estará sempre defasado em 90° em relação à $s_1(t)$, essa etapa provê os sinais BPSK $x_1(t)$ e $x_2(t)$. O sinal QPSK $x(t)$ resulta da soma dos sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$. Para melhor compreensão, a Figura 14 mostra um diagrama de blocos de um modulador QPSK.

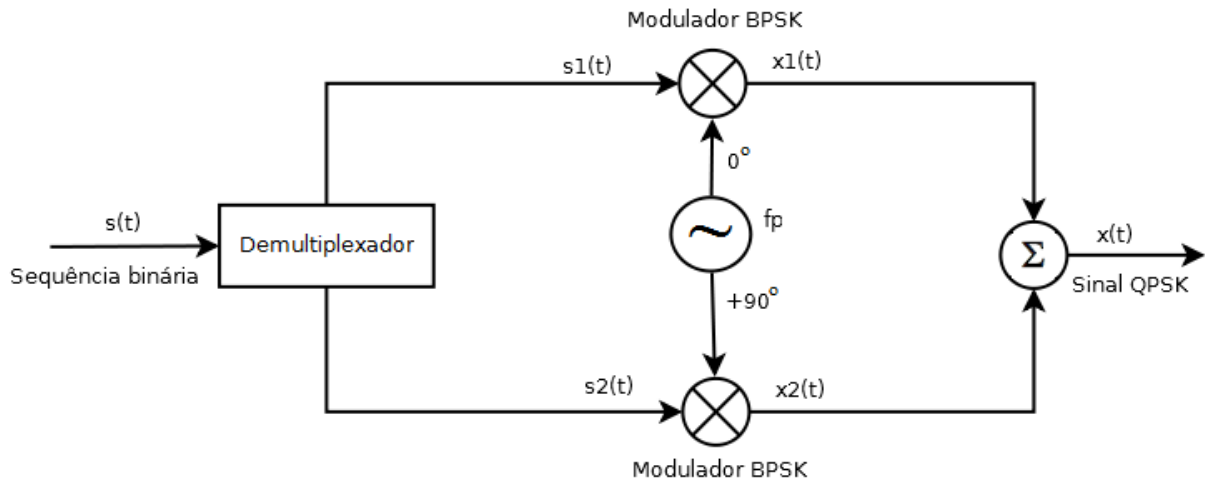


Figura 14 - Diagrama de blocos de um modulador QPSK.

Como resultado tem-se um sinal com a mesma frequência, mas com quatro fases distintas. A Figura 15 ilustra esse tipo de sinal. Para auxiliar a visualização dos componentes de fase e quadratura do sinal utiliza-se o diagrama de constelação que pode exibir ainda quais os símbolos representam cada *bit* ou sequência binária, um exemplo de diagrama é representado na Figura 16.

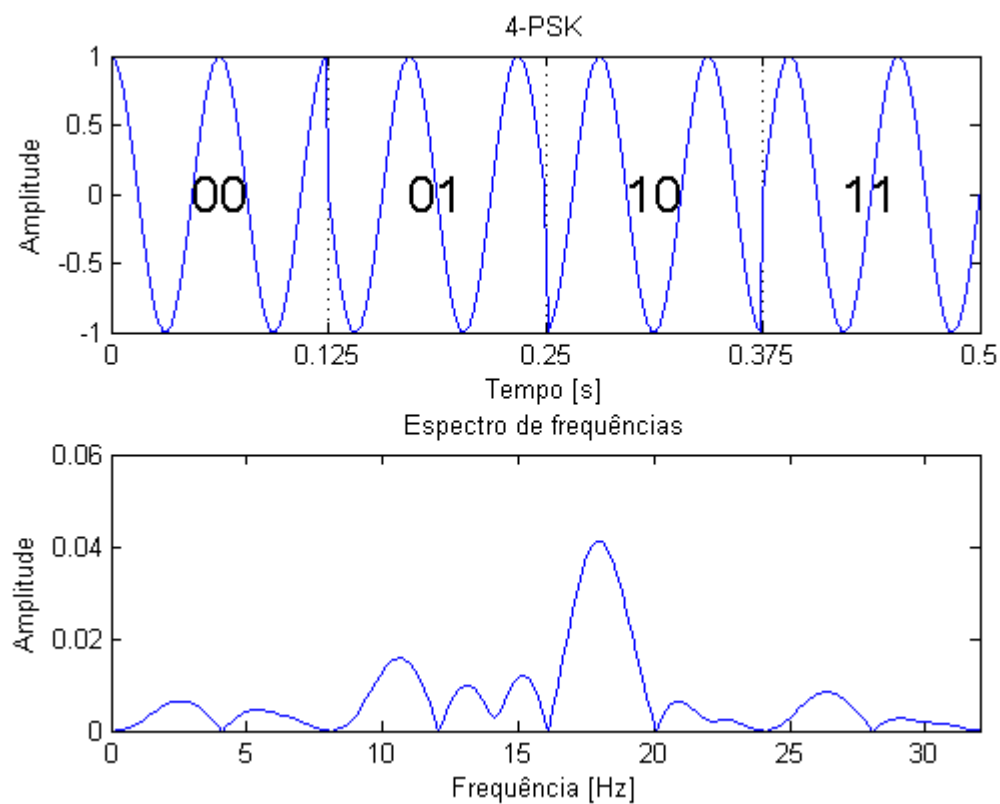


Figura 15 - Modulação 4-PSK e seu espectro de frequências.

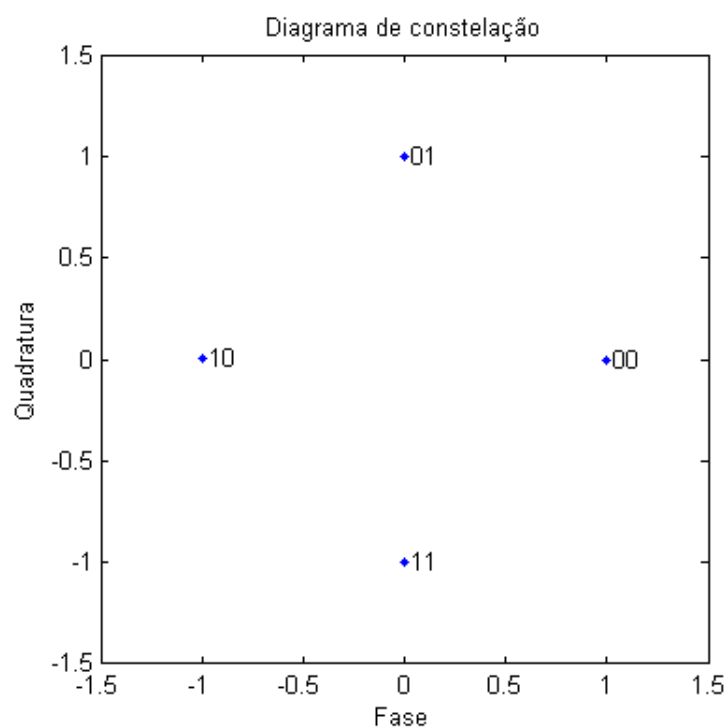


Figura 16 - Diagrama de constelação da modulação 4-PSK.

2.6. Códigos de linha

Para a transmissão de informações digitais, o sinal deve conter algumas características que não são inerentes ao sinal unipolar NRZ, que representa a forma do sinal presente em um circuito lógico digital (conforme mostrado na Figura 18).

Dessa forma, faz-se necessário o uso de codificações de linha que tratam esses requisitos. Segundo Moecke (2004) o processo de codificação de linha consiste em modificar o sinal digital de modo a satisfazer estes requisitos: i) ausência de componente contínua; ii) redução de banda de frequência; iii) transmissão adequada da informação do relógio (*clock*) e iv) facilidade de detecção de erros.

Embora diferentes esquemas de codificação de linha possam ser utilizados, nem todos atendem a esses requisitos. A Figura 17 mostra as codificações mais usadas. Nesta versão inicial do AVASS foram implementadas as codificações Unipolar, Polar e Bipolar, conforme descrito nas próximas seções.

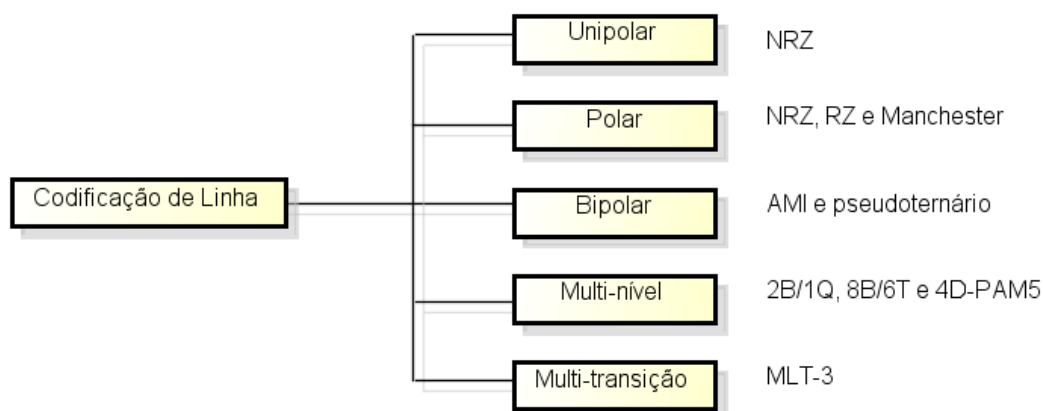


Figura 17 - Codificações de linha mais populares.

2.6.1. Codificação Unipolar

A codificação Unipolar é a mais simples de todas. Esta é a forma como o sinal digital está presente em um circuito lógico digital. Essa codificação é raramente usada para transmissão, mas sua simplicidade ajuda a apresentar os conceitos nos sistemas de codificação mais complexos e permite examinar os tipos de problemas que se devem resolver nos sistemas de transmissão digital (FOROUZAN, 2007). Essa codificação pode ser feita de duas formas diferentes, a primeira, chamada de Unipolar não-retorna-a-zero (*Non-Return-to-Zero* - NRZ) consiste em transmitir o sinal digital diretamente através de um nível de tensão para o *bit* “0” e outro nível de tensão para o *bit* “1”, conforme mostrado na Figura 18. A sequência utilizada para ilustrar a codificação é a sequência “11011001”, a qual será utilizada em todas as demais codificações para fins de comparação.

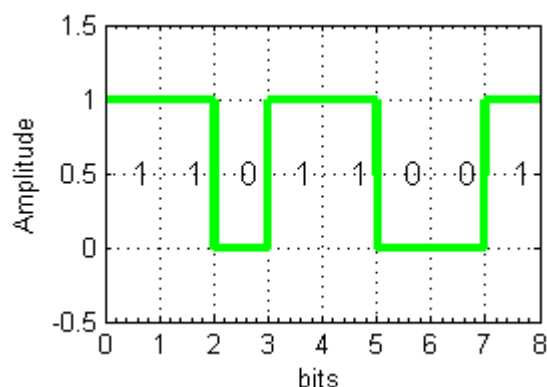


Figura 18 - Codificação Unipolar NRZ.

