

LUCIANO BORGES DE CARVALHO

INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS AVIÔNICOS DE RÁDIO
NAVEGAÇÃO

Guaratinguetá - SP

2015

LUCIANO BORGES DE CARVALHO

INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS AVIÔNICOS DE RÁDIO
NAVEGAÇÃO

Trabalho de Graduação
apresentado ao Conselho de Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Graduação em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Euzédice de
Lucena

Guaratinguetá - SP

2015

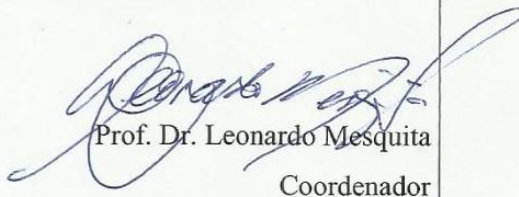
C331i	<p>Carvalho, Luciano Borges de Introdução aos Sistemas Aviônicos de Rádio Navegação / Luciano Borges de Carvalho – Guaratinguetá, 2015. 48 f : il. Bibliografia: f. 47-48</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena</p> <p>1. Circuitos de rádio 2. Eletrônica na aeronáutica 3. Eletrônica na navegação I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.396.44</p>
-------	--

**INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS AVIÔNICOS DE RÁDIO
NAVEGAÇÃO**

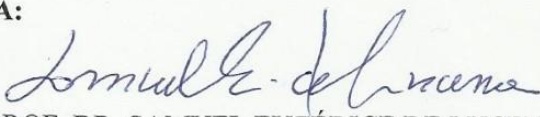
LUCIANO BORGES DE CARVALHO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA"

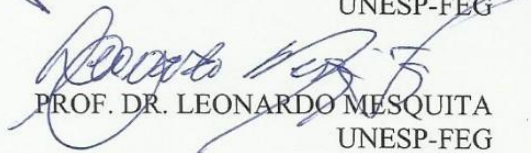
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


PROF. DR. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA
ORIENTADOR/UNESP-FEG


PROF. DR. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG


PROF. DR. LEONARDO MESQUITA
UNESP-FEG

*Dedico integralmente tudo o que alcancei
aos meus pais, que em meio aos desafios da vida
foram exemplo de garra e total entrega,
criou e educou como se deve,
mas principalmente amou e ensinou a amar.*

Agradecimentos

A Deus, por ter me proporcionado os pais que possuo e por aquilo que sou.

Aos meus pais, *Terezinha de Fátima Borges e José Luciano de Carvalho (in memoriam)* que nunca mediram esforços para me proporcionar a melhor formação possível, que me direcionou no caminho certo, que confiou no meu potencial, nas minhas escolhas e sempre me motivaram a alcançar meus objetivos, sempre com muito amor e carinho.

A toda minha família que sempre me apoiou e acreditou em mim e sempre estiveram presente como parte fundamental na minha criação, em especial meu sobrinho *Breno Melo (in memoriam)* que foi um irmão para mim.

Agradeço à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá e todo o corpo docente da Engenharia Elétrica, que contribuíram para a minha formação pessoal e intelectual, me ensaiando não só conceitos e fórmulas, mas também me ensinando a ser crítico e principalmente me ensinando a raciocinar como um Engenheiro. Em especial ao meu orientador o Prof. Dr. Samuel Euzédice Lucena sempre pelo apoio, ensinamentos e conversas durante o decorrer do curso.

Agradeço à Embraer na pessoa do Marcos Costa de Lima e sua equipe, em especial ao time *Phenom*, pelo crescimento profissional e pela oportunidade de me colocar em contato com o mundo da aviação, que me fascinou e se tornou objeto de estudo nesse trabalho.

E por último a todos os meus amigos, que foram muito importantes para eu ser quem sou hoje, sempre aprendendo e crescendo juntos. E em especial, à *República 69*, por todos esses anos de companheirismo, amizade e aprendizados. Pelas risadas, churrascos e festas, e também pela companhia nas noites intermináveis de estudo.

"Se você falha em planejar, planeja falhar."
(Benjamin Franklin)

CARVALHO, L. B. **Introdução aos sistemas aviônicos de rádio navegação**. 2015. 48 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

Resumo

Este trabalho é voltado ao tema de Rádio Navegação Aérea tanto no ambiente embarcado em aeronaves quanto nas estações em solo. Inicialmente é apresentado uma contextualização histórica e motivação do tema escolhido. Nos capítulos seguintes são apresentados os conceitos básicos dos sistemas aviônicos ADF, VOR, DME e ILS de forma que haja um aprofundamento da teoria eletrônica por trás do funcionamento de cada sistema. No estudo presente neste Trabalho de Graduação foram apresentadas as teorias envolvidas nos sistemas, como a definição e formação das ondas de rádio, o espectro de frequência utilizado por cada sistema, a modulação e demodulação de sinais, os diagramas de blocos de funcionamento dos receptores embarcados nas aeronaves e das estações terrestres fonte, bem como os erros envolvidos na utilização de cada sistema

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas Aviônicos, ADF, VOR, DME, ILS, Rádio Navegação

CARVALHO, L. B. **Introduction of avionics air radio navigation systems.** 2015. 48 p. Graduation Work (Graduate in Electrical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

Abstract

This work is focused on the subject of air radio navigation systems embedded on aircraft and in the ground stations. Initially is presented a historical context and motivation of the chosen theme. In the following chapters the basics avionics systems are presented, ADF, VOR, DME and ILS such that there is a deepening of electronics theory behind the operation of each system. In this graduate work were presented theories involved in systems such as the definition and creation of radio waves, the frequency spectrum used by each system, the modulation and demodulation of waves, the operating block diagrams of embedded receiver in the aircraft and the terrestrial source station, and the errors involved in the use of each system

KEYWORDS: Avionics Systems, ADF, VOR, DME, ILS, Radio Navigation

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Torre de Transmissão da Estação NDB.....	15
FIGURA 2.2 – Sinal de onda da estação em terra. À esquerda, onda radial emitida pela torre. À direita, componentes E e H do campo da onda de rádio.....	16
FIGURA 2.3 – Antena <i>Loop</i> na Aeronave	17
FIGURA 2.4 – Soma da Antena <i>Loop</i> com a <i>Sense</i>	17
FIGURA 2.5 – Arquitetura do receptor ADF.....	19
FIGURA 2.6 – Sistema ADF da Bendix King	20
FIGURA 2.7 – Propagação de ondas terrestres e aéreas	21
FIGURA 2.8 – Static Discharge Wick no Wingtip do Boeing737.....	22
FIGURA 3.1 – Sinal Variável	24
FIGURA 3.2 – Sinal de Referência	24
FIGURA 3.3 – Espectro do sinal VOR	25
FIGURA 3.4 – Propagação <i>Multipath</i>	26
FIGURA 3.5 – Estação VOR Doppler	27
FIGURA 3.6 – Geometria do Deslocamento Doppler	28
FIGURA 3.7 – Modelo de Geração dos Sinais DVOR.....	30
FIGURA 3.8 – Indicador VOR.....	31
FIGURA 3.9 – Receptor VOR e conversor de sinal.....	32
FIGURA 4.1 – Interrogação e resposta do DME	33
FIGURA 4.2 – Diagrama de blocos do interrogador DME.....	34

FIGURA 4.3 – Indicador DME embarcado nas aeronaves	35
FIGURA 4.4 – T1: Período constantes dos pares de pulso; T2: Período variável entre os pares de pulso	35
FIGURA 4.5 – Detector de ponto de amplitude de 50%.....	36
FIGURA 4.6 – Estação VOR/DME	36
FIGURA 4.7 – Propagação do sinal DME	37
FIGURA 5.1 – Planos do ILS; <i>Localizer, Glide Slope e Marker Beacon</i>	38
FIGURA 5.2 – Feixe de ondas do <i>Localizer</i>	39
FIGURA 5.3 – Antena <i>Localizer</i>	40
FIGURA 5.4 – Feixe de ondas do <i>Glide Slope</i>	41
FIGURA 5.5 – Antena <i>Glide Slope</i>	41
FIGURA 5.6 – Tipos de <i>Marker Beacons</i>	42
FIGURA 5.7 – Receptor <i>Marker Beacons</i> do tipo super-heteródino	43
FIGURA 5.8 – Antena <i>Marker Beacons</i>	44

Lista de Abreviaturas e Siglas

AC	<i>Alternate Current</i>
AGC	<i>Automatic Gain Control</i>
AM	Amplitude Modulada
ADF	<i>Automatic Direction Finder</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CDI	<i>Course Deviation Indication</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DSB-SC	<i>Double Sideband with Supressed Carrier</i>
DVOR	<i>Doppler Very High Frequency Omnidirectional Range</i>
FI	Frequência Intermediaria
GS	<i>Glide Slope</i>
HF	<i>High Frequency</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>
KTS	<i>Knots True Airspeed</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
LOC	<i>Localizer</i>
MB	<i>Marker Beacon</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
NDB	<i>Non-Directional Beacon</i>
OBS	<i>Omnibearing Selector</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VOR	<i>VHF Omnidirectional Range Radio</i>

Lista de Símbolos

E	Intensidade de campo Elétrico
H	Intensidade de campo Magnético
Hz	Hertz
k	Kilo
M	Mega
f_c	Frequência da portadora (<i>Frequency Carrier</i>)
V_x	Componente x da velocidade
V	Velocidade tangencial
θ	Ângulo
Δf	Deslocamento de frequência
λ	Comprimento de onda
c	<i>Velocidade</i> da luz
π	Constante matemática com valor aproximado de 3,1415
dB	Unidade de medida da intensidade relativa de dois sinais.
A	Amplitude da onda senoidal
f	Frequência de onda
h	Ordem harmônica
<i>sen</i>	Função seno
<i>cos</i>	Função cosseno
t	Tempo
T	Período de amostragem
v	Tensão elétrica
θ	Ângulo de fase de referência temporal

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 DIVISÃO DO TRABALHO	14
2 AUTOMATIC DIRECTION FINDER.....	15
2.1 NON DIRECTIONAL BEACON	15
2.2 SISTEMA ADF	18
2.3 ERROS NO ADF	21
3 VOR: VHF OMNI-RANGE.....	23
3.1 SINAL VOR.....	23
3.2 ERROS NO VOR.....	26
3.3 VOR DOPPLER.....	27
3.4 RECEPTOR VOR.....	30
4 DISTANCE MEASURING EQUIPMENT	33
4.1 INDICADOR DME.....	34
4.2 ESTAÇÃO DME.....	36
5 INSTRUMENT LANDING SYSTEM	38
5.1 LOCALIZER.....	39
5.2 GLIDE SLOPE.....	40
5.3 MARKER BEACON	42
5.4 ERROS NO ILS	44
6 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

O termo Aviônico nada mais é do que "eletrônica de aviação", a combinação de dois fascinantes campos da ciência, que atingiram sua maturidade durante o século 20. Grandes desenvolvimentos na aviação durante o século 18 e 19 com os balões, dirigíveis e planadores permitiram com que no século 20 fosse realizado o primeiro voo de um avião, o 14-Bis de Santos Dumont. E no âmbito da eletricidade diversas tecnologias foram descobertas nesse período por cientistas como Benjamin Franklin, Alessandro Volta, André-Marie Ampère, James Clerk Maxwell, Michael Faraday, Thomas Alva Edison, Nikola Tesla dentre outros.

As condições do tempo foi o determinante para que em meados de 1920 o exército Americano iniciasse uma pesquisa para o que se chamou de “Voo Cego”. Antes desse período os voos eram condicionados apenas a dias claros tanto para pouso quanto para cruzeiro, o que limitava muito sua utilização.

Com base na experiência de voo já adquirida na época, os pesquisadores definiram 3 sistemas essenciais para realizar voos à cega. O primeiro seria um altímetro preciso o suficiente para permitir ao piloto evitar montanhas invisíveis e outras obstruções tanto quanto para realizar pousos mesmo em condições de neblina.

O segundo item era uma referência para o horizonte natural. Quando o tempo estava com nevoeiro, nuvens ou outros fatores que possam obscurecer o horizonte da terra, o piloto não consegue depender dos seus sentidos para saber se está de pé ou de “cabeça para baixo” devido a força da gravidade. Assim, a segunda exigência era um horizonte artificial para fornecer referências visuais para controlar o avião.

A exigência final foi de navegação, para orientar o piloto para um destino sem que precisasse ver-marcações de terra, estrelas ou outros recursos de fora do *cockpit*. Os sistemas ópticos de orientação, já utilizados pela navegação oceânica, estavam fora de cogitação, porque a luz não consegue penetrar nuvens, a solução foram os sistemas à radio.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste Trabalho de Graduação é a discussão das teorias envolvidas no que se diz respeito a navegação aérea por ondas de rádio. Para tal, realiza-se uma revisão conceitual e teórica dos fundamentos adequados ao tema de sistemas aviônicos de rádio navegação.

1.3 DIVISÃO DO TRABALHO

O trabalho aqui apresentado está dividido em 5 capítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução acerca do assunto a ser tratado durante o decorrer do trabalho, contendo a motivação da escolha do tema em estudo, assim como o objetivo que o desenvolvimento deste trabalho possui.

