



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**TRANSMISSÃO DE SINAIS EM RADIO FREQUÊNCIA VIA
ONDAS CURTAS**

William Fischer

Lajeado, Novembro de 2018

William Fischer

TRANSMISSÃO DE SINAIS POR RADIO FREQUÊNCIA VIA ONDAS CURTAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da
Universidade do Vale do Taquari - Univates,
como parte dos requisitos para a obtenção do título
de bacharel em Engenharia Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Alexandre Stürmer Wolf

Lajeado, Novembro de 2018

RESUMO

Este trabalho apresenta um contexto histórico e evolutivo das tecnologias aplicadas aos sistemas de comunicação, partindo de sistemas valvulados até a utilização de equipamentos transistorizados modernos, permeando pela comunicação por telegrafia e modulação por Amplitude Modulada (AM), por fim, tratando dos sistemas de transmissão digital. Além disso, este trabalho visa elaborar e construir um transmissor de rádio frequência para transmissão na banda de ondas curtas, o qual será utilizado como estudo, para realizar a análise de cada uma das etapas necessárias para a elaboração e construção do equipamento transmissor, como parte oscilatória, amplificadora, alimentação, acoplamentos, filtros, modulação e irradiação. Com o sinal proveniente do transmissor, serão realizadas a análise e sintonia em diversos receptores remotos, permitindo um estudo sobre as camadas da ionosfera e sua influência sobre os sinais de ondas curtas e sua propagação.

Palavras-chave: Transmissão, Ondas Curtas, Propagação

ABSTRACT

This work presents a historical and evolutionary context of the technologies applied to the communication systems, starting from valve systems until the use of modern transistorized equipment, permeating by the communication by telegraphy and modulation by Modulated Amplitude (AM), finally, dealing with the transmission systems digital. In addition, this work aims to elaborate and construct a transmitter of radio frequency for transmission in the band of short waves, which will be used as study, to carry out the analysis of each of the necessary steps for the elaboration and construction of the transmitting equipment, as part oscillator, amplifier, power, couplings, filters, modulation and irradiation. With the signal coming from the transmitter, the analysis and tuning will be carried out in several remote receivers, allowing a study on the layers of the ionosphere and its influence on the signals of short waves and their propagation.

Keywords: Transmission, Short Waves, Propagation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Válvula termiônica.....	14
Figura 2 - Receptor Galena.....	16
Figura 3 - Sinal analógico e digital.....	17
Figura 4 - Receptor SDR	18
Figura 5 - Espectrograma Inglaterra.....	22
Figura 6 - Banda de ondas curtas.....	23
Figura 7 - Camadas da ionosfera	25
Figura 8 - Índices de propagação.....	25
Figura 9 - Zona de silêncio	26
Figura 10 - Diagrama esquemático do rádio desenvolvido no projeto de TCC	28
Figura 11 - Diagrama de um sistema de realimentação clássico	29
Figura 12 - Oscilador transistorizado	30
Figura 13 - Oscilador valvulado	31
Figura 14 - Análise amplificador em classe C.....	33
Figura 15 - Esquema filtro Π	34
Figura 16 - Largura de banda	35
Figura 17 - Atenuação harmônicas filtro Π	36
Figura 18 - Técnicas de modulação em amplitude	38
Figura 19 - Sinal em amplitude modulada	41
Figura 20 - Sinal modulante nas bandas laterais	42
Figura 21 - Largura de banda utilizada por um sinal AM	43
Figura 22 - Curvas de pré-ênfase para áudio	45
Figura 23 - Antena dipolo.....	47
Figura 24 - Lóbulo de irradiação antena dipolo	47
Figura 25 - Esquema oscilador e amplificador	51
Figura 26 - Válvula 807 em classe C modulada.....	53
Figura 27 - Núcleo E/I.....	56
Figura 28 - Amplificador de áudio modificado	57
Figura 29 - Esquema para modulação positiva.....	58
Figura 30 - Esquema pré-ênfase e filtro passa-baixa.....	59
Figura 31 - Relação ganho frequência de áudio	60
Figura 32 - Breakaway Broadcast Processor	61
Figura 33 - Índice de modulação e largura de banda.....	62
Figura 34 - Transmissor construído.....	63
Figura 35 - Conexões transmissor concluído	64
Figura 36 - Determinação da potência da portadora.....	65
Figura 37 - Modulação de 1 kHz em São Luiz do Paraitinga.....	67
Figura 38 - <i>Slow sweep</i> em São Luiz do Paraitinga	68

Figura 39 - Ruído branco em Paraty.....	69
Figura 40 - Ruído branco em São Luís do Paraitinga	70
Figura 41 - Modulação de áudio em Paraty.....	71
Figura 42 - Modulação de áudio em São Luiz do Paraitinga	72
Figura 43 - Sinal em Lamont, Canadá.....	74
Figura 44 - Sinal em Haparanda, Suécia	75
Figura 45 - Sinal em South West, Inglaterra	76
Figura 46 - Conclusão das análises de propagação	77

LISTA DE ABREVIATURAS

AC:	Corrente Alternada
AM:	Amplitude Modulada
CW:	Continuous Waves
DC:	Corrente Contínua
DDS:	Direct Digital Synthesis
DRM:	Digital Radio Mondiale
FI:	Frequência Intermediária
FM:	Frequência Modulada
HF:	High Frequency
LF:	Low Frequency
NDB:	Non Directional radio Beacon
QAM:	Modulação de Amplitude em Quadratura
RF:	Radiofrequência
RMS:	Root Mean Square
SDR:	Software Defined Radio
S/N:	Relação Sinal-ruído
SSB:	Single Side Band
SW:	Short Waves
UHF:	Ultra High Frequency
UTC:	Tempo Universal Coordenado
VHF:	Very High Frequency

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Objetivos gerais	10
1.2	Objetivos específicos.....	10
1.3	Estrutura e organização do trabalho	11
2.	AS PRIMEIRAS COMUNICAÇÕES.....	12
2.1	Contexto histórico.....	12
2.2	Evolução das telecomunicações	13
2.3	Evolução das tecnologias de rádio – da válvula ao SDR	13
2.4	Digital Radio Mondiale (DRM)	16
2.5	Software Defined Radio (SDR).....	18
3.	FREQUÊNCIAS UTILIZADAS E PROPAGAÇÃO	20
3.1	Frequências utilizadas.....	20
3.2	Propagação e ionosfera.....	24
4.	PROJETO PROPOSTO.....	28
4.1	Oscilador.....	29
4.2	Amplificador classe C	31
4.3	Acoplamento de saída por meio de filtro Π	34
4.4	Transformador de tensão	37
4.5	Transformador de acoplamento para modulação AM	37
4.6	Amplificador de áudio para a etapa de modulação.....	39
4.7	Amplitude modulada e índice de modulação.....	40
4.8	Filtro de áudio e curva de pré-ênfase.....	44
4.9	Antenas	46
4.10	Técnicas de análise da propagação dos sinais	49
5.	DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DO TRANSMISSOR	50
5.1	Oscilador, amplificador e filtro Π	50
5.2	Transformadores de energia	53
5.3	Transformadores de acoplamento.....	54
5.4	Amplificador de áudio	56
5.5	Modulação e filtros de áudio	58
5.6	Considerações sobre o transmissor.....	62
6.	AVALIAÇÃO DE TRANSMISSÃO.....	65
6.1	Potência irradiada	65
6.2	Testes de modulação no Brasil	67
6.3	Recepções intercontinentais	73
7.	CONCLUSÃO.....	78

1. INTRODUÇÃO

No princípio da eletricidade e eletrônica os avanços estavam intrinsecamente ligados aos sistemas de comunicação, com o objetivo de encurtar distâncias. Sistemas de cabamentos ligavam várias regiões do mundo, possibilitando a comunicação via telegrafia, mais tarde sendo substituídos por sistemas sem fio valvulados. Os primeiros circuitos valvulados possibilitaram inicialmente a transmissão de sinais telegráficos. Na sequência já foi possível transmitir áudio, voz, sucessivamente até a radiodifusão comercial. Sistemas cada vez mais potentes e novos estudos quanto as bandas e frequências utilizadas favoreceram este desenvolvimento. A necessidade de comunicação durante os períodos de guerra foi mais um incremento para o desenvolvimento das telecomunicações sem fio, conseqüentemente a eletrônica envolvida, tanto na transmissão quanto na recepção dos sinais (WOOD, 1992).

O sistema de comunicação via ondas curtas foi um marco na história das telecomunicações. Em um período de comunicações restritas este sinal chegava a todos os locais do mundo, especialmente em regiões mais remotas, em uma época onde não haviam muitas transmissões locais de rádio, conectando várias regiões, especialmente na África e Ásia (WOOD, 1992).

Com a invenção do transistor, novos equipamentos foram possíveis, desde receptores portáteis e novos transmissores transistorizados. Atualmente o sistema de transmissão de ondas curtas vem se modernizando, já ocorrem transmissões no sistema digital, Digital Radio Mondiale (DRM) o que proporciona melhor qualidade de áudio para o ouvinte. Também já é possível utilizar sistemas de recepção por *Software Defined Radio* (SDR).

Escolheu-se este tema para o trabalho devido à abrangência de técnicas que o rádio engloba, tanto para transmissão e recepção, sendo de grande interesse e fascínio o sistema de transmissão, especialmente em ondas curtas, onde sinais de rádio, mesmo que em baixa potência podem percorrer grandes distância ao redor da Terra, devido à propagação.

Por estes motivos, decidiu-se construir um transmissor de ondas curtas, abordando cada uma das etapas envolvidas para a elaboração, especialmente a eletrônica. Já com o transmissor montado, mesmo que em baixa potência, ver qual a distância que o sinal poderia chegar.

1.1 Objetivos gerais

Projetar e construir um transmissor de ondas curtas com capacidade de transmissão intercontinental.

1.2 Objetivos específicos

Realizar um estudo geral da história das comunicações, desde o princípio, sistemas valvulados até os sistemas mais modernos usado nos dias atuais como rádio digital, assim como sistemas de recepção por SDR;

- Realizar a revisão bibliográfica dos circuitos oscilatórios, amplificador em classe C, acoplamentos, transformadores de força, transformadores de impedância, modulação em amplitude e antenas;
- Elaboração de transformadores, indutores, filtros e moduladores;
- Realizar estudo sobre a propagação, utilizando receptores remotos SDR de ondas curtas, na América do Sul, América do Norte e Europa;
- Realizar estudo sobre a ionização do sol sobre a Terra, seus efeitos, ciclos, tempestades solares, camadas e de que forma elas influenciam na distância de propagação do sinal gerado até a recepção do sinal.

1.3 Estrutura e organização do trabalho

No capítulo 2 é apresentado um breve contexto histórico sobre a evolução dos sistemas de telecomunicações, história e evolução associado à eletrônica envolvida.

No capítulo 3 é realizado uma contextualização das frequências de rádios utilizadas e suas características de propagação. Além disso mostra de que forma as camadas da ionosfera influenciam na propagação.

No capítulo 4 é apresentado o projeto de forma detalhada. Ele foi dividido em 9 etapas, que vão desde o sistema de oscilação até o sistema de transmissão por antenas. Para cada uma destas etapas é realizada a revisão bibliográfica.

No capítulo 5 é detalhada a construção do transmissor com base no referencial teórico, aplicando-o no desenvolvimento do equipamento, e de que forma foi realizada a montagem de cada uma das etapas até a conclusão.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados do transmissor construído, como potência, modulação, alcance, testes de sintonia e alcance.

2. AS PRIMEIRAS COMUNICAÇÕES

Nessa seção são detalhados os principais avanços e mudanças na área de telecomunicações e eletrônica. Desde as primeiras comunicações, transmissões por código Morse até o rádio digital.

2.1 Contexto histórico

A comunicação sempre foi essencial para o compartilhamento de informações, permitindo a troca de ideias e pensamentos. A comunicação é imprescindível na vida humana, podendo ser realizada por materiais impressos, forma verbal, linguagem corporal e por processos eletrônicos. Os dois principais empecilhos nas comunicações foram a distância e a linguagem, devido às diferentes nacionalidades e culturas (FRENZEL, 2012).

Para as longas distâncias os povos primitivos necessitavam comunicar-se pessoalmente ou buscar formas simples de compreensão, como som em batida de tambores, sinais de fumaça e indicação por bandeiras. Mais tarde com a possibilidade da escrita e avanços nos sistemas de transportes e correios, foi possível melhorar esta forma de comunicação, porém de forma muito lenta. A comunicação teve um grande avanço graças às descobertas na área de eletricidade e eletrônica, permitindo agilidade e comunicação instantânea (FRENZEL, 2012).

2.2 Evolução das telecomunicações

Em termos históricos, em 1837 Samuel Morse inventou o sistema de comunicação via telégrafo. Em 1866 foi instalado o primeiro cabo transatlântico entre os Estados Unidos e a Inglaterra. Em 1876 houve a invenção do telefone, por Alexander Bell. Em 1887 teve Heinrich Hertz com a descoberta das ondas de rádio, conhecidas como ondas hertzianas. Já em 1901, foi realizada a primeira transmissão transatlântica sem fio, por Guglielmo Marconi. Em 1906 ocorreu a primeira transmissão em amplitude modulada (AM), permitindo a comunicação via voz, por Reginald Fessenden. E por fim, a primeira rádio em 1920, a KDKA de Pittsburgh nos Estados Unidos (FRENZEL, 2012).

No Brasil, um dos pioneiros na área das telecomunicações foi o padre cientista Landell de Moura. Ele construiu o primeiro transmissor em 1894, transmitindo uma mensagem por 8 km na cidade de São Paulo. Entre 1903 e 1904, Landell de Moura conseguiu as patentes de três inventos, o transmissor de ondas hertzianas, o telefone sem fio e o telégrafo sem fio. Devido a estes seus inventos ele foi de grande importância para o desenvolvimento das comunicações no Brasil. Já em 1922, é realizada no Brasil a primeira transmissão radiofônica oficial (ALENCAR, LOPES, ALENCAR, 2012).

A técnica de modulação em frequência (FM) é apresentada pela primeira vez em 1933 por Edwin Armstrong. Já em 1942 são produzidos os primeiros aparelhos comerciais de FM, que permitem uma transmissão de áudio com maior fidelidade (FRENZEL, 2012).

Segundo Frenzel (2012), a comunicação evolui rapidamente, novas formas foram possíveis, especialmente por meio da telefonia móvel, rádio, TV e Internet. A agilidade nas comunicações sempre foi essencial nas nossas vidas, tanto de forma profissional como pessoal.

2.3 Evolução das tecnologias de rádio – da válvula ao SDR

Para existir um sistema de comunicação eletrônica é necessário que haja um sistema de transmissão, um meio, ou canal de transmissão e por fim um sistema de recepção. Na transmissão é necessário que alguma pessoa ou computador gere algum tipo de informação ou

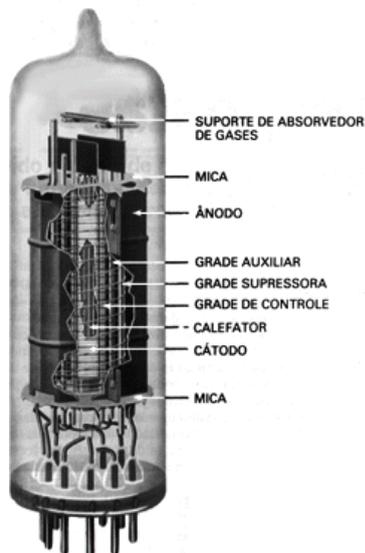
mensagem. Esta informação deve ser levada ao transmissor, que deve ser capaz de enviá-la por meio de um canal de comunicação. Este sinal chega até um receptor, onde o sinal deve ser decodificado e vir a ser transmitido para outra pessoa (FRENZEL, 2012).

Em 1887, o físico alemão Heinrich Hertz foi o primeiro a demonstrar o efeito da radiação eletromagnética no espaço. A distância de transmissão foi de apenas alguns metros, mas essa transmissão provou que as ondas de rádio podem deslocar-se de um lugar para outro sem a necessidade de qualquer conexão por fios. Hertz também provou que as ondas de rádio, embora invisíveis, deslocam-se com a mesma velocidade que as ondas de luz (GROB, SCHULTZ, 2003).

Em termos históricos tem-se em 1903 a invenção da válvula termiônica, podendo ser utilizada como retificação de sinais alternados por John Fleming. Já em 1906, é inventada a válvula tríodo, por Lee de Forest, onde um pequeno sinal poderia ser amplificado por meio da grade de controle. Entre 1933-1939, ocorreu a invenção do receptor super-heteródino e da modulação em frequência, por Edwin Armstrong. A grande invenção do transistor nos laboratórios Bell em 1948, possibilitou uma revolução na eletrônica até então. Mais tarde, em 1958-1959 a invenção do circuito integrado, pela Texas Instruments e a Fairchild (FRENZEL, 2012).

A figura 1 apresenta detalhadamente uma válvula termiônica com cada uma de suas conexões com as respectivas nomenclaturas.

Figura 1 - Válvula termiônica



Fonte: <http://trabalhofisicavet.blogspot.com/2012/09/valvulas-eletronicas-definicao.html> <Acessado em 16/09/2018>

A válvula possui um filamento, normalmente de 6,3 Volts, para proporcionar o aumento da temperatura e conseqüentemente o efeito termiônico. De forma análoga, é possível comparar a grade de controle, o cátodo e o ânodo ao um transistor com a base, emissor e coletor respectivamente.

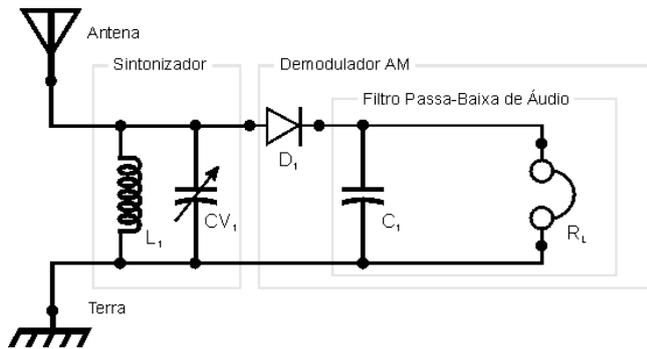
A grande mudança e evolução fica a cargo dos receptores que evoluíram muito, em comparação aos transmissores. Em termos históricos os primeiros receptores eram de galena, posteriormente regenerativos, heteródinos e super-heteródinos. Com a invenção do transistor e circuitos integrados, os receptores podiam ter tamanho reduzido e serem portáteis. Mais tarde receptores digitais e micro processados apareceram, até com possibilidade de recepção via software e com a disponibilidade de acesso remoto, assim como receptores digitais de rádio.

Um simples receptor de sinais em amplitude modulada pode ser construído por meio de um receptor de galena, ou diodo como detector. Este processo chama-se demodulação AM, onde o sinal é captado e recuperado no formato original, na qual foi previamente modulado na transmissão AM (YOUNG, 2006).

Com a presença da galena ou diodo, ocorre a retificação do sinal. A presença do sinal modulado produz uma envoltória na portadora, com o uso do diodo existe a condução destes sinais sempre que superarem os valores de 0,2 V, isso para diodos de germânio, variando conforme o sinal modulado. Na sequência este sinal segue para um capacitor em paralelo, que proporciona filtragem do sinal original, assim como aumento dele. O Capacitor se carrega com os valores positivos dos pulsos, já quando a tensão diminui o capacitor se encarrega-se de descarregar lentamente (YOUNG, 2006).

Este receptor pode ser visualizado na figura 2, ele é composto inicialmente pela bobina LC paralelo, que é responsável pela sintonia do circuito, como referência utiliza-se uma das extremidades ao solo e a outra como antena. Através do capacitor variável é possível alterar a frequência de sintonia. Já a detecção é feita por meio de diodo ou galena. Já a filtragem é realizada por um capacitor fixo. A saída pode ser conectada a fones de ouvidos de alta impedância, não sendo necessário haver alimentação externa ao circuito.

Figura 2 - Receptor Galena



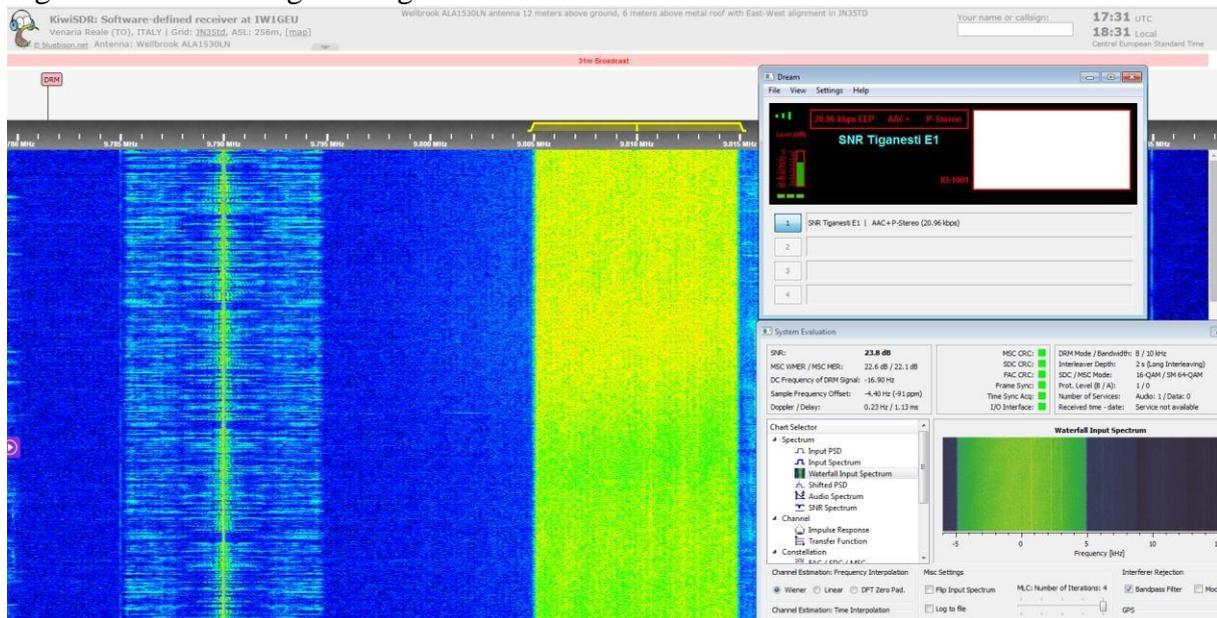
Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/EsquemaRadioDeGalena2.gif><Acessado em 16/09/2018>

O sistema de transmissão continua a utilizar sistemas valvulados para alta potência, porém com o surgimento do transistor tais equipamentos vêm sendo substituídos, devido especialmente ao custo de operação e manutenção. A grande mudança foi o aperfeiçoamento em técnicas de controle e eficiência de tais equipamentos. Existe grande tendência para adoção da transmissão digital, em substituição à transmissão analógica, do mesmo modo que vem acontecendo com a televisão.

