



ESCOLA NAVAL

talant de biefaire



Ricardo Marques Batista

História dos Sistemas de Rádio-posicionamento

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha



**Alfeite
2019**



ESCOLA NAVAL



ta tante de bi faire



Ricardo Marques Batista

História dos Sistemas de Rádio-Posicionamento

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de
Marinha

Orientação de:

O Aluno Mestrando

O Orientador

ASPOF M Marques Batista

CMG M Costa Canas

**Alfeite
2019**

Epígrafe

“Sometimes you don’t realize your own strength until you come face to face with your greatest weakness”

Susan Gale

Dedicatória

Aos meus pais, por terem sido os mais pacientes e apoiantes nesta viagem que foi a minha vida até agora. Presentes nos momentos bons e maus é com sentido de gratidão máximo que dedico este trabalho a eles.

Agradecimentos

Nestes agradecimentos começo por fazer menção ao meu orientador, o Capitão-de-mar-e-guerra Costa Canas, não só pela proposta de tema que me apresentou, mas pelo apoio e ajuda que a sucederam. Sempre disponível e com um conhecimento vasto foram vários os momentos que me guiou nesta jornada. Um muito obrigado.

Tenho também de prestar agradecimentos às bibliotecas que me receberam e disponibilizaram material de investigação fulcral para o desenvolvimento desta dissertação.

Quero também, e por fim, fazer um agradecimento especial ao meu amigo e camarada Guarda-marinha Pires Fernandes, pelos conselhos dispensados (que nem sempre, erradamente, aceitei), pela pronta disponibilidade que sempre apresentou para me ajudar e claro pela amizade que partilhamos.

Resumo

Intitulada *História dos Sistemas de Rádio-posicionamento*, esta dissertação pretende fazer um apanhado histórico dos principais sistemas de radionavegação do século XX.

Este tipo de tema de dissertação surge por se denotar, por parte das gerações mais jovens dos oficiais da Marinha Portuguesa, um total desconhecimento no que concerne os sistemas que foram fundamentais para a navegação no século XX. Os jovens oficiais são dotados da capacidade de fazerem navegação astronómica, geonavegação e operarem com os sistemas GPS mais recentes. No entanto, relativamente aos sistemas usados no século passado, o conhecimento é pouco ou inexistente. Com isto é pretendido divulgar esta parte da história para que a geração futura não viva na ignorância de um marco tão importante como a evolução da navegação que hoje conhecemos.

Esta dissertação baseia-se num vasto trabalho de pesquisa, estando fundamentada em pesquisa de acervos documentais e fontes primárias. Foram disponibilizados, pelas bibliotecas de Marinha e do Instituto Hidrográfico, vários documentos detentores de informações fundamentais que contribuíram de forma bastante significativa para o enriquecimento do conteúdo deste projeto.

Pretende-se, nesta dissertação, apresentar, relativamente a cada um dos sistemas de radionavegação, um enquadramento histórico, uma descrição das suas principais características e modos de funcionamento, tipos de documentos auxiliares utilizados e erros associados. Pretende-se ainda, por fim, demonstrar a transição efetuada para os sistemas atuais de navegação por satélite.

Palavras-chave: Sistemas, Frequência, Estação, Navegação, Sinal

Abstract

Entitled *Radiopositioning Systems History*, this dissertation intends to make a historical overview of the main radionavigation systems of the twentieth century.

This dissertation theme arises by observing that, the younger generations of Portuguese Navy officers, show a complete lack of knowledge regarding the systems that were of utmost importance the twentieth century navigation. Young officers have the ability to perform astronomical navigation, geo navigation and operate with the latest GPS systems. However, regarding the systems used in the last century, any knowledge about the subject is minimal or nonexistent. This dissertation intends to impart this part of history so that future generations do not live in ignorance of such an important milestone as the evolution of navigation we know today was.

This dissertation is based on a vast research work, based on the research of documentary collections and primary sources. Several documents containing paramount information were made available by the Navy's library and the Hydrographic Institute's library, which were a major factor to the enrichment of this project.

In this dissertation, it is intended to present, for each of the radionavigation systems, a historical background, a description of its main characteristics and operating modes, types of auxiliary documents used and associated errors. At last, it is intended to demonstrate the transition made to current satellite navigation systems.