O grande problema das codificações NRZ ocorre quando o transmissor e receptor estão dessincronizados, pois o receptor não sabe quando um *bit* termina e outro começa. Uma solução é utilizar a codificação Unipolar retorna-a-zero (*Return-to-Zero* – RZ), na qual as mudanças de nível de tensão ocorrem no meio do *bit* “1”. A Figura 19 ilustra essa forma para a mesma sequência binária.

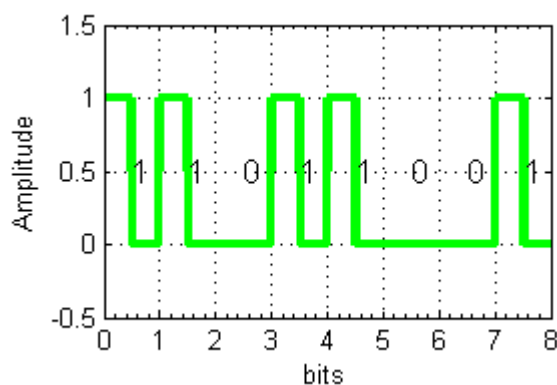


Figura 19 - Codificação Unipolar RZ.

2.6.2. Codificação Polar

A codificação Polar às vezes é confundida com a Bipolar, por isso é importante explicitar as diferenças entre elas. A Figura 20 exemplifica a codificação Polar NRZ, na qual o bit “1” tem um nível de tensão positivo e o bit “0” tem nível de tensão negativo.

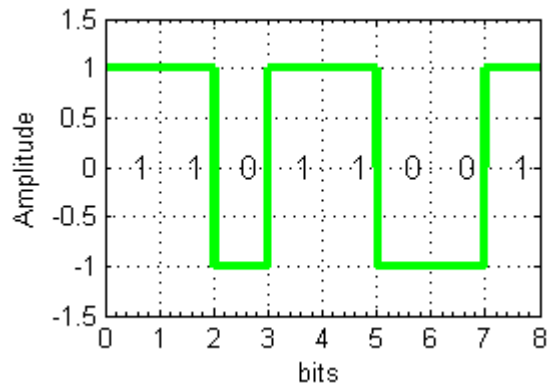


Figura 20 - Codificação Polar NRZ.

Também existe a variante RZ para codificação do tipo Polar, mostrada a Figura 21. Neste caso o *bit* “0” também passa a ter uma transição para zero no meio do *bit*. A principal desvantagem no uso de codificações RZ, segundo Forouzan (2007), é a maior largura de banda devido à necessidade de duas mudanças de sinal por *bit*. Além disso, essa variante RZ apresenta uma complexidade um pouco maior que a NRZ, pois utiliza três níveis de tensão, tornando complexo para o circuito digital definir e reconhecer com precisão esses níveis.

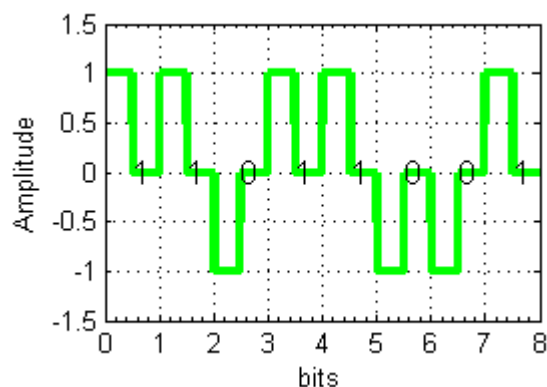


Figura 21 - Codificação Polar RZ.

2.6.3. Codificação Bipolar

A codificação Bipolar possui nível de tensão que é alternado entre positivo e negativo para para o *bit* “1” e nível de tensão zero para o *bit* “0” (FOROUZAN, 2007). A codificação AMI-NRZ (*Alternate Mark Inversion*) é do tipo bipolar e é ilustrada na Figura 22. Essa codificação também pode ser implementada na variante RZ (LU ET AL, 2005).

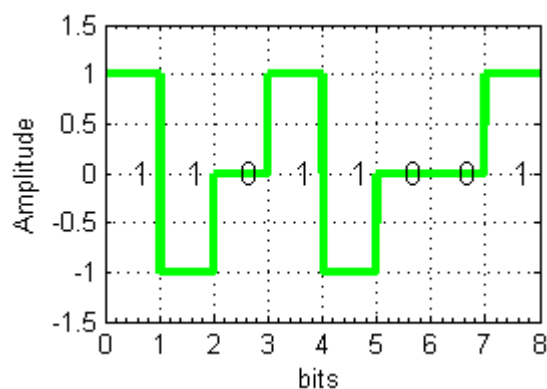


Figura 22 - Codificação AML.

2.6.4. Codificação Manchester (Bifase)

Outra codificação implementada nesse projeto foi a Manchester que também é do tipo polar. Nessa codificação a duração do *bit* é dividida em duas partes, sendo que ao *bit* “1” é atribuído um nível de tensão positiva até a metade do *bit* quando há uma transição para o nível de tensão negativa. Da mesma forma, o *bit* “0” é representado por um nível de tensão negativo com uma transição para o nível de tensão positivo na metade do *bit*, conforme mostrado na Figura 23. A existência de uma transição a cada *bit* garante o correto sincronismo e alinhamento de *bit* no receptor. Uma desvantagem dessa codificação é a necessidade do dobro da largura da banda se comparado à codificação polar NRZ.

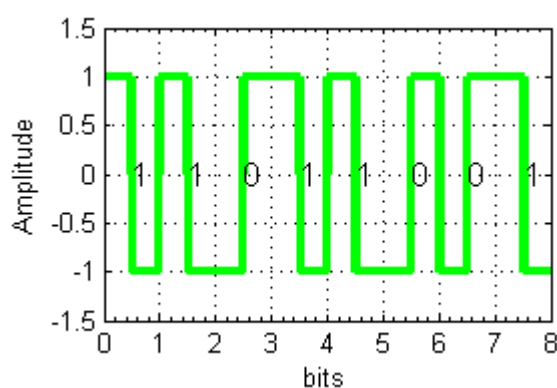


Figura 23 - Codificação Manchester.

3. Desenvolvimento

Para a implementação do projeto do sistema AVASS, foi utilizado o Matlab como plataforma de desenvolvimento. A escolha se baseou na ampla disponibilidade de bibliotecas, conhecidas como Toolbox, as quais proporcionam uma estrutura favorável ao desenvolvimento de aplicações e protótipos desde simples até muito complexos nas diversas áreas de conhecimento, incluindo o processamento de sinais e sistemas. O Matlab tem sido usado na maioria das universidades do mundo e começa a também no desenvolvimento de sistemas na indústria de telecomunicações, por prover ferramentas ágeis, rápidas e confiáveis (MATHWORKS, 2010).

Outro fator decisivo na escolha do Matlab é a disponibilidade de 10 licenças para uso educacional no *campus* de São José do IF-SC, que implica na disponibilidade do ambiente AVASS para os alunos do *campus* sem custo adicional, através do acesso remoto por máquinas virtuais. Todo o ambiente foi escrito em linguagem “.m”, sendo esta de alto nível, além do próprio Matlab possuir uma interface amigável.

O sistema AVASS possui uma interface gráfica para cada módulo implementado. Em cada módulo o usuário pode definir alguns parâmetros e realizar as simulações e interações desejadas. O diagrama de blocos representado na Figura 24 mostra o fluxo de uso do ambiente AVASS.

O processo de desenvolvimento do sistema foi realizado em duas etapas: i) Construção da interface gráfica; ii) Programação do módulo.

Na construção da interface gráfica utilizou-se uma ferramenta GUI (*Graphical User Interface*) nativa do Matlab, que permite projetar a interface do usuário. A programação do módulo é a parte mais importante do processo de desenvolvimento, pois ela define as funções e comportamentos de cada componente da interface, como botões, caixas de texto, caixas de seleção e barras de rolagem. A Figura 25 ilustra a janela de apresentação gráfica do *guide*, no qual foram projetadas as interfaces de cada um dos módulos do sistema AVASS. Nesta janela o menu de ferramentas à esquerda tem diversos componentes que podem ser adicionados à interface gráfica do módulo. Na parte central da janela do *guide* é possível arranjar o

conteúdo gráfico do módulo e editar as propriedades de cada item. Ao completar a tarefa de configuração gráfica, é gerado um arquivo “.m” onde deve ser feita a programação do comportamento de cada módulo.

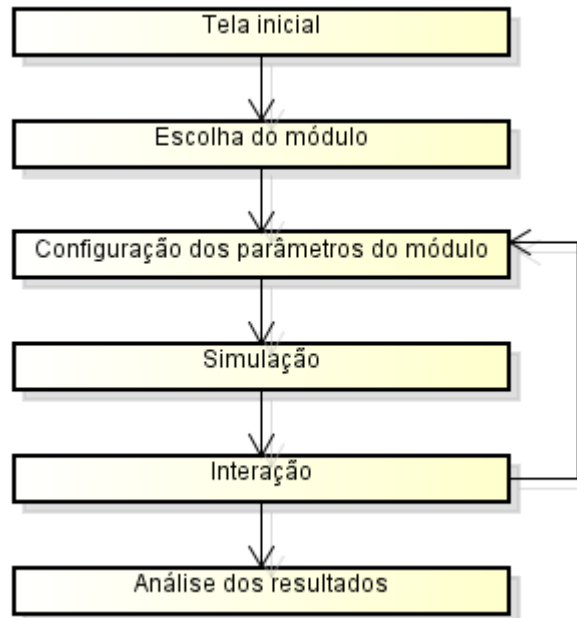


Figura 24 - Diagrama de blocos do uso do sistema AVASS

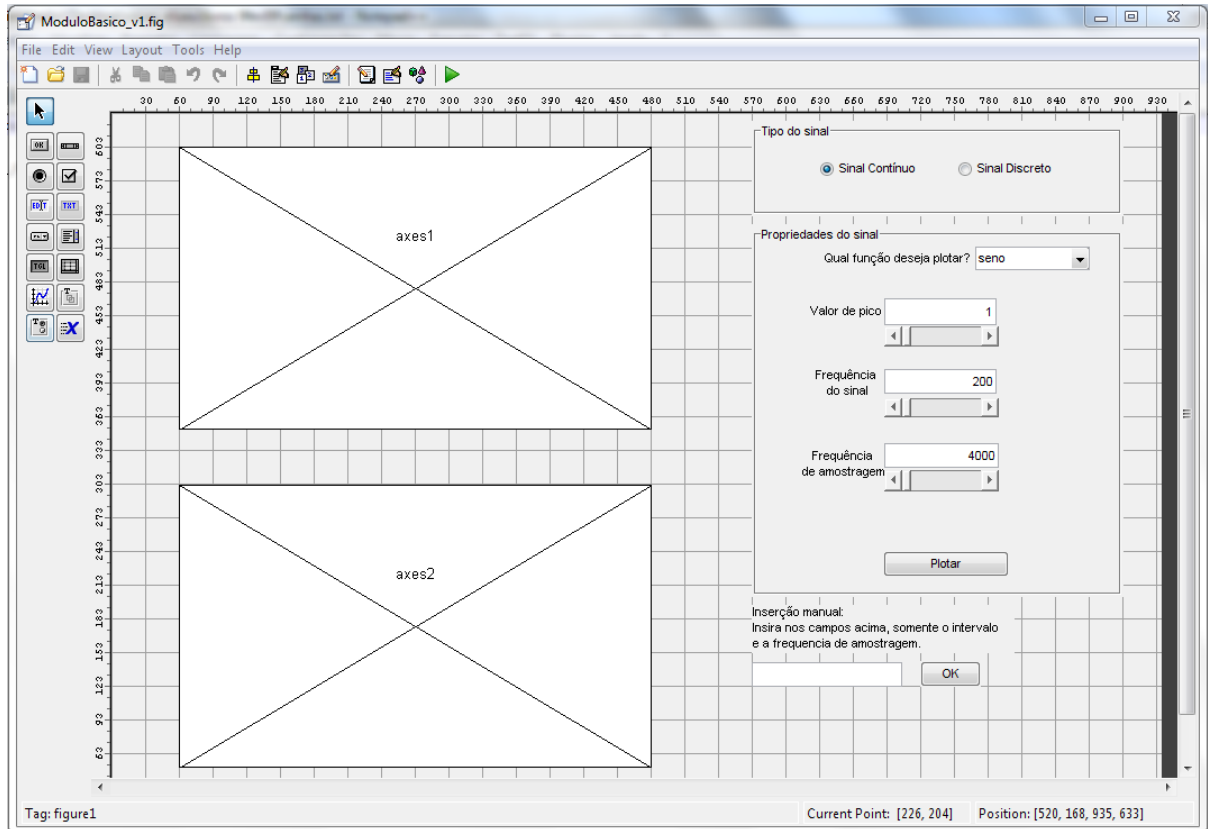


Figura 25 - Projeto da interface de um módulo usando a ferramenta *guide* do Matlab.