2.4 Digital Radio Mondiale (DRM)

Como comentado anteriormente, o sinal analógico vem sendo substituído pelo digital. Um sistema digital de rádio para ondas curtas e médias é o padrão DRM. O DRM foi elaborado para ser de acesso global. Na figura 3 é possível visualizar via um espectrograma a recepção de sinais de rádio em um SDR remoto na Itália. Pode-se verificar na frequência de 9790 kHz, uma portadora, traço mais intenso, em sinal analógico, e junto a ela a modulação em amplitude, contendo a informação de áudio, com largura de banda de 10 kHz. Já em 9810 kHz é possível verificar um sinal digital em DRM, com largura de banda também em 10 kHz, proveniente da Rádio Romênia Internacional.

Figura 3 - Sinal analógico e digital



Fonte: Autor, SDR Itália

Como foi comentado anteriormente, na figura 3, é possível visualizar o sinal da Rádio Romênia Internacional digital, onde não apresenta uma portadora característica como no sinal analógico. Existem receptores especiais, específicos para sintonia de rádios digitais, como no caso da figura 3, a sintonia é realizada por meio do software Dream, que realiza a decodificação do sinal digital para áudio.

Este sinal pode apresentar largura de banda variada, conforme norma do DRM, podendo ser de 4,5, 5, 9, 10, 18 e 20 kHz. Logo, com largura de banda maior é possível transmitir com um *bitrate*¹ maior. A modulação utilizada no sistema DRM é a *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM – Modulação de Amplitude em Quadratura) é usada principalmente nas transmissões de sinais digitais, onde é necessária alta taxa de transferência de informação. Possibilita transmissão em 16-QAM, mais robusto, e 64-QAM, possibilitando uma qualidade maior de transmissão, porém com maior dificuldade de decodificação. A transmissão é composta por um sinal I/Q, I fase e Q quadratura (DRM CONSORTIUM, 2017).

Com uma largura de banda de 10 kHz, mais comum, é possível transmitir em 16-QAM com um *bitrate* de 6,1 a 18,4 kb/s, e em 64-QAM entre 7,6 e 34,8 kb/s. Além da transmissão de áudio, o sistema DRM também permite a transmissão de imagens, textos, links e alertas (DRM CONSORTIUM, 2017).

¹Taxa de bits por segundo

2.5 Software Defined Radio (SDR)

O receptor SDR é um conversor analógico digital (A/D). Estes receptores realizam a conversão dos sinais recebidos pelas antenas e os converte em formato digital. Logo, estes sinais digitais são tratados por meio de softwares, sendo possível alterar frequência, largura de banda e tipo de modulação, além de poder visualizar estes sinais em um monitor. O software realiza as funções ou etapas de um receptor como misturador, frequência intermediária, ganho automático de áudio, filtros, amplificadores, demoduladores e detectores (REALTEK SEMICONDUCTOR, 2018).

Na figura 4 é possível visualizar um receptor SDR, modelo RTL2838. Com este receptor é possível ter acesso aos sinais nas mais diversas frequências, sendo possível receber vários sinais. A conexão é realizada por meio da porta USB, sendo possível conectá-lo a uma antena externa, e por meio de softwares específicos realizar a sintonia nas mais diversas frequências, em diversos tipos de modulação como AM, FM, SSB, DRM e CW (REALTEK SEMICONDUCTOR, 2018).

Estes sinais de RF são possíveis de serem visualizados na própria tela, como na figura 3, funcionando como um espectrograma. Ainda é possível determinar a largura de banda utilizada para cada sinal.

Figura 4 - Receptor SDR



Fonte: <https://i.ebayimg.com/images/g/jQAAAOSwMQBZ8LkP/s-l300.jpg> <Acessado em 28/10/2018>

Como este receptor faz o tratamento dos sinais de forma digital, é possível conectá-lo a Internet. Com isso é possível acessar remotamente estes receptores via navegador, sendo possível o próprio usuário definir as frequências, e formas de escutas.

No capítulo 2 foi apresentado um apanhado histórico da evolução das telecomunicações e eletrônica, assim como modos de transmissão analógicos e digitais. Na sequência, é apresentado características de propagação e os comprimentos de ondas que favorecem cada típico específico de comunicação, e mostra de que forma é possível obter longas distâncias de transmissão.

3. FREQUÊNCIAS UTILIZADAS E PROPAGAÇÃO

Este capítulo apresenta as frequências utilizadas para a transmissão dos sinais de rádio, conseqüentemente as bandas utilizadas. Além disso, descreve as camadas da ionosfera e as características de propagação dos sinais.

3.1 Frequências utilizadas

Primeiramente os sistemas de comunicação eletrônica utilizam uma gama enorme de frequências, representando um grande espectro, sendo que cada banda é usada para uma necessidade específica de transmissão e recepção. Adotou-se divisão em bandas, pela frequência utilizada (FRENZEL, 2012).

Os comprimentos de onda podem ser calculados por meio da equação 1.

$$\lambda = \frac{300}{f(\text{MHz})} \quad (1)$$

O comprimento de onda (metros) é a distância ocupada por um ciclo de onda completo. Por exemplo, a frequência de 1 MHz tem comprimento de onda de 300 metros, já a frequência de 10 MHz tem um comprimento de onda de 30 metros. Desta forma é possível verificar que as frequências inferiores possuem comprimentos de onda maior, e frequências superiores possuem comprimento de onda menor (FRENZEL, 2012).

As primeiras formas de comunicação utilizam frequências bastante baixas, esta banda é conhecida por frequências muito baixas - *Very Low Frequencies* (VLF), que estendem-se de 9

a 30 kHz e são utilizadas em casos específicos, uso militar e para comunicação com submarinos. Na sequência existe a banda de frequências baixas - *Low Frequencies* (LF), que está compreendida entre 30 e 300 kHz (FRENZEL, 2012).

Na faixa de frequência LF está situado as transmissões de sinais horários, como o DCF77 em 77,5 kHz em Mainflingen, Alemanha. Nestas frequências aparecem as primeiras rádios comerciais em ondas longas - *Long Waves* (LW) entre 153 e 279 kHz, utilizada especialmente na Europa, para grandes distâncias. Além disso também é utilizada para orientação, como os rádio faróis (NDB), com seus sinais telegráficos.

Na banda das frequências médias - *Medium Frequencies* (MF), tem-se uma das mais importantes faixas, situando-se entre 300 e 3000 kHz. A principal característica desta faixa é a sua utilização na área de radiodifusão comercial para rádios AM. Estas emissoras ocupam as frequências em ondas médias - *Medium Waves* (MW) de 530 até 1710 kHz, sendo utilizada em todos os lugares do mundo, desde serviços locais, regionais, nacionais e internacionais nesta faixa de transmissão. Grandes distâncias são possíveis durante o dia, porém à noite, devido a propagação favorável, estas transmissões alcançam distâncias muito grandes (FRENZEL, 2012).

A banda de altas frequências - *High Frequencies* (HF), representada pelas ondas curtas - *Short Waves* (SW), compreende-se entre 3000 e 30000 kHz. Utilizada por diversos serviços, desde rádios comerciais, serviços governamentais, militares, científicos e radioamadores (FRENZEL, 2012). Desta forma, conclui-se pela equação 1 que as frequências mais baixas possuem comprimentos de onda maiores, e a medida que as frequências aumentam, possuem comprimento de onda menor.

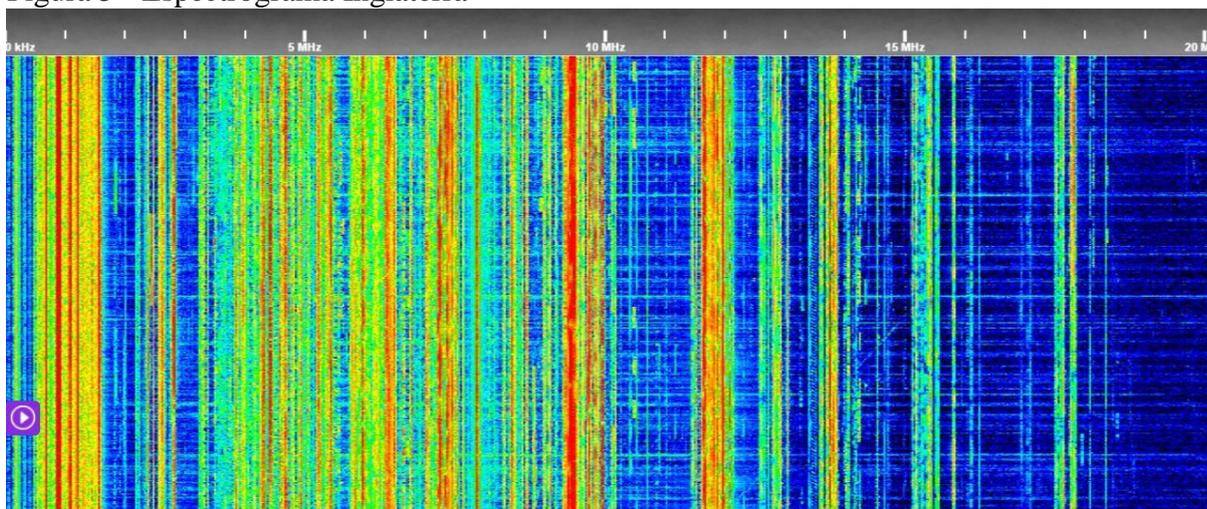
Grandes emissoras internacionais utilizam estas frequências para transmitir os seus programas em diversas línguas ao redor do mundo. Grandes emissoras como a Voice of America (VOA), British Broadcasting Company (BBC), Deutsche Welle (DW), Radio France International (RFI) e China Radio International (CRI) continuam transmitindo em ondas curtas.

A grande vantagem da utilização desta banda é a facilidade de captação destes sinais, por exemplo, por meio de um receptor portátil a pilha. Além disso, a abrangência destes sinais é muito grande, cobrindo grandes partes do planeta, chegando a lugares remotos, especialmente em regiões da África e Ásia, levando informação, notícias e entretenimento às pessoas destas regiões mais pobres e isoladas, alcançando lugares sem Internet e cobertura por satélite.

Acima destas frequências tem-se a banda de frequências muito altas - *Very High Frequencies* (VHF), encontra-se entre 30 e 300 MHz, a utilizam por exemplo, rádios em FM, comunicação aeronáutica, marinha e radioamadores. Acima desta faixa, tem-se a banda de frequências ultra-altas - *Ultra High Frequencies* (UHF), que compreendem frequências entre 300 e 3000 MHz, utilizada especialmente por transmissão de TV digital e celulares (FRENZEL, 2012).

Na figura 5 é possível visualizar um espectrograma de sinais entre 0 e 20 MHz sendo recebidos no sul da Inglaterra. Os sinais mais fortes são recebidos na cor vermelha. Este é um espectrograma real, com os sinais sendo captados no próprio receptor SDR. A recepção é realizada durante a tarde, sendo possível visualizar os sinais de ondas longas e médias a esquerda e os demais em ondas curtas.

Figura 5 - Espectrograma Inglaterra



Fonte: <http://southwest.ddns.net:8073/> <Acessado em 17/10/2018>

Como este trabalho visa a transmissão em ondas curtas, será abordado de forma mais específica suas características. A banda de ondas curtas tem suas subdivisões e características específicas para cada uma das faixas utilizadas. As bandas de ondas curtas podem ser divididas pelas frequências utilizadas pelos seus respectivos comprimentos de onda. Esta separação pode ser visualizada na figura 6.

Figura 6 - Banda de ondas curtas

Banda (m)	Frequências (kHz)
120	2300 - 2500
90	3200 - 3400
75	3900 - 4000
60	4750 - 5060
49	5900 - 6200
41	7100 - 7600
31	9400 - 10000
25	11600 - 12100
22	13570 - 13870
19	15000 - 15800
16	17480 - 17900
13	21450 - 21850
11	25600 - 26100

Fonte: Adaptado de <https://modernsurvivalblog.com/communications/shortwave-radio-bands-101/><Acessado em 10/05/2018>

Não existe uma forma exata e concreta de determinar e caracterizar cada uma destas bandas. Muitos fatores influenciam na distância de transmissão, como a potência do transmissor, tipo de antena, horário e época do ano. Tanto é que durante o ano ocorrem duas datas para a realização de troca de frequências das grandes rádios internacionais. Elas ocorrem no último domingo de março e no último de outubro. Esta troca visa o melhor rendimento das frequências de transmissão, objetivando o melhor aproveitamento da propagação.

As frequências mais baixas, nas bandas de 120, 90 e 60 metros costumam receber mais uma divisão, sendo chamadas de ondas tropicais, por serem utilizadas especialmente em regiões tropicais ao redor do mundo para transmissão de serviços locais e regionais. Ao longo do dia costumam ter um alcance limitado, distâncias de até 300 e 700 km, porém a noite alcançam grandes distâncias.

De forma geral, as bandas de 49, 41, 31 e 25 metros são utilizadas normalmente durante o amanhecer, entardecer e noite para cobrir grandes distâncias, especialmente intercontinentais. Já durante o dia alcançam distâncias entre 1000 e 2000 km. Já as bandas de 22, 19, 16, 13 metros são usadas especialmente durante o período do dia para cobrir grandes distâncias, também intercontinentais. Porém durante à noite ela torna-se desfavorável, não existindo propagação para estas frequências. Estas informações foram feitas com base em análises de diversos receptores SDR e horários de transmissão fornecidos pelas emissoras.

Outra característica, especialmente nas bandas mais altas é a zona de silêncio, na qual o sinal começa a ser recebido somente a partir de uma distância da antena transmissora, por exemplo, 1000 km. Para cobrir de forma eficiente uma grande região ou continente é comum as emissoras utilizarem mais de uma frequência para transmitirem suas programações, como uma frequência em 49 metros para sinais mais locais e outra em 25 metros para distâncias maiores. Estas características como zona de silêncio, onda terrestre e onda espacial serão vistas de forma mais detalhada na próxima seção.

3.2 Propagação e ionosfera

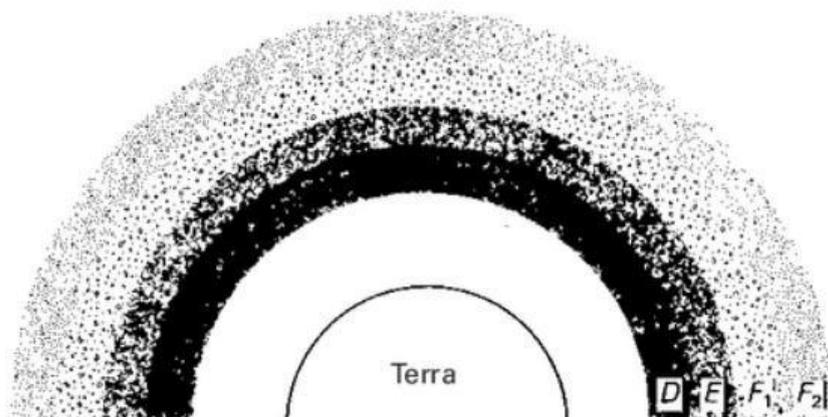
O sistema de propagação de ondas no espaço pode ser dividida em duas categorias, a visada direta e a rádio HF. A propagação por visada direta é simples, tanto a antena transmissora e receptora necessitam ter visada, precisam se enxergar. Já a propagação por HF, frequências entre 3 e 30 MHz, consiste em uma transmissão terrestre e espacial, onde o sinal é refletido pela ionosfera (YOUNG, 2006).

Como as antenas de ondas médias e curtas são grandes, estas são construídas próximas ao solo. A onda terrestre consiste em um somatório vetorial da irradiação direta da antena e as reflexões da terra. Para um sistema de baixa condutividade do solo, o sinal tende a ir em direção ao céu. A medida que a frequência aumenta, o sinal terrestre enfraquece. Por outro lado a propagação em ondas curtas utiliza a propagação espacial, utilizando ionosfera como propagação ou meio de transmissão (YOUNG, 2006).

O sistema de comunicação por ondas curtas apresenta um índice de confiabilidade de 90% ou mais. Essa configuração permite que os sinais sejam transmitidos a longas distâncias e com segurança, fazendo com que o sinal transmitido reflita pela ionosfera e retorne à Terra, com possibilidade de grande distância entre a zona de transmissão e a zona de recepção (YOUNG, 2006).

Esta possibilidade de transmissão é possível devido à ionosfera. Existem várias camadas de gases na atmosfera da Terra, que se tornam ionizadas devido à incidência de irradiação de partículas de raios cósmicos, atividades meteóricas, e atividades solares (YOUNG, 2006). A ionosfera é dividida em camadas, essas são identificadas na figura 7.

Figura 7 - Camadas da ionosfera



Fonte: Young, 2006, p. 466

Conforme a figura 7, existem quatro principais camadas da ionosfera, D, E, F1 e F2. A camada D, a mais próxima da Terra, situa-se entre 50 e 90 km da superfície terrestre, ela existe somente durante os períodos de dia. A camada E, localiza-se entre 90 e 140 km acima da superfície. A camada F1, localiza-se entre 140 e 250 km da Terra, e com o anoitecer tende a mesclar com a camada F2, que está presente dia e noite, com altitude variável. Durante o dia, localiza-se a 250 e 300 km, e durante à noite 150 e 350 km da superfície (YOUNG, 2006).

Na figura 8, é mostrado a forma de análise das condições de propagação. Nela são apresentados alguns dos principais parâmetros de análise de momento.

Figura 8 - Índices de propagação



Fonte: <https://www.qsl.net/py4sm/propagacao.htm> <Acessado em 20/10/2018>

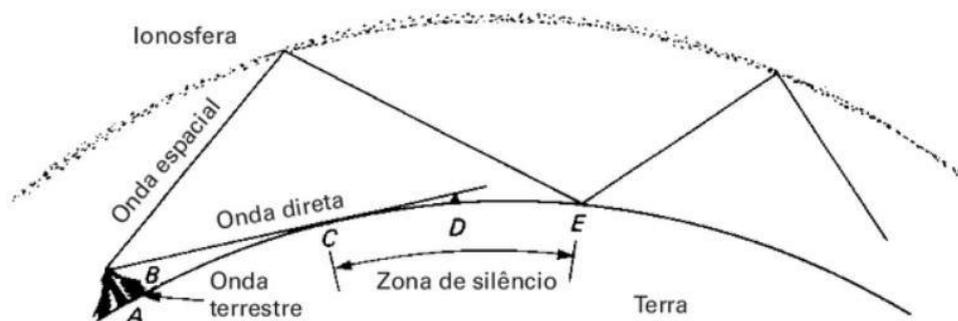
Os principais índices são: SFI, indica o índice de fluxo solar, que é a quantidade de energia recebida do sol. Quanto maior o valor, melhores condições para realizar a sintonia. Já SN é a contagem de manchas solares, sendo que esse valor aumenta quando existe proximidade dos máximos solares, que ocorrem a cada 11 anos. Por fim, A é um índice que indica a quantidade de distúrbios magnéticos na ionosfera (HERRMAN, 2015). Além disso é feita uma

separação entre as principais bandas, indicando se a condição de propagação é boa, regular ou ruim.

A escolha da frequência utilizada deve considerar o horário de transmissão para que o sinal chegue de forma confiável até à região ou zona de recepção, aproveitando da melhor forma possível as camadas da ionosfera para a refração e reflexão dos sinais. Estas frequências devem ser alteradas ao longo do dia, assim como para estações do ano. Também devem ser consideradas outras questões, como zona de silêncio, multicaminho, desvanecimento e atenuação espacial, que serão explicadas a seguir (YOUNG, 2006).

A zona de silêncio pode ser visualizada na figura 9. É apresentada uma transmissão, primeiramente existe uma onda direta ou terrestre, que é a área de visada direta, que não sofre a influência da curvatura da terra, que representa uma distância curta, e irá depender da altura do sistema irradiante. Além da onda direta ainda está presente a onda espacial, que é representada por dois saltos até a ionosfera. A zona de silêncio localiza-se entre os pontos C e D, onde não existe recepção de onda direta e nem sinal por onda espacial, onde o sinal começa a chegar somente no ponto E. A zona de silêncio vai depender se o sinal transmitido é durante o dia ou noite, assim como a frequência utilizada e o horário (YOUNG, 2006).

Figura 9 - Zona de silêncio



Fonte: Young, 2006, p. 467

Além da zona de silêncio existe a distorção por multicaminho. Isso ocorre quando objetos com superfície condutora refletem estes sinais transmitidos, podemos considerar prédios ou montanhas. Devido a este efeito existe a recepção de um sinal mais forte, que é direto e associado a ele um sinal de menor intensidade, proveniente de uma região de reflexão, chegando os dois em momentos diferentes. Isto caracteriza-se especialmente em sistemas de transmissão de TV analógicas, onde o resultado é uma imagem com fantasmas (YOUNG, 2006).

Existem perdas ao longo da transmissão que podem ser por: diminuição de densidade de potência, devido ao aumento da distância, que seria a atenuação em espaço livre. Já outra seria a absorção devido à moléculas na atmosfera da Terra e a possibilidade de desvanecimento, que ocorre em relação à mudanças no terreno e condições climáticas. Também está associado às explosões e manchas solares que alteram os valores de ionização, para mais ou menos, além dos chamados ciclos solares, sendo estes considerados de perda espacial (YOUNG, 2006).

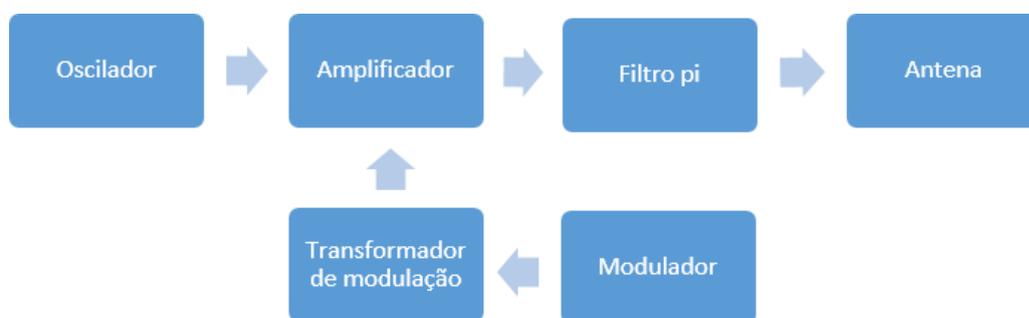
No capítulo 3 foi abordado as frequências eletromagnéticas utilizadas, explicando a característica de propagação e termos associados a cada uma das bandas de ondas curtas. Tratou-se de propagação e de que forma o sinal pode propagar-se por grandes distâncias, devido a presença da ionosfera que é detalhada ao longo do capítulo.