Keywords: Systems, Frequency, Station, Navigation, Signal

Índice

Epígrafe	IV
Dedicatória	VI
Agradecimentos	VIII
Resumo.....	X
Abstract	XII
Índice.....	XIV
Índice de Figuras.....	XVIII
Índice de Tabelas	XX
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	XXII
1. Introdução	1
2. Introdução aos Sistemas de Radionavegação	5
2.1 Telegrafia sem Fios	7
2.2 Radiogoniómetro.....	9
2.3 Sistemas hiperbólicos	11
3. LORAN	13
3.1 LORAN-A	13
3.1.1 História.....	13
3.1.2 Princípios de Operação	15
3.1.3 O Fim	17
3.2 LORAN-C.....	17
3.2.1 História.....	18
3.2.2 Princípios básicos do sistema	20
3.2.3 Características do sinal	21
3.2.4 Ondas terrestres e ionosféricas	23
4. Sonne/Consol.....	25
4.1 História	25

4.2	Princípios de funcionamento	27
4.3	O sinal.....	29
4.4	Alcance e precisão do sistema	29
4.4.1	Alcance	29
4.4.2	Precisão	30
4.5	Descrição das estações terrestres	31
4.5.1	Equipamento de transmissão	31
4.5.2	Sistema de antenas	32
4.5.3	Instalações de Controlo.....	32
5.	Decca Navigator System (DNS)	33
5.1	História	33
5.2	Princípios Básicos	38
5.3	Transmissores Decca.....	41
5.4	Alcance do Sistema	43
5.5	Erros do Sistema	45
6.	OMEGA.....	49
6.1	História	49
6.2	Sistema de Transmissão	52
6.3	Recetores e equipamento de navegação	56
6.4	Propagação dos sinais Omega.....	57
6.5	Cartas e publicações Omega.....	60
7.	Navegação por Satélite	65
7.1	Sputnik.....	65
7.2	Transit.....	67
7.3	GPS.....	69

7.4	Outros Sistemas.....	72
8.	Conclusão	73
9.	Lista Bibliográfica.....	79

Índice de Figuras

Figura 1 - Nomenclatura de bandas de frequência(Hitchcock, 2004)	6
Figura 2 - "Righi-transmitter" presente no Museu Teylers	8
Figura 3 - Marconi-coherer presente no Museu Teylers	9
Figura 4 - Carta Loran com estação master e slaves.....	16
Figura 5 - Conversor CV-27/UPN.....	18
Figura 6 - Disposição estações LORAN-C/ Posição determinada	21
Figura 7 - Impulso LORAN de uma estação <i>master</i>	22
Figura 8 - Percurso das ondas terrestres e das ondas ionosféricas	23
Figura 9 - Equipamento de transmissão	27
Figura 10 - Carta experimental da Força Aérea Inglesa	28
Figura 11 - Esquemático de uma estação Consol	31
Figura 12 - Esquemático da unidade de controlo	32
Figura 13 - Carta para a ASE	35
Figura 14 - Logotipo do Sistema Decca	37
Figura 15 - Carta Decca	40
Figura 16 – Decómetro	41
Figura 17 - Ciclo de transmissão	42
Figura 18 - Recetor Mark 21 (MK 21).....	44
Figura 19 - John Pierce	50
Figura 20 - Datas importantes das Estações Omega	52
Figura 21 - Localizações de estações Omega.....	53
Figura 22 - Tipos de antenas Omega	54
Figura 23 - Formato de transmissão do Sinal Omega.....	55
Figura 24 - Cartas Omega	61

Figura 25 - Diagrama das LDP's da área 12.....	61
Figura 26 - Ponto numa quadrícula Mercator	62
Figura 27 - Sputnik 1	65
Figura 28 - Satélite Transit.....	67
Figura 29 - Formato "gaiola" descrito pela órbita dos satélites Transit.....	68

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Variantes do P.P.R.	17
Tabela 2 - Transmissão e comparação de frequências de uma cadeia	39
Tabela 3 - Erros nas posições	44

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

APL – Applied Physics Laboratory

ASE – *Admiralty Signals Establishment*

CEMA – Chefe de Estado Maior da Armada

CW – *Continuous wave*

CYTAC – *Cycle Matching Tactical Bombing and Navigation System*

GPS – *Global positioning System*

GRI – *Group Repetition Interval*

HMS – *Her/His Majesty's Ship*

Hz – *Hertz*

IALA – *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities*

ITU – *International Telecommunication Union*

LDP – *Linha de posição*

LF – *Low frequency*

MIT – *Massachusetts Institute of Technology*

MP – *Multi Pulse*

PCU – *Phase control Unit*

P.R.I. – *Pulse repetition interval*

TSF – *Telegrafia Sem Fios*

VLF – *Very Low Frequency*

1. Introdução

Em temas de história, em termos metodológicos não se costumam identificar questões centrais e derivadas, sendo feita uma leitura dos documentos tendo sempre presentes diversas questões, cujas respostas permitem ir construindo o discurso histórico. Assim sendo, nesta dissertação pretende-se responder, ao longo dos vários capítulos que abordam diferentes sistemas de radionavegação, a questões como: em que circunstâncias surgiu cada sistema? Quando é que surgiu? Que pessoas, organizações, países estiveram envolvidos no seu desenvolvimento? Como era o seu modo de funcionamento? Quais as suas características principais? Quais as suas limitações? Que tipo de erros tinha associados e formas de os reduzir?