3.1. Módulos desenvolvidos

Usando a janela do *guide* como interface de acesso e visualização dos resultados, foram implementados os módulos de processamento projetados para auxiliar no processo de ensino-aprendizagem na área de Sinais e Sistemas. Na versão inicial, o AVASS dispõe dos módulos para os seguintes conteúdos e temas: i) aquisição, amostragem, quantização e codificação de sinais; ii) operações básicas realizadas sobre sinais (multiplicação por escalar, deslocamento no tempo, escalamento temporal, reversão temporal, multiplicação e soma de sinais); iii) representação de sinais no domínio da frequência através da transformada de Fourier; iv) modulação analógica em AM e FM; v) modulação digital em ASK, PSK e FSK; vi) codificação de sinais em AMI, Manchester, RZ e NRZ.

O acesso aos diferentes módulos é feito através de uma tela inicial representada na Figura 26. Na fase inicial optou-se por mostrar os códigos fontes dos módulos e funções desenvolvidas através do *Editor* do próprio Matlab, pois este permite editar e executar o código fonte linha por linha através da ferramenta de depuração de código embutido,

permitindo ao aluno entender o funcionamento do módulo. O usuário também pode, se desejar, alterar o código fonte dos módulos ou acrescentar novos módulos ou novas opções dentro dos módulos usando as interfaces gráficas já desenvolvidas.



Figura 26 - Tela inicial do AVASS com seleção dos módulos.

3.1.1. Módulo de sinais básicos

O módulo de sinais básicos permite ao usuário gerar sinais contínuos e discretos no tempo, além de visualizar seu espectro de frequências. Algumas opções predefinidas do sinal também já estão disponíveis, além da possibilidade de ajuste dos parâmetros como frequência do sinal, frequência de amostragem e valor da amplitude de pico.

Para permitir uma maior liberdade, versatilidade e flexibilidade no estudo de sinais, foi implementado um campo de texto que simula uma linha de comando do Matlab. Através desse campo é possível personalizar o sinal a ser utilizado. A Figura 27 ilustra o módulo com um sinal discreto do tipo $\sin[n]/n$, o espectro de frequências correspondente, bem como todos os parâmetros que podem ser configurados na interface.

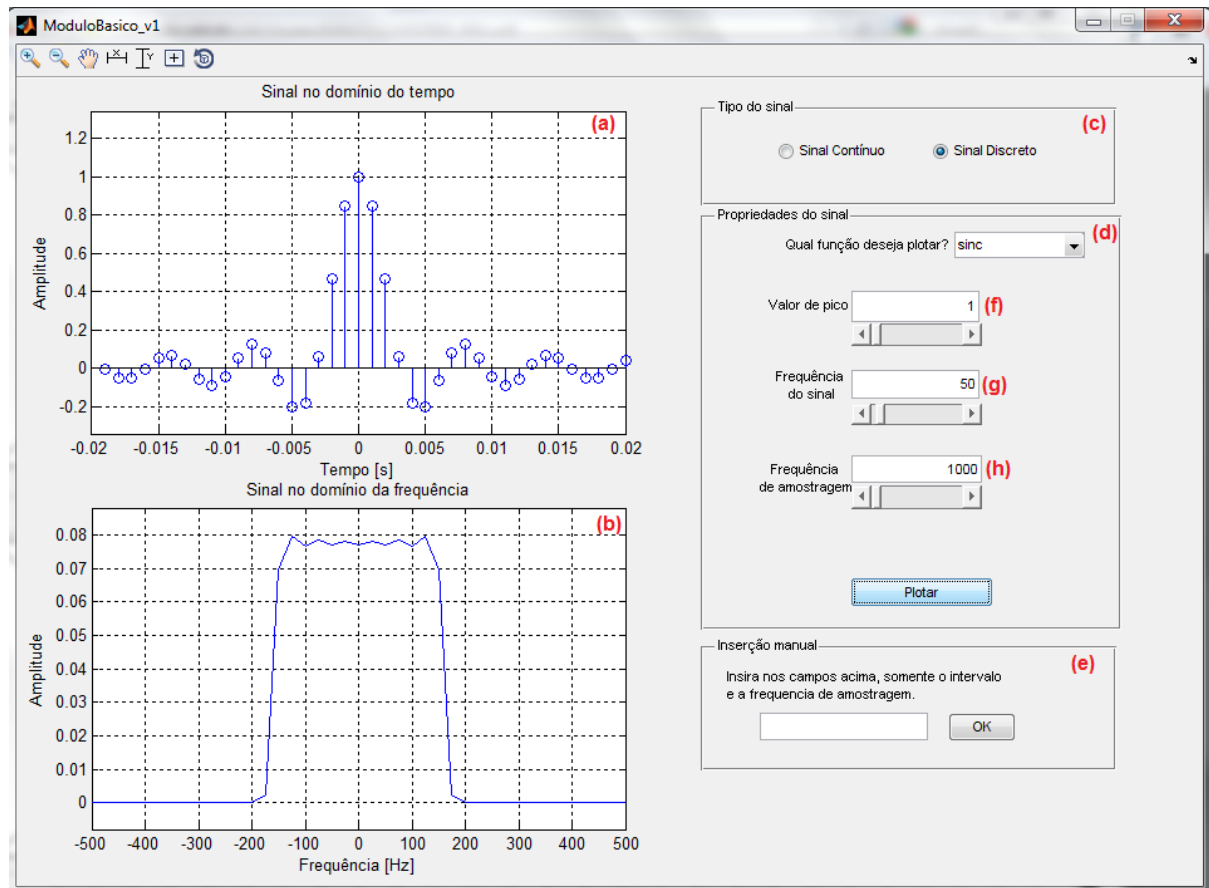


Figura 27 – Interface gráfica do módulo de sinais básicos.

O funcionamento do módulo pode ser descrito com base na Figura 27. Inicialmente o usuário precisa definir se o sinal será representado na forma contínua ou discreta (c), e se o sinal for discreto deve escolher a frequência de amostragem em (h). Em seguida o usuário ou seleciona um sinal da lista (d) ou insere um sinal personalizado no campo (e). Caso escolha um sinal da lista, poderá definir os parâmetros como amplitude de pico (f), frequência do sinal (g). Quando o usuário clicar o botão **Plotar**, o sinal no domínio do tempo será exibido no painel (a) enquanto que o espectro de frequência (amplitude) é exibido no painel (b).

Cada parâmetro ajustável possui um campo onde pode ser digitado o valor do parâmetro ou opcionalmente pode ser usada a barra de rolagem para estabelecer este valor. No parâmetro “frequência de amostragem”, embora o valor máximo esteja em 1000 é possível aumentar o valor, devendo-se atentar para o tempo de processamento.

Em cada um dos módulos foi também criado um conjunto de ícones que possuem as funções de *zoom* e arraste (*panning*), os quais podem ser fixados para atuar apenas no eixo X ou apenas no eixo Y. Outro ícone permite ler os valores sobre os gráficos mostrados, através de um simples clique do mouse.

Essa interface pode ser utilizada para constatar os problemas que ocorrem quando a amostragem é realizada de forma incorreta. Outra possibilidade de uso desse módulo é a inserção manual de sinais, na qual se pode digitar a equação completa de um sinal desejado, permitindo uma ampla liberdade e facilidade no entendimento de operações realizadas com sinais, e suas consequências no domínio do tempo e domínio da frequência. Neste caso os sinais básicos que podem ser utilizados são todos os definidos no Matlab, como $\sin(t)$, $\cos(t)$, ou $\sin(t) / t$, além dos definidos no módulo como o $u(t)$.

3.1.2. Módulo de operações básicas

O módulo de operações básicas provê uma interface que possibilita a realização de operações sobre dois sinais distintos e exibe o resultado das mesmas. Também conta com as operações sobre apenas um sinal como reversão temporal, multiplicação por escalar e deslocamento no tempo. Ele conta com algumas funções pré-definidas sendo elas o seno $\sin(t)$, o cosseno $\cos(t)$, o degrau unitário $u(t)$ e a função amostragem $\text{sinc}(t) = \sin(t) / t$, a partir das quais o usuário pode desenvolver seus estudos.

A Figura 28 mostra a interface desse módulo implementando a multiplicação entre um degrau unitário $u(t)$ e um $\sin(t) / t$. No painel (a) é mostrado o primeiro sinal $s_1(t)$ que é escolhido pelo usuário a partir das funções (e) pré-definidas já mencionadas. Através dos parâmetros (d) é possível definir sua frequência (f) e após selecioná-lo em (g) poderá aplicar as operações de reversão temporal $s_1(-t)$ em (h), multiplicação por escalar $ks_1(t)$ em (i) e deslocamento temporal $s_1(t \pm T)$ em (j). No painel (b) é mostrado o segundo sinal $s_2(t)$ o qual também é definido pelo usuário em (e), aplicando-se os mesmos parâmetros (f), (h), (i) e (j) definidos para o primeiro sinal. Após selecionar e configurar os dois sinais o usuário pode escolher (k) a operação soma $s_3(t) = s_1(t) + s_2(t)$ ou de multiplicação $s_3(t) = s_1(t) \cdot s_2(t)$ que deseja efetuar entre os dois sinais, sendo o resultado mostrado no painel (c).