O segundo capítulo trata do sistema ADF que compreende o primeiro auxílio à navegação terrestre por rádio que foi o farol não direcional, ou NDB. Nele o piloto se mantinha na linha de um sinal em direção a uma antena direcional. Como uma luz no meio da noite, o feixe de ondas fornecia uma indicação para voar. Se não houvesse ventos laterais ou outras perturbações na trajetória de voo, o curso seria uma linha reta. Porém tal método era deficiente pois caso não soubéssemos o ângulo de desvio do vento, manter no curso se tornava muito difícil.

No terceiro capítulo é apresentado o VOR que é um sistema capaz de proporcionar um grande número de cursos na forma de radiais para o destino, tornando a navegação mais simples. Tal sistema operava com frequências VHF o que proporcionou um uso com menos ruídos e interferências.

No capítulo seguinte, é solucionado o problema da indicação da distância com o DME. Além de fornecer a distância até a estação selecionada, normalmente a estação VOR, ele também mostra a indicação de velocidade. O sistema faz uso de interrogações da aeronave e respostas da estação para obter tais dados.

Após o domínio da navegação aérea por rádio em reações adversas de situação climática, um auxílio para pouso se tornou necessário. No penúltimo capítulo é apresentado o ILS, um sistema que fornece um auxílio para o eixo da pista, para a rampa de planeio e para a aproximação.

E no último capítulo é discutida a conclusão dos assuntos apresentados durante o decorrer do trabalho de graduação

2 AUTOMATIC DIRECTION FINDER

2.1 NON DIRECTIONAL BEACON

A primeira forma de navegação terrestre por rádio foi a radiofarol não direcional, comumente referido por NDB(do inglês *Non-Directional Beacon*), ainda encontrado em várias partes do mundo. Os radiofaróis não direcionais transmitem uma onda portadora não modulada em baixa frequência: 30KHz-300kHz e em média frequência: 300KHz-3MHz em todas as direções (transmissão “circular” ou “em 360 graus”). A antena direcional da aeronave aponta para o NDB, permitindo que o piloto siga uma direção até a rádio estação.

Na FIGURA 2.1 é possível ver a estação NDB em solo

FIGURA 2.1 – Torre de Transmissão da Estação NDB



Fonte: (ABDULLA et al, 2005)

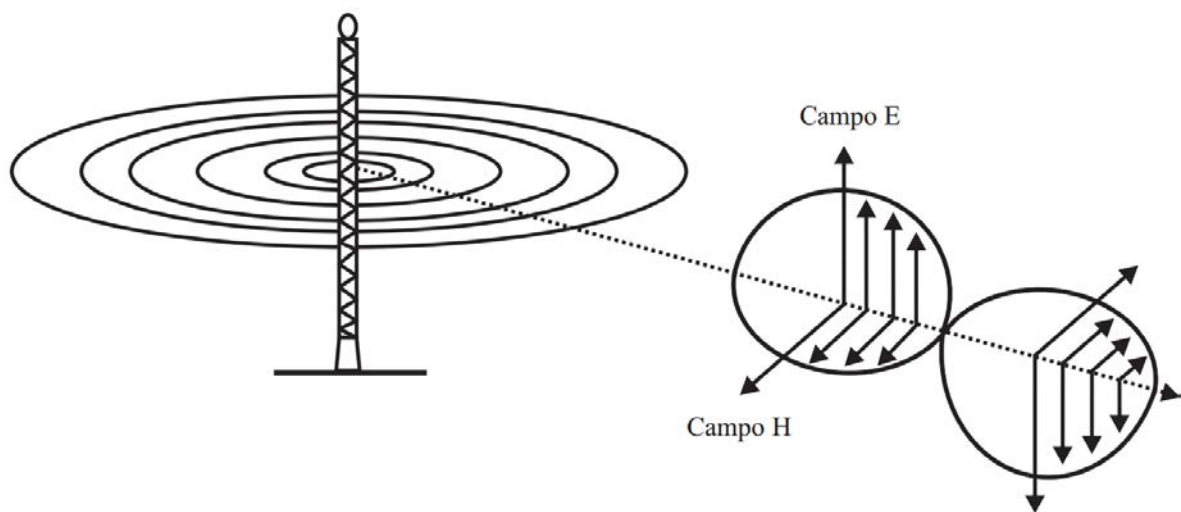
O uso de ondas de baixa frequência (LF) e de media frequência (MF) é devido a dois fatores, primeiro o fator histórico que na época não existiam transmissores de alta frequência

(HF), segundo devido que as ondas HF podem viajar pela ionosfera, a qual podem variar muito de acordo com dia, noite, estação e ciclo solar, podendo até mudar a polarização da onda

Os campos magnéticos e elétricos, são ortogonais, o que significa que eles estão orientados a 90 graus entre si. Para uma propagação vertical do campo elétrico, o campo magnético se desloca a partir da torre de transmissão, em círculos crescentes.

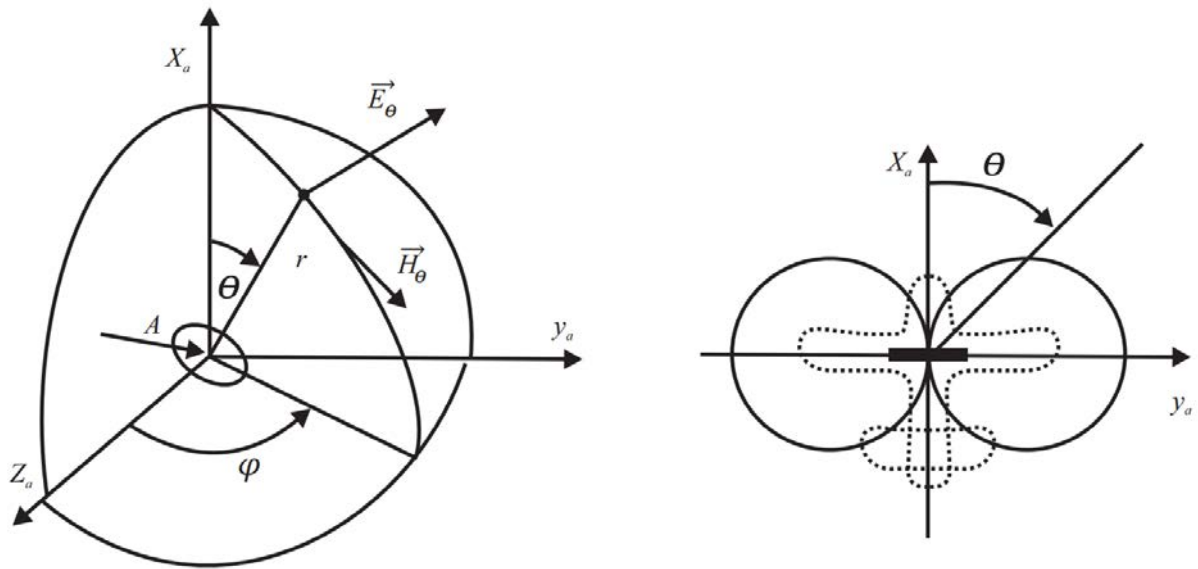
Na FIGURA 2.2 é representado a propagação das ondas pela estação terrestre.

FIGURA 2.2 – Sinal de onda da estação em terra. À esquerda, onda radial emitida pela torre. À direita, componentes E e H do campo da onda de rádio



Fonte: (HELFRICK, 2007)

As estações transmitem em todas as direções, dois sinais diferentes, *Loop* e *Sense*. As antenas instaladas no avião captam os sinais emitidos pelo NDB e fornecem um norte rádio magnético. O sinal *Loop* fornece uma trajetória com duas possibilidades de localização, a estação NDB pode estar na direção X ou na oposta desse ponto enquanto a *Sense* fornece um sinal para solucionar essa ambiguidade e guiar o avião para a direção correta, FIGURA 2.3

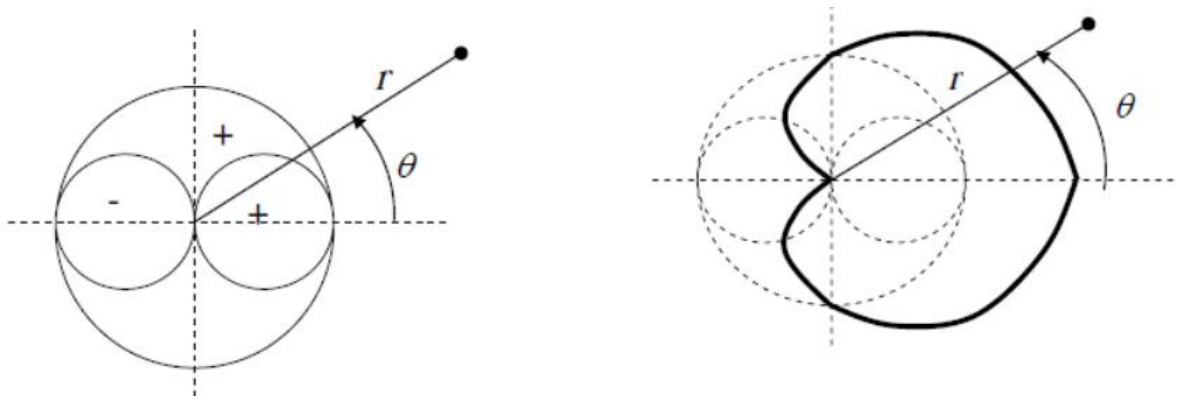
FIGURA 2.3 – Antena *Loop* na Aeronave

Fonte: (FERNANDES, 2006)

Onde X_a, Y_a, Z_a são os eixos da aeronave e r a distância entre o receptor e o transmissor.

Movendo-se a antena *Loop* e fazendo uso do ponto de nulo do sinal, podemos determinar em qual direção está o NDB com uma ambiguidade de 180°

A soma dos diagramas de uma antena *Loop* com o de uma antena *Sense* (omnidirecional) forma um diagrama com o formato de uma cardioide, FIGURA 2.4:

FIGURA 2.4 – Soma da Antena *Loop* com a *Sense*

Fonte: (FERNANDES, 2006)

Girando a antena Cardioide, soma da *Loop* com a *Sense*, e utilizando do ponto de nulo podemos determinar sem ambiguidade a direção do NDB.

A estação é identificada através de código Morse (normalmente três letras para auxílios principais de voo em rota e aerovias, e duas para auxílios secundários e procedimento de aproximação).

2.2 SISTEMA ADF

O Sistema *Automatic Direction Finder* (ADF) foi desenvolvido para facilitar a operação de encontrar uma rádio estação e navegar até sua direção. Com o sistema ADF nenhuma operação manual é necessária para encontrar a estação, continuamente o sistema indica o ponto a se seguir até o NDB.

Se voltarmos ao campo magnético recebido e considerar o goniômetro, temos duas componentes completas de um vetor, incluindo seu sinal. Usando o campo elétrico como referência, as polaridades dos componentes do vetor são conhecidas. A razão porque simplesmente alimentar a saída das antenas *Sense* e *Loop* somadas juntas à um receptor não podem produzir uma saída de erro é que nos perdemos a relação de fase entre os campos elétricos e magnéticos, perdemos o sinal dos vetores componentes.

Se os campos elétricos e magnéticos são processados, então a relação de fase não se perde e um erro é produzido como um sinal. O sinal de erro é amplificado e utilizado para rotacionar a antena *Loop*. Um método consiste em processar os sinais *Sense* e *Loop* em dois receptores idênticos, mas como existe uma alta probabilidade de os receptores não serem idênticos, isso induzirá dois deslocamentos de fase diferente. Para evitar isso devemos processar os sinais através do mesmo receptor.

Isso é feito marcando (*tagging*) os dois sinais de antena de forma que podem ser combinados, alimentados para o receptor e recuperados sem interferir mutuamente. Essa é o mesmo procedimento da multiplexagem, a qual utiliza mais de um sinal de informação na mesma gama de frequência.