Na sequência, capítulo 4, é realizada a revisão bibliográfica para o desenvolvimento e construção do transmissor de ondas curtas, isso para cada uma das etapas que compreendem-no.

4. PROJETO PROPOSTO

Neste capítulo será descrita a proposta do projeto, assim como as etapas que o compõem e as ferramentas que serão utilizadas durante o seu desenvolvimento. Foi escolhido a construção de um transmissor valvulado, por apresentar construção mais simples e potência mais elevada, com um número menor de componentes, comparado a um sistema transistorizado que necessita várias etapas de amplificação com maior complexidade. O diagrama esquemático do sistema de rádio desenvolvido é apresentado na figura 10.

Figura 10 - Diagrama esquemático do rádio desenvolvido no projeto de TCC



Fonte: Autor

Através do diagrama simplificado do transmissor é possível verificar cada uma das etapas envolvidas. O circuito começa no oscilador, onde a frequência de transmissão é gerada em baixa potência. A partir do sinal gerado, esse é amplificado para gerar maior potência, isso fica a cargo da etapa amplificadora em classe C.

Já o sinal de áudio é introduzido no modulador, que é um amplificador de áudio transistorizado em baixa impedância. Como este sinal amplificado é em baixa impedância, ele é conectado em um transformador de impedância, que tem a função de realizar o acoplamento

entre a baixa impedância do amplificador de áudio com a alta impedância do amplificador valvulado. Já com o sinal de RF modulado, esse é acoplado a antena por meio de um filtro π que tem duas funções. A primeira função é realizar o acoplamento entre a alta impedância do amplificador em classe C, com a baixa impedância da antena. Além disso outra função é a atenuação de harmônicas que o filtro proporciona.

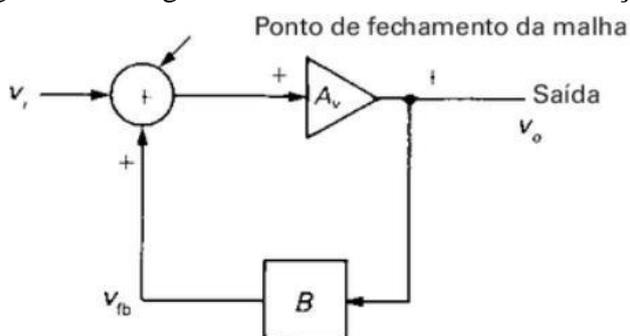
4.1 Oscilador

O oscilador é responsável pela geração do sinal de RF. Ele pode ser gerado de várias maneiras, por diversas técnicas e estruturas, com várias formas de onda, sendo a etapa inicial para o transmissor. A partir deste sinal gerado, mesmo que em baixa potência, ele servirá de base para as demais processos de amplificação em outras etapas. Um dos principais objetivos do oscilador é garantir a estabilidade da frequência por ele gerada.

Para que um sistema oscile são necessários respeitar alguns critérios como: fonte de alimentação, ganho, um esquema que determine a frequência, como um cristal de quartzo e realimentação, que deve ser positiva (realimentação em fase e ganho de malha fechado do sistema igual a 1) (YOUNG, 2006).

O oscilador é um sistema de realimentação na qual deve obedecer a dois critérios, chamados de critérios de Barkhausen. Primeiro o sinal de realimentação deve estar exatamente em fase com o sinal de entrada original no ponto de fechamento da malha. Segundo, o ganho em estado estacionário geral da malha de realimentação deve ser exatamente igual a unidade, como indica a figura 11 (YOUNG, 2006).

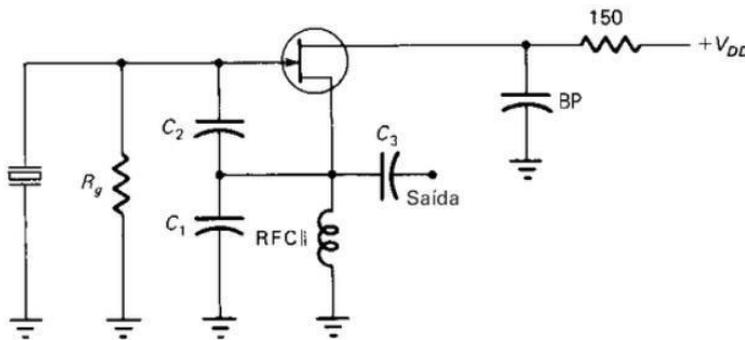
Figura 11 - Diagrama de um sistema de realimentação clássico



Fonte: YOUNG, 2006, p. 40

Um circuito oscilador Colpitts² transistorizado, do tipo JFET, pode ser visualizado na figura 12. O cristal determina a frequência de operação do oscilador, já os capacitores C1 e C2 realizam a realimentação para o oscilador. O resistor Rg realiza a polarização do transistor, o indutor RFC fornece um curto para o sinal DC. Já para o sinal em alta frequência o indutor atua com alta reatância, fazendo com que o sinal do oscilador não chegue ao terra. Já a saída do sinal é pelo capacitor C3 (YOUNG, 2006).

Figura 12 - Oscilador transistorizado



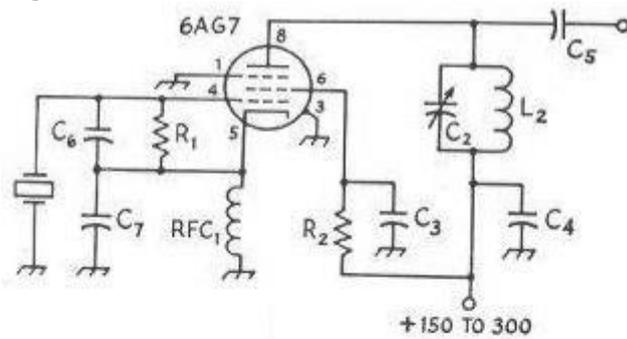
Fonte: YOUNG, 2006, p. 40

O sistema necessita de uma fonte de alimentação para que a oscilação possa ocorrer, assim como é necessário haver um ganho no circuito, devido às perdas que ocorrem, para que estas atuem como forma de compensação. Assim como existe a necessidade de um circuito que possa proporcionar a frequência do oscilador, como um sistema LC, ou como utilizado no oscilador do exemplo acima, um cristal de quartzo. A vantagem do uso do cristal dá-se especialmente na estabilidade e exatidão da frequência (YOUNG, 2006).

A partir deste oscilador, buscou-se novas possibilidades, com o uso de um oscilador valvulado. Foi pesquisado diversas válvulas e configurações disponíveis para a elaboração do transmissor. Como circuito oscilador foi utilizado amplamente a válvula 6AG7, devido as suas características de alto ganho de transcondutância, ser blindada e ainda ser de fácil aquisição. Como fonte de pesquisa foram utilizados diversos matérias, como a American Radio Relay League (ARRL). Um circuito oscilador valvulado é apresentado na figura 13.

² A principal característica deste oscilador é a realimentação que é feita por meio de dois capacitores atuando como divisores de tensão para o sinal em alta frequência. Projetado por Edwin H. Colpitts.

Figura 13 - Oscilador valvulado



- C_1 —Screen bypass—0.001- μ f. disk ceramic.
 C_2 —Plate bypass—0.001- μ f. disk ceramic.
 C_3 —Output coupling capacitor—50 to 100 pf.
 C_4 —Excitation-control capacitor—30-pf. trimmer.
 C_5 —Excitation capacitor—220-pf. mica for 6AG7; 100-pf. for 5763.
 R_1 —Grid leak—0.1 megohm, $\frac{1}{2}$ watt.
 R_2 —Screen resistor—47,000 ohms, 1 watt.
 RFC $_1$ —2.5-mh. 50-ma. r.f. choke.

Fonte: ARRL, 1957

O oscilador de entrada e saída sintonizada foi comumente utilizado para osciladores a válvula, porque elas possuem impedância de entrada muito alta conectadas à grade de controle, que remete a utilização de um circuito ressonante em paralelo na entrada (YOUNG, 2006).

A sintonia do oscilador é realizada por um circuito LC paralelo. A relação de LC determina a frequência de ressonância. A frequência de oscilação é determinada pela equação 2.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

4.2 Amplificador classe C

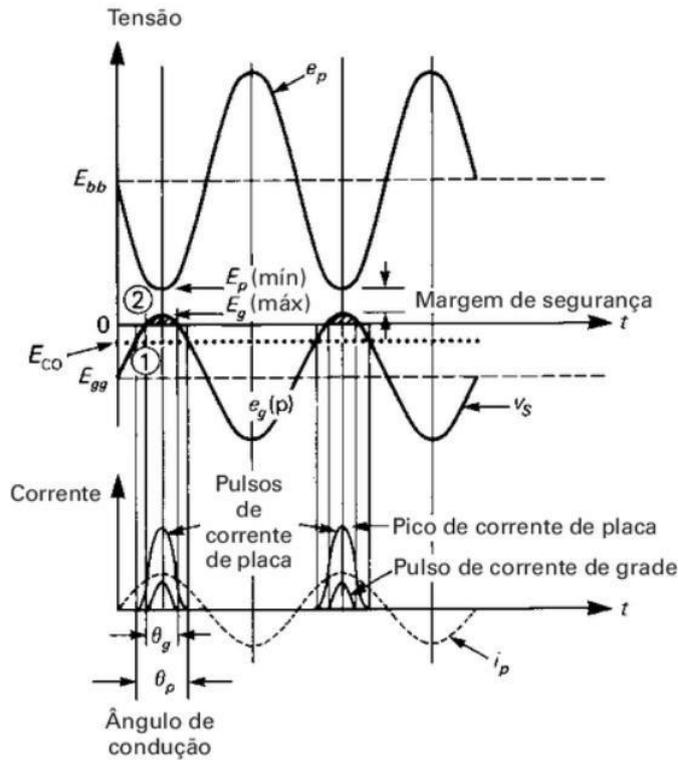
A partir do sinal de baixa potência gerado no oscilador, esse deve ser entregue ao amplificador, que possui a função de aumentar a intensidade do sinal de RF para que haja maior potência de irradiação na antena. A classe mais utilizada em sistemas de RF é a classe C, devido especialmente a sua alta eficiência.

Para a etapa de amplificação são usados os amplificadores do tipo A, B e C. Estes amplificadores costumam ser sintonizados com uma frequência, ou banda utilizada, sendo que ele deve amplificar a informação sem distorção, assegurando um valor adequado de harmônicos e espúrios. Devido à baixa eficiência do amplificador em classe A, não é comum ser utilizado para amplificação de sinais de RF, mesmo possuindo alta linearidade e baixa distorção. Já na classe B a eficiência é bem maior, porém é mais comum sua utilização em amplificadores lineares. Logo o amplificador mais utilizado para a amplificação de sinais de RF é o de classe C. Ele deve ser utilizado de forma sintonizada, onde os pulsos gerados pelos seu chaveamento, produzem alta potência e eficiência na saída, devido à grande parte do tempo o amplificador estar desligado (YOUNG, 2006).

A polarização de um amplificador classe C é estabelecida de forma que o dispositivo ativo, transistor ou válvula, possa ser acionado. O dispositivo ativo não conduz, a menos que o pico de sinal de entrada exceda a tensão de corte do dispositivo, de modo que a corrente de saída flua em pulsos por menos de metade do ciclo, menos que 180° . A fração do ciclo de entrada para qual flui a corrente de saída é chamada ângulo de condução \emptyset , e é dada em graus de fase. Com o ângulo \emptyset menor a eficiência é maior, e com ângulo maior a potência é mais alta. Na prática o ângulo fica entre 120° e 150° , com uma eficiência próxima a 60% para circuitos valvulados (YOUNG, 2006).

Na figura 14, indicação 1, o sinal de pico, proveniente do oscilador excede a tensão de corte da válvula, onde a corrente da placa começa a fluir. Na posição 2, o sinal positivo do oscilador é grande o suficiente para excitar positivamente a grade, possibilitando alta corrente de placa. Logo, com tensão negativas na grade a corrente de placa tende a diminuir, ficando praticamente sem condução. É possível verificar a corrente de placa conduzindo somente na região positiva, proporcionalmente com a corrente de grade (YOUNG, 2006).

Figura 14 - Análise amplificador em classe C



Fonte: YOUNG, 2006, p. 122

Outro aspecto muito importante na configuração em classe C é determinar a impedância de saída do circuito, para posterior acoplamento de impedâncias com a antena (carga), por meio de uma configuração do tipo π . Segundo Young (2006), as equações que determinam a impedância em classe C para circuitos valvulados são as seguintes:

A impedância de saída em classe C pode ser expressa pela equação 3.

$$Z_{saída} = \frac{V_{pico}}{I_{pico}} \quad (3)$$

O valor de V_{pico} para a classe C, equação 4.

$$V_{pico} = E_{bb} - \left[\frac{E_{bb} \cdot \cos(\theta_p)}{0,9 \cdot \cos(\theta_g)} \right] + E_{gg} \quad (4)$$

O valor de I_{pico} em classe C, equação 5.

$$I_{pico} = 1,27 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{g} \quad (5)$$

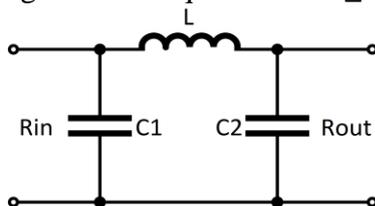
Estas informações são obtidas por meio dos *datasheets* de cada válvula.

4.3 Acoplamento de saída por meio de filtro π

O filtro π é muito utilizado na área de RF, tendo a função de realizar o fácil acoplamento de impedâncias entre o transmissor e a antena, proporcionando maior entrega de potência entre os dois. Além disso, ele propicia uma grande atenuação de harmônicos para que estes não sejam irradiados pelo sistema irradiante.

Uma das redes de casamento mais comumente utilizadas para estágios de saída de transmissores é a rede de casamento de impedância do tipo π , implementada em uma configuração de filtro passa-baixa com três polos com um pico de ressonância e decaimento rápido com corte de frequência (YOUNG, 2006). A configuração do filtro π é mostrada na figura 15.

Figura 15 - Esquema filtro π



Fonte: Autor

O filtro π é composto por dois capacitores e um indutor. A grande importância deste filtro está associada ao casamento de impedância que é possível realizar entre a alta impedância da válvula, representada por R_{in} e a antena, geralmente 50Ω , representada por R_{out} . Outra importante função é a atenuação das harmônicas que são bastante elevadas na classe C.

O primeiro capacitor, $C1$ atua em ressonância com o indutor L , isso para a frequência desejada. Já $C2$ atua como acoplador de impedância, transferindo o máximo de energia para a carga.

A qualidade de um filtro é definida por um fator de mérito ou fator Q , que indica o quanto o filtro está sintonizado com a frequência de ressonância. Valores mais elevados de Q indicam um circuito fortemente ressonante. Valores de capacitores mais altos e indutor mais baixo resultam em um Q mais alto, já valores de capacitância mais baixos e indutância alta resultam em um Q baixo. Com um Q mais alto os valores de atenuação de harmônicas são

maiores, resultando em uma banda mais estreita. Já com Q mais baixo, os valores de atenuação de harmônicas são menores, porém a banda é mais larga (FRENZEL, 2016).

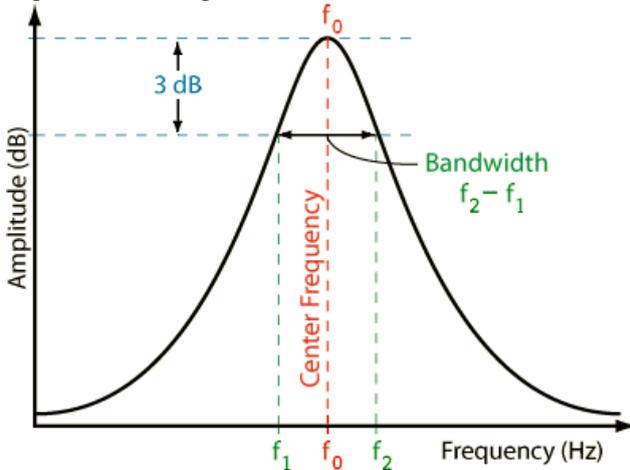
Os indutores armazenam a energia em seu campo magnético, já os capacitores em seu campo elétrico. A energia que é armazenada durante metade do ciclo *ac* é devolvida durante a outra metade. A perda de energia durante este processo, ou ciclo, é associada a uma resistência, um fator de qualidade Q. O fator de mérito pode ser definido como a razão entre a máxima energia armazenada e a quantidade perdida para um ciclo *ac* (YOUNG, 2006).

Para os sistemas de transmissão em RF é bastante comum utilizar um fator de mérito Q entre 10 e 15. Segundo Young (2006), a largura de banda pode ser determinada pela equação 6.

$$BW = \frac{f_0}{Q} \tag{6}$$

Por exemplo, para a frequência de 8065 kHz, e fator de mérito 12, a largura de banda total é de 672 kHz, sendo este o valor para frequência de corte, -3 dB. Assim haverá a possibilidade de utilização em 336 kHz acima e abaixo da frequência central. A largura de banda pode ser visualizada na figura 16, assim como a frequência de corte.

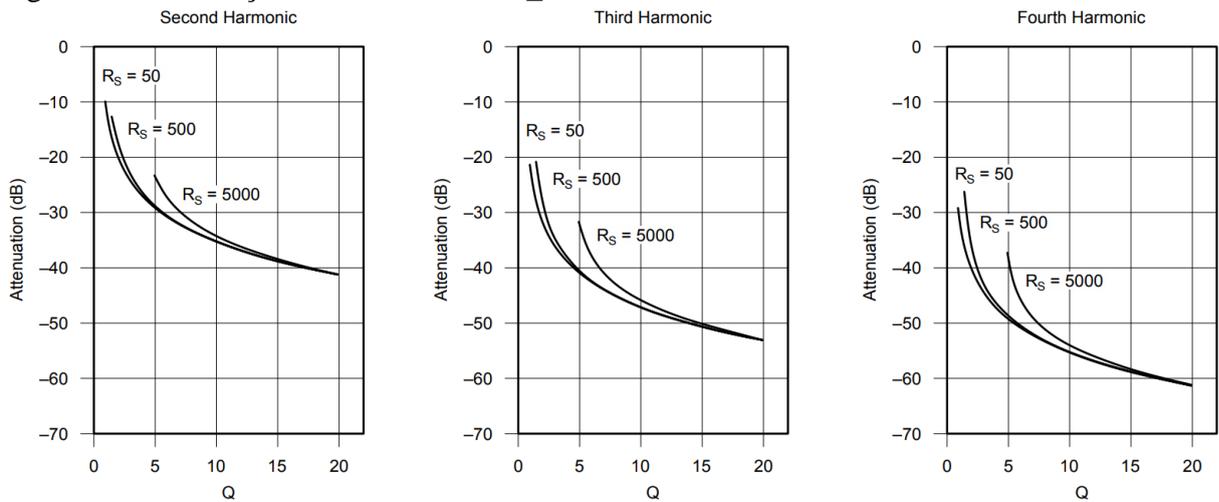
Figura 16 - Largura de banda



Fonte: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-bandwidth.htm> <Acessado em 13/04/2018>

A figura 17, apresenta a atenuação das segundas, terceiras e quartas harmônicas, em relação a fundamental para o filtro. A impedância de entrada do filtro é representada por *Rs*, indicando valores de 50, 500 e 5000 Ω e com saída de 50 Ω. Já Q indica o valor de mérito do circuito, utilizando valores entre 0 e 20.

Figura 17 - Atenuação harmônicas filtro Π



Fonte: Quality Factor, Bandwidth, and Harmonic Attenuation of Pi Networks, Bill Kaune, 2015

Por exemplo, para a segunda harmônica, com Q igual 12, a redução foi de aproximadamente 36 dB, terceira harmônica 48 dB e quarta harmônica 57 dB, isso praticamente indiferente da impedância de entrada e com Q igual a 12 em todos os casos.

É possível calcular os valores de C1, L e C2, conforme esquema da figura 15. Para isso é necessário determinar o fator de mérito e a frequência de operação. Além disso, conhecer a impedância de entrada e de saída. As equações a seguir foram obtidas da Eimac Division (2005).

Para determinar o valor de capacitância C1, pode-se utilizar a equação 7.

$$C1 = \frac{1}{2R_s \cdot \omega} \tag{7}$$

Já para determinar o valor de capacitância C2, utiliza-se a equação 8.

$$C2 = \frac{1}{2R_s \cdot \omega} \sqrt{\frac{R_s \cdot (\omega^2 + 1) - \omega}{\omega}} \tag{8}$$

E por fim, o indutor L pode ser calculado pela equação 9.

$$L = \frac{R_s \cdot \omega + 2R_s \cdot \omega^2 \cdot C1 \cdot C2}{2R_s \cdot (\omega^2 + 1)} \tag{9}$$

4.4 Transformador de tensão

Um transformador pode ser representado por duas ou mais bobinas ligadas entre si através de um fluxo magnético. O transformador é dividido em bobinas primárias e secundárias, onde a variação do fluxo da primária induz uma tensão na bobina secundária, ou seja, ambas estão conectadas devido ao acoplamento mútuo entre elas. Sem esta indutância mútua entre as bobinas o transformador não funcionaria (FOWLER, 2012).

Uma das principais vantagens da utilização das válvulas está relacionada a baixa corrente necessária para alimentação, porém as tensões envolvidas são maiores. Para a elaboração do transformador foi adotado como referência para o equacionamento o livro Transformadores, de Alfonso Martignoni (1991).

Para a definição do número de espiras é utilizado a equação 10 para sinais senoidais.

$$N = \frac{U \cdot 10^8}{4,44 \cdot B_m \cdot S \cdot f} \quad (10)$$

Para o cálculo, N indica o número de espiras, U a tensão do enrolamento, B_m indica a indução máxima das lâminas de ferro silício, geralmente 11300 Gauss, S a seção magnética utilizada, e por fim, f indica a frequência utilizada, no caso a rede elétrica, 60 Hz (MARTIGNONI, 1991).