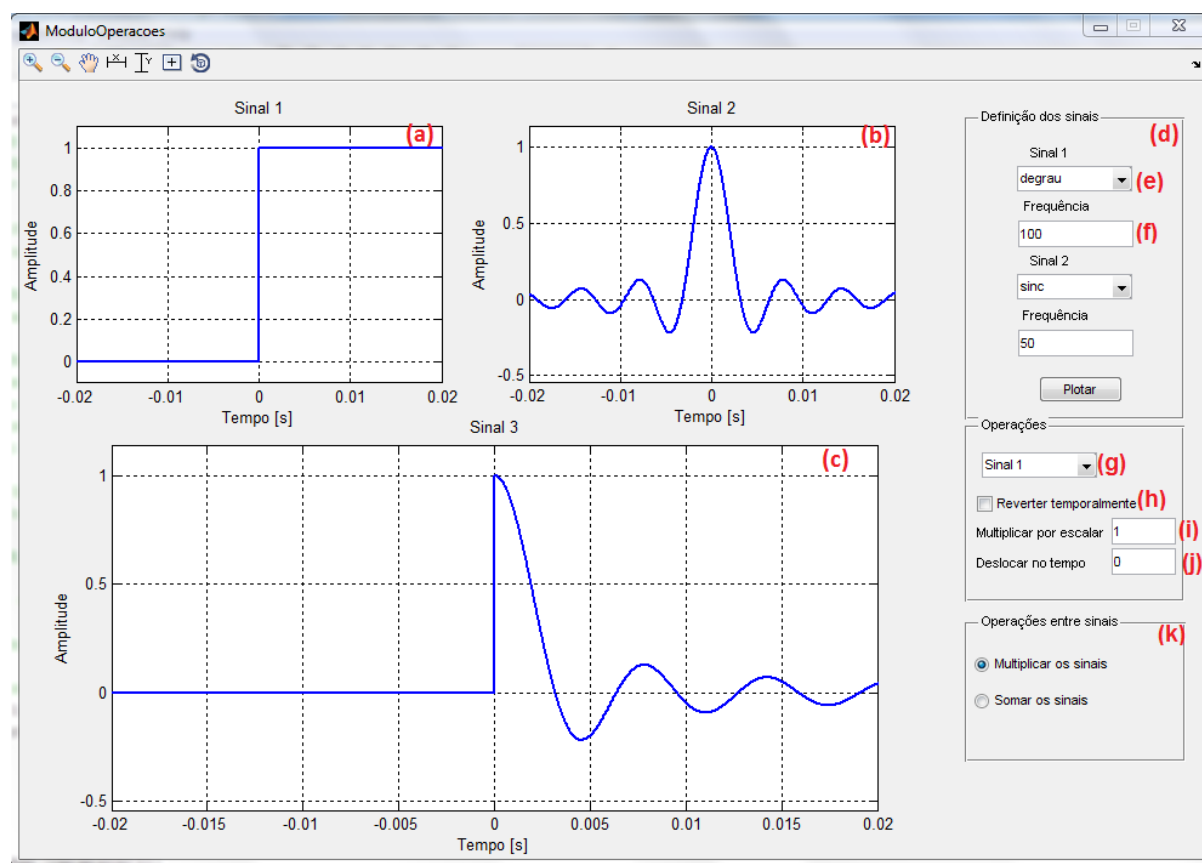


Figura 28 – Interface gráfica do módulo de operações básicas.

Para que as alterações realizadas nos parâmetros sejam efetuadas o usuário deverá pressionar o botão *Plotar*, sendo que em futuras implementações essa operação poderia ser acionada automaticamente.

3.1.3. Módulo de aquisição e reprodução de voz

Com o uso desse módulo é possível compreender o processo de aquisição e reprodução de voz utilizando o Matlab e ainda visualizar o sinal da voz no domínio da frequência. O toolbox *Data Acquisition* foi utilizado para realizar esse processo, tornando-se um requisito para que o módulo funcione corretamente. Os passos para realizar a gravação e reprodução estão disponíveis no código do módulo que foi comentado para prover o maior nível de entendimento possível.

Através da interface, o usuário pode escolher o tempo de gravação, sendo este restrito apenas pela quantidade de memória disponível, que é um aspecto que mostrou-se difícil de ser tratado durante o desenvolvimento do projeto.

Apesar da simplicidade da sua funcionalidade, este módulo visa proporcionar um embasamento para futuras implementações utilizando aquisição de voz. Na Figura 29 é elucidado o módulo desenvolvido.

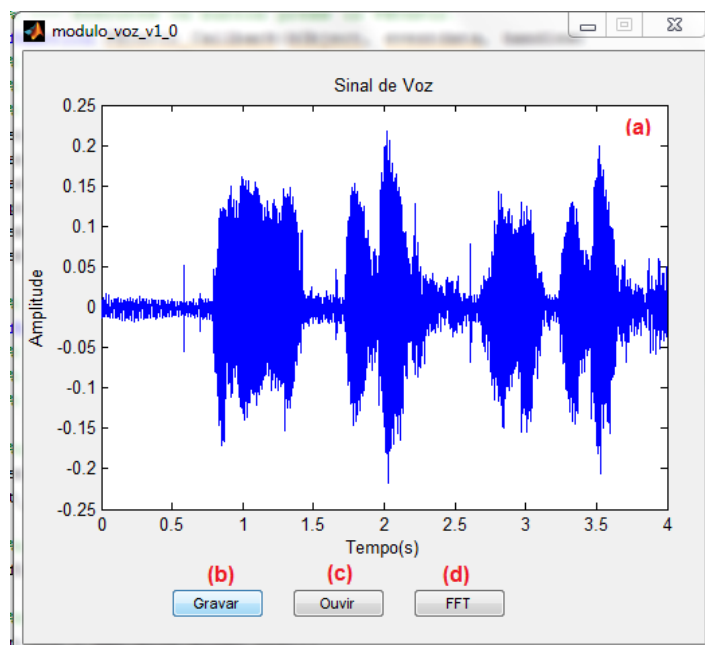


Figura 29 - Interface gráfica do módulo de aquisição de voz.

O módulo conta com apenas um gráfico que representa o sinal de voz no domínio do tempo, podendo ser visto na Figura 29(a). A interface do módulo apresenta três botões que são responsáveis pelo comportamento do mesmo, em (b) tem-se o botão *Gravar*, que quando pressionado captura o sinal de áudio durante cinco segundos, já em (c) é possível reproduzir o áudio que foi capturado anteriormente e por fim, em (d), o sinal capturado é representado por seu espectro de frequências.

O fato da captura de áudio ser feita de acordo com o dispositivo de entrada padrão do sistema operacional do usuário, possibilita que não somente a voz seja capturada, mas também um instrumento musical, uma música ou outros tipos de mídia. Para obter mais informações sobre a configuração do dispositivo de captura recomenda-se a leitura do Apêndice A.

3.1.4. Módulo de modulação AM

Este módulo tem como função principal denotar o funcionamento de uma modulação em amplitude. Ele provê a configuração de alguns parâmetros dos sinais envolvidos, como a frequência de cada um dos sinais envolvidos no processo e o índice de modulação.

Para melhorar a visualização do sinal modulado no domínio do tempo, a envoltória do sinal foi destacada conforme mostrado na Figura 30(c). O módulo também mostra simultaneamente o espectro de frequências do sinal modulado Figura 30(d). Os demais controles do módulo possuem as seguintes funções. O sinal da portadora é representado no painel (a), sendo sua frequência e valor de pico de amplitude definidos em (e). Diversos tipos de sinal modulante (b) podem ser selecionados em (g), se a opção `Voz` for selecionada a interface mostrará ao usuário o botão `Gravar` e `Ouvir`. Clicando em `Gravar` uma mensagem surgirá solicitando o tempo de gravação. Ao fim da gravação, o sinal gravado será mostrado em (b). No caso da opção em (g) for `Manual` o usuário poderá escolher a frequência do sinal pré-definido em (i). Em (f) é definido o índice de modulação a ser usado. Após definir os parâmetros e clicar no botão `Plotar`, o sinal modulado no domínio do tempo será mostrado em (c) e o seu espectro de frequências em (d).

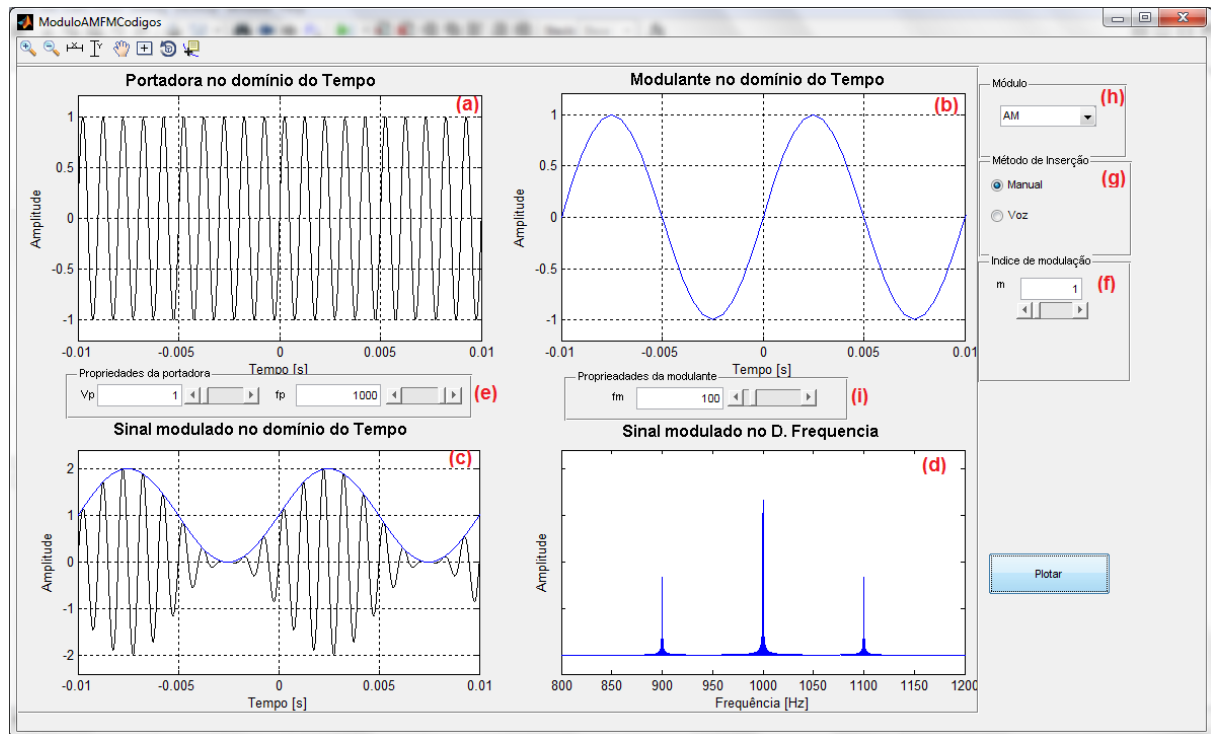


Figura 30 – Interface gráfica do módulo de modulação analógica (opção – AM).

Neste projeto optou-se em efetuar a modulação com códigos passo a passo, visando explicitar o funcionamento de uma modulação AM, apesar de existir, no Matlab, a função *modulate* que realiza modulações diretamente. Desta forma, ficam mais claras para o usuário as operações necessárias para realizar cada modulação. No Quadro 1 é apresentado um fragmento do código utilizado neste módulo, os nomes das variáveis foram atribuídos de forma a serem intuitivos em relação ao seu significado.