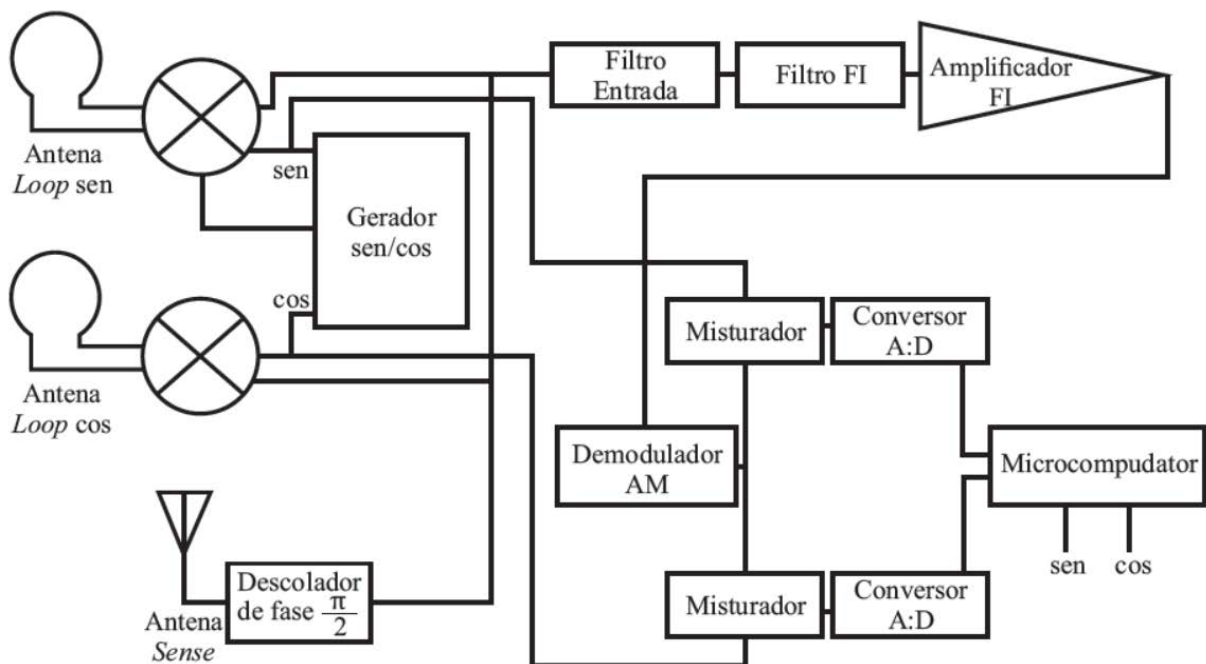
Um método de multiplexagem é a em quadratura, onde dois sinais ocupam o mesmo espectro. Na entrada do receptor existem três sinais; dois *Loop* e um *Sense* provenientes das saídas da antena. O sinal *Loop* é modulado em X e Y por um sinal seno e cosseno de baixa frequência, algo em torno de 45 Hz, A modulação será multiplexada usando um modulador que

produz uma saída de Banda Lateral Dupla e Portadora Suprimida (do inglês: *Double Sideband with Supressed Carrier DSB-SC*)

Em virtude da sua modulação em quadratura, as saídas podem ser alimentadas para um receptor de rádio e demoduladas facilmente de forma independente. Isso exige que os sinais sejam demodulados e multiplicados pelas funções seno e cosseno correspondentes. Um problema que ocorre na portadora suprimida é que a portadora deve ser reinserida para demodular o sinal. Nós não podemos usar a portadora a partir de qualquer posição do *Loop* porque pode estar em um ponto nulo e dessa forma não sabemos sua polaridade e orientação.

Para o receptor, o sinal aparece como uma portadora e uma banda lateral de mais ou menos 45 Hz de frequência. Referindo-se a FIGURA 2.5 os sinais de *loop* são multiplicados por uma função seno e cosseno com frequência da portadora de 45 Hz.

FIGURA 2.5 – Arquitetura do receptor ADF



Fonte: (HELFRICK, 2007)

Como uma onda portadora de amplitude constante está presente a partir da antena *Sense*, quando esse sinal é adicionado com os dois sinais de banda lateral dupla, o resultado é um sinal de amplitude modulada (AM). As informações dos dois *Loops* estão presentes nas bandas laterais, incluindo um sinal de amplitude. Um detector AM no receptor demodula as duas bandas laterais. Após a detecção o resultado disso é a soma de uma função seno e cosseno com

frequência de 45 Hz e fases coerentes com os sinais de modulação originais. As amplitudes das duas funções são proporcionais às amplitudes das antenas, incluindo o sinal que pode ser negativo ou positivo. Assim obtemos o que é preciso: dois sinais proporcionais à magnitude do vetor campo magnético juntamente com o seu sinal.

Para recuperar a amplitude dos dois sinais em quadratura de 45 Hz no detector AM, a saída é multiplicada pelas mesmas funções que modulam os sinais nas saídas das antenas. Depois de multiplicado, o resultado é filtrado ou integrado resultando em um nível DC proporcional à amplitude das antenas *Loop* e *Sense*.

O nível DC do detector AM é proporcional a portadora, a qual é a entrada da antena *Sense*. Uma vez que a saída da antena *Sense* não é uma função da posição da *Loop*, é utilizado um AGC (Controle Automático de Ganho) no receptor, assim fazendo a máxima saída do *Loop* é a mesma independente da amplitude do sinal recebido.

Com a magnitude e a polaridade das componentes X e Y do campo magnético, podemos gerar um vetor e assim mover o indicador do ADF, FIGURA 2.6, do display e do piloto automático

FIGURA 2.6 – Sistema ADF da Bendix King



Fonte: (ABDULLA et al, 2005)

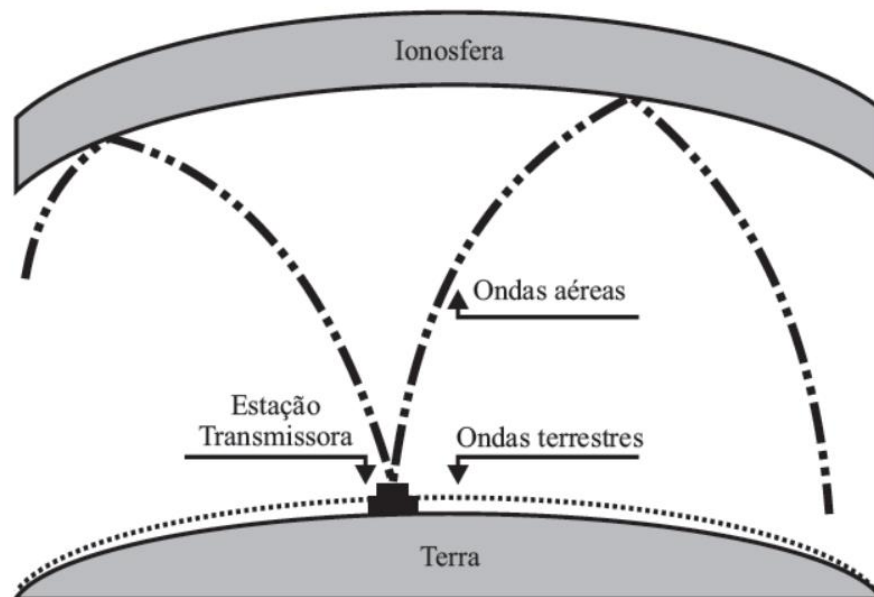
2.3 ERROS NO ADF

Existem diversas fontes de erros que podem afetar o sistema ADF. Pela mesma razão que as ondas eletromagnéticas propagam ao longo da terra por condutância, elas podem sofrer distorções na fuselagem de metal da aeronave. Essa distorção, no entanto, é cíclica, onde o erro gerado em um lado da aeronave é contrariado por um erro de sentido oposto do outro lado, é o chamado erro Quadrantal. Tais erros podem ser de cerca de 10 graus e solucionados calibrando o ADF em solo.

Outra fonte comum de erros são os efeitos atmosféricos:

Night effect: efeito que acontece logo após o pôr do Sol e logo antes do nascer do Sol. As ondas eletromagnéticas são refletidas pela Ionosfera e causam indicações errôneas, FIGURA 2.7;

FIGURA 2.7 – Propagação de ondas terrestres e aéreas



Fonte:(ABDULLA et al, 2005)

Shoreline effect: quando a estação emissora fica próxima da costa e a aeronave está voando sobre o mar, as ondas são refratadas apontando indicações incoerentes de trajeto;

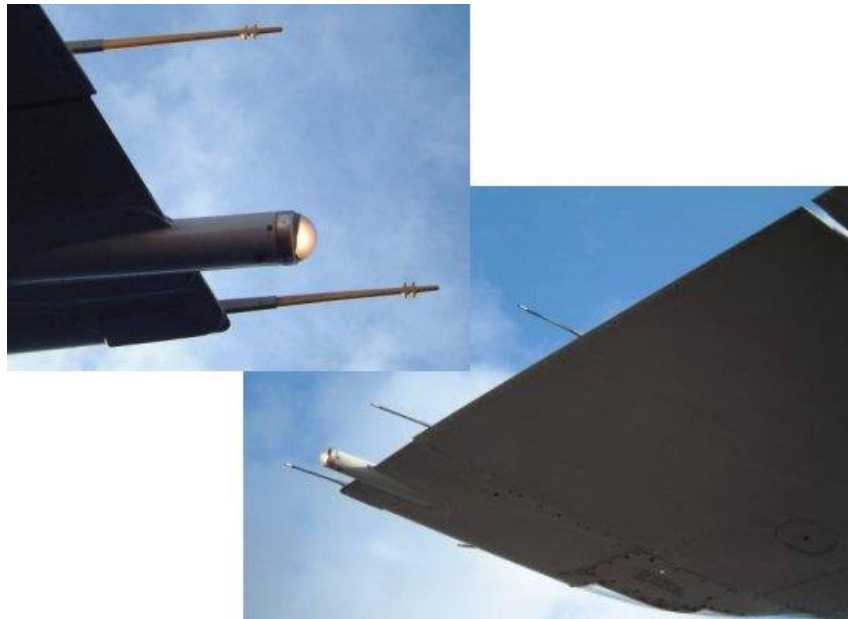
Mountain effect: obstruções significantes, como as montanhas, podem refletir e dobrar as ondas e também gerar distúrbios nas indicações;

Raios e precipitação: a estática presente nas nuvens são um grande problema. Chuva e raios causam indicações extremamente divergentes, é comum ver um apontamento em direção aos raios;

Não só as nuvens acumulam descargas elétricas, o movimento da aeronave através do ar também pode gerar esse acúmulo sobre a fuselagem, ao ponto do potencial elétrico se tornar tão elevado que se dissipa através de ionização para o ar adjacente. Uma vez que essa descarga está próxima da antena do ADF, ela pode produzir um forte ruído no sistema.

Para diminuir o acúmulo de cargas em uma aeronave, “arames pontiagudos” conhecidos como *Static Discharge Wick*, FIGURA 2.8, (pávios de descarga elétrica) são conectados a partes protuberantes da aeronave. Eles aumentam o campo elétrico na extremidade pontiaguda descarregando-o a uma tensão mais baixa, reduzindo assim consideravelmente o nível de ruído.

FIGURA 2.8 – Static Discharge Wick no Wingtip do Boeing737



Fonte:(ABDULLA et al, 2005)

3 VOR: VHF OMNI-RANGE

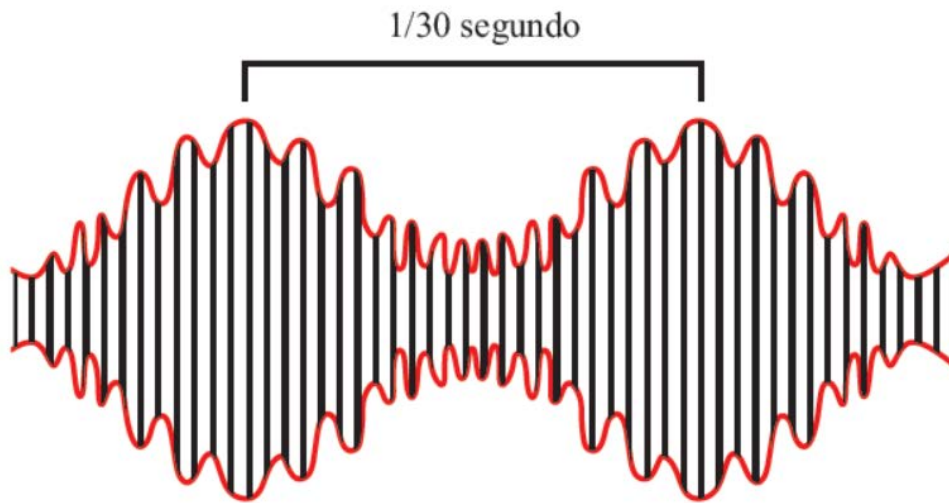
O *VHF Omnidirectional Range Radio* (VOR) é um sistema que emite uma seleção contínua de sinais que informa a aeronave qual a sua radial em relação ao VOR. Os sinais são propagados no espectro de alta frequência, 108,00 – 117,950 MHz, os quais sofrem pouca interferência elétrica, não são afetados por ondas terrestres ou aéreas e se propagam quase que em linhas retas.

3.1 SINAL VOR

O sinal VOR é gerado por um padrão de rotação da antena direcional. Uma analogia simples utiliza sinais de luz no lugar de ondas de rádio. Imaginem um farol com um feixe de luz rotativa em um aeroporto que pisca branco quando ele se alinha com a visão do piloto. Quando a luz se move através do norte magnético, provoca uma segunda luz para iluminar em todas as direções. Por isso todas as aeronaves dentro do alcance, independentemente da posição, veem um marcador para o norte magnético. Cada posição da aeronave pode agora ser determinada medindo o tempo entre ver o norte magnético e quando uma luz piscante é observada. Desse modo é possível estabelecer linhas retas até o farol. No caso do VOR são emitidas 360 radiais para fora da estação.

A estação VOR emite um sinal de referência Omnidirecional, (mesmas propriedades em todas as direções), FIGURA 3.2, e um sinal variável direcional, FIGURA 3.1. O sinal variável aumenta e diminui na amplitude de 30 vezes por segundos. No receptor da aeronave irá aparecer uma amplitude modulada de 30% com uma onda senoidal com frequência de 30 Hz. Em vez de medir o tempo de atraso, o receptor VOR mede a fase.