Para determinar os fios é utilizado o valor de densidade de corrente em 3 A/mm², valor utilizado para potências de até 500 VA. A medida que a potência aumenta o volume do núcleo também aumenta, dificultando a irradiação do calor, por isso diminui-se a densidade de corrente nos condutores para potências mais elevadas (MARTIGNONI, 1991).

4.5 Transformador de acoplamento para modulação AM

Para realizar a transmissão de informação ou áudio, é necessário aplicar modulação a portadora, no caso modulação por amplitude. Para a modulação em amplitude é necessário controlar a corrente de ânodo da válvula, análogo ao coletor de um transistor. Para realizar isso

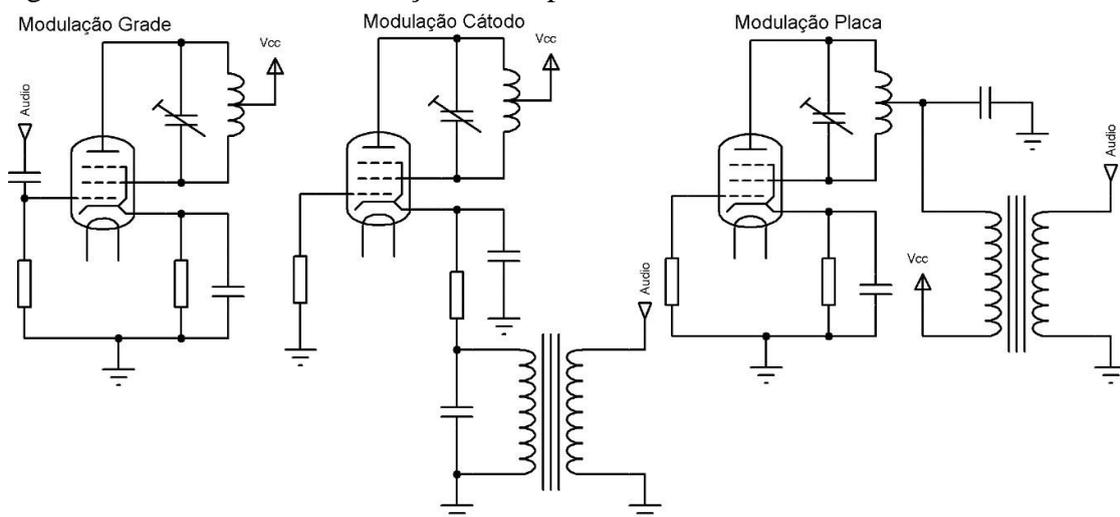
deve-se utilizar um transformador de acoplamento devido à impedância das válvulas ser elevada e a saída do modulador, amplificador de áudio, ser em baixa impedância.

Existem basicamente três formas de modulação: por grade, por cátodo e por ânodo. A modulação por grade pode ser realizada por meio de um único sistema oscilador, por exemplo, em uma aplicação com oscilador Hartley³. O sinal de áudio é aplicado diretamente à grade, ocasionando que a variação da tensão do sinal de áudio que controla o fluxo de elétrons entre o cátodo e o ânodo no interior da válvula amplifica o próprio sinal. A vantagem deste sistema é a baixa potência necessária para realizar a modulação, devido que a própria válvula amplificar o sinal de áudio (YOUNG, 2006).

Outra forma utilizada é a modulação pelo cátodo. Neste sistema, existe a inserção de um transformador entre o cátodo e o terra. Assim a tensão induzida na válvula sofre variações com o sinal de áudio. A vantagem deste sistema é a necessidade de um nível de sinal de áudio baixo, pois o sinal será amplificado pela própria válvula. Porém este método gera uma modulação de baixa qualidade, com grande distorção harmônica.

Já o método mais utilizado é por meio da modulação de placa, nesta configuração controla-se a corrente de ânodo da válvula, também utilizando um transformador em série com a alimentação, e no secundário a entrada de áudio. Os três circuitos podem ser visualizados na figura 18.

Figura 18 - Técnicas de modulação em amplitude



Fonte: Modificado, <http://www.reocities.com/projetoperiferia5/proj7.htm> <Acessado em 15/04/2018>

³ Neste oscilador a frequência do sinal produzido é determinada por uma bobina e um capacitor. Já o sinal de realimentação é retirado da conexão central da bobina. Projetado por Ralph Hartley.

Para a elaboração do transformador de acoplamento também foi adotado como referência o livro, Transformadores de Alfonso Martignoni (1991).

Outro fator importante na construção de transformadores de impedância é a frequência utilizada. Por exemplo, a frequência de corte em 150 Hz, resulta em um transformador econômico, de baixa qualidade, já 70 Hz é utilizado para transformadores mais comuns, geralmente rádios, 40 Hz para equipamentos de boa qualidade e 30 Hz equipamentos de alta fidelidade. A principal diferença é em relação a quantidade de material utilizado. Transformadores com frequência alta resultam em tamanho inferior e de menor custo. Já os em baixa frequência resultam em grande volume, e acabam tendo custo superior, porém de qualidade muito alta em relação a resposta de áudio (MARTIGNONI, 1991).

Para a elaboração do transformador de impedância é necessário determinar a impedância primária e secundária, a potência envolvida e a frequência de corte. A impedância de polarização da válvula pode ser calculada pela equação 11.

$$\square = \frac{\square}{\square} \quad (11)$$

4.6 Amplificador de áudio para a etapa de modulação

O amplificador de áudio deve ser capaz de entregar sinal suficiente ao transformador de acoplamento para que esse possa modular a amplitude da onda gerada pelo transmissor. O sistema de modulação pode ser valvulado ou transistorizado. Um sistema transistorizado apresenta alta potência, tamanho reduzido, alta eficiência, compacto e de baixo custo. Comparado com um modulador valvulado, existe a necessidade de um número maior de válvulas, transformador em *push-pull*, espaço, resultando em um custo maior.

A função do amplificador de áudio é intensificar um pequeno sinal de áudio proveniente de uma pequena fonte, que pode ser um microfone, instrumento permitindo excitar um alto falante. A distorção em um amplificador deve ser a menor possível, para garantir a fidelidade da fonte original. Além disso deve-se levar em conta a linearidade do amplificador, que deve ser a mais linear possível em todas as frequências (BRAGA, 2015).

Segundo Young (2006), a potência necessária para a modulação por ânodo da válvula pode ser determinada utilizando a equação 12. A potência de áudio necessária para a modulação é obtida multiplicando-se a tensão e corrente de ânodo, dividindo-a por dois.

$$P_{\text{pot}} = P_{\text{pot}}/2 \quad (12)$$

4.7 Amplitude modulada e índice de modulação

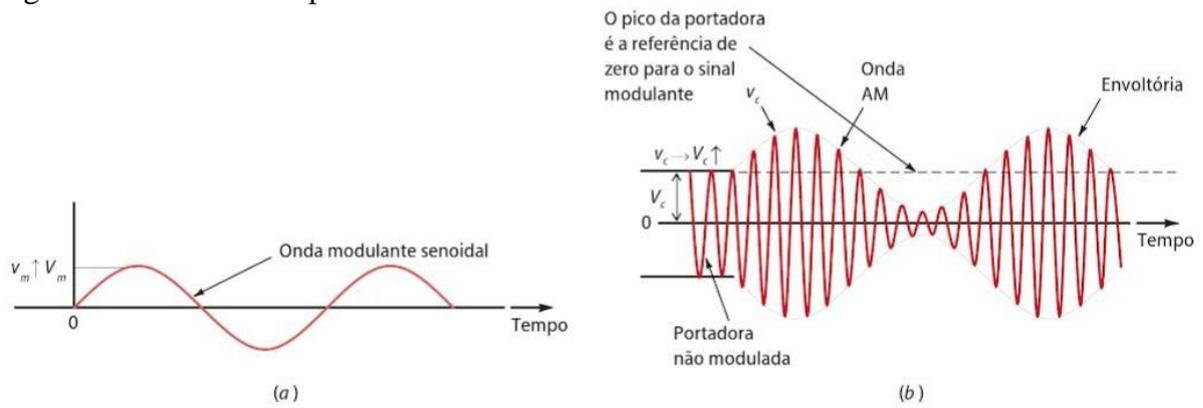
Se não existir a modulação em uma transmissão, tem-se somente o sinal da portadora. Por meio da modulação é possível transmitir informação, áudio, voz, música.

Quando a amplitude da portadora é variada de acordo com o sinal de informação, produz-se amplitude modulada (AM). Da mesma forma, a modulação em frequência (FM) ou modulação em fase (PM) resulta quando o sinal de informação varia a frequência ou fase da portadora (YOUNG, 2006).

A frequência da portadora permanece constante durante o processo de modulação, mas sua amplitude varia de acordo com o sinal modulante. Um aumento na amplitude do sinal modulante causa um aumento na amplitude da portadora. Os picos positivos e negativos da onda portadora variam com o sinal modulante. Um aumento ou diminuição na amplitude do sinal modulante gera um correspondente aumento ou diminuição nos picos positivo e negativo da amplitude da geradora. Em torno da portadora, forma-se uma envoltória com o sinal modulado (FRENZEL, 2013).

Na figura 19 é possível verificar em A, o sinal a ser modulado, e em B a portadora em alta frequência sendo modulada, assim como sua envoltória.

Figura 19 - Sinal em amplitude modulada



Modulação em amplitude. (a) O sinal de modulação ou informação. (b) A portadora modulada.

Fonte: Frenzel, 2003, p. 86

Segundo Frenzel (2013), a equação 13 descreve o sinal da portadora.

$$v_c = V_c \cdot \sin(2\pi f_c t) \tag{13}$$

Esta equação determina o valor instantâneo de tensão de uma portadora senoidal em qualquer momento do tempo, representado por t . Já V_c indica o valor de pico constante da portadora, que será o valor entre zero e o pico positivo ou negativo. A frequência da portadora é determinada por f_c , e t indica um ponto específico no tempo (FRENZEL, 2013).

Quando deseja-se modular a amplitude, é importante que a tensão do sinal modulante seja menor do que o sinal da portadora, a fim de garantir qualidade do sinal, sem haver distorções. Segundo Frenzel (2013), a equação 14 descreve o valor instantâneo do sinal modulado.

$$v_{AM} = V_c \cdot \sin(2\pi f_c t) + (V_m \cdot \sin(2\pi f_m t)) \cdot (\sin(2\pi f_c t)) \tag{14}$$

v_{AM} representa o valor instantâneo da onda AM, $V_c \cdot \sin(2\pi f_c t)$ representa a forma de onda da portadora. Já $(V_m \cdot \sin(2\pi f_m t)) \cdot (\sin(2\pi f_c t))$, é a forma de onda da portadora multiplicada pela forma de onda do sinal modulante. A onda AM é o produto da onda portadora pelo sinal modulante (FRENZEL, 2013).

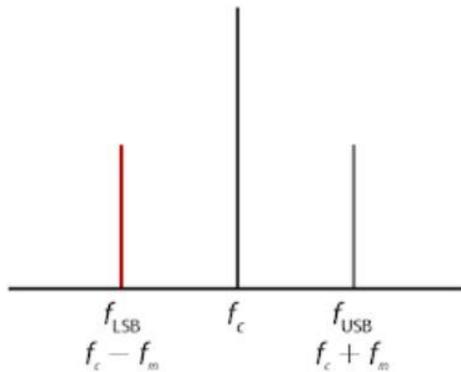
Outro fator muito importante é o índice de modulação. Como comentado anteriormente, o sinal modulante deve ser menor do que o sinal da portadora, isso para que não existam distorções na saída do sinal. A relação de modulação é dada pela equação 15. O valor é multiplicado por 100, para obter o valor em porcentagem de modulação.

$$\text{Modulação} = \frac{\text{Potência do sinal modulado}}{\text{Potência da portadora}} \quad (15)$$

O valor de modulação deve estar entre 0 e 100%, caso o sinal modulado for maior do que 100%, irá ocorrer a distorção do sinal. Para um sinal de áudio haverá baixa qualidade, som saturado, de difícil compreensão. A melhor condição para a transmissão de áudio, seria com sinal 100% modulado, desta forma tem-se uma potência de saída maior no transmissor, conseqüentemente um sinal mais forte para a detecção no receptor (FRENZEL, 2013).

O sinal modulante irá aparecer nas chamadas bandas laterais da portadora. Estes sinais vão aparecer na parte negativa e positiva da onda portadora, como apresenta a figura 20.

Figura 20 - Sinal modulante nas bandas laterais



Fonte: Frenzel, 2013, p. 92

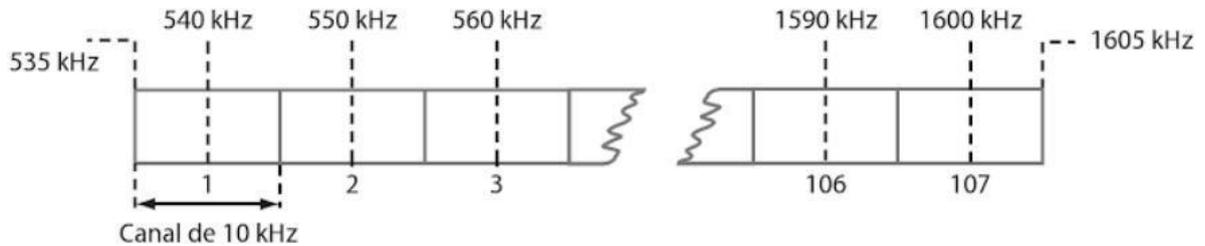
Desta forma tem-se um gráfico no domínio da frequência. A frequência portadora f_c , no centro da imagem, pode-se considerar, por exemplo, a frequência de 1000 kHz. Já como moduladora pode-se considerar um sinal senoidal de 1 kHz. Logo, este sinal irá aparecer na frequência inferior, em 999 kHz, e na superior, em 1001 kHz. Isso representa a largura de banda, somando-se a diferença da parte positiva a da negativa, logo a largura de banda ocupada por um sinal senoidal de 1 kHz, gera uma banda total de 2 kHz (FRANZEL, 2013). Desta forma é possível determinar que a largura de banda é dada pela equação 16.

$$\text{Largura de banda} = 2 \cdot \text{Frequência do sinal} \quad (16)$$

No caso do sistema de transmissão em ondas médias, o espaçamento entre os canais é de 10 kHz, exemplo, 540, 550, 560, 570 kHz para as Américas, conforme figura 21. Já para a Europa o sinal é espaçado em 9 kHz, exemplo, 540, 549, 558, 567 kHz. Desta forma fica claro que a máxima frequência de áudio utilizável na América é de 5 kHz, e na Europa 4,5 kHz. Como a largura de banda utilizada é o dobro da máxima frequência de áudio, cada sinal vai

ocupar uma largura de 10 e 9 kHz respectivamente. Portanto o sinal de áudio deve ser limitado nestas frequências, por meio de filtros passa baixa, para garantir que o sinal de uma emissora não invada as frequências adjacentes. Porém estes valores não acabam sendo respeitados normalmente, sendo que os valores mais utilizados de filtro para corte são em 5, 7,5 e 10 kHz.

Figura 21 - Largura de banda utilizada por um sinal AM



Fonte: Frenzel, 2013, p. 93

Quando um sinal é transmitido por uma antena, ele representa uma composição de somas de vários sinais. A potência total transmitida será o somatório da potência da portadora mais as potências das bandas laterais. Para utilizar os valores de potência em raiz do valor quadrático médio, *Root Mean Square* (RMS), existe a necessidade de dividir os valores de pico por $\sqrt{2}$, para sinais senoidais. Sabendo que potência pode ser expressa por $P = \frac{V^2}{R}$, e a carga R representando a antena, valor típico de 50Ω , pode-se determinar a potência irradiada. A equação 17 representa a potência total.

$$P_{total} = P_{portadora} + P_{sup} + P_{inf} \tag{17}$$

$$P = \frac{V_{portadora}^2}{R} + \frac{V_{sup}^2}{R} + \frac{V_{inf}^2}{R}$$

Segundo Frenzel (2013), como o sinal modulante pode ser expresso em termos da portadora $V_m = V_c \cos(\omega t)$, pode-se simplificar a potência total em termos do nível de modulação m , utilizado a equação 18.

$$P_{total} = P_{portadora} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \tag{18}$$

Logo, um transmissor de 10 W de portadora, com uma modulação em 100%, $m = 1$, gera uma potência total de 15 W. Isso resulta em 10 W na portadora e 5 W nas bandas laterais, sendo que cada uma representa 2,5 W. Se o nível de modulação for inferior a 100%, a potência nas bandas laterais também será menor. O objetivo da modulação em amplitude é manter a máxima

porcentagem de modulação possível, porém sem ultrapassar o limite de 100%, de modo a poder ter o máximo de potência nas bandas laterais (FRENZEL, 2013).

Com os valores citados no exemplo, pode-se concluir que a potência da portadora representa $\frac{2}{3}$ da potência total transmitida. Com a portadora em 10 W e o somatório das bandas laterais resultando em 15 W, a relação entre as duas é de 66,7%. Já a relação entre as bandas laterais, 5 W pela potência total de 15 W, resulta em 33,3% de aproveitamento para máxima modulação. Assim o sinal de cada banda lateral para um nível de 100% de modulação representa apenas $\frac{1}{4}$ da potência da portadora (FRENZEL, 2013).

Quando a modulação ocorre, são produzidas as bandas laterais, responsáveis pela informação, essa que o receptor irá reproduzir. Conforme já apresentado, $\frac{2}{3}$ da potência representam a portadora que não carrega qualquer tipo de informação, e $\frac{1}{3}$ somente representa as bandas laterais com informação (FRENZEL, 2013).

4.8 Filtro de áudio e curva de pré-ênfase

Além de simplesmente conectar a entrada de áudio ao transmissor para a modulação, são necessárias algumas filtragens de áudio. Elas visam cortar as frequências mais altas de áudio, por exemplo, em 5 ou 10 kHz, atuando como um filtro passa baixa, para que estas representem uma largura de banda de 10 e 20 kHz respectivamente. Além de fixar a frequência de corte, algumas frequências são amplificadas, com o intuito de melhorar a resposta ao ruído no receptor, na qual, são chamadas de curvas de pré-ênfase.

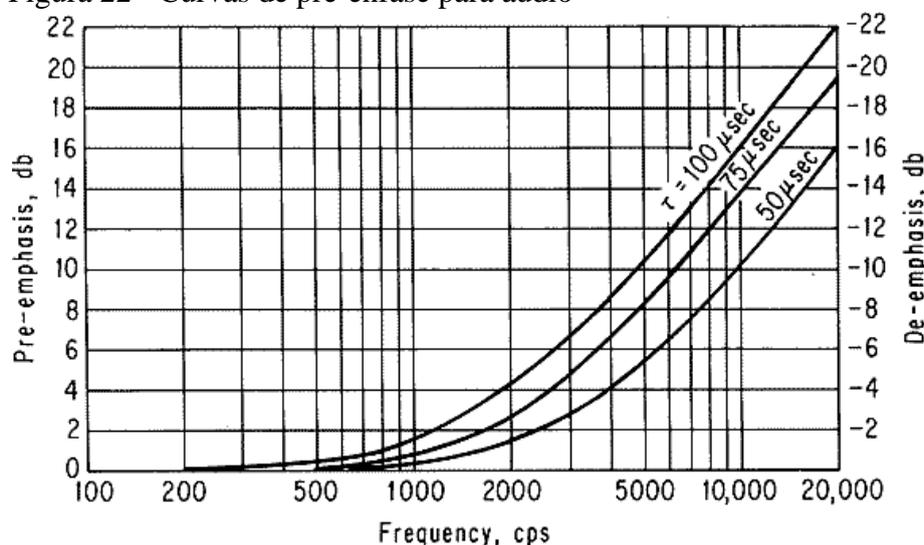
Uma forma de melhorar a relação sinal-ruído, *Signal Noise* (S/N) de um sinal recebido depende do projeto do receptor, sendo possível eliminar o ruído utilizando filtros mais estreitos. Este tipo de projeto vai depender do esquema utilizado, assim como a frequência intermediária (FI) utilizada nos receptores. Logo, estreitando-se a largura de banda no receptor a relação S/N melhora (YOUNG, 2006).

Na maioria das vezes a relação sinal-ruído é calculada na entrada de RF para determinar a potência do ruído. Porém a maioria dos circuitos de FI, tem a banda mais estreita do que o próprio sinal recebido, sendo que o ruído é menor na FI, exatamente para melhorar a relação

com o ruído. Quando o sinal recebido em um receptor é fraco, o som tende a ser ruim, ruidoso, já para sistemas de televisão a imagem tende a ser chuviscada (YOUNG, 2006).

A maioria do ruído está nas altas frequências, exatamente por isso tende-se a diminuir a largura de banda do receptor para evitar estes ruídos. Porém ocorre atenuação dos sinais de áudio em maior frequência, tornando-se um áudio abafado no receptor. Uma forma de contrapor este fato é aumentar o ganho de áudio no transmissor em altas frequências, servindo como compensação para a atenuação em frequências mais elevadas, desta forma melhorando a relação S/N em altas frequências. Este processo é conhecido como curva de pré-ênfase no transmissor e de-ênfase no receptor. As curvas de pré e de-ênfase podem ser visualizadas na figura 22.

Figura 22 - Curvas de pré-ênfase para áudio



Fonte: <https://www.radiomuseum.org><Acessado em 30/04/2018>

São usados dois sistemas de pré e de-ênfase, o de 50 e 75 uS. Este sistema é usado tanto para rádios AM e FM. A curva de 50 uS é usada em grande parte do mundo, especialmente Europa, já a de 75 uS é usada especialmente nos Estados Unidos. A relação 50 ou 75 uS representa a constante de carga RC. Com largura de banda maior o ruído acaba sendo mais presente no receptor, agora aplicando-se um sistema de pré-ênfase, melhora-se a relação S/N, sendo que no processo de modulação aumenta-se o ganho nestas frequências mais elevadas, conseqüentemente aumenta-se a intensidade de modulação nestas frequências.

Por exemplo, para uma curva de 50 uS, pode-se utilizar um capacitor de 5 nF e um resistor de 10 kΩ. Logo, a frequência de corte pode ser calculada pela equação 19.

$$\square\square = \frac{1}{2\square\square\square} \quad (19)$$

Por meio desta equação a pré-ênfase de 50 uS tem ganho de 3 dB na frequência de 3183 Hz, e 75 uS em 2122 Hz, valores que podem ser confirmados na figura 22.