Quadro 1 – Código modulação AM

```
% Sinal da portadora:
portadora=vp*sin(2*pi*fp.*t);
% Sinal modulante:
modulante = sin(2*pi*fm.*t);
% Sinal modulado:
s=((k*modulante+1)).*portadora;
```

Para proporcionar uma interatividade maior, ao modificar os controles de frequência e índice de modulação o resultado da modulação é atualizado automaticamente. Além disso optou-se por apresentar esses controles na forma de barras de rolagem simultaneamente com

a digitação do valor, conforme mostra a Figura 30. Em relação a esse método utilizado, surgiu um problema de congelamento da interface durante a atualização dos resultados de acordo com os valores inseridos. O provável fato desse *bug* é devido ao gerenciamento de memória utilizada pelo Matlab, sendo assim, uma possível análise para futuras correções é recomendada.

3.1.5. Módulo de modulação FM

O outro módulo desenvolvido para modulações analógicas foi o de modulação em frequência (FM). Esse módulo é similar ao anteriormente descrito. Utilizando a Figura 31 segue a explicação de seu uso. O sinal da portadora em (a) e o sinal modulante em (b) podem ter suas frequências ajustadas em (e) e (i) respectivamente. Também é necessário definir o valor do índice de modulação em (f). Após a configuração desses parâmetros, deve-se pressionar o botão **Plotar** para que o sinal modulado seja exibido em (c), bem como seu espectro de frequências em (d).

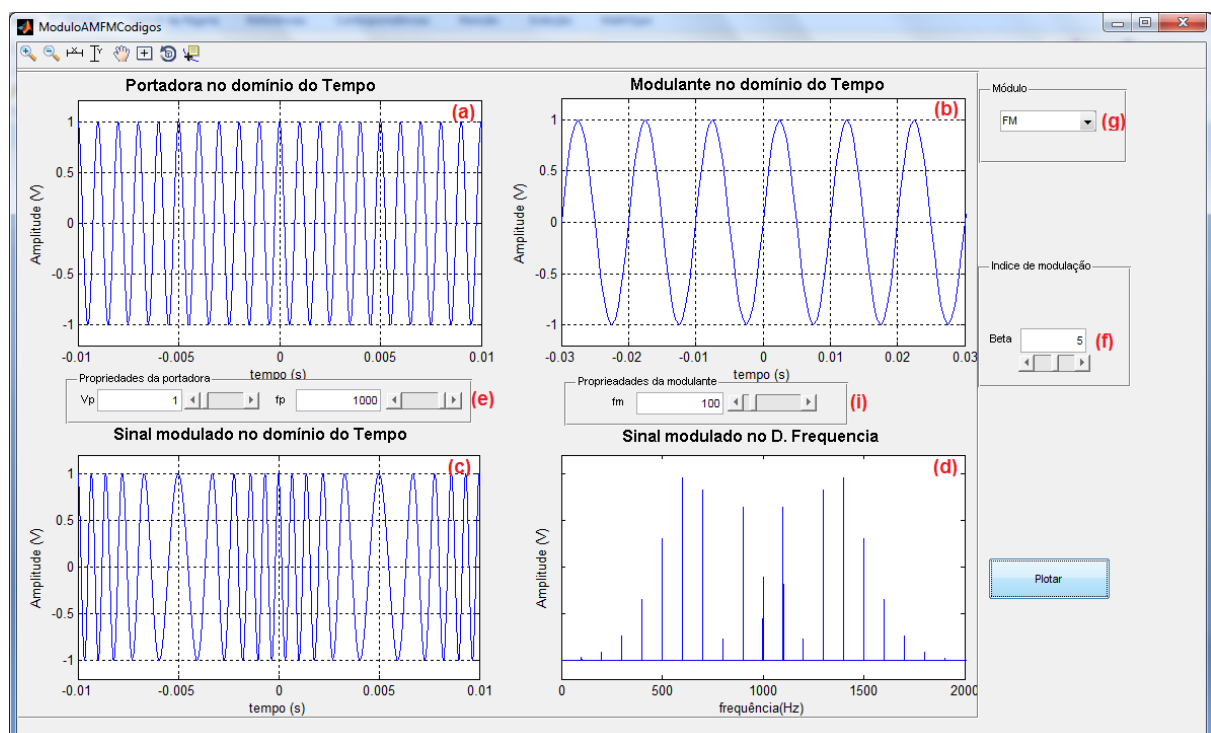


Figura 31 – Interface gráfica do módulo de modulação analógica (opção – FM).

3.1.6. Módulo de modulações digitais

O módulo de Modulações Digitais provê ao usuário a possibilidade de realizar simulações com as modulações ASK, FSK e PSK. Para isso ele conta com outras funcionalidades presentes em outros módulos, como a opção Manter bits e informar uma sequência binária personalizada. Esse módulo é representado na Figura 32.

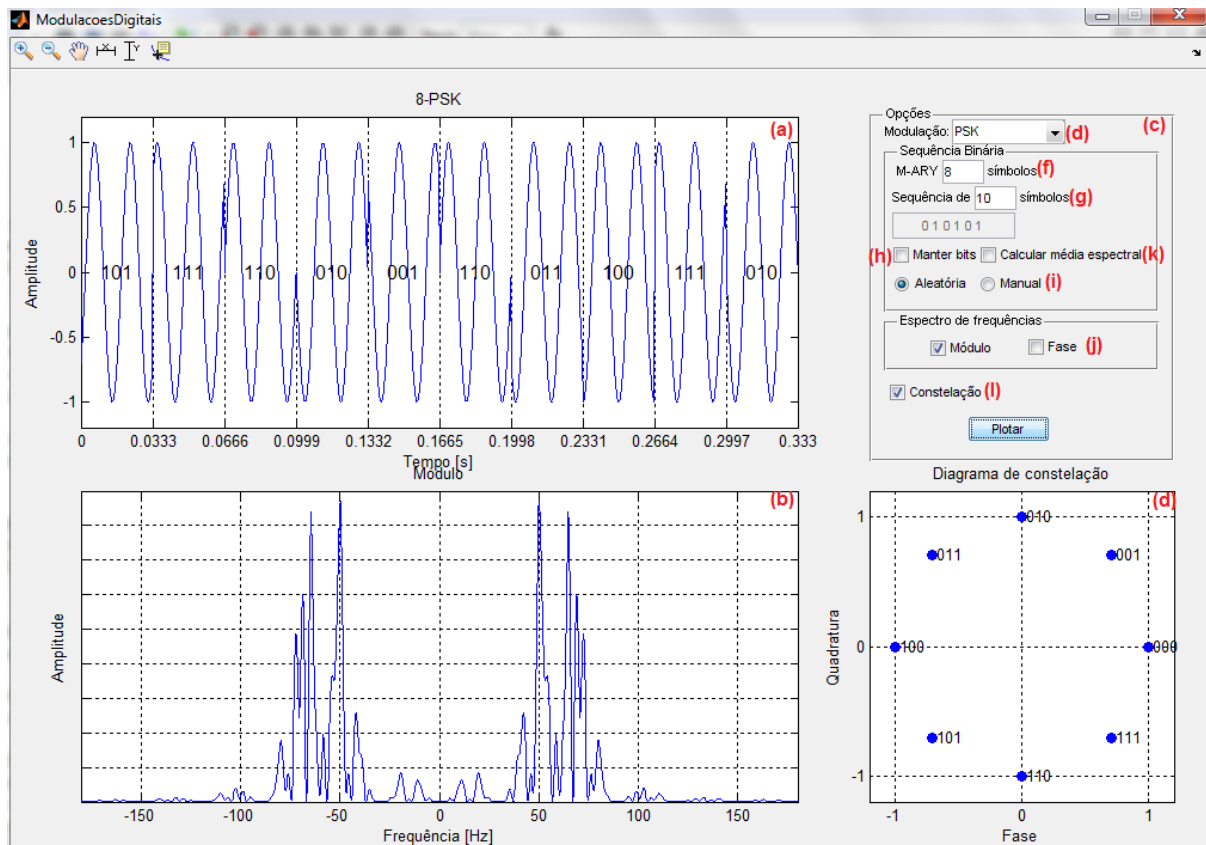


Figura 32 - Interface gráfica do módulo de modulações digitais.

Por terem interfaces similares o uso desse módulo é análogo ao módulo de Codificação Digital, para ilustrar seu uso a Figura 32 será usada. Após selecionar a opção de modulação no menu (e), o usuário poderá definir algumas opções básicas como a quantidade de símbolos usada na modulação (*M-ARY*) no campo de texto em (f) e a sequência de símbolos que serão representados no gráfico através do campo de texto em (g). Em (h) há a opção de manter os *bits* gerados e pelos botões de seleção em (i) o usuário escolhe se a sequência binária será gerada automaticamente ou definida pelo usuário. Pode-se considerar como opções avançadas algumas funcionalidades como selecionar em (j) se no espectro de frequências será mostrado somente o módulo do sinal, a fase ou ambos. Existe ainda a opção

de calcular a média acumulada de *FFTs* do sinal exibida em (k), que vai sendo feita à medida que novas sequências são moduladas. Esse cálculo é feito com o auxílio de duas variáveis globais, sendo que uma é o contador c_m que indica quantas modulações foram realizadas e a outra variável é o vetor $s_{m\acute{e}dia}$ que armazena a nova média calculada, a fórmula utilizada para esse cálculo pode ser descrita como

$$s_{m\acute{e}dia} = (s_{FFT} + (s_{m\acute{e}dia} * c_m) / (c_m + 1)), \quad (9)$$

onde s_{FFT} é o vetor contendo o espectro do sinal atual.

Outro gráfico que é apresentado na interface é o diagrama de constelação que pode ser selecionado pelo campo de checagem na Figura 32(l), ele apresenta o alfabeto de símbolos da modulação em termos de quadratura e fase. O Matlab possui a função *scatterplot* que recebe os valores de quadratura e fase em uma matriz e fornece o diagrama de constelação, mas para o uso nessa interface optou-se por utilizar uma função própria que mostra como são calculados os valores do diagrama.

3.1.7. Módulo de codificações digitais

Este módulo apresenta uma interface na qual o usuário escolhe qual será a codificação utilizada a partir do menu mostrado na Figura 33(d). Em seguida, devem ser selecionados os parâmetros de configuração nas opções de controle mostradas em (c), selecionando a opção Aleatória em (g), a sequência de *bits* a ser utilizada será gerada automaticamente de acordo com o número de *bits* escolhido em (e). Para fins de comparação a interface oferece a opção Manter *bits* que impede a geração de novas sequências. Caso seja interesse do usuário, pode ser definida uma sequência manual bastando selecionar a opção Manual em (h). Para facilitar a interpretação da codificação são adicionados os valores do *bit* sobre cada gráfico gerado. Quando os parâmetros estiverem definidos, as alterações serão efetuadas quando o botão Plotar for selecionado, exibindo em (a) o sinal codificado no domínio do tempo e em (b) a densidade espectral de potência do sinal.