Relativamente aos objetivos da dissertação pretende-se uma exposição, num único documento, de vários aspetos de sistemas de radionavegação do século XX como o LORAN-A, LORAN-C, Consol, Decca e Omega. Pretende-se então responder às diversas questões apresentadas anteriormente mencionando a história de cada um, realçando os momentos e pessoas chaves para o aparecimento e desenvolvimento dos diversos sistemas; os princípios básicos de operação, referindo como funcionavam e quais as suas principais características, nomeadamente, quantas estações compunham cada um, qual o seu tipo, como eram formadas as suas cadeias, entre outras; características dos sinais e propagação dos mesmos, fazendo uma descrição mais aprofundada sobre que tipos de sinais eram transmitidos, a nível da sua frequência e comprimento de onda, e como eram propagados, sob a forma de ondas terrestres ou ondas ionosféricas; recetores, transmissores e ainda tipos de cartas, publicações e elementos auxiliares especiais inerentes a cada um dos sistemas.

Tendo em conta o que foi descrito anteriormente, a presente dissertação foi estruturada em três grandes capítulos: “LORAN”, “*Decca Navigator System*”, “Omega”, visto terem sido sistemas diferentes uns dos outros e com grande impacto na história da navegação e um capítulo mais pequeno, “Navegação por Satélite”, sobre a transição para os sistemas de navegação até à atualidade.

O primeiro capítulo, capítulo 2, “Introdução aos Sistemas de Radionavegação”, pretende, como o seu nome indica, fazer uma introdução ao tema da presente dissertação

de mestrado, tendo como subcapítulos, “Telegrafia sem fios”, onde é descrito o início das comunicações, através de ondas eletromagnéticas e sem recorrer ao uso de fios entre dispositivos; “Radiogoniómetro”, que foi um aparelho pioneiro e inovador da radionavegação e que conseguia indicar a direção de um sinal que tivesse a receber, indicando o respetivo azimute; e ainda “Sistemas hiperbólicos”, onde é descrita a transição para este tipo de sistemas, onde estariam incluídos o LORAN, o *Decca Navigator System*, o Omega, entre outros, e os seus princípios de funcionamento.

O capítulo 3, “LORAN”, está dividido em 2 subcapítulos, “LORAN-A” e “LORAN-C”. Pretende-se descrever a ligação dos dois, começando por se fazer um relato histórico e as razões para o aparecimento do primeiro. É abordado também o fim do sistema LORAN-A e o aparecimento do “novo” LORAN-C. Para ambos os subcapítulos é feita uma descrição dos princípios básicos e de operação dos sistemas e ainda sobre as características do sinal.

O capítulo 4, dedicado ao sistema Sonne/Consol é um pouco diferente dos outros por não se tratar de um sistema hiperbólico. Desenvolvido na Segunda Guerra Mundial pelos alemães, foi introduzido neste projeto pela sua importância. No referido capítulo é feita uma abordagem histórica, descrevendo como surgiu e quem os envolvidos no seu desenvolvimento; são demonstrados os princípios de funcionamento do sistema, referindo a frequência dos sinais do mesmo, a disposição das antenas, e onde e sob que formato se encontravam as informações fundamentais para o seu uso; é feita uma descrição pormenorizada do sinal; demonstra-se o alcance e precisão do sistema, indicando os principais fatores que os influenciam; e por fim é apresentada uma descrição das estações terrestres, nomeadamente sobre o equipamento de transmissão, o sistema de antenas e as instalações de controlo.

No que concerne o capítulo 5, “*Decca Navigator System*”, os subcapítulos são focados na história deste sistema, onde se refere as suas origens, as dificuldades de implementação do projeto, os testes realizados, tanto a nível dos seus criadores como a nível militar, e a sua utilização num dos dias mais importantes de toda a história do século XX, que culminou com o desembarque na Normandia por parte das forças aliadas; nos princípios básicos, onde é explicada a disposição das estações transmissoras e como são constituídas as cadeias do sistema; os transmissores Decca, sendo abordada a evolução

dos mesmos; o alcance do sistema e os fatores que contribuíam para as suas alterações, e ainda os possíveis erros aos quais o Decca podia estar sujeito.

No capítulo 6, “Omega” é, à margem dos capítulos anteriores, abordada a história deste sistema as origens do sistema sendo referida a transição para as transmissões em VLF, com mais alcance, os percalços sofridos e a instalação de antenas. os sistemas de transmissão utilizados, o número e localização de estações, o tipo de antenas, recetores e restantes equipamentos são também aprofundados. Outros subcapítulos fazem referência aos sinais e propagação dos mesmos, que podia ser através de ondas terrestres ou ionosféricas, e ainda ao tipo de cartas e publicações especiais usados.

Com o capítulo 7, último capítulo desta dissertação, é feita uma breve apresentação do aparecimento dos sistemas de navegação por satélite, onde se explica como apareceram, como foram desenvolvidos, como eram os satélites e respetivas órbitas, e terminando o capítulo com o atual GPS.