Já para a utilização de filtros pode-se utilizar diversas configurações. Os mais comuns são Butterworth, Chebyshev e Bessel. Todos estes podem ser utilizados como passa-alta ou baixa, dependendo da configuração. O filtro Butterworth possui uma resposta plana, linear na banda escolhida até a frequência de corte, porém não apresenta uma elevada atenuação fora da banda projetada. Já o Chebyshev apresenta maior seletividade e taxa de atenuação, porém na banda passante apresenta muita ondulação. Por fim, o Bessel apresenta atraso de tempo constante na banda de passagem. Mesmo com variação da frequência, o deslocamento de fase mantém-se igual. Também apresenta atenuação menor fora da banda de passagem (FRENZEL, 2013).

4.9 Antenas

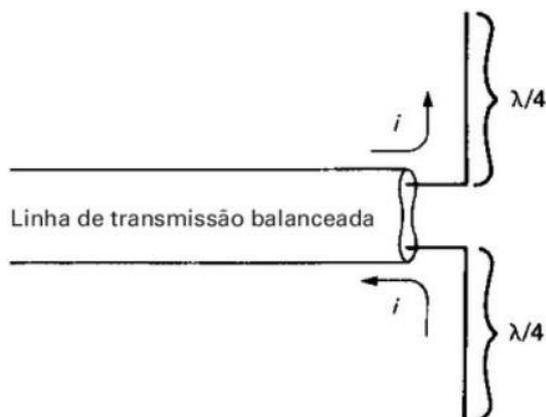
A antena é responsável por transmitir e receber os sinais de rádio, TV, celulares, Internet e satélite, existindo diversas configurações de antenas. Para que uma antena apresente máximo desempenho ela deve possuir o mesmo valor de impedância com o receptor ou transmissor e cabeamento, ou seja, apresentar sistema casado. Antenas possuem ganho específico, assim como faixas de frequência admissíveis, lóbulos de irradiação e polarização.

O sistema irradiante ou antena, são dispositivos eletromagnéticos projetados para transmitir ou receber ondas eletromagnéticas. Qualquer condutor diante de uma corrente alternada irradia energia eletromagnética em sua volta. De forma geral, o sistema de irradiação em uma antena é uma distribuição de correntes e cargas que variam ao longo do tempo, conforme a frequência utilizada (NOTAROS, 2012).

Uma das antenas mais comumente utilizadas é a antena dipolo, figura 23. São dois condutores, irradiando um sinal senoidal, que terão um máximo de tensão no lado aberto, cada um com comprimento de $\frac{1}{4}$ de onda. Esta configuração da linha perde pouca energia por irradiação devido aos campos dos dois condutores se cancelarem, porém todo o sinal é irradiado

pela parte dobrada, em formato T. Neste modo, os campos magnéticos ficam na mesma orientação e são aditivos, assim as componentes dos campos elétricos e magnéticos da antena não voltam e são irradiados para o espaço (YOUNG, 2006).

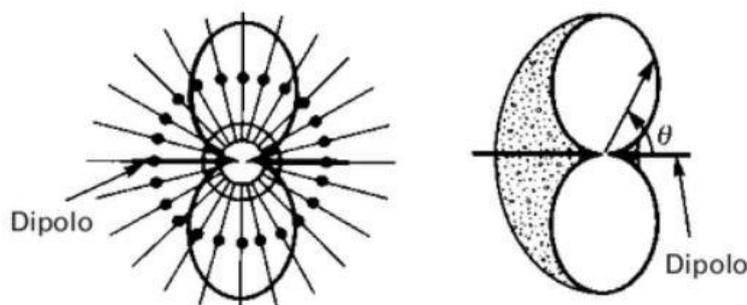
Figura 23 - Antena dipolo



Fonte: Fonte: YOUNG, 2006, p. 451

Dependendo da forma de orientação da antena, vertical como na figura 23, determina-se esta antena com polarização vertical, e se disposta horizontalmente de polarização horizontal, sendo estas as mais comuns além de existir a polarização circular e elíptica. Desta forma, a configuração correta é uma antena transmissora polarizada da mesma forma que uma antena receptora, ou seja, o campo elétrico de ambas devem possuir a mesma orientação. Na figura 24 é possível identificar o lóbulo de irradiação de uma antena dipolo polarizada horizontalmente. A tendência é o sinal ser nulo nas extremidades, e ser irradiado em torno do dipolo (YOUNG, 2006).

Figura 24 - Lóbulo de irradiação antena dipolo



Fonte: YOUNG, 2006, p. 453

Nesta configuração, o campo de irradiação está concentrado no centro da antena e a potência transmitida ou irradiada aparece em torno de dois laços bidimensionais, na forma de um toróide. Este formato de irradiação apresenta ganho de 2,15 dBi, sobre um sistema esférico

de transmissão, que é demonstrado na imagem pelos círculos. Este ganho refere-se a um elemento irradiador isotrópico teórico, esfera perfeita. Desta forma é possível comparar os ganhos de uma antena pelo sistema isotrópico de irradiação em dBi. Logo, utilizando mais elementos, como refletores e diretores, é possível aumentar o ganho da antena, assim como modificar a diretividade, ou seja, seu lóbulo de irradiação (YOUNG, 2006).

A antena dipolo geralmente é feita por meio de dois fios, ou dois condutores com o comprimento de $\lambda/4$ cada. Para a antena ser ressonante na frequência utilizada, ela deve apresentar $\lambda/2$, onde λ é o comprimento de onda, que é obtido por $\lambda = 300/f$, com f em metros e a frequência em MHz, ou seja, a soma dos dois elementos de $\lambda/4$. Este comprimento total, calculado para $\lambda/2$, é dimensionado para uma determinada frequência, porém ainda costuma-se encurtá-lo em 5%, isso para compensar os efeitos de borda capacitivos nas extremidades. A antena dipolo apresenta uma impedância de $73 + j42,5$ Ohms (YOUNG, 2006).

As correntes nas extremidades do dipolo são iguais a zero e aumentam em direção ao interior do dipolo, sendo que o valor máximo encontra-se na região central. Para o dipolo ressonante pode ser considerada a impedância de irradiação em 73Ω na região central, local de conexão com o cabo. Esta potência dissipada é chamada de resistência de irradiação. Logo para existir o máximo de potência transmitida, o sistema deve ter suas impedâncias casadas (YOUNG, 2006).

Se o cabo de alimentação, a carga e o transmissor possuem mesma impedância, o critério de máxima transferência de potência é atendido. Quando todos os equipamentos estão sob mesma impedância, diz-se que o sistema está casado, obtendo-se assim, baixa relação de ondas estacionárias (FRENZEL, 2013).

Por exemplo, para o dimensionamento de uma antena, frequência de 8065 kHz, cada elemento, condutor do dipolo deve ter 8,83 metros, representando um total de 17,66 metros para a antena.

4.10 Técnicas de análise da propagação dos sinais

Com o sinal gerado pelo transmissor e irradiado pela antena, pode-se realizar testes de propagação e recepção. Para recepção são utilizados os receptores remotos via SDR, disponíveis em sdr.hu e websdr.org, que possibilitam acesso via navegador de Internet. Com o uso desta plataforma é possível realizar testes de propagação e recepção dos sinais gerados.

Por meio destes receptores pode-se analisar as condições de propagação, frequência, horário, podendo-se determinar momentos mais propícios para a realização da recepção. Além disso é possível comparar por meio de dois ou mais receptores as condições de propagação para diferentes regiões. Para auxílio neste processo, pode-se utilizar o guia de teste de propagação da VOACAP, disponível em <http://www.voacap.com/p2p/index.html>. Por meio das condições de propagação época do ano, horário e distâncias, potência de transmissão tipos de antena, o software traça uma probabilidade com a melhor frequência e o melhor horário para haver a transmissão entre dois pontos.

Neste capítulo foi abordado todo o referencial teórico para a construção do transmissor a ser construído. Foi abordado a parte oscilatória, amplificadores, transformadores e acopladores. Já no capítulo 5 será detalhado a construção do transmissor, com base nestas informações.

5. DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DO TRANSMISSOR

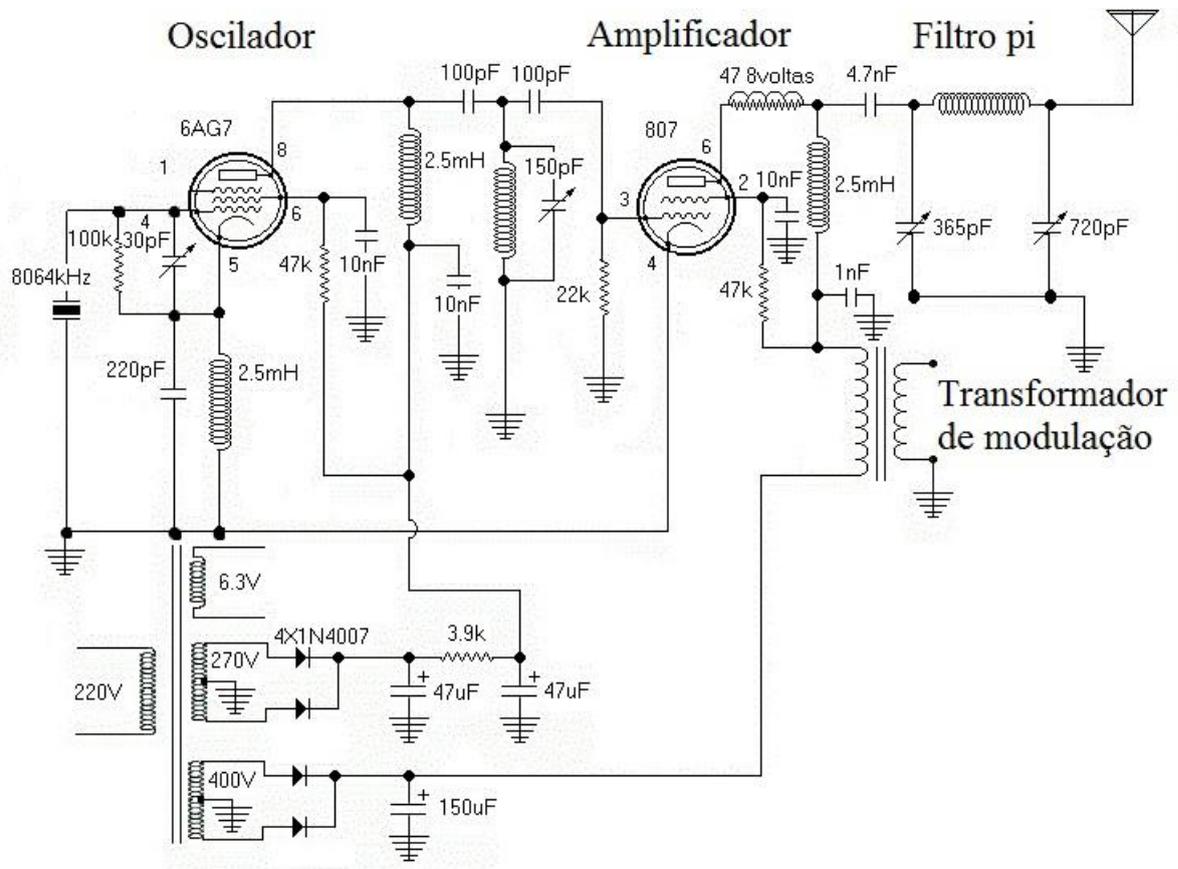
Neste capítulo será abordado a forma que o transmissor de ondas curtas valvulado foi construído, do início, com cada uma das etapas realizadas até a conclusão e funcionamento.

Foi definido a frequência de transmissão em 8065 kHz, gerado por meio de um cristal de quartzo. Foi utilizada esta frequência, com base nas informações do capítulo 3, por encontrar-se fora das bandas comerciais de comunicação. Além disso, tal frequência proporciona um bom alcance durante o dia e noite.

5.1 Oscilador, amplificador e filtro □

O esquema do circuito construído pode ser visualizado na figura 25. Nela é apresentada as principais ligações realizadas tanto para a parte de oscilação, amplificação e acoplamentos.

Figura 25 - Esquema oscilador e amplificador



Fonte: Autor

O circuito construído foi muito parecido com oscilador valvulado da figura 13 (pág.31). Esse circuito representa um oscilador Colpitts, porém algumas modificações foram realizadas. Para a etapa de oscilação, representada pela válvula 6AG7, a etapa de ressonância foi desacoplada por mais um capacitor de 100 pF, pois o capacitor variável foi ligado ao chassis, terra do circuito, da forma original estaria em curto com a fonte. Além disso, esta mudança aumenta a segurança do circuito, pois o capacitor variável passa a não ser mais energizado pela fonte. A alimentação é feita diretamente ao ânodo da válvula, por meio de um indutor de 2,5 mH, tendo a principal função barrar o sinal de RF, impedindo que ele chegue a fonte de alimentação devido à alta reatância do indutor à frequência do oscilador.

A realimentação de um oscilador Colpitts dá-se por meio de um divisor de tensão capacitivo, no caso 220 pF e um *trimmer* de 30 pF. Esse atua como nível de excitação, servindo como ajuste fino na frequência do cristal. Ajustando este *trimmer*, é possível variar em mais ou menos 2 kHz sobre a frequência central do cristal. O resistor de 100 kΩ, conectado entre a grade e o terra serve como polarização negativa, tensão próxima a -30 V.

Todos os indutores de 2,5 mH foram construídos. Seus valores são elevados devido à alta impedância das válvulas de forma a barrar os sinais de RF de circularem no circuito. Os indutores construídos foram medidos e apresentaram valores próximos a 2,4 mH, não representando valor crítico para funcionamento. Foi possível obter alto fator de qualidade, devido ao enrolamento *honeycomb*⁴, que favorece a diminuição da capacitância entre as espiras.

A sintonia é realizada por meio de um circuito ressonante paralelo LC, conforme equação 2 (pág. 31). O capacitor variável possui capacitância de 150 pF e o indutor de aproximadamente 3,5 uH. Este não é um circuito crítico para a sintonia, pois é possível fazer o ajuste por meio do capacitor variável, cobrindo frequências entre 7 e 12 MHz.

Um pequeno desvio na frequência, de 8064 kHz para 8065 kHz, é feito por meio do *trimmer* de 30 pF, em série com o capacitor de 220 pF, que é responsável pela realimentação. O oscilador utilizado possui saída sintonizada por meio de um circuito LC paralelo, que deve ser ressonante com a frequência do oscilador. O sinal da etapa osciladora é acoplado à grade da válvula amplificadora 807 por meio de um capacitor de 100 pF. Já o resistor de 22 k Ω realiza a polarização negativa da grade de controle.

Os capacitores de 10 nF, 1 nF na válvula 807 atuam como desacoplamento, são responsáveis por drenarem os sinais de RF para o terra, proporcionando um caminho de curto circuito em regiões onde não deve haver circulação destes sinais, como no caso grade supressora. O sinal de RF deve circular pelo capacitor de 4,7 nF, capacitor esse de desacoplamento, entre o ânodo e o filtro π , que deve proporcionar um curto para o sinal de alta frequência e também impedir que a alta tensão de alimentação da válvula chegue a antena.

Para a etapa de potência foi escolhida a válvula tetrodo de potência 807, amplamente utilizada para amplificadores em classe A e B e especialmente na área de RF em classe C. Na figura 26 é possível visualizar o *datasheet* da válvula 807. Em vermelho foi escolhido os dados a serem utilizados para projeto em classe C.

⁴Para reduzir o efeito de proximidade e a capacitância entre espiras, as bobinas RF são enroladas em padrões em que as espiras não sejam paralelas, mas sim cruzadas.

Figura 26 - Válvula 807 em classe C modulada

CLASS C RADIO-FREQUENCY POWER AMPLIFIER AND OSCILLATOR—PLATE MODULATED

(Carrier conditions per tube for use with a max modulation factor of 1.0)

	CCS	ICAS	CCS	ICAS	
D-c plate voltage	325	400	475	600	475 600 volts
D-c grid voltage	-75	-80	-85	-90	-200 -200 volts
From a grid resistor of	25000	22800	21300	22500	ohms
D-c screen voltage	225	225	225	275	300 300 volts
From a series resistor of Δ	20000	30000	50000	50000	ohms
D-c plate current	80	80	83	100	83 100 milliamperes
D-c grid current, approx.	3	3.5	4	4	5 5 milliamperes
D-c screen grid current	5	5.75	5	6.5	milliamperes
Plate input				40	60 watts
Screen grid input				2.5	2.5 watts
Plate dissipation				16.5	25 watts
Peak r-f grid input voltage, approx.	90	95	110	115	volts
Driving power, approx.	0.25	0.3	0.4	0.4	watts
Plate power output	17.5	22.5	27.5	42.5	watts

Fonte: Datasheet, General Electrics, GL807

Com base nas informações de *datasheet* da válvula 807, foram obtidos os valores de tensão, corrente e potência. Com estes dados é possível utilizar as equações 3, 4 e 5 (pág. 33) para determinar a impedância. O resultado é uma impedância de placa em classe C de aproximadamente 3012 Ohms.

Já para a construção do filtro π foi determinado o fator Q em 12, frequência de operação em 8065 kHz, impedância de entrada em 3012 Ω , calculado anteriormente como impedância em classe C e saída em 50 Ω , representando a impedância da antena. Foi possível calcular os valores de C1, L e C2 por meio das equações 7, 8 e 9 (pág. 36). Com essas informações é possível calcular os capacitores C1 com 78 pF e C2 com 468 pF. Já o indutor L deve ser de 5,4 uH, representando o circuito π da figura 15 (pág 34).

Os valores não são críticos para a construção do filtro, pois os capacitores utilizados são variáveis, C1 de 365 pF e C2 de 720 pF. Qualquer pequena variação no indutor pode ser compensada pelos capacitores variáveis.

5.2 Transformadores de energia

Para o transformador de alimentação foi projetado um enrolamento primário em tensão alternada (Vac) de 220 Vac e três secundários, um de 270 Vac, para a alimentação da válvula osciladora, 400 Vac, para a válvula amplificadora e 6,3 Vac para a alimentação dos filamentos de ambas.

Foi projetado por meio das informações *datasheet* das válvulas 12 Watts para a válvula 6AG7, 50 Watts para a 807 e 10 Watts para os filamentos.

A potência necessária total para os secundários do transformador é de aproximadamente 72 Watts. A potência de entrada é multiplicada por 1,1, segundo Martignoni, a fim de compensar eventuais perdas, sendo a potência de entrada aproximadamente 80 Watts.

Para o primário, com potência de 80 Watts, tensão de 220 Vac a corrente é de 0,36 A, dividido pela densidade de corrente 3 A/mm², resulta em 0,121 mm², sendo o fio mais próximo o 26 AWG, com 0,13 mm². Na tensão de saída 270 Vac foi utilizado fio 35 AWG, 0,0159 mm², para 400 Vac, foi utilizado fio 31 AWG, 0,04 mm², para 6,3 Vac foi utilizado fio 20 AWG, 0,52 mm².

Foi utilizado um núcleo E/I ferromagnético com largura do núcleo igual a 38x38 mm, sendo seção geométrica igual a 14,44 cm². Já a seção magnética é calculada dividindo-se a seção geométrica por 1,1, resultando em 13,13 cm². Para a definição do número de espiras foi utilizado a equação 10 (pág. 37).

Conforme equação 10, para a tensão de 220 Vac, no primário foram necessárias 561 espiras, para a tensão de 270 Vac foram necessárias 689 espiras, para a tensão de 400 Vac foram necessárias 1020 espiras e para a tensão de 6,3 Vac foram necessárias 16 espiras.

Os resultados de tensão obtidos do transformador foram muito próximo dos valores calculados.

5.3 Transformadores de acoplamento

Para projetar o transformador de acoplamento primeiramente é necessário calcular a impedância de polarização da válvula. Com os valores de tensão e corrente, a impedância de polarização da válvula 807 é de 5397 Ω , calculados pela equação 11 (pág. 39). Determinando a tensão da válvula 807 em 475 V, e corrente de placa em 83 mA, mais 5 mA de corrente de grade supressora, pois a mesma circula pelo transformador, dados obtidos no *datasheet* da válvula. Como a tensão de placa é de 475 V e a corrente de 88 mA a potência envolvida é de 41,8 Watts.

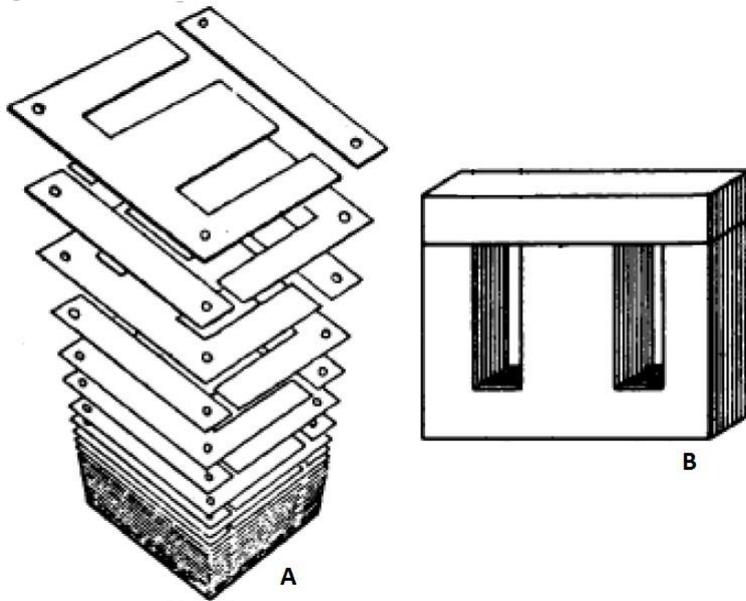
Determinando a impedância refletida, para o modulador em 4Ω , valor comum para equipamentos de áudio, a corrente para a mesma potência é de 3,23 A, e a tensão de 12,9 V. Novamente adotando o valor de densidade de corrente em 3 A/mm^2 , mesmo cálculo utilizado para o transformador de alimentação, sendo o fio utilizado para a parte da válvula, alta impedância, 32 AWG, $0,032 \text{ mm}^2$, e para a etapa moduladora, baixa impedância, fio 16 AWG, $1,31 \text{ mm}^2$. Para fins de cálculo foi determinado a frequência de corte em 50 Hz, representando um transformador de boa qualidade, conforme Martignoni.