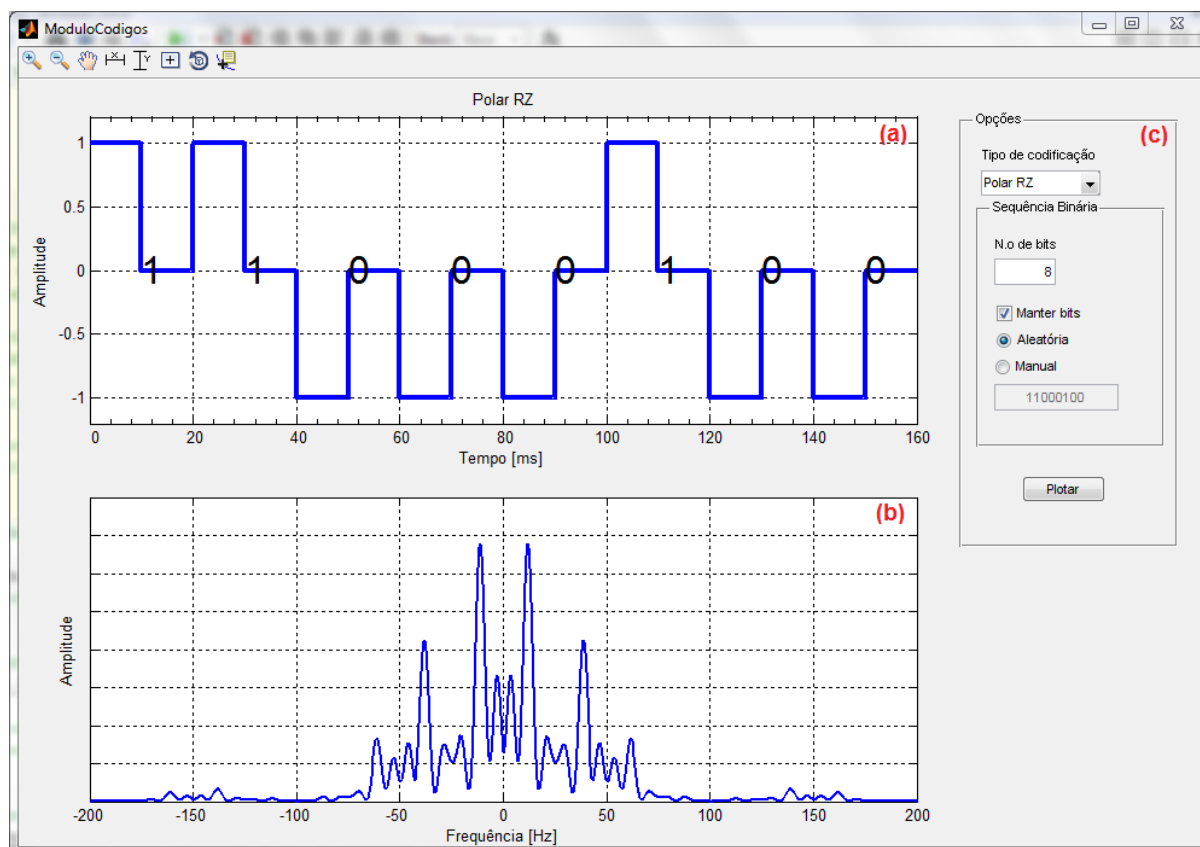


Figura 33 - Interface gráfica do módulo de codificações digitais.

4. Resultados

Tendo em mente que um dos principais objetivos do sistema AVASS é auxiliar no processo de ensino-aprendizagem, apresenta-se a seguir alguns resultados obtidos com o uso dos módulos implementados. Para ilustrar a versatilidade e eficiência do sistema AVASS, serão apresentados dois casos de uso dos módulos implementados. No primeiro caso é explorada a modulação AM, ilustrando como diferentes sinais de entrada e também parâmetros de modulação podem ser explorados pelo usuário. No segundo caso são destacados características do espectro de frequências de diferentes tipos de codificação digital.

4.1. Caso 1: Estudo da modulação analógica AM

Ao utilizar o módulo de “Modulação Analógica” na opção AM, tanto o professor quanto o aluno poderão tirar algumas conclusões a partir dos experimentos realizados. Neste caso de uso será usada uma frequência portadora f_c de 1000 Hz, 50 Hz para a frequência modulante f_m e o índice de modulação m terá valor igual a 1. Após pressionar o botão `Plotar` tem-se o resultado apresentado na Figura 34.

É possível verificar que o espectro do sinal modulado possui a componente principal em 1000 Hz devido a f_c , além disso, as bandas laterais estão com valor de distância em relação a componente principal igual a f_m . Devido ao valor do índice de modulação m , 100% da amplitude da portadora é variada de acordo com o sinal modulante.

Continuando o estudo, pode-se analisar de forma individual as mudanças nos parâmetros envolvidos nessa modulação. Primeiro é alterado o valor de f_c para 500 Hz, e na Figura 35 observa-se a mudança no sinal modulado no domínio do tempo, que se deve ao fato de a diferença relativa entre f_c e f_m ter diminuído.

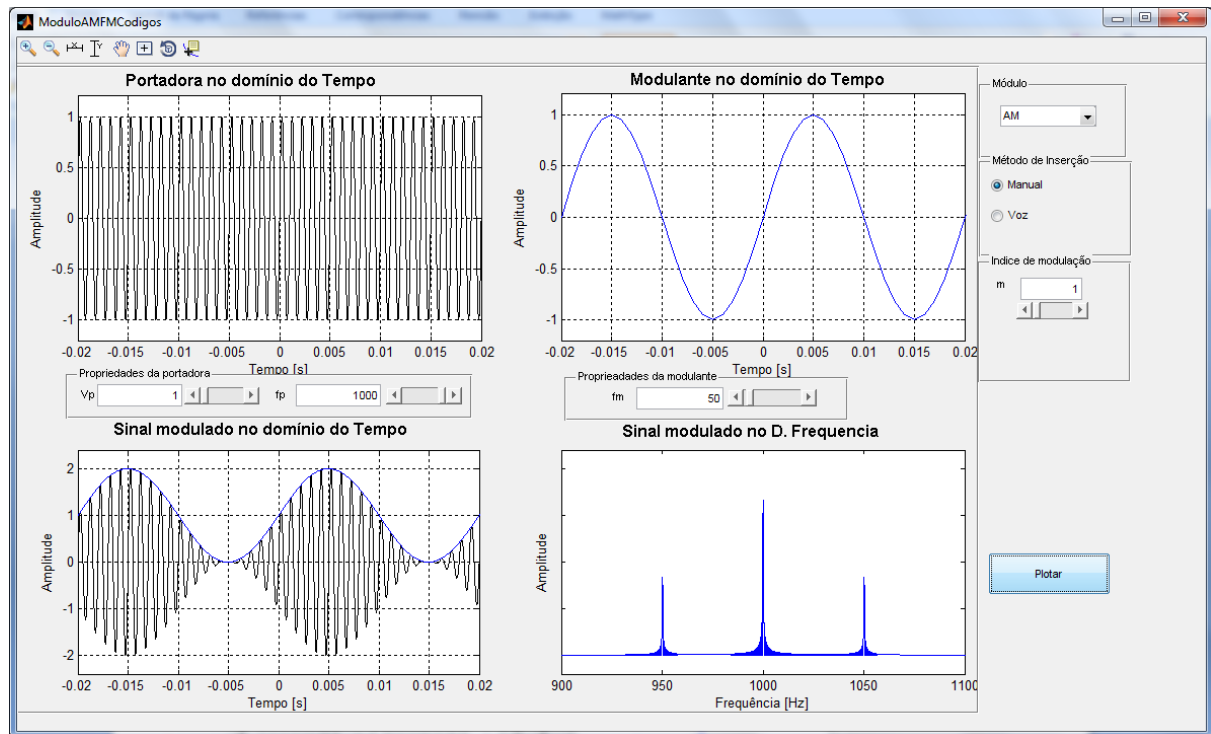


Figura 34 - Interface gráfica do módulo de modulações analógicas (opção-AM) com o resultado da configuração para o caso de uso 1.

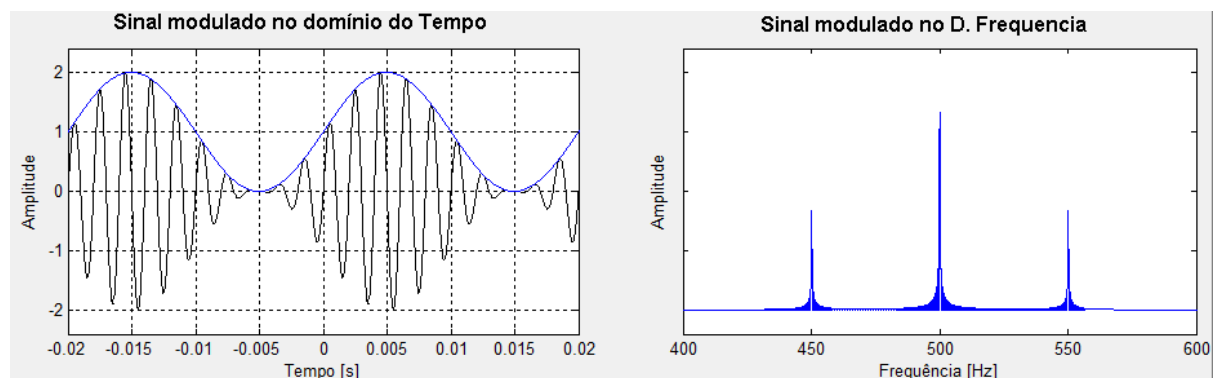


Figura 35 - Exemplo do módulo de modulação AM com novo valor de frequência de portadora.

No próximo passo é alterado o valor de f_m para 25 Hz, conforme mostrado na Figura 36, nota-se no espectro do sinal modulado a diferença entre a componente da portadora e as bandas laterais diminuiu. No domínio do tempo o sinal modulado também muda, pois a diferença relativa entre f_c e f_m aumentou.

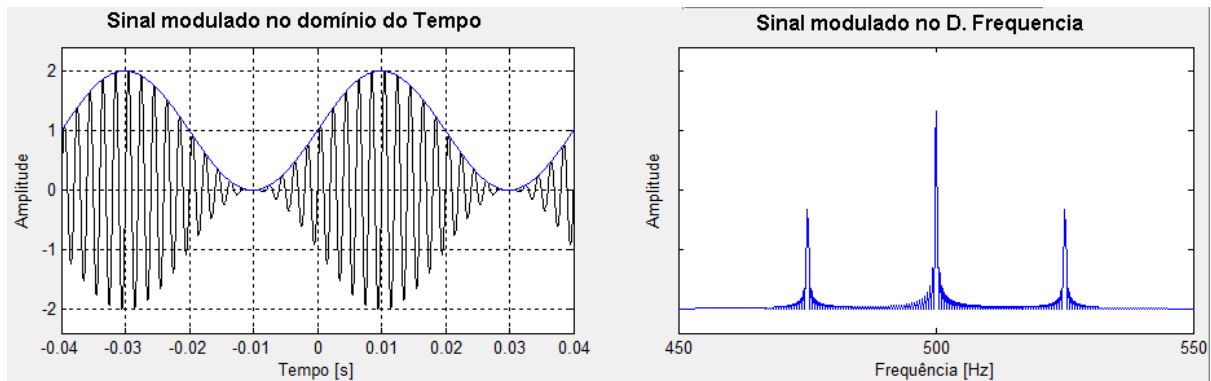


Figura 36 - Exemplo do módulo de modulação AM com novo valor da frequência modulante.