2. Introdução aos Sistemas de Radionavegação

O que é a navegação? Consiste no processo de direcionar o movimento de uma embarcação de um local A para um local B. Ao navegarmos deparamo-nos com perguntas tais como: “onde estou?”, “para onde?” e “qual é a distância?”. A prioridade de um sistema de navegação é responder à primeira, não tirando importância às seguintes. Até ao início do século passado os métodos de navegação eram baseados em geonavegação, que consistia em navegação costeira apoiando-se em pontos conspícuos em terra, ou na navegação astronómica, que consistia por sua vez na observação dos astros para determinar a posição. O navegador recorria ainda à navegação por carteação e estima tendo em conta o rumo e a velocidade a que governava. Era importante para o ser humano ultrapassar esta barreira e foi no século XX que novas maneiras de determinar a posição foram descobertas e desenvolvidas. Recorrendo à transmissão e receção de ondas rádio foram criados inúmeros sistemas de navegação aparecendo assim a radionavegação.

Estes sistemas são caracterizados por transmissões por radiofrequência, da onda transportadora, potência e o tipo de sinal. Caracterizam-se também pela maneira como os sinais são analisados após receção dos mesmos, as linhas de posição que fornecem, a sua área de alcance, disponibilidade para o utilizador, a sua passividade e a sua precisão.

A frequência e potência da transmissão da onda de rádio são uns dos fatores que determinam o alcance efetivo de um sistema. A Figura 1 representa a nomenclatura das bandas de frequência.

Frequency	Range	Designation	Abbreviation
< 3	Hz	sub-extremely low frequency	sELF ^A
3–3000	Hz	extremely low frequency	ELF ^B
3–30	kHz	very low frequency	VLF
30–300	kHz	low frequency	LF
300–3000	kHz	medium frequency	MF
3–30	MHz	high frequency	HF
30–300	MHz	very high frequency	VHF
300–3000	MHz	ultra high frequency	UHF
3–30	GHz	super high frequency	SHF
30–300	GHz	extremely high frequency	EHF

^A — Also called ultralow frequency, ULF
^B — Current IEEE definition of ELF; may also be defined as 30 to 300 Hz.

Figura 1 - Nomenclatura de bandas de frequência ¹

Sinais VLF (*very low frequency*), “viajam” longas distâncias com pequenas quantidades de potência irradiada. Apesar das transmissões LF (*low frequency*) normalmente mostrarem maior atenuação com a distância que os sinais VLF, as transmissões de 100 kHz do LORAN-C oferecem uma recepção de ondas terrestres de confiança a distâncias de 800 a 1200 milhas náuticas².

O *Decca Navigator System*, operando nas frequências 70-130 kHz, mas com menos potência que o LORAN-C oferece uma recepção a distâncias superiores a 400 milhas náuticas durante o dia com boas condições de recepção.

O tipo de sinal afeta a forma como os sinais são analisados quando recebidos. Normalmente os recetores de sistemas de pulso modelado determinam intervalos de tempo enquanto que os recetores de sinais contínuos comparam fases. Esses sistemas são designados, em relação à recepção, como *time difference measuring systems* e *phase comparison systems*. É feita a distinção mesmo quando ambos os sistemas fazem medição de intervalos de tempo. A comparação de fases consiste em determinar a alteração de tempo de uma onda em relação a outra, tendo como unidade de tempo o inverso da frequência.

¹ (Hitchcock, 2004)

² Milha náutica = 1852 metros

No Loran-C o recetor processa o tipo de sinal de ambas as maneiras, diferença de tempo e comparação de fases.

A diferença entre os alcances de recepção efetiva dos sinais dos sistemas LORAN-C e Decca deve-se também à modulação de pulso dos sinais do LORAN-C. Múltiplos formatos de pulso aumentam a potência média aumentando assim o alcance.

A modulação de pulso também traz outras vantagens tais como: *freedom from lane ambiguities*, meios para distinguir entre ondas terrestres e ondas aéreas, técnicas de código adequadas podem ser utilizadas para discriminar as ondas terrestres das aéreas mesmo que a onda aérea de um pulso anterior coincida com a onda terrestre de um pulso posterior e o “envelope” do pulso permite a identificação de uma *specific carrier wave cycle* de um sinal de radiofrequência coerente para medidas de fase.

2.1 Telegrafia sem Fios

A telegrafia sem fios representa sinais telegráficos através de ondas de rádio.