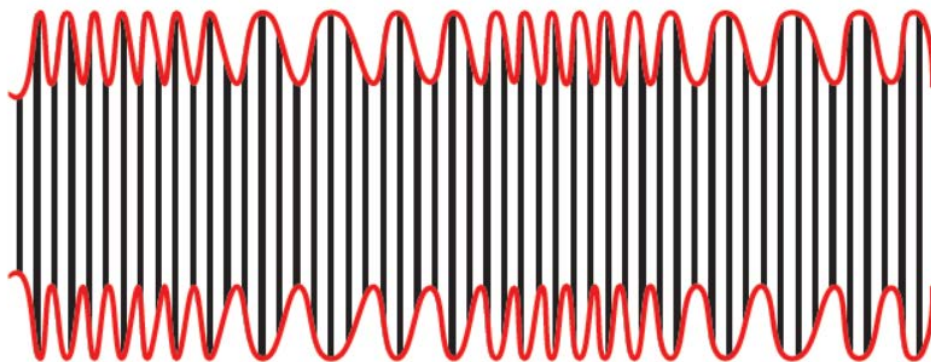
FIGURA 3.1 – Sinal Variável



Fonte: (BARBOSA, 2009)

O sinal de referência deve ser modulado com uma onda senoidal para realizar a medição do ângulo de fase. Uma vez que a portadora já contém 30 Hz de modulação para aplicar na referência, não podemos modular a portadora com 30Hz, os dois sinais poderiam gerar interferência. O segundo sinal de 30Hz é então utilizado como uma subportadora no transmissor VOR. O sinal de referência deve estar em fase com o sinal variável quando apontado para o norte magnético.

FIGURA 3.2 – Sinal de Referência

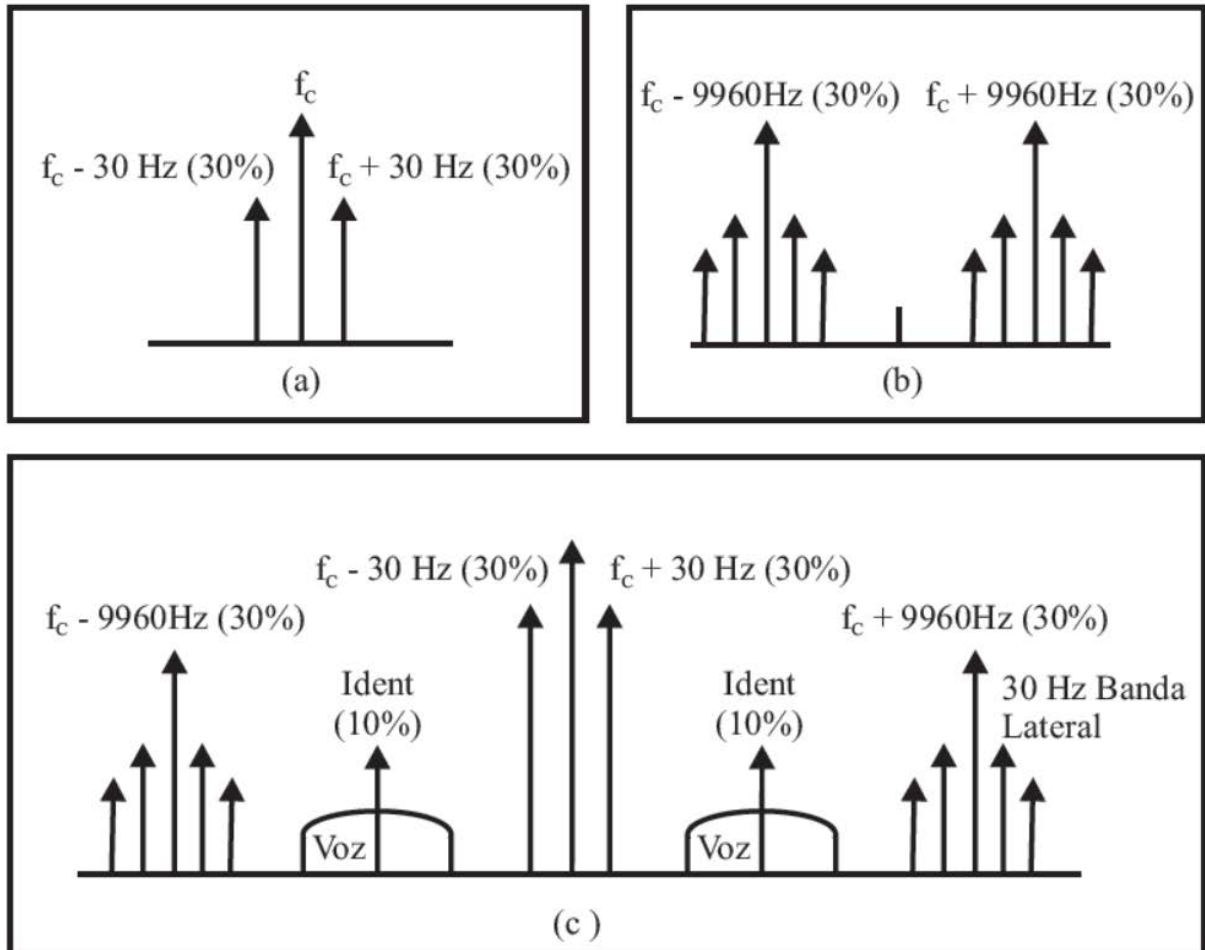


Fonte: (BARBOSA, 2009)

Para evitar a modulação de 30 Hz na referência proveniente do sinal variável, uma subportadora de 9960 Hz é modulada em frequência (FM) com uma função seno de 30Hz. O desvio de pico da subportadora 9960Hz é de 480 Hz e uma vez que a referência é uma senoide de 30 Hz, o índice de modulação é 16. A FIGURA 3.3 mostra o espectro da portadora com

bandas laterais de 30 Hz geradas a partir da modulação em amplitude produzida pela antena rotativa. O segundo espectro mostra a portadora de mesma frequência exceto que está é de banda lateral dupla e portadora suprimida com sinal de referência de 9960 Hz.

FIGURA 3.3 – Espectro do sinal VOR



Fonte: (HELFRICK, 2007)

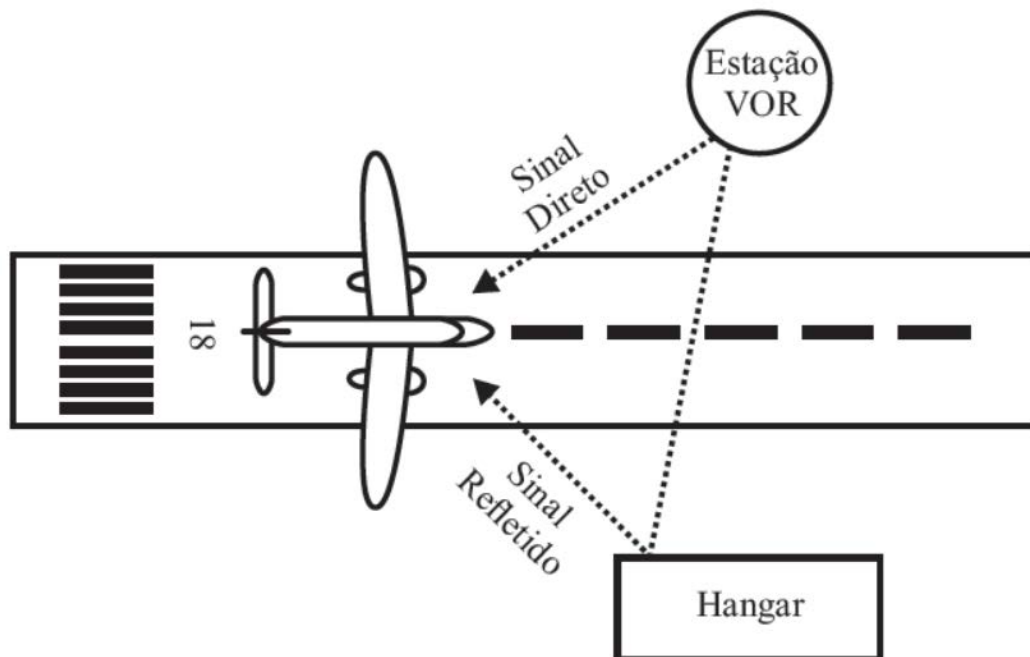
Os dois sinais irradiados são adicionados no espaço e o sinal que chega no receptor VOR da aeronave é a soma desses sinais, mostrado na FIGURA 3.3C. Além disso, um sinal de voz e um código Morse de identificação também são adicionados, o resultado é um sinal AM onde a variável de modulação de 30 Hz modula a portadora de 30% bem como a subportadora de 9960 Hz.

3.2 ERROS NO VOR

O maior problema da propagação de sinais nas estações VOR, assim como qualquer sistema de rádio navegação, é a propagação por caminhos múltiplos (do inglês: *Multipath*). Anteriormente foi apresentado o *multipath* no momento que foi discutido o erro *night effect* o qual ocorre quando a onda emitida em terra é refletida na ionosfera e são recebidas pelo receptor em tempos diferentes, causando interferências

Considere um exemplo de como o *multipath*, FIGURA 3.4, pode distorcer um sinal VOR. Suponha que um aeroporto tenha uma estação VOR a qual emite um sinal que é recebido na aeronave por um caminho direto e outro refletido em um hangar. A diferença de tempo desses sinais elétricos recebidos pelo receptor gera um deslocamento de fase

FIGURA 3.4 – Propagação *Multipath*



Fonte: (HELFRICK, 2007)

3.3 VOR DOPPLER

A estação VOR Doppler disposta na FIGURA 3.5, ou DVOR, é constituída de uma antena direcional mais potente que pode reduzir as distorções *multipath* direcionando o sinal longe dos objetos que podem refletir.

Para entender como o DVOR funciona, vamos tomar que exista uma antena direcional fixa no centro e em volta um par de antenas direcionais

FIGURA 3.5 – Estação VOR Doppler



Fonte:(ABDULLA et al, 2005)

Imagine que essas duas antenas estão se movendo rapidamente ao longo de uma trajetória circular em torno da antena central.

Uma delas se move com a seguinte frequência:

$$F_U = f_c + 9960 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Onde f_c é a frequência da portadora VOR.

A geometria do deslocamento Doppler é mostrado na FIGURA 3.6. Considere que a distância da aeronave à estação seja tal que o ângulo formado entre o movimento da antena e

o avião sejam pequenos. Portanto a velocidade do movimento da antena é percebida pela aeronave simplesmente como a componente x da velocidade, que é:

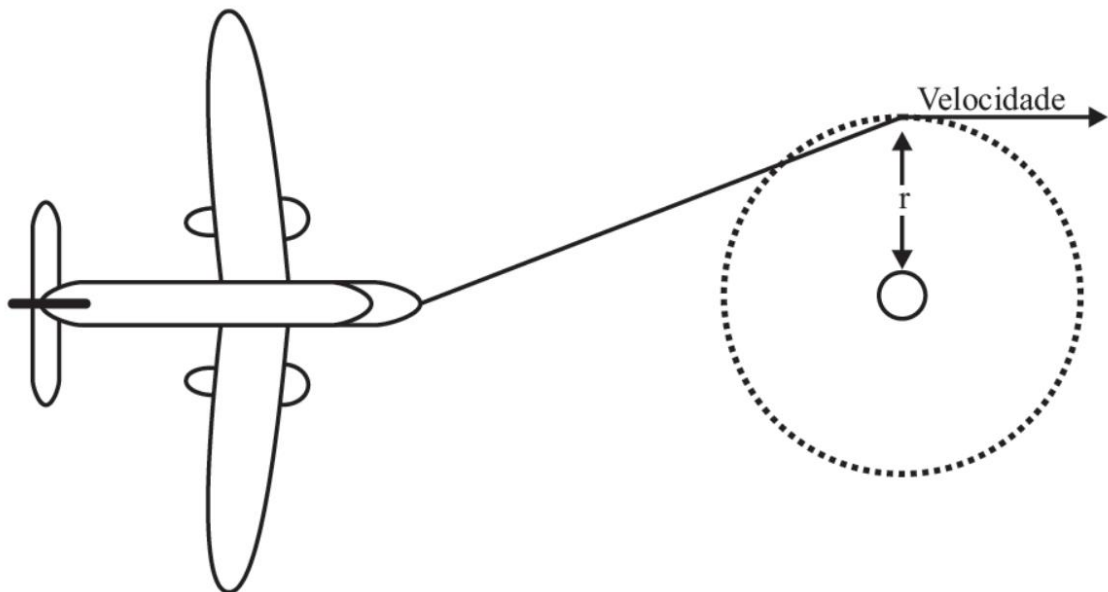
$$V_x = V \sin \theta \quad (3.2)$$

Onde V_x é a componente x da velocidade na direção da aeronave, V é a velocidade tangencial do movimento da antena e θ é o ângulo em torno do círculo medido a partir do eixo x. O deslocamento Doppler para as fontes que se deslocam a velocidades muito inferiores à velocidade da luz é:

$$\Delta f = \frac{V_x}{\lambda} = \frac{V_x F_U}{c} = (V F_U / c) \sin \theta \quad (3.3)$$

Onde Δf é o deslocamento de frequência, λ o comprimento de onda e c a velocidade luz.