O núcleo utilizado é de seção geométrica de $11,56 \text{ cm}^2$. Como realizado no transformador de alimentação, a seção geométrica é dividida por 1,1 para a obtenção da seção magnética, resultando em $10,51 \text{ cm}^2$. Para determinar a relação de espira/volt também é utilizado a mesma equação para transformadores de alimentação, equação 10 (pág. 37). A relação de multiplicação espira/volt é de 3,8. Como a tensão da válvula é de 475 V, utilizou-se 1807 espiras, e para a parte secundária de 12,9 V, um total de 49 espiras.

Foram utilizadas técnicas de construção diferentes para este transformador, comparado ao transformador de alimentação. Para melhorar o acoplamento magnético, foi dividido os enrolamentos pela metade, primeiro foi enrolado a metade do primário, em seguida metade do secundário, depois restante do primário, e por fim, a última metade do secundário. Outra técnica adotada foi utilizar o enrolamento com as espiras lado a lado, e a cada sessão terminada utilizava-se uma tira de papel para o isolamento entre as camadas. O grande benefício desta montagem é a diminuição da capacitância entre espiras, o que reduz a atenuação em frequências de áudio mais elevadas, o que propicia um áudio com maior qualidade e linearidade.

Diferente de um transformador de alimentação, onde as placas E/I são colocadas de forma alternada, neste foi utilizado todas as placas E juntas e I juntas. Isso ocorre devido ao transformador estar conectado entre o ânodo da válvula e a fonte de alimentação, sendo que seu enrolamento circula corrente contínua, gerando um campo magnético em um sentido. Com esta configuração é necessário utilizar um entreferro para evitar a saturação do núcleo. Na figura 27 é possível visualizar a orientação das lâminas E/I, em A é do tipo entrelaçada, utilizado no transformador de alimentação. Já em B a mesma orientação, utilizado no transformador de impedância.

Figura 27 - Núcleo E/I



Fonte: Modificado Martignoni, 1991, p. 75 e 76

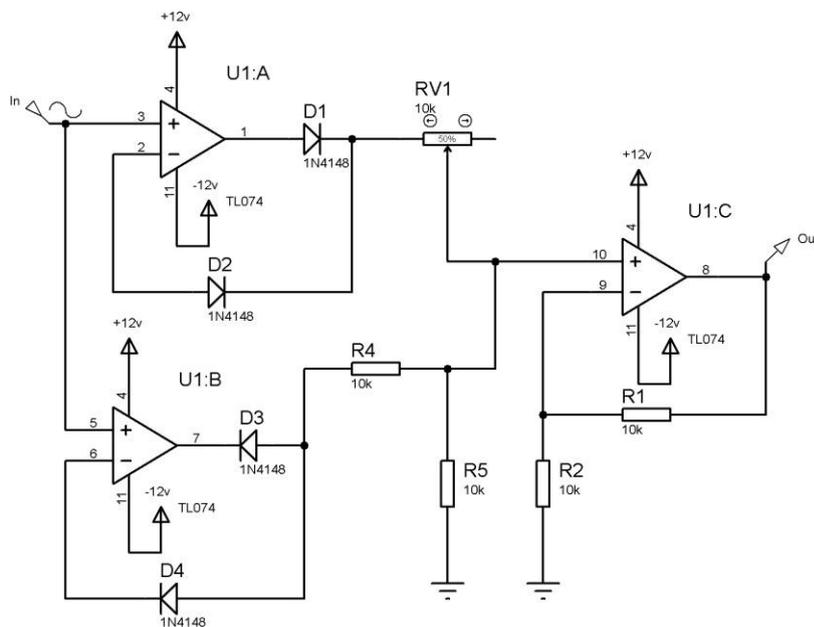
5.4 Amplificador de áudio

Para a etapa de amplificação de áudio foi utilizado o circuito integrado TDA7294. O esquema original de alimentação utiliza uma fonte simétrica, porém no transmissor foi utilizado um transformador de único secundário, 22 Vac. Realizando a retificação, a tensão ficou próxima dos 28 V. Devido à fonte de alimentação linear, foi necessário realizar mudanças no circuito, transformando o amplificador de fonte simétrica para fonte linear usando um divisor de tensão resistivo, gerando um terra virtual ao amplificador. O esquema final do amplificador de áudio pode ser visualizado na figura 28.

5.5 Modulação e filtros de áudio

A partir do amplificador de áudio e do transformador de impedância é possível realizar a modulação do transmissor. Conforme o circuito elaborado, figura 28, é possível obter uma modulação de até 100%. Além da utilização de modulação em 100%, é possível realizar modulação positiva. Para isso deixa-se a parte negativa do sinal modulante limitada a um máximo de 100% e pode-se alterar a parte positiva para valores maiores, como, 120, 130, 150% de modulação positiva, produzindo assim uma assimetria ao sinal. Não foi implementado um modulador para a parte positiva, porém foi elaborado um circuito que pode ser visualizado na figura 29.

Figura 29 - Esquema para modulação positiva



Fonte: Autor

O sinal de áudio é inserido na entrada de dois amplificadores operacionais, sendo que o primeiro U1:A retifica a parte positiva de áudio, por meio dos diodos 1N4148. Já U1:B retifica a parte negativa de áudio. Ambos os sinais são somados por meio de um amplificador somador não inversor U1:C, responsável pela união dos sinais. A parte negativa possui ganho unitário, porém a parte positiva possui um potenciômetro para ajuste de ganho, podendo ter o seu valor aumentado, gerando uma assimetria do sinal, e como resultado um ganho na parte positiva.

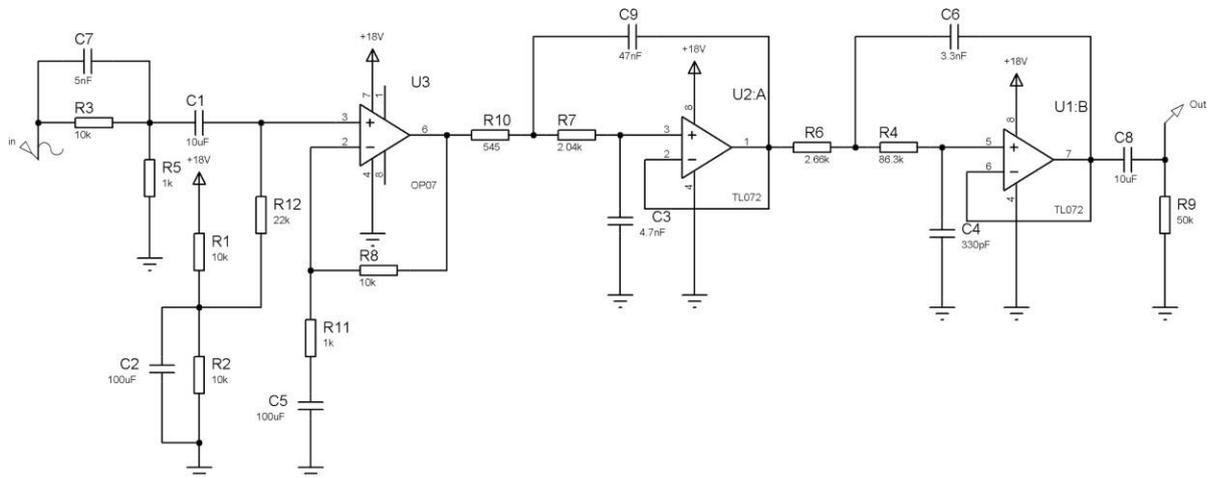
Com o potenciômetro de 10 k Ω , o sinal pode ser variado de 100 a 200% de modulação positiva. Por exemplo, um sinal de entrada senoidal com 1 V de amplitude e potenciômetro

regulado em 10 k Ω irá gerar um sinal positivo e negativo com 1 e -1 V respectivamente na saída. Já regulando-o para próximo de zero, a amplitude do sinal positivo fica em 2 V e a do negativo continua em -1 V.

Para o receptor haverá um sinal mais intenso, e para o transmissor uma potência irradiada maior. Este circuito não foi elaborado devido a assimetria muito elevada do sinal modulante gerar uma perda na qualidade de áudio, a medida que o nível de modulação positiva aumenta a distorção também aumenta.

Já para a elaboração do filtro de áudio foi definido que a frequência do corte seria em 10 kHz para o filtro de áudio, 20 kHz de largura banda. Para este filtro foi usado o circuito Butterworth de quarta ordem. Para a elaboração do filtro foi utilizado a ferramenta online de projetos da Analog Devices. Além disso foi utilizado na entrada do circuito pré-ênfase de 50 μ S, para compensação de sinais em maior frequência. O esquema do filtro pode ser conferido na figura 30.

Figura 30 - Esquema pré-ênfase e filtro passa-baixa

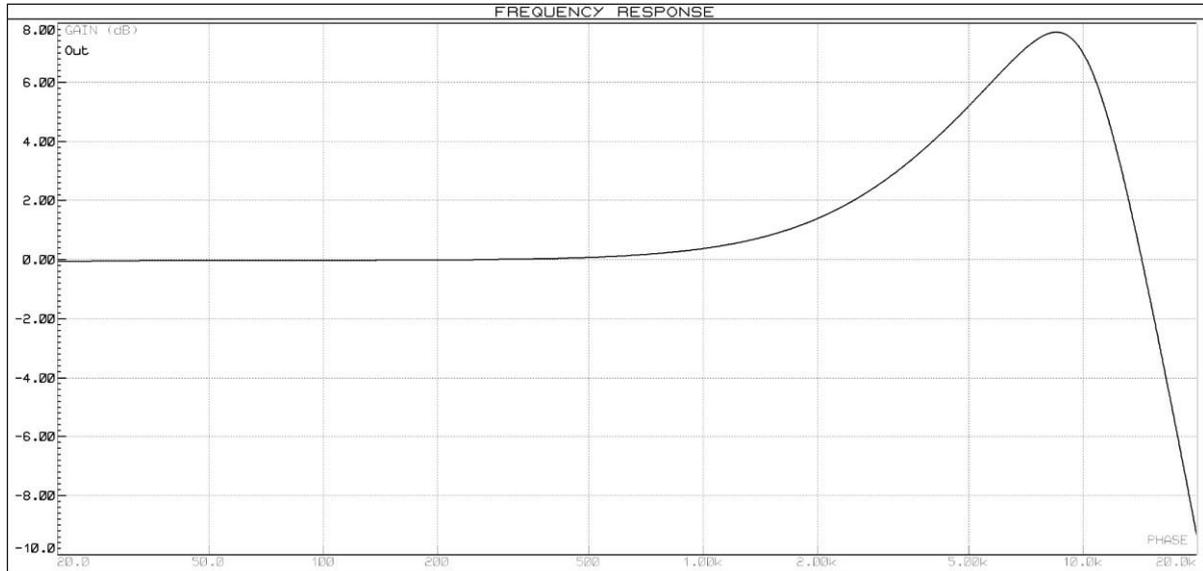


Fonte: Autor

Considerando uma entrada de áudio em baixa impedância, o circuito C7, R3, R5, atua como pré-ênfase em 50 μ S. Já U3 atua como amplificador não inversor para este sinal proveniente da pré-ênfase, assim como proporciona baixa impedância em sua saída e *offset* de 9 V, devido a fonte ser de 18 V e possuir divisor de tensão ligada à entrada positiva, possibilitando conexão ao filtro Butterworth. Já C5 atua como um curto para os sinais de áudio e impede que o sinal DC, 9V seja amplificado. Já o filtro Butterworth de quarta ordem é representado pelos amplificadores U2:A e U1:B. Já a saída de áudio é realizada por meio do capacitor C8, que representa um caminho de baixa impedância para o sinal de áudio e impede

que o sinal DC propague-se. Na sequência, é possível visualizar a resposta, ganho do circuito elaborado por meio da figura 31.

Figura 31 - Relação ganho frequência de áudio



Fonte: Autor

É possível verificar que o filtro elaborado fica muito próximo da figura 22 (pág. 45), com atenuação próxima a 10 kHz, assemelhando-se a norma americana NRSC-R10, disponível na seção de referências.

Este filtro construído funcionou de forma satisfatória. Com a utilização de um gerador de frequências, o amplificador mostrou ganho de 3db nas frequências próximas a 3 kHz, entrando em atenuação na frequência de 9,5 kHz, tendo a resposta de frequência ficado muito próxima da simulada na figura 31.

No decorrer do trabalho toda a etapa de filtragem e processamento de áudio foi eliminada. Em seu lugar foi utilizado o software de processamento de áudio Breakaway Broadcast Processor v0.90.66. Este software possibilita a utilização de diversas configurações de áudio como: equalização, filtros, ganho, compressão, adaptando-se o processador para transmissões em diversas plataformas. Neste software é possível definir a curva de pré-ênfase em 75 uS, 50 uS, 25 uS e 15 uS podendo ser utilizado tanto em sistemas de transmissão AM ou FM. Para a transmissão foi definido o valor de 75 uS. Na figura 32 é possível visualizar a interface de configurações.

Figura 32 - Breakaway Broadcast Processor



Fonte: Autor

O sinal de pré-ênfase pode ser desativado habilitando-se a de-ênfase, para isso seleciona-se L/R Out De-emphasis. Também é possível definir um valor de frequência para o filtro passa alta (HPF), podendo-se desabilitá-lo ou utilizar valores de 30, 45, 60, 80, 100 e 120 Hz. Foi determinado frequência de corte em 60 Hz, devido o transformador de áudio ter sido calculado para a frequência de 50 Hz.

Na sequência, a opção Bandwidth determina a frequência de áudio a ser limitada, atuando como um filtro passa baixa (LPF). É possível selecionar frequências entre 5 e 16 kHz. Para a transmissão foi utilizado a frequência de 5 kHz, lembrando que para a transmissão em AM a largura de banda utilizada é o dobro da máxima frequência de modulação, logo a largura de banda ocupada pela transmissão é de 10 kHz.

Ainda é possível realizar configurações para a compensação em frequências baixas e altas. Além disso alterar a assimetria dos sinais, proporcionando mudança nos níveis de modulação positiva de transmissão. O software também realiza o controle de ganho do áudio, proporcionando um sinal nivelado, realizando a compensação de sinais de alto e baixo ganho, além de atuar como compressor.

Já na figura 33, é possível visualizar a resposta de um sinal de áudio com largura de banda em 20 kHz, filtro de áudio com frequência de corte em 10 kHz, e pré-ênfase em 50 μ S. A recepção foi feita por meio de receptor SDR/USB, localizado próximo ao transmissor, utilizando-se software SDRsharper v03h.

Figura 33 - Índice de modulação e largura de banda



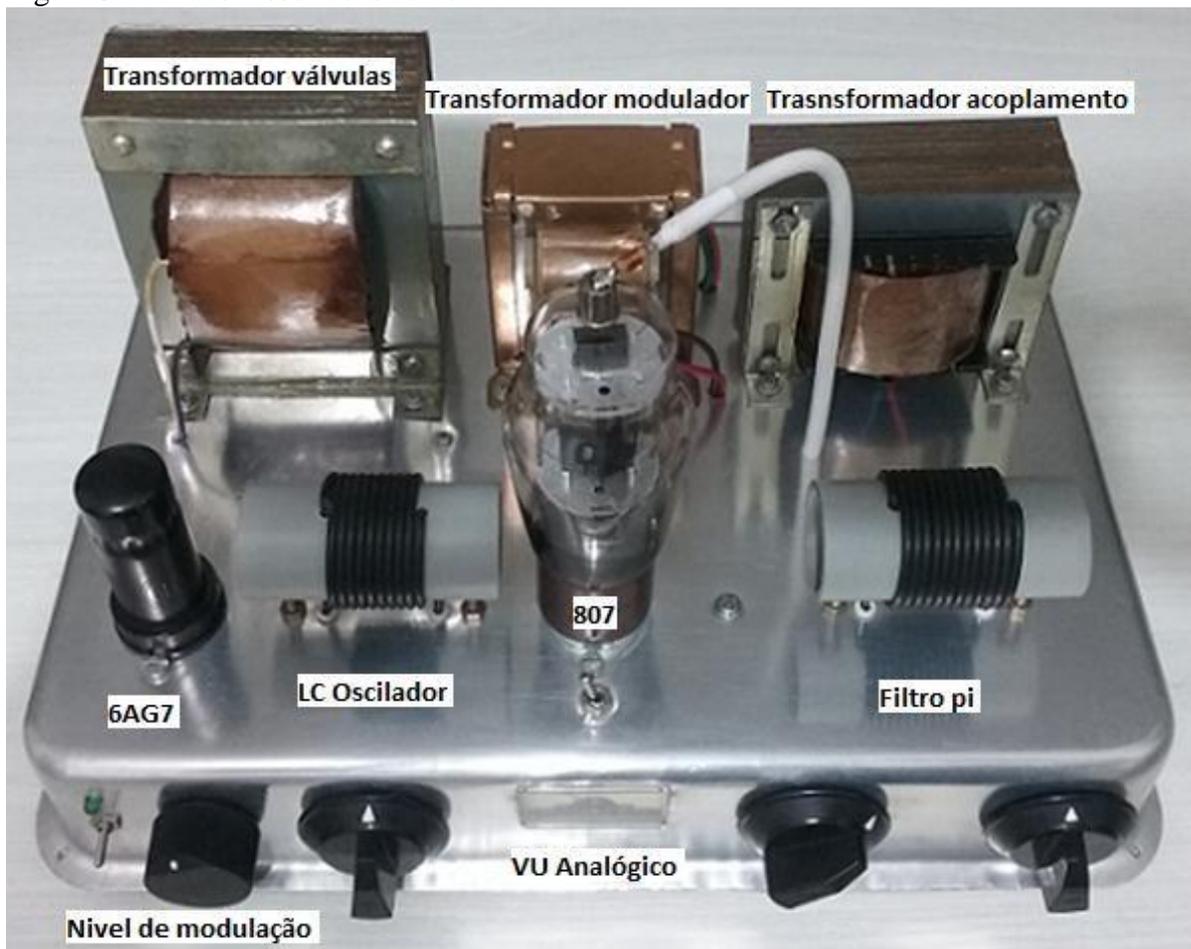
Fonte: Autor

Neste software é possível visualizar a portadora, traçado mais intenso em 8065 kHz, e nas bandas laterais, o áudio modulado, sendo que a parte superior, vai até 8075 kHz e a inferior indo até 8055 kHz, representando os 20 kHz de largura. Ao lado esquerdo, na parte inferior, é possível visualizar no osciloscópio o sinal de áudio e abaixo os níveis de modulação, no caso chegando a picos de 100% em vermelho. Os testes de modulação e recepção serão mostrados no capítulo 6.

5.6 Considerações sobre o transmissor

Na sequência é possível visualizar o transmissor concluído, com todos os transformadores, bobinas, válvulas, ajustes e uma breve explicação de funcionamento. Foi construído em um chassis de alumínio, visível na figura 34.

Figura 34 - Transmissor construído



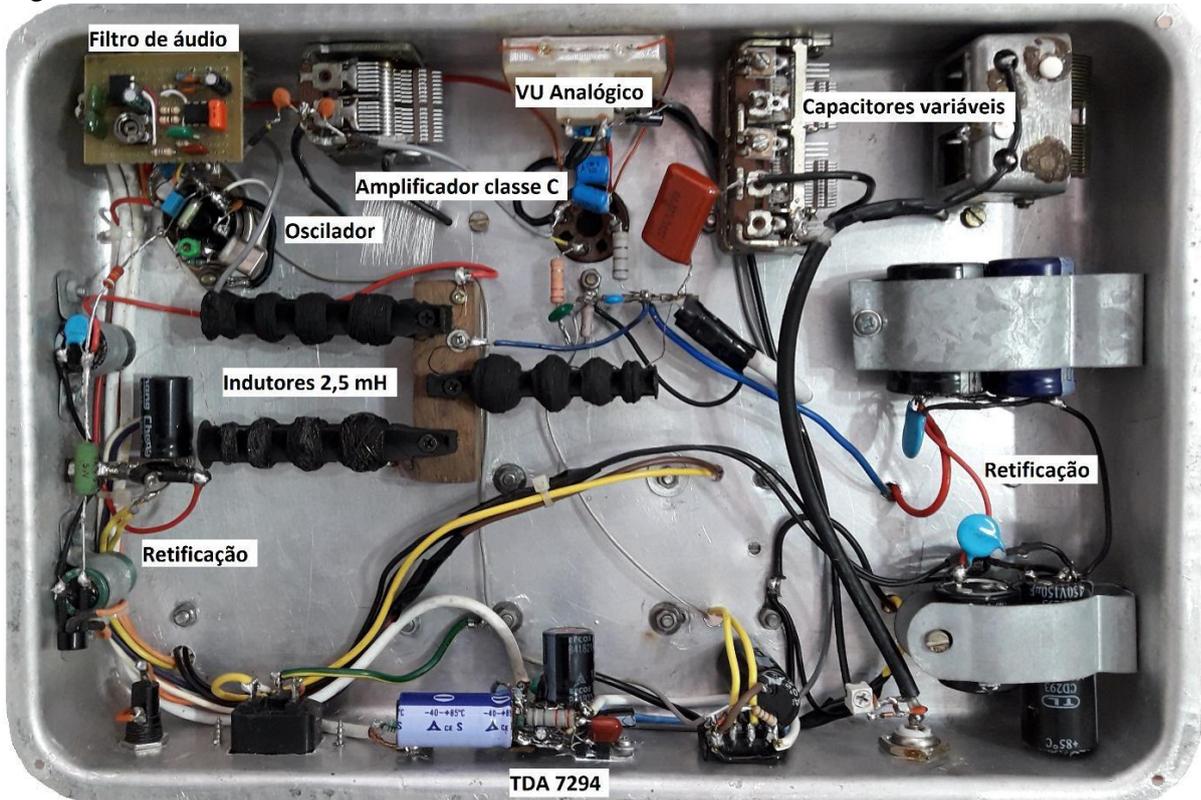
Fonte: Autor

O primeiro transformador, à esquerda, é o de alimentação das válvulas, assim como dos filamentos. O transformador do meio é da alimentação do amplificador TDA7294. Já o último transformador, à direita, é o de modulação, acoplamento do sinal de alta impedância das válvulas com o de baixa impedância do amplificador de áudio.

A primeira válvula, à esquerda, em preto, é a osciladora 6AG7, e logo à direita o indutor, e abaixo o capacitor variável para ajuste de ressonância conforme a frequência do cristal utilizado, configurando um sistema LC paralelo para sintonia com a frequência do oscilador. Já a válvula do meio é a de potência, 807, responsável pela amplificação do sinal em classe C. À direita encontra-se o filtro π , representada pelos dois capacitores variáveis e o indutor. A saída do sinal é realizada pela parte traseira, por meio de um conector SO-239. Além disso, a entrada de áudio é feita pela parte traseira, e o nível de modulação é controlado por um potenciômetro, localizado abaixo da válvula 6AG7, na parte frontal.