Guglielmo Marconi foi físico italiano e o inventor da telegrafia sem fios. Nascido na cidade de Bolonha, em Itália, recebeu o prémio Nobel da Física em 1909 pelos seus trabalhos na comunicação telegráfica sem fios, que partilhou com o físico alemão Ferdinand Braun. Continuou os seus trabalhos no desenvolvimento de comunicações sem fios com ondas curtas, que constitui, hoje em dia, a base dos rádios de longa distância. Marconi patenteou um sistema completo *wireless* no ano de 1897 e foi o primeiro a conseguir mostrar o funcionamento da telegrafia sem fios (TSF). Isto foi tudo tornado possível após vários anos de pesquisa e experiências de transmissão de ondas eletromagnéticas em grandes distâncias culminando no ano de 1895. Para isso baseou-se no trabalho teórico que ambos Maxwell e Hertz tinham desenvolvido no âmbito de enviar e receber Código Morse³. O sistema que ele desenvolveu utilizava sinais com ondas com grande comprimento (ordem >1 km) e a tecnologia de transmissão necessitava de transmissores muito grandes e com uma potência muito elevada. (Smith-Rose, 1998)

³ Sistema de codificação de caracteres, através de sequências de pontos, traços e espaços, usado nas telecomunicações. (Beechey, 1876)

Para explicar a experiência de Marconi, começemos por descrever o transmissor utilizado: chamado de “Righi-transmitter” (Figura 2) é composto por duas esferas metálicas que estão ligadas a uma bobina de indução, que produz corrente alternada de voltagem elevada com altas frequências. As esferas estão ligadas por um cilindro de ebonite⁴ contendo óleo de vaselina. As descargas elétricas ocorrem entre as esferas passando pelo óleo de vaselina, ocorrendo então emissão de ondas eletromagnéticas. Interrompendo a emissão era possível criar mensagens em código Morse e transmiti-las. Nascia assim a telegrafia sem fios.



Figura 2 - "Righi-transmitter" presente no Museu Teylers⁵

Quanto ao recetor: denominado de “Marconi-coherer” (Figura 3) tinha uma parte central com um tubo de vidro com pó de metal que separa dois eléctrodos⁶. Ao aplicar-se um sinal ao dispositivo as pequenas partículas de metal juntam-se, permitindo que a corrente passe de forma mais direta. No campo magnético formado as partículas formam

⁴ Nome dado a uma borracha muito dura, que para além de borracha natural contém uma percentagem de 25-80% de enxofre e óleo de linhaça. (“HARTGUMMI (EBONIT),” n.d.)

⁵ (Pansters, 2016)

⁶ Condutor eléctrico utilizado para fazer contacto com partes não metálicas de um circuito.

uma *string* e um circuito elétrico é fechado. Um eletroímã faz com que uma caneta escreva num papel em movimento e assim fica registada “a mensagem”. Foi utilizado por Marconi um sistema que tocava uma campainha ao invés do papel e caneta. (Marconi, 1909)



Figura 3 - Marconi-coherer presente no Museu Teylers⁷

A telegrafia sem fios foi primeiramente utilizada pelo exército e marinha Britânicos na Guerra de Boer (A Guerra de Boer iniciou-se em outubro de 1899 entre duas antigas repúblicas inglesas, *Free Orange State* e *Transvaal*, e o Reino Unido, na África do Sul. Com o desenrolar da guerra os britânicos receberam reforços da Austrália, Nova Zelândia e Canadá. A guerra durou 3 anos e resultou numa taxa de mortalidade bastante elevada para todos os lados. (“Anglo-Boer: Britain’s Vietnam (1899-1902),” n.d.))

A Segunda Guerra Mundial demonstrou a vulnerabilidade dos cabos submarinos e com isso a TSF começou a ser utilizada numa escala muito superior à até então.

2.2 Radiogoniómetro

Foi em 1888 que Heinrich Hertz se apercebeu que era possível saber-se a direção de um transmissor quando, ao rodar uma antena recetora circular o valor da corrente

⁷ (Pansters, 2016)

induzida também variava. Heinrich Rudolf Hertz nasceu em Hamburgo a 22 de fevereiro de 1857. Quando tinha apenas 15 anos Hertz tinha aulas diárias com tutores especializados em temáticas escolhidas pelo próprio e passava os dias a estudar e a fazer experiências. Em 1877 o seu foco de estudo passou a ser a matemática e a física experimental. Desde cedo que a sua investigação e trabalho tinham como temas a eletricidade e o eletromagnetismo e foi o primeiro a conseguir provar a teoria de James Maxwell sobre a existência de ondas eletromagnéticas. Ficou imortalizado ao tornar-se a unidade de medida da frequência. (Appleyard, 1927)

Era o início da radionavegação com um aparelho chamado radiogoniómetro, que detetava a direção do sinal que recebia.(Nusser, n.d.)

A radiogoniometria funcionava de duas maneiras: *«Utilização de radiofaróis, que eram estações em terra que difundiam, em permanência, um sinal rádio em onda média, destinado a ser azimutado pelos navios no mar – a obtenção de dois ou mais azimutes radiogoniométricos permitia ao navio a determinação da sua posição; Utilização de estações radiogoniométricas em terra que, a pedido dos navios, determinavam o azimute radiogoniométrico das emissões por eles originadas e lhas forneciam de seguida – a recepção de dois ou mais azimutes radiogoniométricos permitia ao navio a determinação da sua posição.»*(Monteiro, 2007, p. 68) Dos dois métodos referidos o mais utilizado na navegação marítima foi o primeiro, sendo o segundo considerado pouco prático.