FIGURA 3.6 – Geometria do Deslocamento Doppler



Fonte: (HELFRICK, 2007)

A partir da equação (3.3) vemos que o sinal recebido na aeronave é a frequência modulada com uma função seno. Se a função seno tem um período de 1/30 segundos, então a frequência da modulação é 30Hz.

A segunda antena é alimentada a partir de uma fonte não modulada com uma frequência de:

$$F_L = f_c + 9960 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

O efeito Doppler recebido dessa antena é de mesma modulação senoidal com o mesmo desvio de frequência de pico, exceto que é de 180 graus fora de fase com a outra antena. Isto é, quando uma antena está no pico máximo negativo a outra antena está no pico máximo positivo. O efeito Doppler para a segunda antena é:

$$\Delta f = \frac{V_x}{\lambda} = \frac{V_x F_L}{c} = (V F_L / c) \sin(\theta + \pi) = -(V F_L / c) \sin \theta \quad (3.5)$$

O VOR recebe sinais de ambas as antenas direcionais, moveis e fixas. O sinal recebido é de 30% da amplitude modulada com uma onda senoidal de 30 Hz da frequência da portadora.

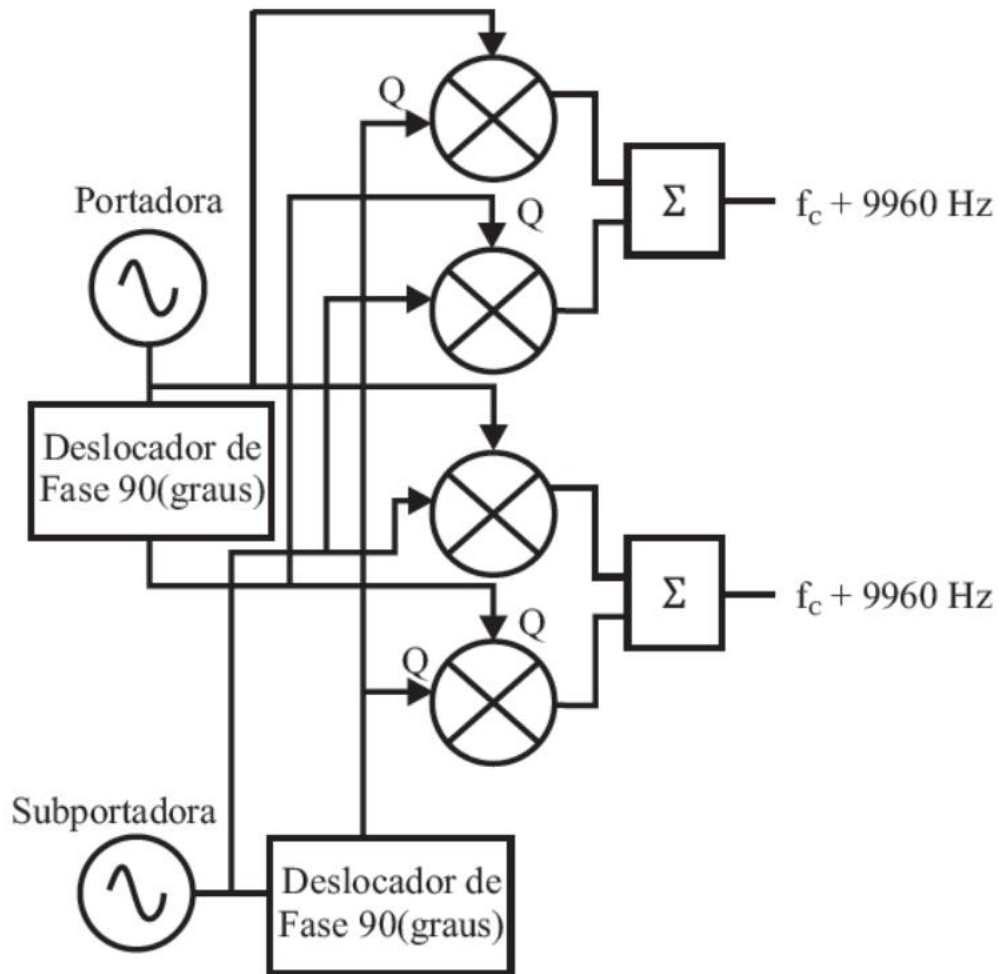
Há também uma banda lateral superior na frequência da portadora mais 9960 Hz que é modulada em frequência devido ao efeito Doppler, e uma banda lateral inferior que é de frequência modulada, para fora da fase, com banda lateral superior com a mesma função senoide. O resultado é de um VOR recebendo o sinal de uma estação convencional.

Embora o sinal parece ser o mesmo que o de um VOR convencional, o ângulo de fase da DVOR que muda quando os aviões se movem em torno do transmissor não é o sinal de 30 Hz variável, mas sim o sinal de referência.

A estação DVOR não possui um par de antenas moveis, a força devido a rotação seria muito grande tornando o sistema caro, perigoso e pouco confiável. A movimentação discutida anteriormente é realizada de forma eletrônica

O centro de uma estação terrestre DVOR é uma antena de polarização horizontal omnidirecional que transmite uma portadora com 30% da onda de 30Hz AM. Ao redor da antena central, encontra-se um anel de 56 antenas omnidirecionais. Essas antenas funcionam em pares e comutadas uma com a outra para criar o efeito da antena se movendo, uma com a frequência da portadora mais 9960 Hz e a outra com a frequência da portadora menos 9960 Hz. Essas duas frequências devem ser precisas, por isso são geradas pelo método heteródino, uma função seno com um oscilador de alta frequência. Tal como na FIGURA 3.7 quatro multiplicadores são usados para gerar as bandas laterais superior e inferior que posteriormente são filtradas e amplificadas para produzir o sinal.

FIGURA 3.7 – Modelo de Geração dos Sinais DVOR



Fonte: (HELFRICK, 2007)

3.4 RECEPTOR VOR

O sistema VOR embarcado nas aeronaves é um receptor AM convencional com circuitos para demodular os sinais variáveis e de referência e fornecer uma indicação do desvio de curso (CDI, do inglês: *Course Deviation Indication*), a integridade do sinal NAV e o TO/FROM que indica se a aeronave está voando em direção ou afastando-se da estação, bem como o *Omnibearing Selector* (OBS) que é usado para selecionar o curso pelo piloto

FIGURA 3.8 – Indicador VOR

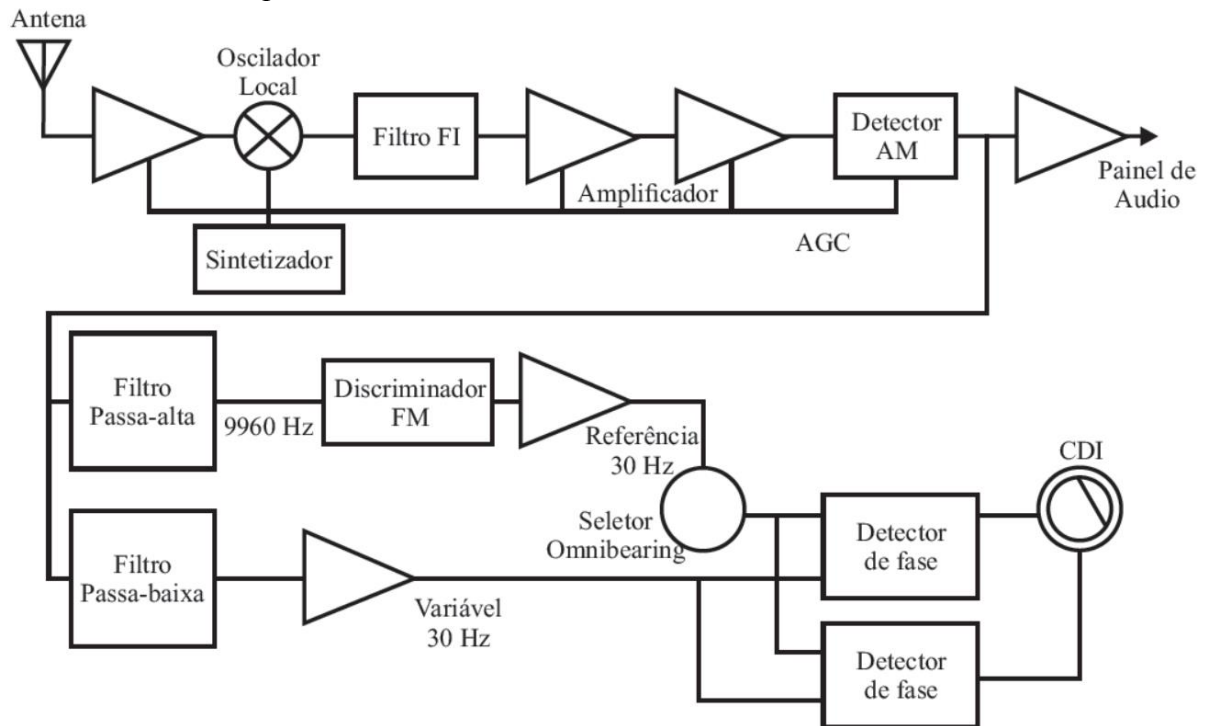


Fonte: (HERSCH LOGBOOK, 2012)

Se o receptor AM recebe um sinal como o representado na FIGURA 3.3C, a saída demodulada será constituída por uma onda senoidal de 30 Hz, uma onda FM de 9960 Hz além do sinal de voz e o código Morse para identificação. Este sinal é denominado “NAV Composite”, indicando que se trata de todas as componentes do sinal VOR juntos. Para recuperar a referência de 30Hz da subportadora de 9960 Hz, um demodulador FM também se torna necessário, como mostrado no diagrama de blocos, FIGURA 3.9

O receptor AM usado é um super-heteródino comum, o qual converte o sinal recebido da antena em uma frequência intermediária fixa (FI). Na primeira parte, as ondas eletromagnéticas são convertidas em correntes e tensões que serão aplicadas a um amplificador com um filtro LC variável na entrada que tem a função de sintonizar apenas uma estação. Na etapa do Oscilador Local ele gera uma frequência diferente para cada emissora selecionada, afim de produzir no misturador uma frequência intermediária. Nos Amplificadores de FI, a frequência é amplificada e filtrada por um filtro passa faixa diminuindo assim os ruídos e interferências e fornecendo um sinal com nível semelhante, independente da estação. Em seguida no Detector AM o sinal de áudio é separado da portadora de frequência intermediária, tal sinal de áudio é então amplificado para que excite corretamente os altos falantes e reproduza o som

FIGURA 3.9 – Receptor VOR e conversor de sinal



Fonte: (HELFRICK, 2007)

Os sinais são separados em três pelos filtros presentes; áudio, variável e referência. O filtro passa baixa separa a variável de 30 Hz do restante do sinal NAV. Um filtro passa alta irá executar a mesma função para a subportadora de 9960 Hz. Um filtro passa faixa separa o equivalente em um sinal de áudio na faixa de 300 Hz – 3 KHz que é distribuído para o painel de comutação onde pode ser usado pelos fones de ouvido ou alto falantes.

Existem agora dois sinais de 30 Hz, na qual a relação de fase entre os dois é o *Omni Bearing*. Teoricamente, o ângulo de fase pode ser medido entre os dois sinais de 30 Hz exibindo a radial a qual a aeronave está. No entanto o objetivo do VOR é fornecer uma indicação do desvio de rumo do curso ou da radial selecionado. Em vez de medir o ângulo de fase, o VOR desloca a fase de um dos sinais e, em seguida, compara a fase com o outro sinal de 30 Hz. O valor do deslocamento é o curso selecionado pelo piloto, não o curso real, e a saída do detector de fase é a indicação do desvio de rumo (CDI).