Na parte frontal do transmissor encontra-se um VU analógico onde é possível visualizar o nível de modulação. Além disso existe uma chave de duas posições para a troca de função, podendo o VU ser utilizado para ajuste do filtro π para a máxima potência de saída. Esquema interno do transmissor na figura 35.

Figura 35 - Conexões transmissor concluído



Fonte: Autor

Ao longo do capítulo 5 foi possível acompanhar a construção do transmissor de ondas curtas, com as suas principais etapas abordadas. Mostra de que forma ele foi construído e a resposta a alguns testes. Mais testes serão abordados no próximo capítulo, como potência irradiada, distância, propagação e modulação.

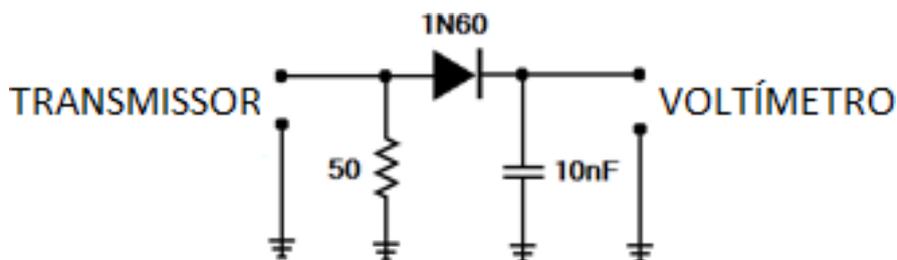
6. AVALIAÇÃO DE TRANSMISSÃO

Neste capítulo serão detalhados aspectos relacionados a potência gerada, assim como influência e condições de propagação na recepção dos sinais transmitidos. Além disso trata da sintonia por meio de SDR's e por meio de receptores convencionais, em âmbito nacional e internacional.

6.1 Potência irradiada

Primeiramente foi necessário determinar a potência da portadora do transmissor, para verificar a potência transferida. Para isso foi elaborado um circuito retificador, que tem o objetivo de determinar a tensão sobre o resistor de $50\ \Omega$, esse puramente resistivo. O circuito pode ser visualizado na figura 36.

Figura 36 - Determinação da potência da portadora



Fonte: Autor

Utilizou-se o diodo de Germânio 1N60 devido à queda de tensão de polarização ser de apenas $0,3\ \text{V}$. Porém foi desconsiderada esta queda de tensão nos cálculos devido ao circuito

estar aberto, sendo que a única descarga do capacitor é a alta impedância do multímetro. Como o sinal de saída do transmissor é senoidal, o diodo acaba atuando como um retificador de meia onda, retificando a parte positiva e carregando o capacitor de 10 nF com o valor de pico do sinal. Conhecendo o valor de tensão de pico sobre o resistor é possível determinar a tensão RMS. Para determinar a tensão RMS de um sinal senoidal utiliza-se a equação 20.

$$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} \quad (20)$$

Não foi testado se o sinal de saída do transmissor é puramente senoidal, porém ele apresenta um som limpo, sem qualquer ruído em um rádio receptor sintonizado na frequência. Quando o sinal não possui características senoidais, é comum o áudio apresentar distorções, ruídos e roncões na recepção. Como nenhum um destes componentes foram detectados, foi considerado que o sinal é senoidal.

Conhecendo o valor de tensão RMS e a resistência de carga é possível determinar a potência sobre o resistor pela equação 21.

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (21)$$

A leitura do multímetro foi de 48 Vpico, isso em uma análise em sinal DC, capacitor carregado, logo representando 33,94 Vrms sobre a carga de 50 Ω. Assim a potência dissipada calculada foi de aproximadamente 23 Watts.

Foi utilizado este método para determinar a potência aproximada de saída devido a inexistência de um wattímetro de RF para comparação dos resultados. Este método foi utilizado apenas para mensurar a potência da portadora na saída, ter a noção da potência irradiada. Outro teste foi considerando a utilização de uma lâmpada incandescente de 21 Watts automotiva. Desta forma a lâmpada serve como carga fantasma, ajustando o filtro π até o máximo brilho, obtendo-se alto nível de iluminação.

6.2 Testes de modulação no Brasil

A transmissão tem origem na cidade de Lajeado, Rio Grande do Sul. Na figura 37, é possível visualizar o sinal transmitido sendo recebido no sistema de rádio recepção SDR de São Luiz do Paraitinga, no estado de São Paulo, disponível em <http://pu2per.proxy.kiwisdr.com:8073>. Foi realizado teste de transmissão na frequência de 8065 kHz modulado com sinal senoidal de 1 kHz.

Figura 37 - Modulação de 1 kHz em São Luiz do Paraitinga



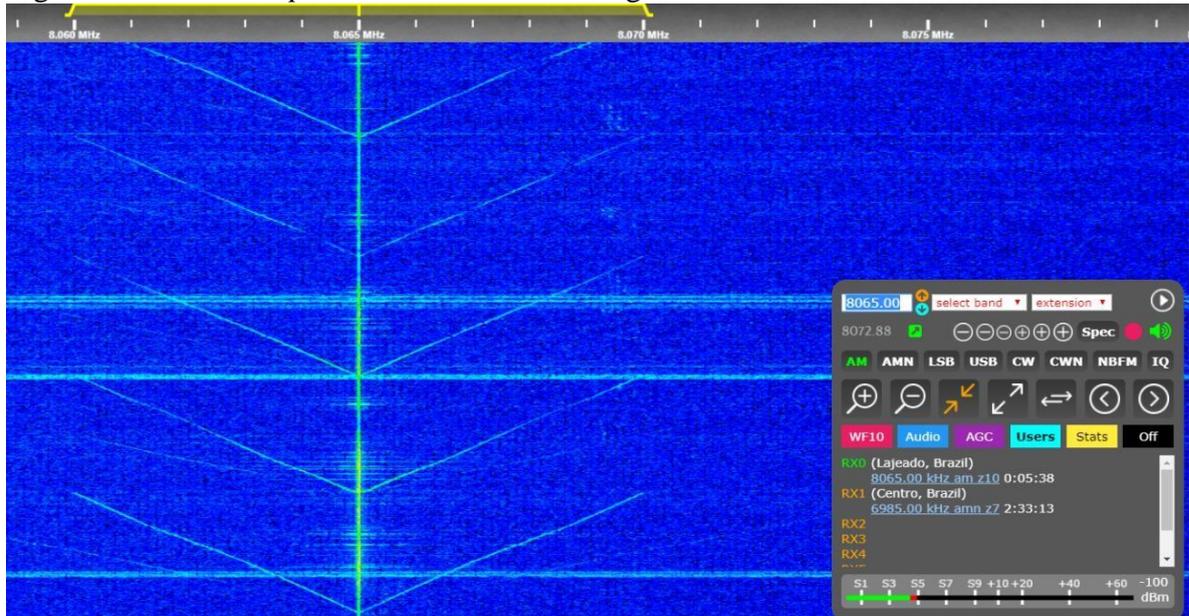
Fonte: Autor

Nesta análise espectral, realizada a uma distância de 960 km, no dia 19/10/2018 às 16:03, tempo universal coordenado (UTC), é possível identificar o sinal da portadora em 8065 kHz, traço mais intenso no meio da figura. Já nas laterais, frequências superiores e inferiores é possível visualizar o sinal modulante em 8066 e 8064 kHz respectivamente.

Esta figura evidencia o processo de modulação, exatamente como na figura 20 (pág. 42), comprovando o funcionamento do transmissor construído com a portadora no traço central mais intenso indicando maior potência. Já nas as bandas laterais, menos intensas, indicando menor potência do sinal modulante. No próprio receptor é possível realizar a escuta deste sinal senoidal de 1 kHz, ou seja, realizar a demodulação do sinal, podendo ser claramente ouvido, confirmando a recepção do mesmo através da própria saída de áudio do computador ou notebook utilizado.

Outra possibilidade de geração é com um sinal *slow sweep*. Este sinal é uma onda senoidal que começa em baixa frequência, onde seu valor é aumentado gradativamente até 5 kHz. Este sinal é cíclico, retornando da baixa frequência até a mais alta. Isso gera um sinal conforme a figura 38. Teste realizado dia 01/08/2018 às 18:41 UTC, também em São Luiz do Paraitinga.

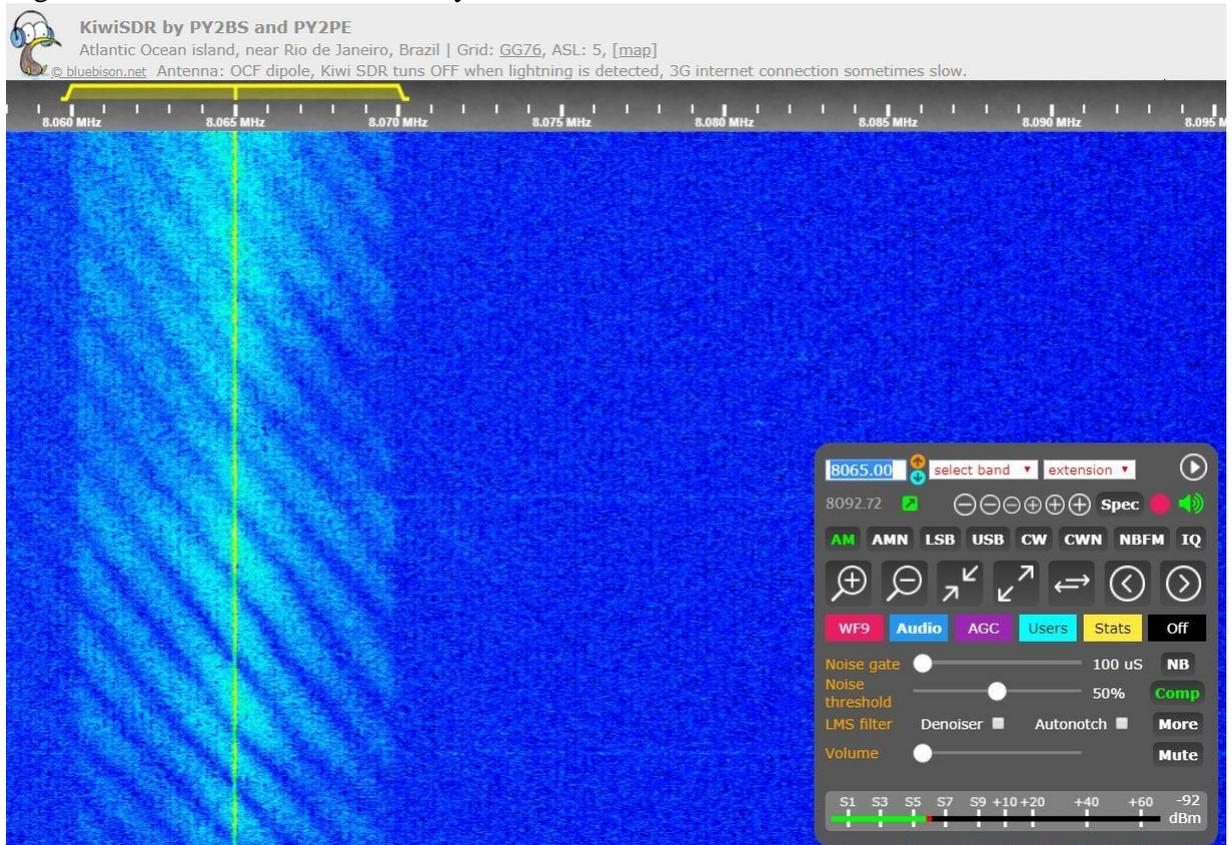
Figura 38 - *Slow sweep* em São Luiz do Paraitinga



Fonte: Autor

Outro teste realizado foi a modulação com ruído branco. O sinal em ruído branco apresenta a mesma intensidade de sinal em todas as frequências. Desta forma ele acaba preenchendo todo o espectrograma em torno da portadora com frequência de corte em 5 kHz, como é apresentado nas figuras 39 e 40 respectivamente.

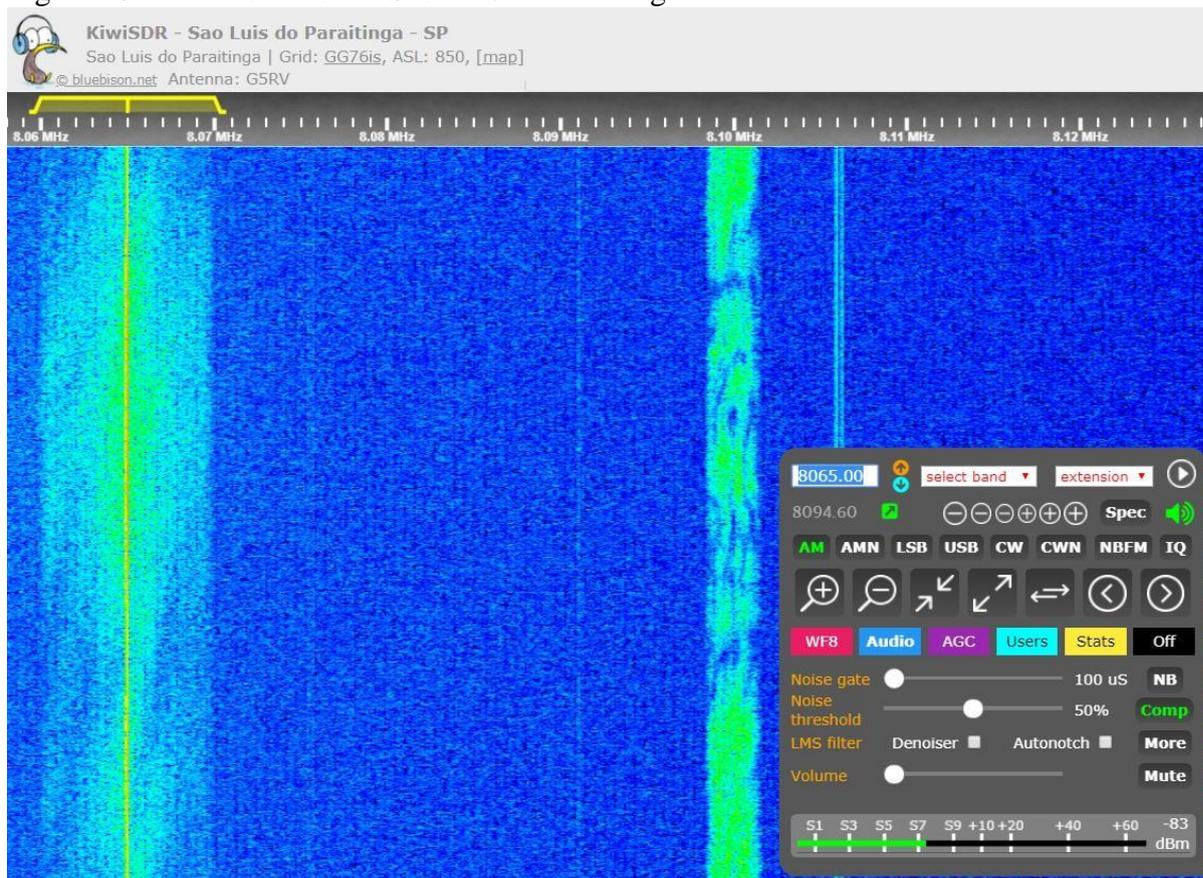
Figura 39 - Ruído branco em Paraty



Fonte: Autor

Na figura 39, é possível visualizar o sinal com ruído branco no SDR de Paraty, no estado do Rio de Janeiro, distância aproximada de 1014 km. Este SDR encontra-se disponível em <http://py1eme.homeip.net:8073>. Teste realizado no dia 01/08/2018 às 17:36 UTC. Na figura 40, representa o mesmo sinal da figura 39, porém no receptor SDR de São Luiz do Paraitinga.

Figura 40 - Ruído branco em São Luís do Paraitinga



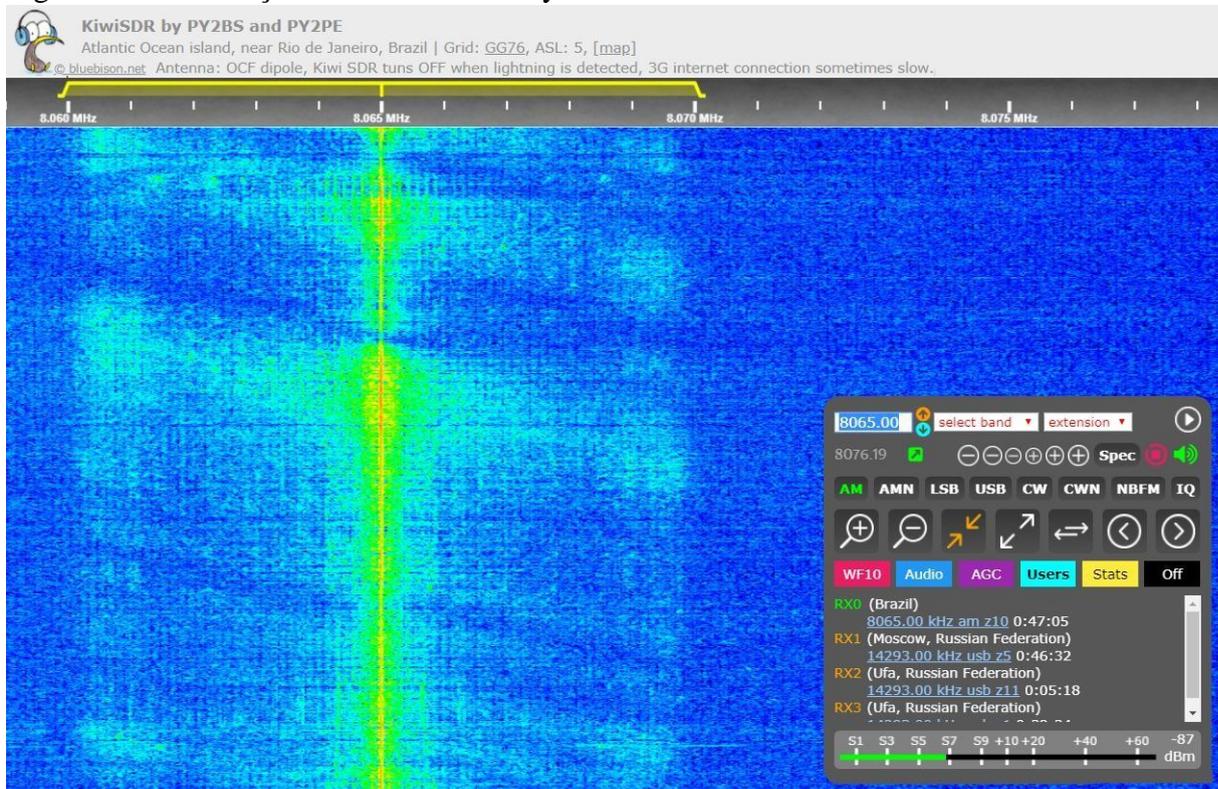
Fonte: Autor

Na figura 39, SDR de São Luís do Paraitinga, receptor já comentado anteriormente, representa o mesmo sinal de ruído branco às 17:36 UTC. Os dois testes anteriores foram realizados ao mesmo momento. Em quanto isso, no SDR de Glorinha, Rio Grande do Sul, distante 125 km, não era possível receber nenhum sinal, representando a zona de silêncio, como na figura 9 (pág. 26). Em ambos os receptores é possível identificar a portadora em 8065 kHz, representado pelo traçado mais intenso. Já nas laterais, é possível visualizar em verde mais claro o sinal modulante com o ruído branco, modulado com 5 kHz, entre 8060 e 8070 kHz, representando largura de banda de 10 kHz. Este sinal de ruído branco confirma a equação 16 (pág. 42), onde a largura de banda representa o dobro da máxima frequência modulada, exatamente como visualizado.

Já nas figuras 41 e 42, são visualizadas a modulação com áudio, música. É possível identificar o sinal de áudio nas bandas laterais da portadora de 8065 kHz. Como nos outros casos já comentados, o sinal de áudio é processado pelo software Breakaway, com curva de pré-ênfase de 75 μ s e largura de áudio de 5 kHz. Este sinal compreende uma largura de banda

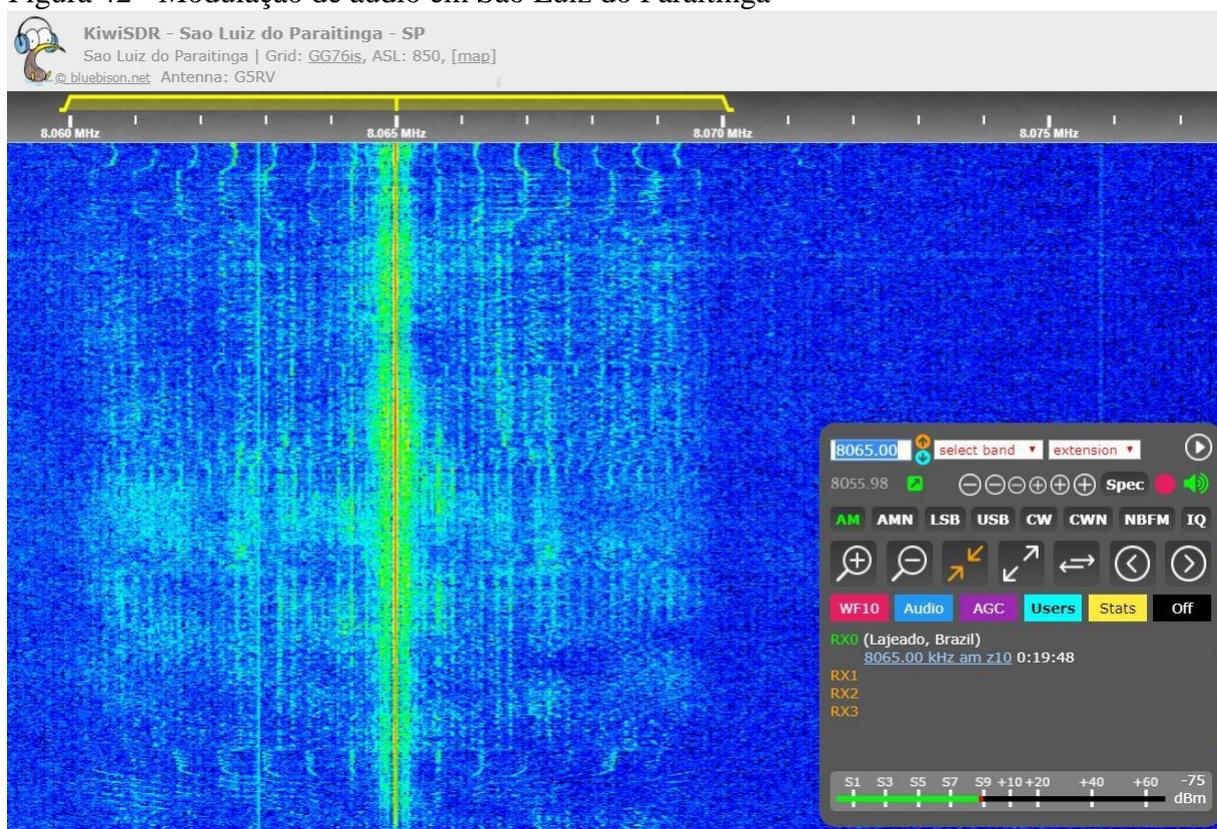
de 10 kHz, estendendo-se de 8060 a 8070 kHz. Recepção dia 07/08/2018 às 19:31 UTC em Paraty.