A fiabilidade dos radiogoniómetros só se vem a verificar durante a Primeira Guerra Mundial, com o aparecimento de válvulas que amplificavam os sinais recebidos, ultrapassando assim o problema de serem precisas antenas de grandes dimensões.

No período entre as grandes guerras foram instaladas em Portugal radiofaróis marítimos, *«sendo que o primeiro radiofarol português foi instalado no Cabo da Roca em 1937, seguindo-se-lhe mais 11, que foram sucessivamente instalados até 1956 (ano da entrada em funcionamento do radiofarol do Cabo de S. Vicente)»*(Monteiro, 2002, p. 12).

Este sistema de radionavegação, no entanto, era muito suscetível a erros, na ordem de 2° a 10° nos azimutes⁸ com tendência a piorarem durante a noite, de maneira que nunca foi muito popular tanto a nível nacional como internacional. Logicamente, quanto maior fosse a distância a um radiofarol, maior seria o erro na posição obtida. «*Por exemplo, um azimute radiogoniométrico que tenha um erro de 1° (valor bastante difícil de conseguir) dará origem a um erro na posição de cerca de milha a 30 milhas do radiofarol, mas produzirá um erro de quase 3,5 milhas a uma distância de 200 milhas do radiofarol.*»(Monteiro, 2007, p. 69).

2.3 Sistemas hiperbólicos

Era necessário criar um sistema que se baseasse na medição de distâncias, de maneira a que o afastamento à estação transmissora não aumentasse o erro. A solução criada consistia na medição da diferença de tempo (ou de fase) entre a chegada de sinais de, pelo menos, duas estações.

Apareceram então sistemas hiperbólicos tais como o Decca, GEE, LORAN e Omega, que viriam revolucionar todo o conceito de determinação de posições tanto no mar como no ar e que marcaram a história da navegação do século XX. Apesar de semelhantes cada um com as suas características próprias e circunstâncias de aparecimento diferentes. Sistemas de radionavegação de carácter mais regional ao início, e que surgiram por motivos de força maior, no caso do Decca, por exemplo, utilizado na Segunda Guerra Mundial, ou mais tarde de carácter global, como o caso do Omega que tinha uma área de cobertura consideravelmente maior não perdendo o rigor da informação disponibilizada.

«*Como os lugares geométricos dos pontos que recebem os sinais de um par de estações com igual diferença de tempo (ou de fase) têm a forma de hipérbolas⁹, cujos focos são as estações, estes sistemas tomaram a designação de sistemas hiperbólicos.*»(Monteiro, 2007, p. 69) As grelhas hiperbólicas formadas nos campos de sinais dos sistemas de radionavegação hiperbólicos e as linhas hiperbólicas de posição

⁸ Medida de abertura angular, com valores entre os 0° e os 360°, do sistema de coordenadas horizontal

⁹ Hipérbolas, em matemática, são tipos de curvas num plano.

associadas, criadas a partir da medição dos diferentes tempos de recepção (ou diferença de fase) entre sinais rádio de duas ou mais estações transmissoras, são a razão do nome atribuído a estes sistemas. Apesar disso, com algumas modificações esses mesmo sistemas podem ser utilizados com linhas circulares de posição.

Estes sistemas cobrem áreas amplas usando apenas alguns locais de transmissão e a relação entre precisão e cobertura é muito boa. Os modos operativos apenas necessitam de recetores de relativa simplicidade, porque a diferença de tempo é medida com alta precisão, sendo dispensável o uso de um oscilador de precisão. Os sistemas são contínuos, não saturáveis e passivos.

A desvantagem de o sistema necessitar de duas estações para fornecer uma “família de hipérbolas” é parcialmente contrariada ao usar-se um grupo de estações em cadeia que operam de forma a criar uma grelha de interseção de “famílias de hipérbolas”.

A precisão de cada linha de posição depende dos seguintes fatores:

- A precisão com que as diferenças de tempo entre a chegada de dois sinais podem ser calculadas;
- A sincronização das estações de transmissão;
- A precisão das previsões de propagação;
- Precisão e operacionalidade do recetor;
- Posição do utilizador em relação às estações transmissoras;
- Precisão das cartas e precisão da posição das estações transmissoras.

3. LORAN

3.1 LORAN-A

3.1.1 História

A atenção dada pelos Estados Unidos da América a sistemas hiperbólicos de ajuda à navegação aumentou quando perceberam que a entrada na Segunda Guerra Mundial era algo inevitável. O LORAN-A (*Long Range Navigation*) surge como um desses sistemas.

Em 1940, sob a alçada do Comité de Investigação de Segurança Nacional, é criado o *Microwave Committee*, para determinar o que era preciso caso os americanos entrassem na Guerra. Era necessário desenvolver um sistema de navegação de precisão para aeronaves e que fosse de longo alcance. Uma das especificações a nível operacional era que o sistema teria que ter uma exatidão de pelo menos 1000 pés¹⁰ num alcance de 200 milhas. O plano era usar pares de estações sincronizadas, separadas por centenas de milhas, que transmitiam impulsos radioelétricos de curta duração.