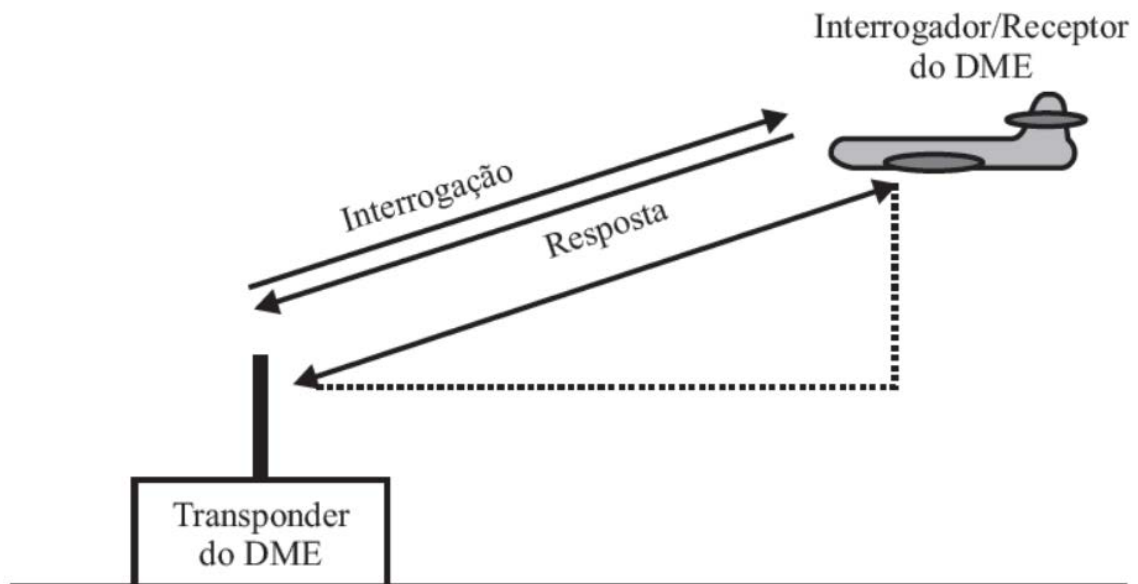
4 DISTANCE MEASURING EQUIPMENT

Os auxílios à navegação discutidos até agora, ADF e VOR são métodos de encontrar um caminho para o destino. Ambos não dão informações do quão longe estamos da estação a menos que a aeronave esteja diretamente acima da estação VOR e o indicador TO/FROM alterne, ou no caso do ADF o ponteiro inverta quando passando sobre a torre NDB.

Uma vez que a velocidade das ondas de rádio, assim como toda onda eletromagnética, é constante se propagando no meio em questão, o ar, o tempo de propagação da onda nos permite medir a distância.

Usando o tempo decorrido a partir de quando um impulso da onda de rádio é transmitido até que um pulso refletido é percebido, é possível determinar a distância do alvo. Para mensurar a distância de uma estação VOR precisamos apenas de um sinal de retorno a partir da estação, em resposta a uma “interrogação” do DME, FIGURA 4.1.

FIGURA 4.1 – Interrogação e resposta do DME



Fonte: (FERNANDES, 2006)

Um termo importante neste estudo é a “milha radar” que assim como o “ano luz”, é uma medida de tempo e não de distância. A milha radar é o tempo para que o sinal percorra a distância de uma milha náutica e retorne, ou seja o tempo para percorrer duas milhas náuticas.

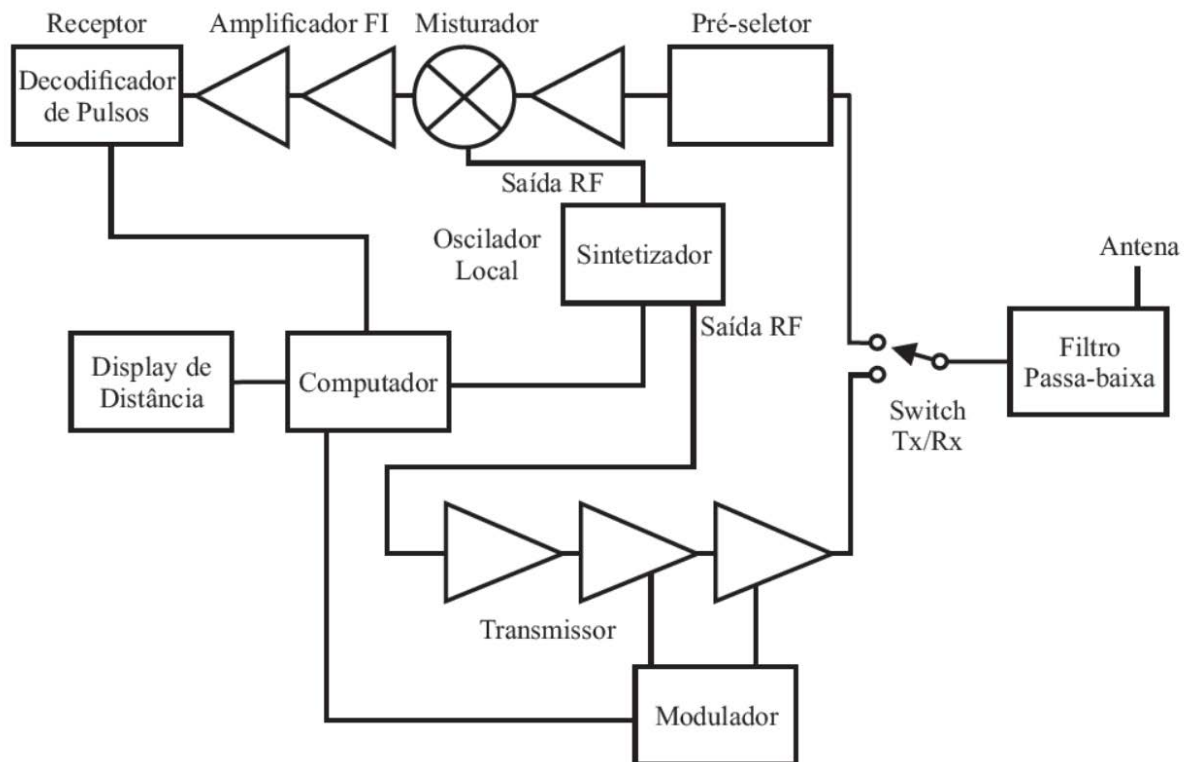
Uma milha náutica é 1852 metros; portanto uma milha radar é:

$$T = (1852 \times 2) / c = 3704 / 3^8 = 12.35 \mu s \quad (4.1)$$

4.1 INDICADOR DME

Na figura FIGURA 4.2 é mostrado o diagrama de blocos de um sistema DME embarcado na aeronave. Assim como no VOR, o super-heteródino pode ser utilizado também. O sintetizador fornece canais de 1 MHz na faixa de frequência 1041 até 1150 MHz, frequência UHF. O receptor é um super-heteródino com frequência intermediária de 63 MHz.

FIGURA 4.2 – Diagrama de blocos do interrogador DME



Fonte: (HELFRICK, 2007)

O display DME é mostrado na FIGURA 4.3, nele é indicado a distância e a estação selecionada:

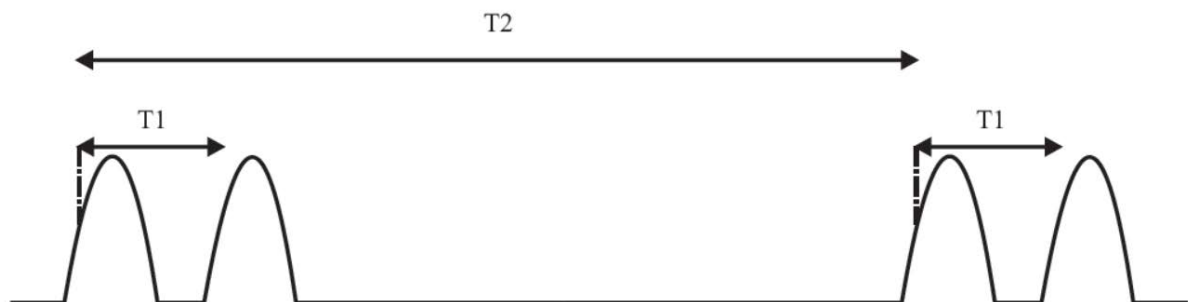
FIGURA 4.3 – Indicador DME embarcado nas aeronaves



Fonte: (FARIA, 2011)

Uma vez que o receptor funciona com uma gama de níveis de sinal diferente, o controle automático de ganho se torna necessário. O detector de pulso é aplicado ao detector AM e o valor de pico é comparado com a referência. A tensão de erro é alimentada de volta para o controle de ganho do amplificador de FI. Além de controlar o ganho de pico do par de pulsos, FIGURA 4.4, alguns DME são capazes de detectar apenas os pares de pulsos com a separação correta entre eles. Visto que a banda L, 950 – 1450 MHz, é compartilhado com outros sistemas, essa detecção impede que interferências sejam capturadas.

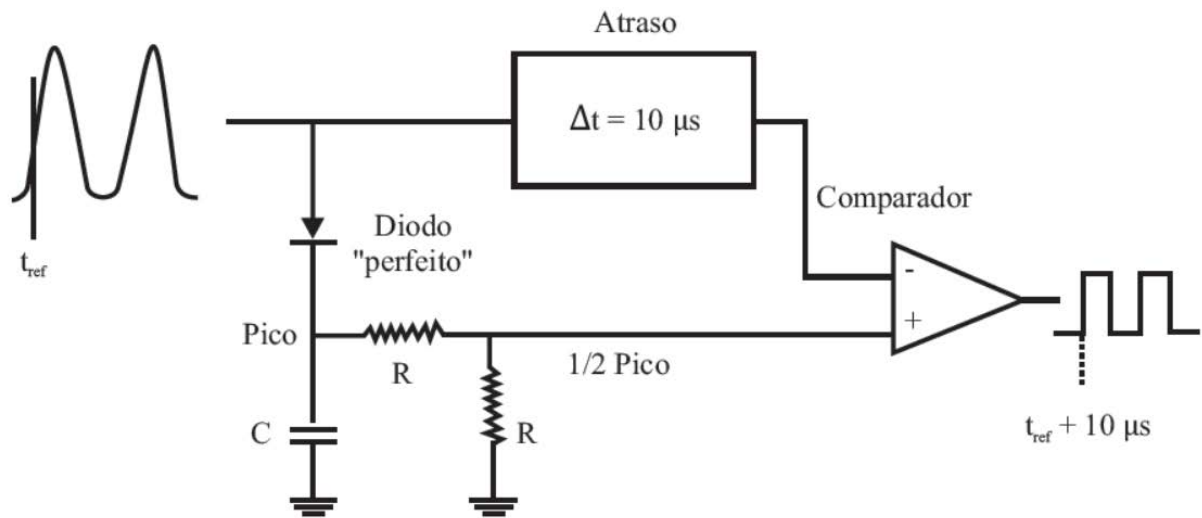
FIGURA 4.4 – T1: Período constantes dos pares de pulso; T2: Período variável entre os pares de pulso



Fonte: (FARIA, 2011)

O ponto de amplitude de 50% do pulso deve ser determinado com precisão pelo sistema DME, o dilema é encontrar esse valor antes que ele ocorra. Uma técnica emprega o primeiro pulso como referência para encontrar a metade do segundo pulso. Tal método consiste em passar o primeiro pulso por um atraso, e em seguida compara-lo com metade do pulso sem atraso. Uma vez que o pulso atrasado cruza o ponto de meia amplitude, a saída do comparador muda de sinal. Esse ponto é o nosso tempo de referência mais $10 \mu\text{s}$, FIGURA 4.5

FIGURA 4.5 – Detector de ponto de amplitude de 50%

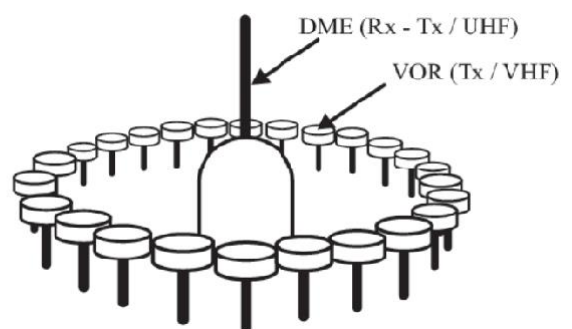


Fonte: (HELFRICK, 2007)

4.2 ESTAÇÃO DME

A estação terrestre do DME, FIGURA 4.6, é bastante semelhante ao receptor DME embarcado nas aeronaves, só que em reverso. Diferentemente do receptor que interroga e recebe uma resposta, a estação DME recebe um interrogatório e, após um tempo, transmite uma resposta. Embora haja semelhança na transmissão e recepção dos pares de impulsos gaussianos na banda L, há grandes diferenças nos sistemas à bordo e solo.

FIGURA 4.6 – Estação VOR/DME

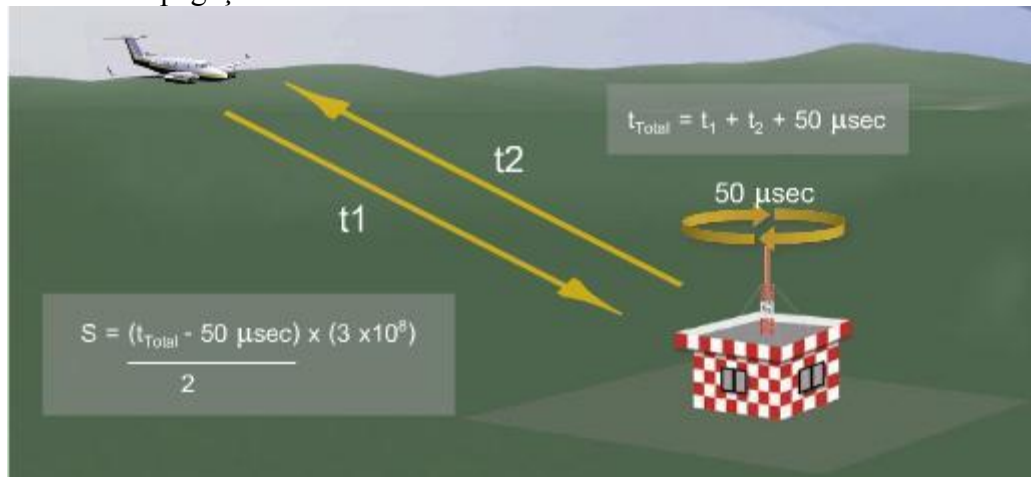


Fonte: (ABDULLA et al, 2005)

Visto que o receptor transponder em solo deve responder a vários sinais e em momentos distintos, o controle automático de ganho não deve ser utilizado. A solução prática nesse caso é um receptor logarítmico, o qual comprime a grande faixa dinâmica de sinais recebidos. Como por exemplo, se o receptor logarítmico tem um fator de 0,1 volt por dB, então 60 dB de faixa de sinal é comprimido em um intervalo de 6 volts.