Por último, altera-se o valor do índice de modulação de m para 0,5 fazendo com que as bandas laterais possuam uma amplitude menor e que também somente 50% da amplitude da portadora é variada, como mostra a Figura 37.

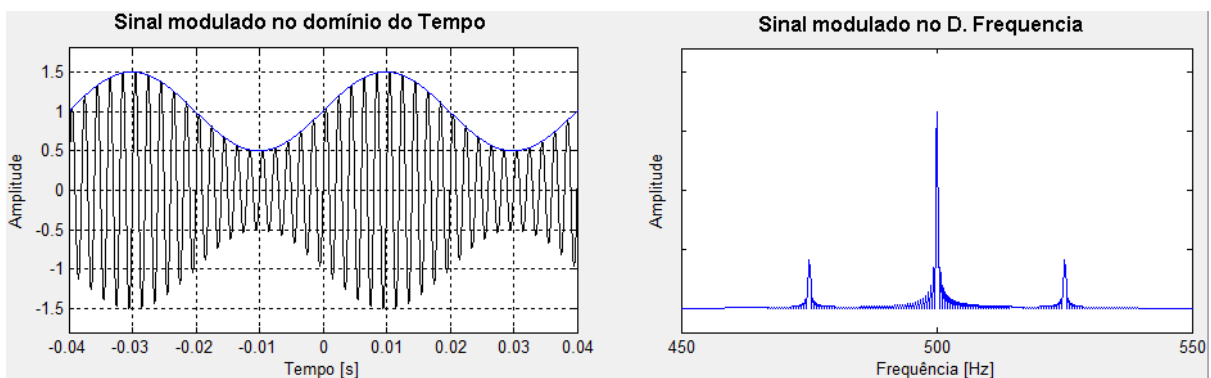


Figura 37 - Exemplo do módulo de modulação AM com novo índice de modulação.

Portanto mostramos que o AVASS permite estudar detalhadamente o funcionamento da modulação AM, através dos gráficos gerados. Os conceitos de modulação são ilustrados tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, permitindo ao aluno perceber claramente como ocorre a modulação. Note que observando o espectro de frequências, o conceito da modulação AM-DSB é também claramente demonstrado, indicando as bandas laterais características desse tipo de modulação. Em função da atualização automática dos gráficos o estudo do processo de modulação se torna bastante flexível e com uma boa interatividade com o usuário. Utilizando-se outros sinais modulantes, outros efeitos da modulação podem ser demonstrados.

O módulo de modulação analógica em FM permite ver claramente a influência do índice de modulação β sobre a largura de banda, mais especificamente no número de bandas

laterais, assim como outras características como a variação da frequência do sinal modulado de acordo com β . O estudo completo desse caso é omitido aqui para economia de espaço.

4.2. Caso 2: Estudo do espectro de frequências da codificação digital

Utilizando o módulo de Codificação Digital, uma série de experimentos pode ser realizada para fins de comparação entre os métodos de codificação ou até mesmo verificar como determinada sequência binária é codificada. No caso de uso que será apresentado a seguir a mesma sequência binária é usada em todas as codificações, para se ter uma melhor comparação entre elas. Essa sequência pode ser obtida de duas formas distintas: i) escolhendo a quantidade de *bits*, gerando uma sequência aleatória e marcando a opção Manter bits; ou ii) definindo manualmente a sequência binária. Neste exemplo a primeira opção foi escolhida, usando 20 *bits* para a sequência.

A primeira codificação selecionada é a Unipolar NRZ. Na Figura 38, é possível visualizar o resultado da codificação como os níveis de tensão para os *bits* “0” e “1”. No espectro de frequências desse sinal, percebe-se claramente a existência do componente contínuo, uma vez que a densidade de potência está concentrada próxima a 0 Hz.

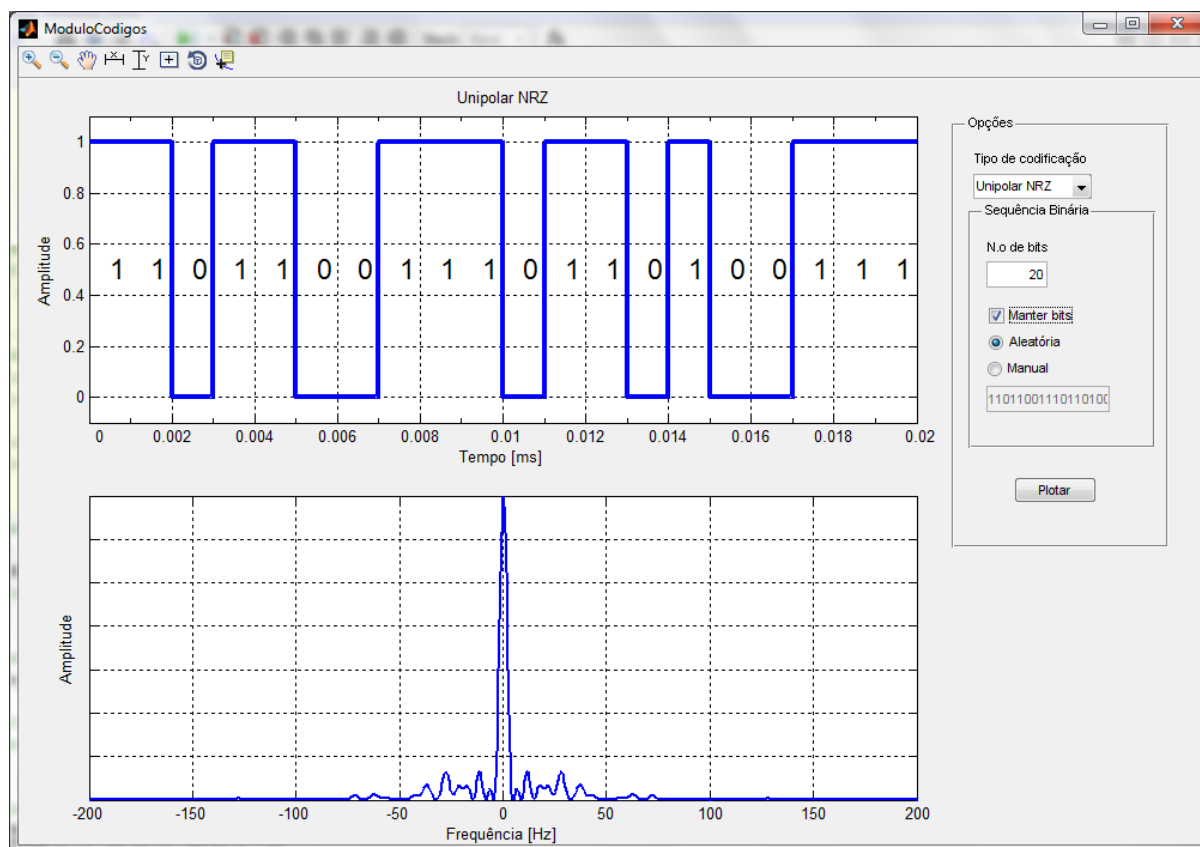


Figura 38 - Interface gráfica do módulo de codificação digital utilizando 20 bits codificados em Unipolar NRZ.

Escolhendo-se outra codificação, por exemplo Manchester, pode-se observar na Figura 39 que o componente contínuo desaparece. Além de poder comparar essa codificação com a anterior, notando principalmente as transições presentes em cada *bit* é possível verificar que o código Manchester é do tipo Polar, possuindo níveis de tensão positivo e negativo.

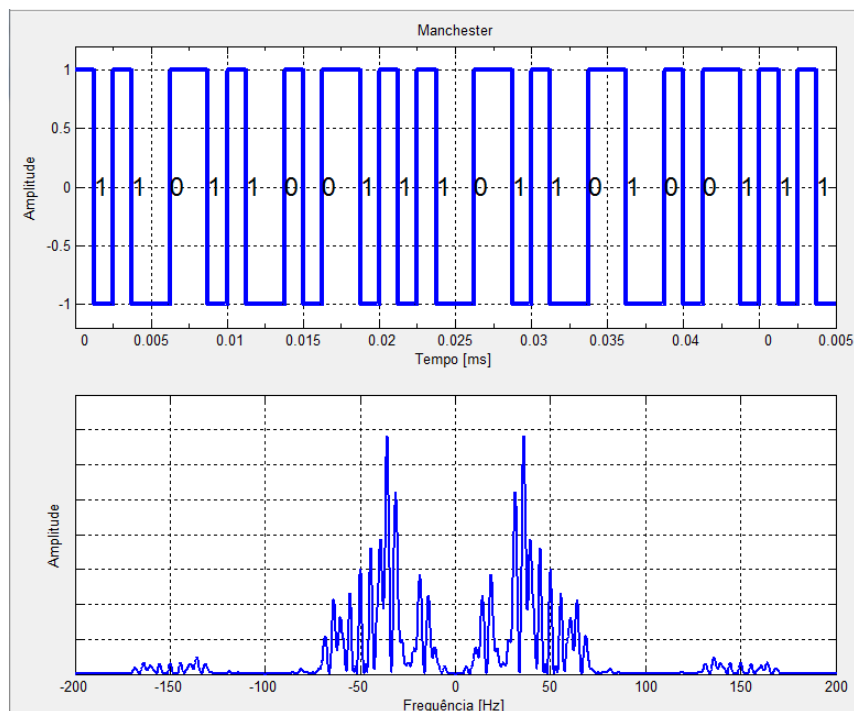


Figura 39 - Fragmento do módulo com a codificação Manchester utilizando 20 bits e seu respectivo espectro de frequências.

Para a próxima etapa será usada uma codificação do tipo Bipolar, selecionando a codificação AMI e mantendo os mesmos *bits*. A Figura 40 mostra como é a sequência codificada nessa opção, sendo também possível concluir que não há componente contínua.

A quantidade de experimentos possíveis através desse módulo é ampla, reforçando a capacidade do AVASS em auxiliar no ensino e aprendizagem dos conteúdos mais abordados na área de Telecomunicações. Outras funcionalidades poderiam ser incorporadas ao módulo como o cálculo da média de *FFTs* já em uso no módulo de Modulações Digitais.

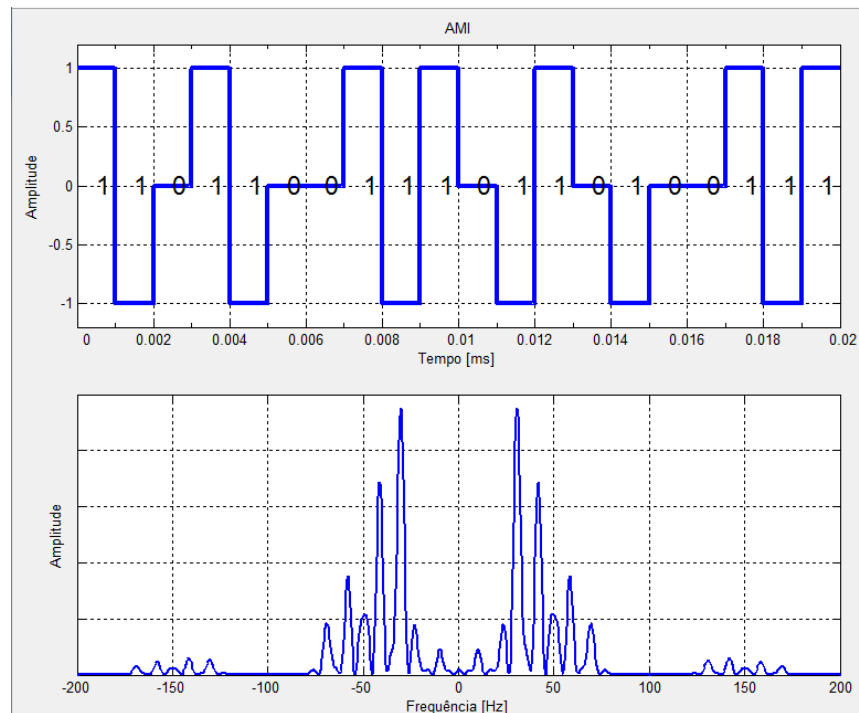


Figura 40 - Fragmento do módulo com a codificação AMI utilizando 20 bits e seu respectivo espectro de frequências.