O projeto, que foi denominado como “*Project 3 (ou C)*”, visava criar um sistema de navegação hiperbólico que operasse em frequências na ordem dos 30 MHz. No entanto, estudos comprovaram que, a operar nessa gama, não se obteriam os alcances desejados e que seria melhor operar em frequências mais baixas da banda HF. As frequências escolhidas para o sistema operar acabaram por ser entre 1.750-1.950 kHz. Ao desenvolverem este novo sistema, os americanos apoiaram-se bastante no que estava a ser feito, na mesma altura no Reino Unido, com o sistema GEE, tendo adotado várias características do mesmo, «*The first iteration of LORAN was derived from the British GEE (generalized estimating equation) system originated by Robert J. Dippy [...]*»(Voellinger, Asendorg, Butzke, & Lastufka-Taylor, 2015), «*[...] now having realized how far work had advanced on Gee, the US team saw no reason to duplicate the British work [...]*»(Proc, n.d.-b).

Alfred Lee Loomis foi o físico norte-americano do NDRC (*National Defense Research Committee*) que apresentou uma proposta do sistema que se viria a chamar LORAN. Alfred nasceu na cidade de Nova Iorque, nos Estados Unidos da América, em

¹⁰ 1 pé = 30,48 centímetros

1887 e teve uma vida bastante recheada tendo sido advogado, oficial do Exército e investidor na banca. Depois virou-se para as áreas científicas tendo se focado na física e mais tarde, na biologia. Os testes começaram em 1941 em estações experimentais situadas em Montuak Point, Nova Iorque e em Fenwick Island, Delaware. No início de 1942 os primeiros testes com ondas rádio foram realizados e a banda de frequências escolhida; foram realizados testes com veículos em movimento em junho do mesmo ano; o inventor do sistema GEE, Robert J. Dippy, de forma a assistir ao desenvolvimento do LORAN, voou para os Estados Unidos da América e lá permaneceu cerca de 8 meses; em outubro inaugurou-se uma cadeia de 4 estações e cerca de 40 indicadores de recepção foram instalados em navios nos 4 a 5 meses seguintes. O desenvolvimento do LORAN dava largos passos evolutivos e na primavera de 1943 o sistema já estava completamente operacional, quando as cartas para as estações da cadeia do Atlântico Norte ficaram disponíveis. (Alvarez, 1980; Voellinger et al., 2015)

O impacto deste novo sistema, quando usado para fins militares, foi imediato, «*Under the Lend-Lease program established in 1941, the United States used LORAN-A to guide planes and bombers to the former Allied Soviet Union during WWII operations.*» (Voellinger et al., 2015). O LORAN teve também grande impacto na guerra que os Estados Unidos da América travavam no Oceano Pacífico. O sistema, fácil de usar e preciso, substituía uma bastante falível navegação astronómica¹¹ e facilitava muito o tão necessário reabastecimento de combustível das aeronaves presentes naquele teatro de operações. A navegação através do LORAN foi bastante importante também durante os bombardeamentos que os americanos faziam no Japão.

Por volta de 1944 já tinham sido distribuídos cerca de 75000 recetores e no final da Segunda Guerra Mundial já existiam 75 estações americanas e 15 britânicas e canadianas que conseguiam cobrir mais de 30% da superfície do globo. «*By 1945, there were stations built all over the world providing some 60 million square miles of coverage (Pierce, McKenzie, and Woodward 1948).*» (Voellinger et al., 2015, p. 2.2)

¹¹ Modo de determinar a posição, através da observação da distância angular dos astros em relação ao horizonte, usando um sextante (aparelho)

Em 1965 foram estabelecidas estações LORAN em Portugal, nomeadamente em Sagres, Porto Santo, Santa Maria e Flores. Estações estas que viriam a ser desativadas em 1977. O sistema LORAN-C, que viria a substituir o LORAN-A, era um sistema que os americanos começaram a desenvolver nos finais da década de 50. Progressivamente, foram substituindo as suas estações LORAN-A a nível mundial por estações LORAN-C. «No entanto, em Portugal isso nunca chegou a ocorrer e [...] a Marinha Portuguesa optou pelo sistema Omega em sua substituição, [...]»(Monteiro, 2002, p. 12)

Em Portugal, perante um pedido do Almirante Chefe do Estado Maior Naval, coube ao Capitão de Mar e Guerra João Francisco Fialho, realizar uma conferência sobre a “Moderna radionavegação hiperbólica”. Nesta conferência, o comandante apoia-se no sistema LORAN para descrever os métodos de radionavegação hiperbólica. Estamos no ano de 1946, apenas um ano depois do final da guerra e apenas três depois da implementação do sistema. Sistema esse que, durante a Segunda Guerra Mundial se manteve em segredo.