Para prevenir problemas de funcionamento devido a colisões dos pedidos de interrogação, o receptor suprime a recepção a partir do momento que um par de pulsos é decodificado. Para uma interrogação válida, o receptor é proibido de receber por 100 μs . Durante este tempo a estação está preparando para transmitir a resposta do primeiro atraso de 50 μs , e em seguida, transmitir a resposta, FIGURA 4.7

FIGURA 4.7 – Propagação do sinal DME



Fonte: (FARIA, 2011)

5 INSTRUMENT LANDING SYSTEM

O ILS é um conjunto de sistemas para auxiliar no pouso por instrumentos, e é composto pelos seguintes componentes abaixo:

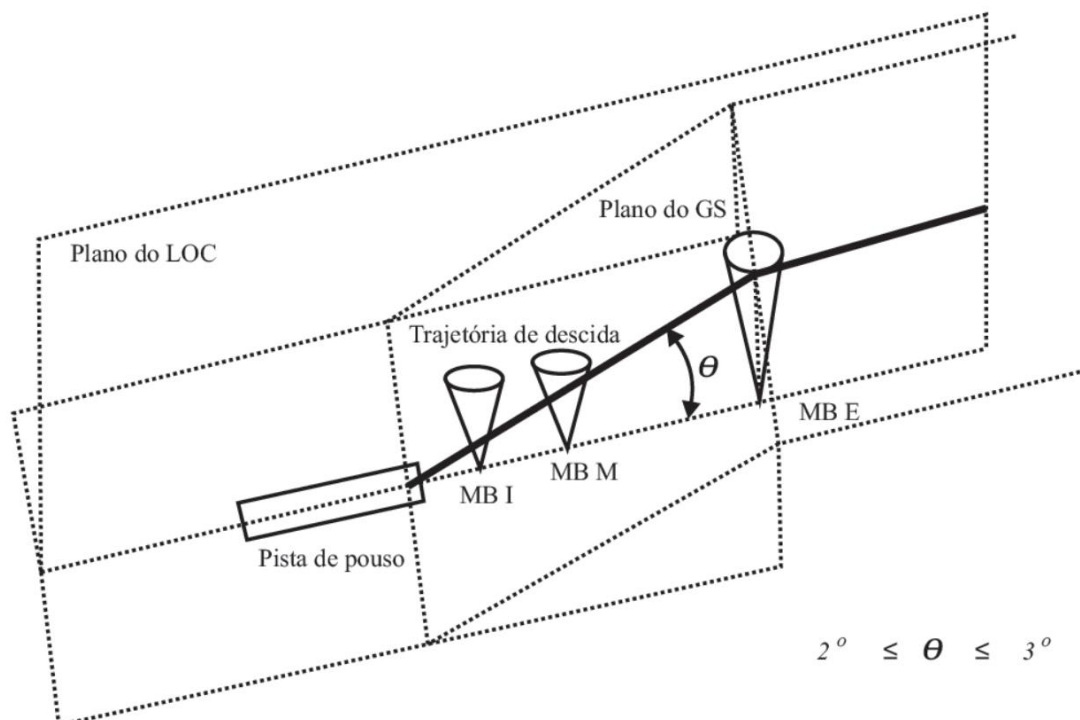
Localizer (LOC): Gera um feixe de rádio ao longo da trajetória de aproximação que é um prolongamento do eixo da pista de pouso. Uma vez que o feixe é interceptado, a abordagem é feita em linha reta na direção da pista. O localizador transmite na faixa de navegação VHF de 108.1- 111,95 MHz, disponibilizando um total de 40 frequências, dos quais 38 são utilizados para navegação e duas para fins de testes;

Glide Slop (GS): Gera a rampa de planeio da aeronave (plano oblíquo à pista de pouso). O caminho de aproximação é uma descida de 3 graus medido a partir da horizontal. O *Glide Slop* opera no espectro UHF, 329,15-335,00 MHz, e cada frequência é combinada com o *Localizer*, obtendo assim um total de 40 frequências;

Marker Beacon (MB) – Gera marcadores (interno, médio e externo) que irradiando na vertical e dispostos em um prolongamento do eixo da pista de pouso, sinalizam os pontos para a tomada de decisão, pouso/arremetida, e o início da rampa de planeio do GS.

Abaixo é possível observar os três marcadores ILS em plano, FIGURA 5.1

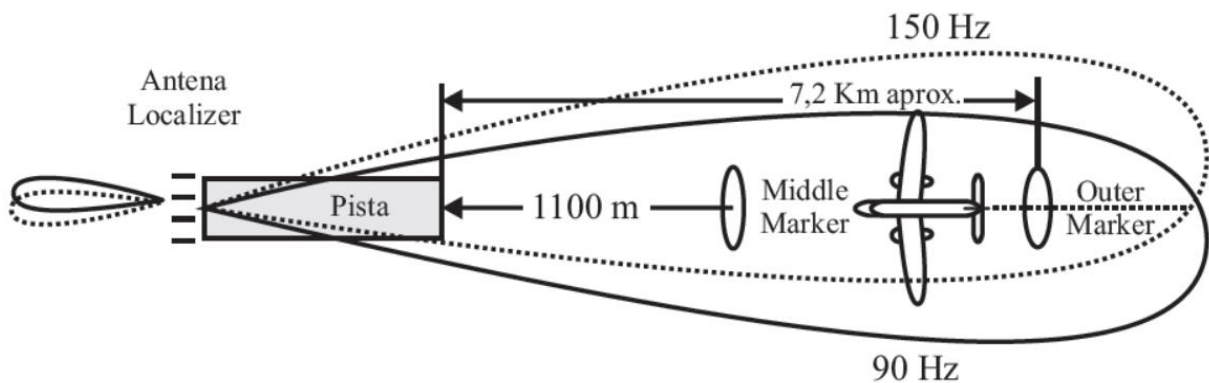
FIGURA 5.1 – Planos do ILS; *Localizer*, *Glide Slop* e *Marker Beacon*



5.1 LOCALIZER

Para entender o *Localizer*, imagine duas antenas com um feixe muito estreito, horizontalmente polarizadas. Uma delas emite um sinal modulado em amplitude em 40% com uma onda senoidal de 90 Hz, como mostrado na FIGURA 5.2. A segunda antena, é alimentado por um sinal com exatamente a mesma portadora, mas com uma onda 40% de 150 Hz senoidal.

FIGURA 5.2 – Feixe de ondas do *Localizer*



Fonte: (HELFRICK, 2007)

Além disso, estas antenas são deslocadas alguns graus a partir do eixo da pista, como mostrado acima. Se o receptor da aeronave está posicionado na linha central da pista prolongada, então serão recebidas quantidades iguais de energia a partir de ambas as antenas. Portanto, as bandas laterais de 90 Hz e 150 Hz são recebidas com intensidade igual, e a portadora com o dobro da intensidade, uma vez que é recebido em quantidades iguais de cada antena.

Se a aeronave se afastar do eixo da pista, o receptor irá detectar mais modulação de um tom e menos do outro. A amplitude da portadora pode variar um pouco que não afeta o sistema. Quando a percentagem de modulação de um tom é maior do que o outro, o receptor *Localizer* irá exibir um desvio no indicador.

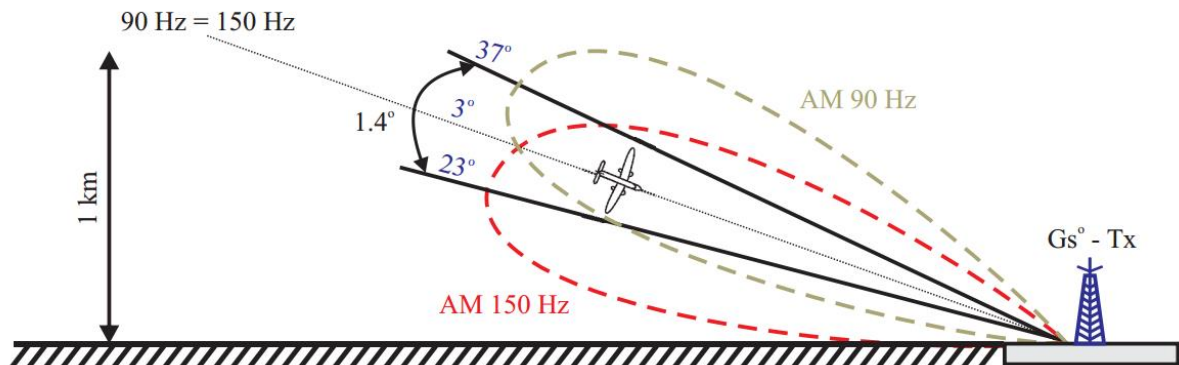
Na FIGURA 5.3 um exemplo real da antena *Localizer*.

FIGURA 5.3 – Antena *Localizer*

Fonte: (ABDULLA et al, 2005)

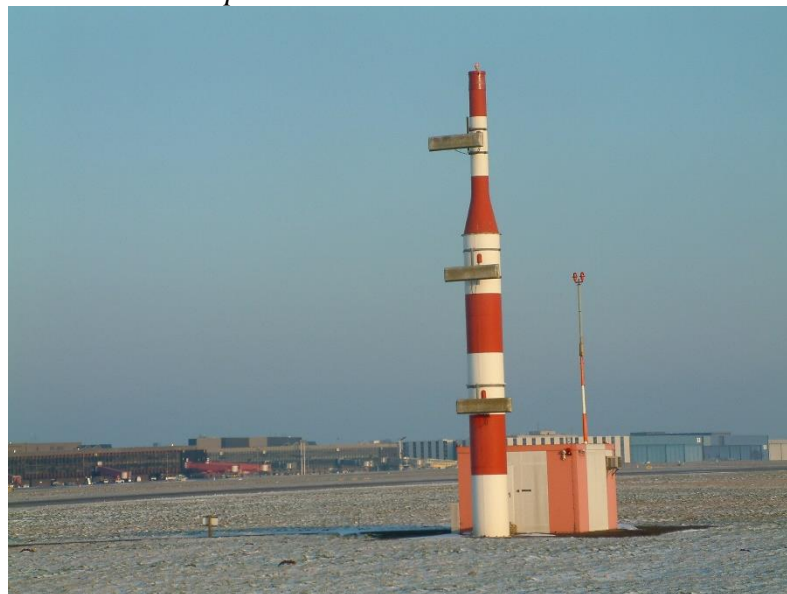
5.2 GLIDE SLOPE

O *Glide Slope* fornece uma orientação de inclinação de planagem, de um modo praticamente idêntico ao do *Localizer* que fornece uma linha prolongada central da pista. Há diferenças, mas os princípios são os mesmos. O *Glide Slope* está polarizado horizontalmente, FIGURA 5.4. A porcentagem de modulação para cada antena é de 80%. Assim, a modulação para cada tom é de 40%.

FIGURA 5.4 – Feixe de ondas do *Glide Slope*

Fonte: (ABDULLA, 2005)

A antena terrestre do *Glide Slope*, FIGURA 5.5, em teoria, é um *Localizer* que virou de lado, mas existem diferenças significativas. A primeira é que o GS é sensível a reflexões do chão. No *Localizer* esse fator não é significativo porque o feixe de ondas abrange tão longe para a esquerda como o faz para a direita. No caso do *Glide Slope*, a descida é de cerca de 3 graus em relação à horizontal.