5. Conclusões e trabalhos futuros

O sistema AVASS tem código aberto e todos os módulos estão desenvolvidos de modo que o usuário possa visualizar graficamente os processos e entender o código usado em cada módulo. Assim, o usuário do ambiente além de aprender os conceitos abordados em cada módulo, poderá aprender como os módulos são feitos e executados. Todos os módulos propostos neste projeto foram desenvolvidos durante seu período de execução, sendo que alguns apresentam algumas deficiências, como o módulo de modulação analógica AM no qual a modulação do sinal da voz não está totalmente correta.

Conforme abordado no Capítulo 1 a lógica utilizada nos módulos seguiu uma característica passo a passo, fornecendo as informações necessárias para o seu entendimento. As interfaces foram desenvolvidas de forma padronizada para que o uso seja intuitivo. Tendo em vista que o Matlab é um *software* multiplataforma, o acesso ao AVASS torna-se facilitado. Sendo assim, muitas das características enumeradas por Sturm e Gibson (2005), puderam ser contempladas nesse ambiente.

Os módulos desenvolvidos mostraram-se eficientes na ilustração dos conceitos tratados nesse projeto, com o Módulo de sinais básicos é possível observar os processos de amostragem e representação de sinais no domínio do tempo e frequência. Através do Módulo de operações básicas, os conceitos de soma, multiplicação, reversão temporal, deslocamento no tempo e multiplicação por escalar podem ser aplicados. Os módulos de modulação analógica e digital auxiliam no processo de ensino-aprendizagem das modulações AM, FM, ASK, FSK e PSK. E com o uso do módulo de codificação digital, os diversos tipos de codificação podem ser explorados, comparados e observados, tais como: Unipolar, Polar e Bipolar, com codificações NRZ, RZ, AMI e Manchester.

Espera-se que em futuras etapas do desenvolvimento do ambiente AVASS, os módulos existentes possam ser melhorados e ampliados com novas ferramentas e funções, assim como a incorporação de módulos completamente novos sobre outros conceitos. Pode-se citar como melhorias para futuras versões do AVASS:

- Desenvolver uma opção de salvar os gráficos gerados para um arquivo de imagem ou imprimi-los, possibilitando a produção de relatórios de experimentos; Atualmente o processo usado é a captura de tela;
- Desenvolver uma opção para gerar gráficos a fim de serem utilizados pelos docentes em avaliações;
- Implementar a possibilidade da utilização de filtros configuráveis sobre os sinais;
- Possibilitar o uso de outras opções de janelamento como Flattop, Hamming, Hanning, Kaiser-Bessel, entre outros;
- Mover algumas opções de parâmetros do sinal para uma nova janela com opções Avançadas, como tipo do janelamento, adição de ruído, filtragem, exibição de fase, exibição de amplitude, mudança de escala, entre outras;
- Com o auxílio de uma barra de rolagem, mostrar determinada porção de energia no espectro de frequências.
- Aperfeiçoar o algoritmo para uso do sinal da voz como sinal modulante no módulo de modulações analógicas;
- Implementar a opção de exibir o código atual fora do editor padrão do Matlab, mostrando somente o fragmento do código de interesse;
- Comparar os valores obtidos através do cálculo da média acumulada de *FFTs* com outras formas de calculo do espectro de frequências;
- Desenvolver um pacote de linguagens para o AVASS, como inglês e espanhol, através do qual todos os comandos e interfaces passam a ser mostrados na linguagem selecionada;
- Desenvolver módulos que realizem convolução discreta contínua, correlação discreta contínua e PCM, além de outras modulações digitais e codificações digitais;
- Realizar a migração do ambiente AVASS para WEB assim como a transformação em um aplicativo executável fora do Matlab;
- Padronizar as interfaces e formas de interação do usuário.
- Desenvolver um conjunto de experimentos no qual os diferentes módulos são usados.

Considerando ainda que a linguagem “.m” é muito utilizada no Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do IF-SC, os próprios alunos usuários das unidades curriculares poderão desenvolver novos módulos orientados pelos professores, usando o ambiente e as ferramentas já existentes, ou acrescentando também novas ferramentas ao ambiente.

O usuário que desejar utilizar o AVASS pode obtê-lo através do portal do IF-SC *campus* São José, pelo endereço <http://www.sj.ifsc.edu.br/avass>. A página contém instruções de instalação, documentação do ambiente e serão disponibilizados tutoriais de uso. Na página também está disponível um formulário para perguntas, dúvidas e sugestões. Na página do projeto também estão indicados os problemas conhecidos do sistema.

Apêndice A – Configuração do dispositivo de áudio do módulo de captura de voz

Um aspecto a ser considerado quanto ao uso desse módulo é o sistema operacional corrente. O pacote do Matlab denominado *Data Acquisition Toolbox*, tem as funções de aquisição de áudio baseadas no adaptador de áudio padrão do sistema, sendo assim é necessário defini-lo no código do módulo. Pode-se obter essa informação através do comando `daqhwinfo()`. No Quadro 2, é exemplificado o uso do comando.

Quadro 2 – Comando `daqhwinfo()`.

```
>> daqhwinfo()

ToolboxName: 'Data Acquisition Toolbox'
ToolboxVersion: '2.13 (R2008b) '
MATLABVersion: '7.7 (R2008b) '
InstalledAdaptors: {'winsound'}
```

No caso ilustrado no quadro acima o dispositivo padrão é o `winsound`, presente no campo `InstalledAdaptors`. A partir dessa informação, o código do módulo deve ser alterado como mostra o Quadro 3. Essa alteração deve ser feita somente se o adaptador padrão do sistema utilizado for diferente de `winsound`.

Quadro 3 – Código definindo adaptador padrão.

```
ai = analoginput('winsound');
```

Lista de Abreviaturas

AM	Modulação em Amplitude (<i>Amplitude Modulation</i>)
AM-DSB	Modulação em Amplitude com Banda Lateral Dupla (<i>Amplitude Modulation Double-Sideband</i>)
AMI	(<i>Alternate Mark Inversion</i>)
ASK	Modulação por Chaveamento de Amplitude (<i>Amplitude Shift Keying</i>),
AVASS	Ambiente Virtual de Aprendizagem de Sinais e Sistemas
BPSK	Modulação por Chaveamento de Fase Binária (<i>Binary Phase Shift Keying</i>)
CPFSK	Modulação por Chaveamento de Frequência com Fase Contínua (<i>Continuous Phase Frequency Shift Keying</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier transform</i>)
FM	Modulação em Frequência (<i>Frequency Modulation</i>)
FSK	Modulação por Chaveamento de Frequência (<i>Frequency Shift Keying</i>)
GUI	Interface gráfica do usuário (<i>User Guide Interface</i>)
NRZ	Não-Retorna-a-Zero (<i>Non-Return-to-Zero</i>)
OOK	Chaveamento de estado ligado-desligado (<i>On-Off Keying</i>)
PCM	Modulação por Código de Pulso (<i>Pulse Code Modulation</i>)
PSK	Modulação por Chaveamento de Fase (<i>Phase Shift Keying</i>)
QAM	Modulação de Amplitude e Quadratura (<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>)
QPSK	Modulação por Chaveamento de Fase e Quadratura (<i>Quadrature-Phase Shift Keying</i>)
RZ	Retorna-a-Zero (<i>Return-to-Zero</i>)

Referências Bibliográficas

- ATMEL. Manchester Coding Basics. [S.l.], 2009. Disponível em: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc9164.pdf> acesso em dezembro, 2011.
- CRUTCHFIELD, Steve. Samplemania. [S.l.], 2010. Disponível em: <http://www.jhu.edu/~signals/sampling/index.html>> acesso em dezembro, 2011.
- FALSTAD, Paul. Fourier Series applet.[S.l.], 2008. Disponível em <http://www.falstad.com/fourier/>> acesso em dezembro, 2011.
- FOROUZAN, B. A. Data Communications and Networking. [S.l.]: McGraw Hill, 2007.
- HAYKIN, S. Sistemas de Comunicação: analógicos e digitais. [S.l.]: Bookman, 2004.
- HAYKIN, S. Sistemas Modernos de Comunicação Wireless. [S.l.]: Bookman, 2008.
- IEEEEXPLORE. 60-GHz Gigabits-Per-Second OOK Modulator With High Output Power in 90-nm CMOS. [S.l.], 2011. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5771063> acesso em dezembro, 2011.
- LATHI, B. P. Sinais e Sistemas Lineares. [S.l.]: Bookman, 2007.
- LU, G., CHEN, L., CHAN, K. A simple AMI-RZ transmitter based on single-arm intensity modulator and optical delay interferometer. [S.l.], 2005. Disponível em: http://www.lightwave.ie.cuhk.edu.hk/publication/document/Journal/Optics%20Communications/2005/gwlu_oc.pdf> acesso em dezembro, 2011.
- MATHWORKS. Verification of High-Efficiency Power Amplifier Performance at Nujira. [S.l.], 2010. Disponível em: <http://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/verification-of-high-efficiency-power-amplifier-performance-at-nujira.html?issue=nn2010>> acesso em dezembro, 2011.
- MAXIM. I'm OOK. You're OOK?. [S.l.], 2009. Disponível em: <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/4439/CMP/ELK12>> acesso em dezembro, 2011.

-
- MEDEIROS, José Cesar de Oliveira. Princípios de Telecomunicações: teoria e prática. [S.l.]: Érica, 2007.
- MIAO, George J. Signal Processing in Digital Communications. [S.l.]: Artech House, 2007.
- MOECKE, M. Conversão de sinais para transmissão. [S.l.]: CEFET-SC, 2004.
- NYACK, Cuthbert. Frequency Modulation, signal, spectrum and phasor. [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://cnyack.homestead.com/files/modulation/modfm.htm>> acesso em dezembro, 2011.
- RAPPAPORT, T. S. Comunicações sem fio: princípios e práticas. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.
- SKLAR, Bernard. Digital Communications: Fundamentals and Applications. [S.l.]: Prentice Hall, 2001.
- STURM, B.; GIBSON, J. Signals and Systems using MATLAB: an integrated suite of applications for exploring and teaching media signal processing. [S.l.]: Proceedings 35th Annual Conference Frontiers in Education, 2005.
- WIKIPEDIA. Digital Modulation. [S.l.], 2011. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_modulation#Digital_modulation_methods> acesso em dezembro, 2011.