Figura 41 - Modulação de áudio em Paraty



Fonte: Autor

Figura 42 - Modulação de áudio em São Luiz do Paraitinga



Fonte: Autor

Já na figura 42, é realizada a sintonia no SDR de São Luiz do Paraitinga, no dia 19/08/2018 às 18:47 UTC. Nestas duas últimas figuras foi possível visualizar a modulação de áudio. Elas ficam muito semelhante comparadas com o sinal analógico na figura 3 (pág. 17), confirmando a modulação AM exatamente como a mencionada. Com isso ainda foi possível ouvir o sinal de áudio sendo recebido nos dois receptores, confirmando ser o mesmo sinal gerado. Como utilizou-se largura limitada de áudio em 5 kHz, naturalmente não existe uma resposta nas frequências superiores de áudio a essa.

Estes testes demonstram o funcionamento do transmissor e de sua etapa de modulação. Além do sistema de recepção via SDR, que possibilita a visualização do sinal por meio do espectrograma, entrou-se em contato com radio escutas de algumas localidades do Brasil para que estes realizassem testes de sintonia, e informassem sobre a recepção do sinal recebido. Foram relatadas várias escutas no Brasil, entre elas destaca-se as seguintes:

Em Alegrete, distante 370 km, em 26/08/2018 às 13:32 UTC, com receptor Sanyo portátil, utilizando antena *longwire*. Em São Gabriel-RS, distante 250 km, dia 06/10/2018, às 20:00 UTC, utilizando receptor Tecsun PL-398 utilizando a própria antena telescópica do rádio. Na mesma hora e dia em Joinville-SC, distante 470 km, receptor Tecsun PL-660 com antena

loop magnética. Em Xavantina-SC, distante 270 km, dia 14/10/2018 às 16:16 UTC, utilizando receptor Tecsun S2000 com antena *longwire*. Em Ouro Fino-MG, distância 980 km, dia 21/08/2018 às 17:57 UTC receptor Degen 1103, utilizando antena *longwire*. E finalizando, em Nova Xavantina-MT, distância 1650 km, dia 15/10/2018 às 20:58 UTC, com receptor Yaesu FRG-8800, utilizando antena dipolo assimétrica.

Realizando análise dos sinais em território brasileiro, conclui-se que o sinal chega de forma mais intensa na região sul. Durante o dia, os sinais alcançaram sinais máximos próximos a 1000 km, a partir desta distância a intensidade do sinal diminui consideravelmente. Outro ponto de destaque é comparando sinais em diferentes estações. Nos meses de inverno no hemisfério sul, onde a radiação solar é menor, noites mais longas, ocasiona uma intensidade menor de íons na ionosfera, o que proporciona uma reflexão para distâncias maiores, que é a zona de silêncio maior.

Por exemplo, nos meses de inverno não era possível receber os sinais a uma distância de 125 km no SDR de Igrejinha, exatamente devido a zona de silêncio. Com a densidade iônica menor, o sinal tende a ser refletido para regiões mais distantes. Já com a entrada da primavera, dias mais longos, ocorre a inversão. A intensidade de radiação solar aumenta no hemisfério sul, ocasionado aumento na intensidade de íons na ionosfera. Isso ocorre devido ao aumento da ionização em regiões mais baixas, proporcionando reflexão para localidades mais próximas, ocorrendo assim uma diminuição da zona de silêncio. Devido a isso já era possível receber o sinal em regiões mais próximas, como em Igrejinha.

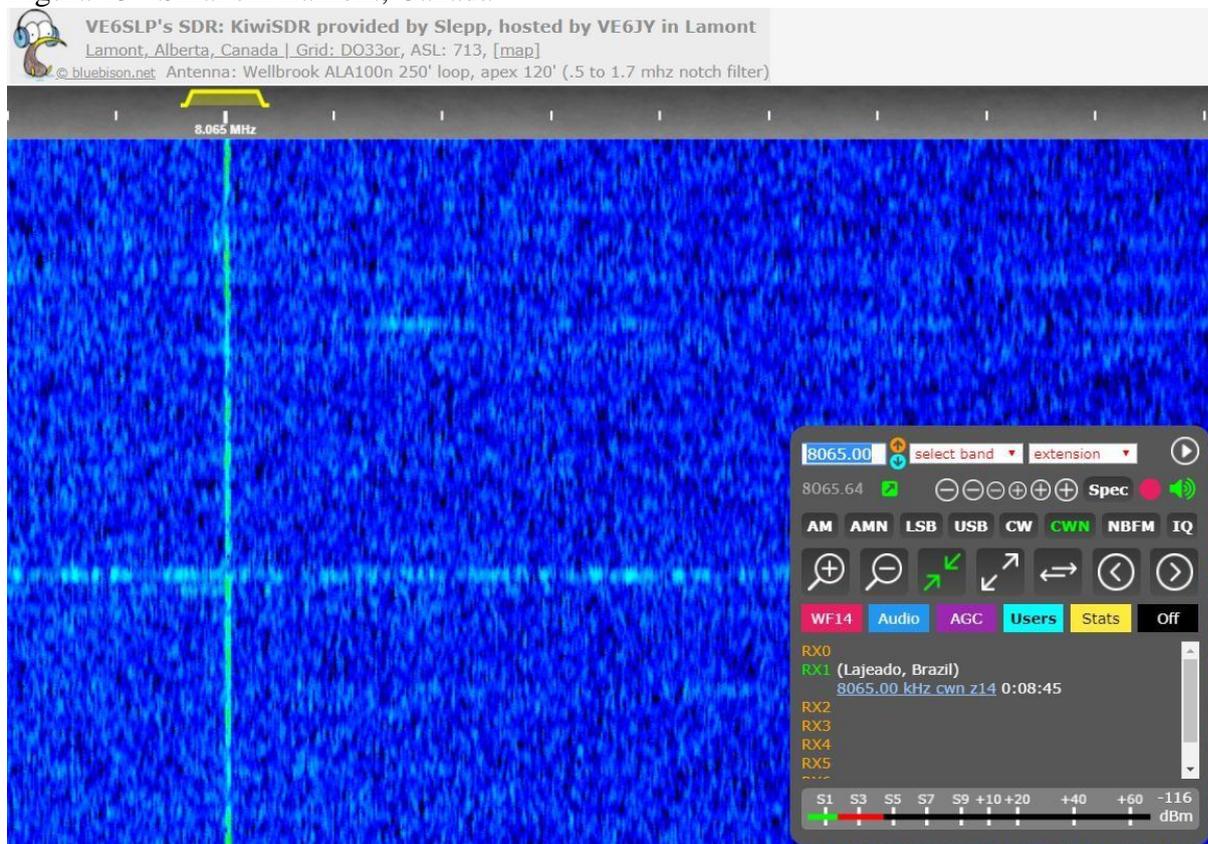
Já durante as noites, especialmente de inverno, não era possível realizar a recepção dos sinais na maioria dos SDR's brasileiros. A medida do início da primavera conseguiu-se um sinal melhor durante a noite nas regiões brasileiras.

6.3 Recepções intercontinentais

Durante a noite o sinal propaga-se para regiões muito distantes, até mesmo intercontinentais. O sinal recebido no exterior foi de baixa intensidade. A seguir é destacado algumas recepções.

Na figura 43, é possível visualizar a portadora chegando em Lamont no Canadá, no dia 19/10/2018, às 00:20 UTC. A distância é de 10940 km, SDR disponível em <http://kiwisdr.ve6slp.ca:8173>.

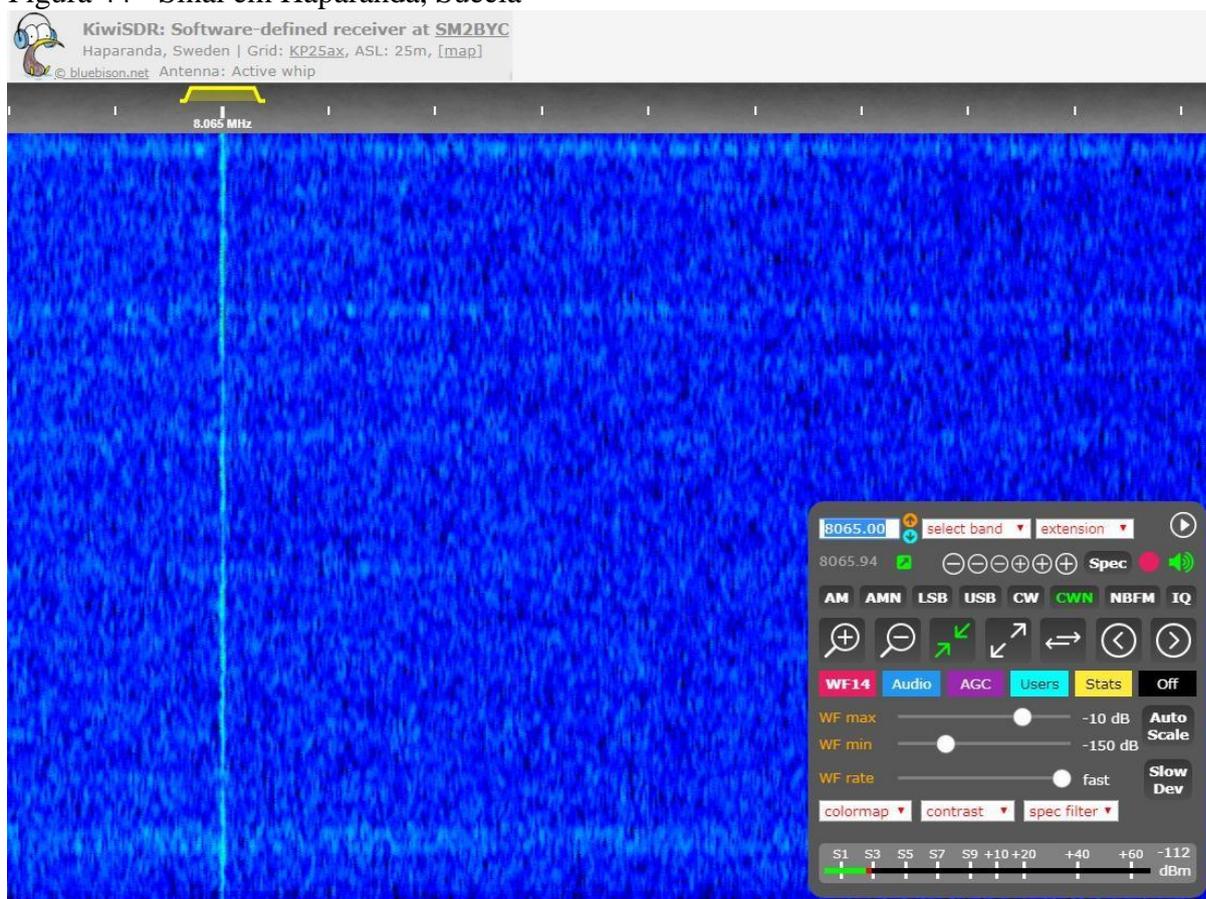
Figura 43 - Sinal em Lamont, Canadá



Fonte: Autor

Já na figura 44, é possível identificar o sinal chegando no norte da Suécia, cidade de Haparanda, no dia 05/08/2018 às 21:58 UTC, distância de 12380 km, SDR disponível em <http://sm2byc.ddns.net:8073>.

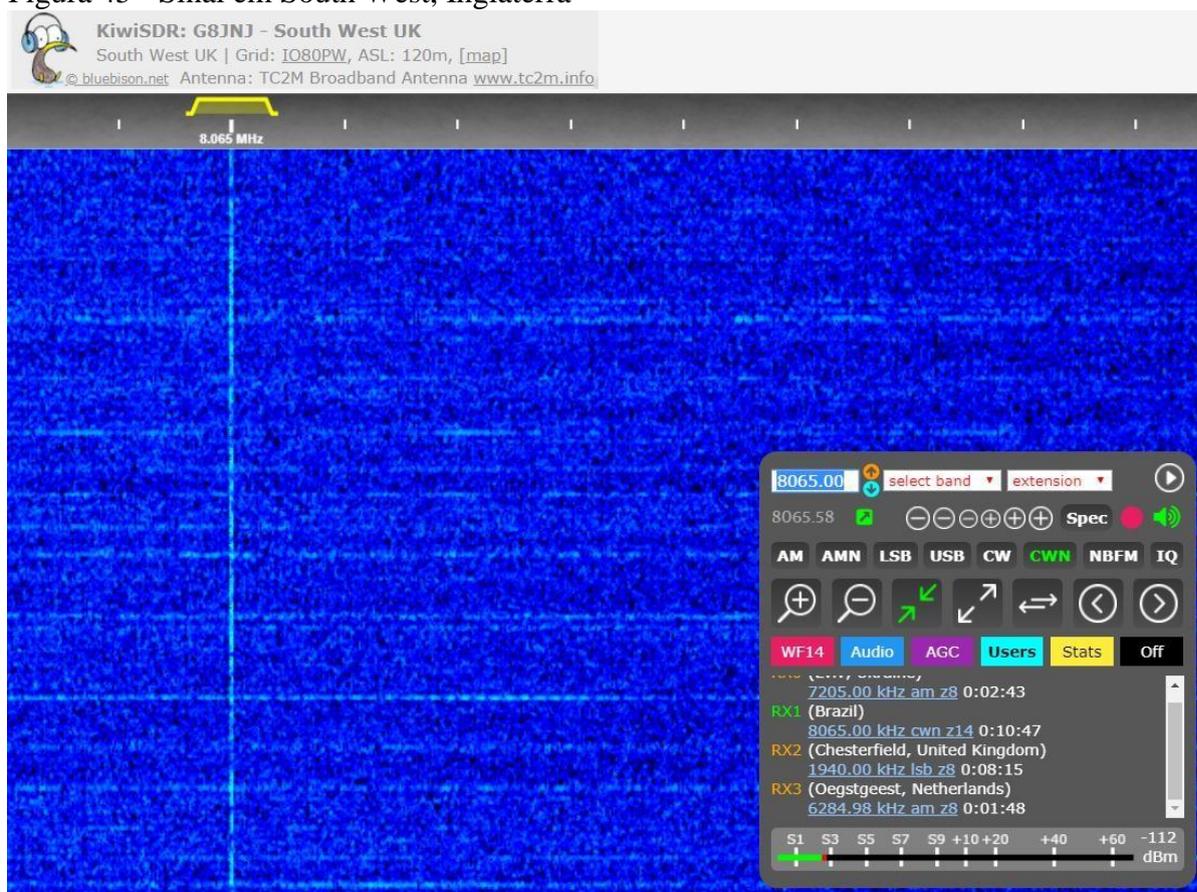
Figura 44 - Sinal em Haparanda, Suécia



Fonte: Autor

Por fim, na figura 45, existe a recepção do sinal na região sudoeste da Inglaterra, no dia 05/08/2018 às 21:38 UTC, distância de 10160 km, disponível em <http://southwest.ddns.net:8073>.

Figura 45 - Sinal em South West, Inglaterra



Fonte: Autor

Em todas estas regiões foi possível receber o sinal gerado. Foram sinais fracos, porém são claramente visíveis. Em todos os casos o sinal da portadora foi recebido pelos SDR's internacionais. Certamente haveriam dificuldades de escuta para sinais modulados em amplitude, como áudio ou voz.

Na figura 46 é realizado um apanhado geral com as localidades, dia, horário, potência e distâncias e o nível de sinal recebido nos principais receptores SDR utilizados para testes.

Figura 46 - Conclusão das análises de propagação

Local	Dia	Horário (UTC)	Nível de Sinal (dBm)⁵	Distância (km)
São Luiz do Paraitinga - SP	19/08/2018	18:47	-75	960
Paraty - RJ	02/08/2018	19:31	-87	1014
Lamont - Canadá	19/10/2018	00:20	-116	10940
Haparanda - Suécia	05/08/2018	21:58	-112	12380
South West - Inglaterra	05/08/2018	21:38	-112	10160

Fonte: Autor

⁵ dBm é uma unidade de medida logarítmica utilizada principalmente em telecomunicações para expressar a potência. Define-se como o nível de potência em decibéis em relação ao nível de referência de um 1 mW.

7. CONCLUSÃO

Neste projeto foi apresentada a proposta para a implementação de um transmissor valvulado em ondas curtas. O equipamento foi elaborado por meio da revisão bibliográfica das etapas que o compõem. Com o desenvolvimento em cada uma das áreas deu-se início à construção do transmissor.

Além de todo o conhecimento teórico para a construção do equipamento, também levou-se em conta técnicas de construção, especialmente para indutores e transformadores. O resultado final foi muito satisfatório, sendo que o transmissor apresentou alcance como o esperado, assim como boa qualidade de áudio. Este foi um projeto que envolveu diversas áreas do conhecimento, que contribuíram muito para aplicação de conceitos teóricos e práticos.

O projeto envolve conhecimento de áreas da engenharia elétrica, assim como telecomunicações, dessa forma, foram abordados conteúdos de diversas disciplinas do curso, como: Circuitos Elétricos, Eletrônica Analógica I e II, Teoria Eletromagnética Aplicada e Máquinas Elétricas.

Os circuitos eletrônicos valvulados ainda vem sendo empregados, especialmente na área de transmissão em alta potência e amplificadores de áudio. Válvulas ainda são encontradas no mercado, apresentando vantagens em relação a sua simplicidade e conexões, aliados a alta potência. Por outro lado, apresenta desvantagens quanto ao tamanho, baixa eficiência e elevada temperatura de operação. Este projeto alia tecnologia antiga para a etapa de transmissão, porém é avaliada pela mais recente tecnologia na área de recepção, como o uso de receptores SDR, com a facilidade de sintonia e visualização na Internet do sinal transmitido.

Para mudanças ou aperfeiçoamento, pode-se incluir um gerador de síntese direta digital *Direct Digital Synthesis* (DDS), para aumentar a faixa de frequências disponíveis para a transmissão, substituindo o uso de cristais para a etapa de oscilação. Além disso realizar mudanças no circuito para a transmissão de sinais em banda lateral única, *Single Side Band* (SSB) e além disso possibilitar a transmissão de sinais digitais em DRM.

REFERÊNCIAS

- WOOD, J. **History of international broadcasting**. London: P. Peregrinus Ltd. in association with the Science Museum, 1992
- M. ALENCAR, W. LOPES, T. ALENCAR. **O Fantástico Padre Landell de Moura e a transmissão sem fio** Disponível em: <<http://landelldemoura.com.br/o%20fantastico%20padre%20landell%20de%20moura%20transmissao%20sem%20fio.pdf>>. Acesso em: 28 de Outubro de 2018.
- FRENZEL JR., L. E. **Modulação, demodulação e recepção: fundamentos de comunicação eletrônica**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 362p.
- FRENZEL JR., L. E. **Eletrônica moderna: fundamentos, dispositivos, circuitos e sistemas**. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- FOWLER, R. **Fundamentos de eletricidade**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 274p. (Corrente Alternada e Instrumentos de Medição, v. 2).
- NOTAROS, Branislav M. **Eletromagnetismo**. 1. ed. Pearson, 2012.
- YOUNG, Paul H. **Técnicas de comunicação eletrônica**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.
- MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8. ed. São Paulo: Globo, 1991.
- BRAGA, Newton C. **Fundamentos de som e acústica**. São Paulo: NCB, 2015.
- ORR, William I. **The radio handbook**. 15. ed. Summerland: Editors and Engineers, 1959.
- HARRISON, N. J. **RCA Transmitting Tubes**. Radio Corporation of America, Electron tube division. USA, 1962.
- DRM Consortium, **DRM Introduction and Implementation Guide**. Disponível em: <http://www.drm.org/DRM_Introduction_and_Implementation_Guide-V3.pdf>. Acesso em: 21 de Abril de 2018.
- EIMAC Division: **Care and feeding of power grid tubes**. 5. ed. 2003.
- KAUNE Bill, **Quality Factor, Bandwidth, and Harmonic Attenuation of Pi Networks**. Disponível em: <http://www.arrl.org/files/file/QEX_Next_Issue/2015/Sep-Oct_2015/Kaune.pdf>. Acesso em: 24 de Março de 2018.
- ANALOG Devices, **Analog Filter Wizard**. Disponível em: <<http://www.analog.com/designtools/en/filterwizard/>>. Acesso em: 15 de Março de 2018.
- NRSC, **NRSC-R10 AM Preemphasis Standards**. Disponível em: <<http://nrscstandards.org/Reports/NRSC-R10.pdf>>. Acesso em: 10 de Maio de 2018.
- ARRL. **American Radio Relay League**. Disponível em: <<http://arrl.org>>. Acesso em: 10 de Maio de 2018.

PTB. **DCF77**. Disponível em: <<https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-44/ag-442/dissemination-of-legal-time/dcf77.html>>. Acesso em: 23 de Abril de 2018.

MARTINS, M. **Entendendo a propagação**. Disponível em: <<https://www.qsl.net/py4sm/propagacao.htm>>. Acesso em: 06 de Outubro de 2018.

REALTEK. **RTL2832U**. Disponível em: <<http://www.realtek.com.tw/products/productsView.aspx?Langid=1&PFid=35&Level=4&Conn=3&ProdID=257>>. Acesso em: 20 de Outubro de 2018.

HERRMAN Paul L. **HF Propagation**. Disponível em: <<http://www.hamqsl.com/solar.html>>. Acesso em: 20 de Outubro de 2018.