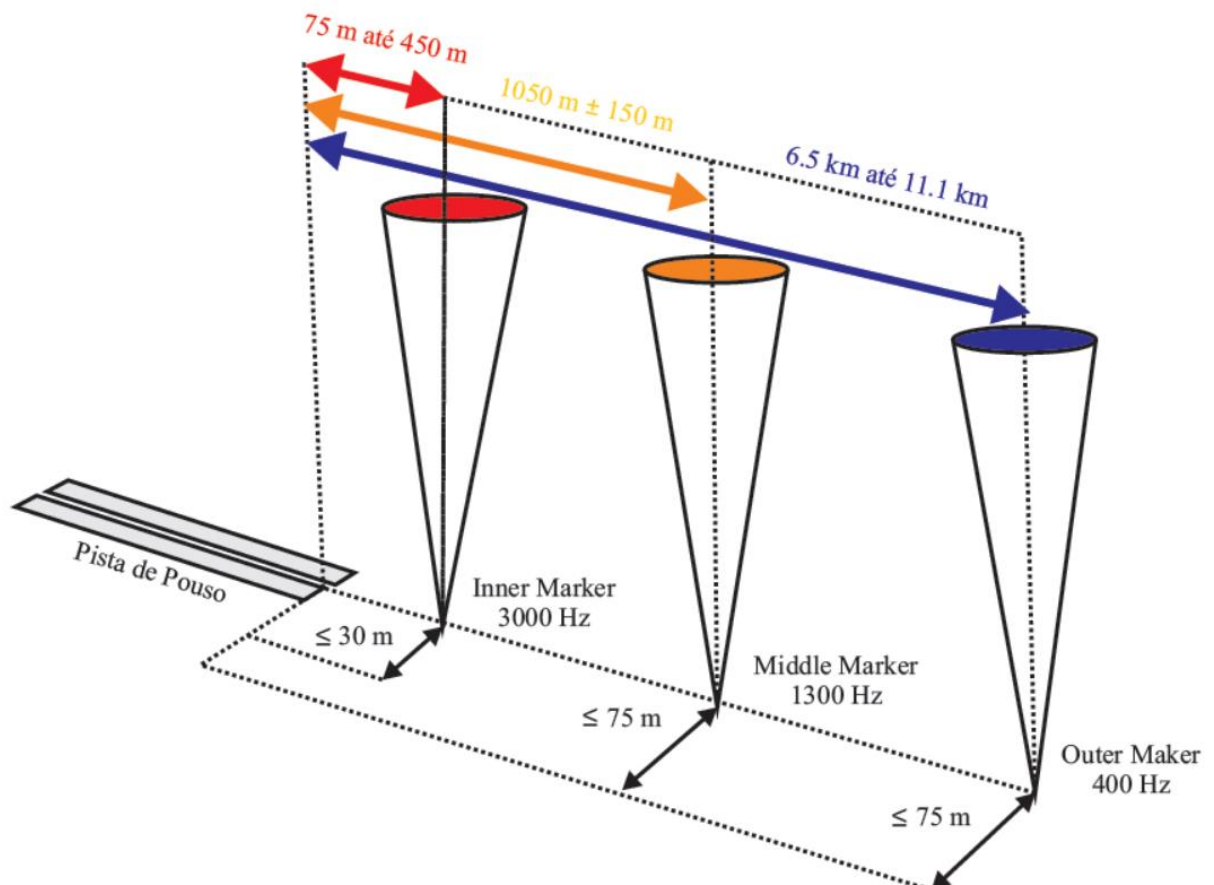
FIGURA 5.5 – Antena *Glide Slope*

Fonte: (ABDULLA et al, 2005)

5.3 MARKER BEACON

Durante uma aproximação por instrumentos, a posição da aeronave é verificada pelo *Marker Beacon*. É um transmissor de 75 MHz, com uma antena direcional dirigida para cima. A potência de saída do transmissor MB não é tão grande, o sinal só é recebido quando o avião está diretamente sobre o feixe da antena. A aeronave é equipada com um receptor de 75 MHz e uma antena na barriga. O receptor não é altamente sensível, pela mesma razão que o transmissor MB não tem alta potência. A aeronave deve receber o sinal apenas quando está diretamente acima da antena. Há três tipos de *Marker Beacons*: *Outer Marker*; *Middle Marker*; *Inner Marker*, FIGURA 5.6.

FIGURA 5.6 – Tipos de *Marker Beacons*



Fonte: Autor

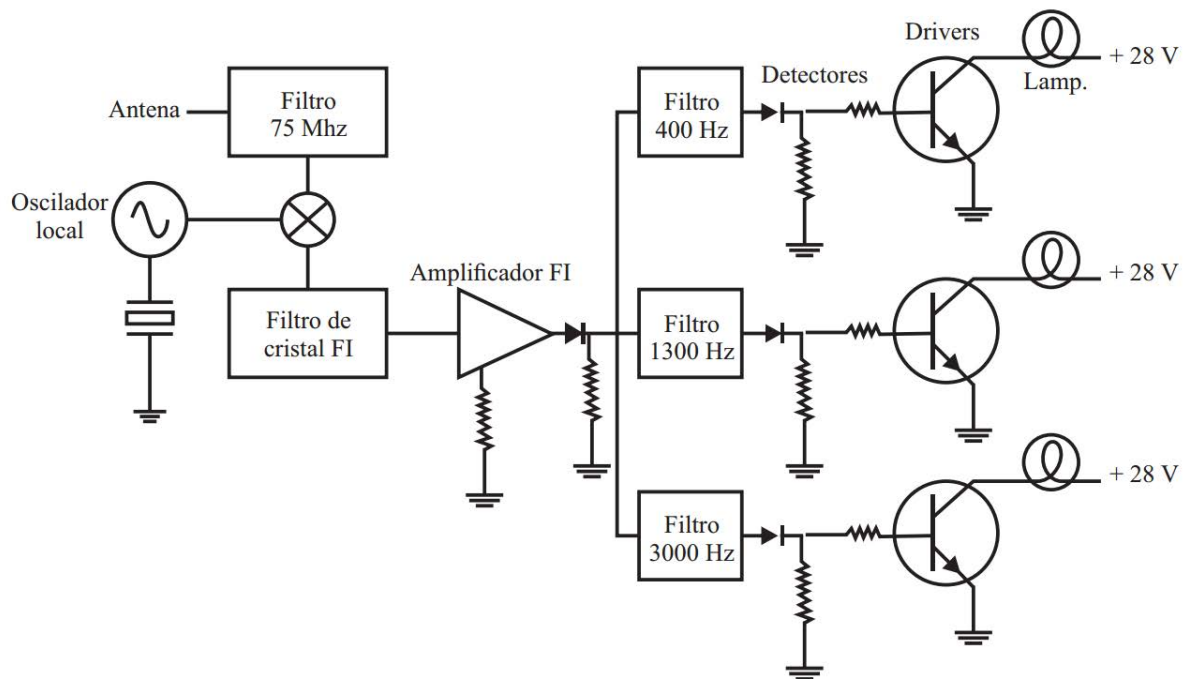
Os marcadores de 75 MHz são modulados com três tons de áudio. O marcador externo é um sinal AM de 400 Hz e identificado por dois traços por segundo. O marcador médio é um

signal AM de 1300 Hz, com a alternância de pontos e traços. O marcador interno é modulado com um tom de 3 kHz, com 6 pontos por segundo.

O receptor *Marker Beacon* filtra os tons e ilumina uma das três lâmpadas no painel de instrumentos. O *Outer Marker* ilumina uma lâmpada azul, o *Middle Marker* uma lâmpada âmbar, e o *Inner Marker*, uma luz branca. Com lâmpadas, tons e padrões de códigos diferentes, a tripulação é alertada para posições-chave durante o pouso por instrumentos.

A FIGURA 5.7 mostra um diagrama de blocos de um receptor *Marker Beacon* do tipo super-heteródino.

FIGURA 5.7 – Receptor *Marker Beacons* do tipo super-heteródino



Fonte: (HELFRICK, 2007)

A saída demodulada é alimentado para filtros de 400 Hz, 1300 Hz e 3000 Hz. Os tons das frequências foram escolhidos de modo que qualquer harmônica não corresponde a outro tom. Embora algumas harmônicas estejam próximas, assim como a terceiro harmônico de 400 Hz que é de 1200 Hz, a largura de banda dos filtros é suficientemente estreita para rejeitar o harmônico de 1200 Hz.

Na FIGURA 5.3 um exemplo real da antena *Localizer*.

FIGURA 5.8 – Antena *Marker Beacons*

Fonte: (ABDULLA et al, 2005)

5.4 ERROS NO ILS

Os erros no sistema de pouso por instrumentos sofrem dos mesmos problemas que o VOR e o DME possam também sofrer, como o mais comum o *multipath*, que nesse caso pode flexionar o feixe do sinal e gerar perturbações na indicação dos instrumentos. Os erros podem estar em três dimensões, devidos ao *Localizer* e ao *Glide Slope*. Erros no sinal *Marker Beacon* não são tão críticos.

Outro problema é a falta de canais. Existem apenas 40 frequências ILS e, uma vez que cada pista requer sua própria frequência ILS, um aeroporto com múltiplas pistas requerem uma frequência para cada. No caso da aproximação por instrumentos para ambas as extremidades da pista podemos utilizar um sistema ILS com sua respectiva frequência que uma não interferirá na outra. Isto porque esses dois sistemas ILS nunca vão utilizados por duas aeronaves ao mesmo

tempo e em direções opostas. Para isso existe um rigoroso requisito de segurança para garantir que nunca possam ser alimentados simultaneamente.

Outro problema é a interferência das estações transmissoras FM. A maior frequência permitida para a radiodifusão FM é 107.9 MHz e a menor frequência do *Localizer* é 108,30 MHz. Uma solução simples é não utilizar a frequência do *Localizer* para estações de rádio FM onde podem sofrer intermodulação.

6 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O trabalho aqui apresentado teve como foco o estudo das características teóricas dos sistemas aviônicos de rádio navegação, seja ele embarcado em uma aeronave ou de uma estação terrestre. Nesta abordagem, não é discutido a superioridade dos sistemas, eles se completam no auxílio a navegação. São apontados os benefícios, prejuízos e erros de cada sistema em particular.

As discussões realizadas descrevem de forma satisfatória a proposta deste trabalho. O princípio de funcionamento de diversos sistemas foi apresentado e alguns destes puderam ser modelados através de circuitos simples. Para tal, foi realizada um estudo aprofundado em livros, normas, apostilas e conhecimento profissional, de modo a fornecer a base teórica aplicada às aeronave e estações de transmissão. Com isso, acredita-se que o presente trabalho possa representar uma boa fonte inicial de referência para quem deseja se aprofundar um pouco mais nesse tema.

Embora o início da navegação radiogoniométrica se deu pouco antes da Segunda Guerra Mundial, na década de 1930, os sistemas aqui estudados ainda permanecem em uso de forma muito semelhante em algumas aeronaves com instrumentação analógica. Em aeronaves mais modernas os instrumentos de ponteiros foram substituídos por sistemas digitais e displays integrados, mas ainda assim sendo sistemas ADF, VOR, DME e ILS.

Atualmente existem sistemas de navegação aérea mais modernos e precisos como o GPS, porém tal sistema é controlado pelo Governo Americano e em caso de conflito com o país o governo pode desativar a cobertura em determinada região. Diferente dos sistemas aqui estudados que possuem tecnologias já dominadas e de fácil implementação em qualquer país.

REFERÊNCIAS

ABDULLA, M.; SVOBODA, J. V.; RODRIGUES, L. **Capítulo 5: Short-Range NAV AIDS**. Avionics Made Simple. Canada: 2005. 150 p.

BARBOSA, A. M. J. P.; VALENTE, S. A. L. P. **Sistemas de Localização Aérea via Rádio**. Sistemas de Telecomunicações. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Licenciatura em Engenharia Eletronica e de Computadores, 2002, 18 p.

BEKIR, E. **Introduction to Modern Navigation Systems**. World Scientific Publishing Co, 2007, 240 p.

CAPITAL AVIONICS. **Omn Bearing Selectors**. 1999. Disponível em <<http://capitalavionics.com/techttime/omni-bearing-selectors-may-1999/>> Acesso em 1 Jul 2015.

FARIA , A. **DME Distance Measuring Equipment**. SAIT Polytechnic, 2011 Disponível em <<https://leagueofextraordinarytechnicians.wikispaces.com/>> Acesso em 1 Jul 2015.

FERNANDES, D. **Rádio Navegação**. ITA-Divisão de Engenharia Eletrônica Departamento de Telecomunicações. 2006. Disponível em <<http://www.ele.ita.br/~david>> Acesso em 05 Out 2014.

HELFRICK, A. D. **Principles of Avionics**. 4ª edição. Estados Unidos da América : Avionics Communications Inc. 2007. 426 p.

HERSCH LOGBOOK. **Navigation Systems**. 2012 Disponível em <<http://herschlogbook.blogspot.com.br/2012/07/navigation-systems.html> > Acesso em 1 Jul 2015.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LEGAT, K.; WIESER, M. **Principles of Positioning and Guidance**. Nova Iorque: Springer-Verlag Wein, 2003. 427 p.

SCHNEIDER, A. O. **Radionavegação por VOR**. International Virtual Aviation Organisation, versão 01, 2013. Disponível em <http://academia.iviao.com.br/files/tutorials/tutorial_20130620232150_jgfaria.pdf> Acesso em 1 Jul 2015.

SIMINIONI, L. **Entendendo ADF e NDB**. Aeroentusiasta, 2012. Disponível em <<http://aeroentusiasta.com/blog/index.php/entendendo-adf-ndb/>> Acesso em 1 Jul 2015.

VITORINO, J. C. **Circuito Receptor AM – DSB**. Princípios de Comunicação, FACAMP. Disponível em <http://www.faccamp.br/apoio/JoseCarlosVotorino/princ_com/circuito_receptor_AM-DSB.pdf> Acesso em 1 Jul 2015.

YOON, J. **Static Discharge Wicks**. Aerospaceweb, 2005. Disponível em <<http://www.aerospaceweb.org/question/design/q0234.shtml>> Acesso em 1 Jul 2015