3.1.2 Princípios de Operação

Como funcionava o sistema? Pelo menos 3 estações, que formavam uma cadeia composta por uma estação *master* e duas *slave*, emitiam impulsos radioelétricos com a duração de 40 microssegundos, em intervalos, rigorosamente medidos, que duravam entre 29000 a 40000 microssegundos, chamados *Pulse Repetition Interval* (P.R.I). Eram medidas as diferenças de tempo de chegada dos impulsos de um par de estações, que eram então visualizadas através de um tubo de raios catódicos¹². Esta medida é então transposta para umas cartas especiais LORAN e era adquirida uma linha de posição. «*Dois ou mais linhas de posição por 2 ou mais pares de estações transmissoras, dão pelo seu cruzamento o ponto Loran.*»(Fialho, 1946, p. 3). O alcance máximo confiável era de 700 milhas durante o dia e 1400 à noite.

É importante referir que as transmissões da estação *master* e da correspondente *slave* não eram simultâneas, sendo separadas por um intervalo fixo de tempo. Esse intervalo correspondia ao tempo que o sinal demorava a fazer o percurso *master-slave*,

¹² Tubo em vácuo que tem um ou mais emissores de eletrões e um ecrã fosforescente e é usado para mostrar imagens. Modula, acelera e deflete os feixes de eletrões para o ecrã criando imagens.

somando metade do P.R.I. e um pequeno intervalo de tempo chamado “coding delay”. A expressão retrata o intervalo de tempo, que também pode ser chamado de atraso absoluto da *slave*, sendo o “” o tempo em microssegundos que o sinal demora da estação *master* até à *slave*, o “L” o P.R.I. e o “” o “coding delay”. «Para remover a ambiguidade das 2 linhas de posição com a mesma diferença de tempo e para evitar a grande confusão que um tal sistema provocaria nas medições das diferenças de tempo T , nas proximidades da linha central adoptou-se a seguinte modalidade: - As pulsações deixarem de ser simultâneas.»(Fialho, 1946, p. 4). (Bortolotti, 2015, p. 73)

Na Figura 4 visualizamos uma estação *master* e duas estações *slave* e consequentes linhas de posição. Cada uma dessas curvas tem uma certa combinação, de letras e números, que nos permite identificar a frequência rádio e a frequência das pulsações do par de estações que lhe deu origem. Por ex. 2H4-3300.

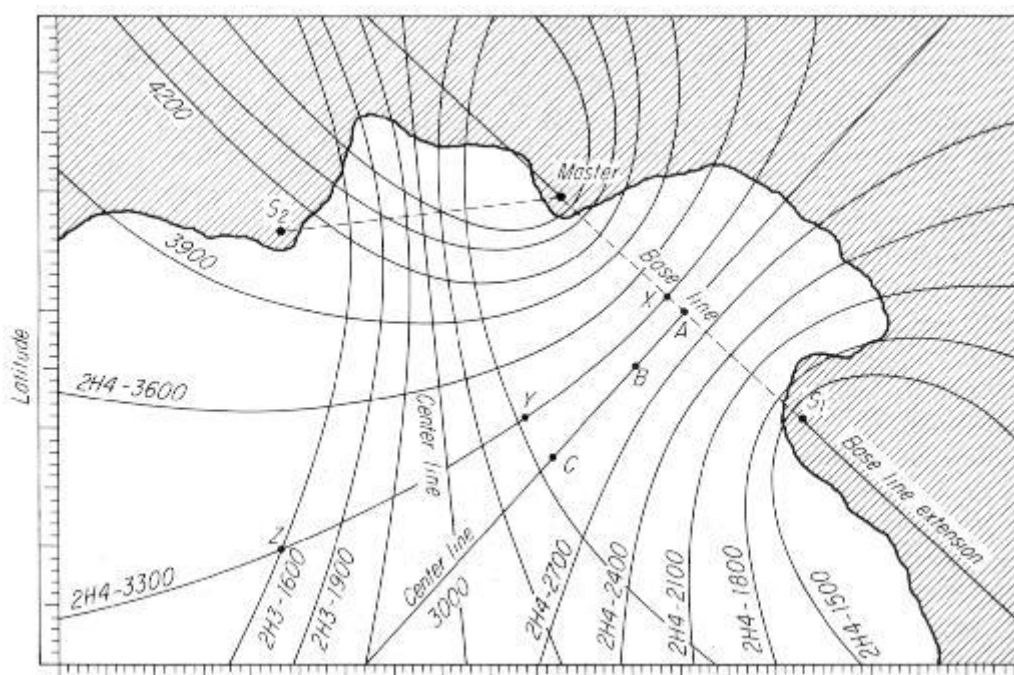


Figura 4 - Carta Loran com estação master e slaves ¹³

Analisemos o primeiro número, indicador das frequências das estações, que podia tomar os números 1, 2, 3 e 4, correspondendo a 1950, 1850, 1900 e 1750 kHz respetivamente; a letra, indicadora da frequência de repetição de impulsos que podia ser “L (*Low*)”, se fossem 25 pulsações por segundo, “H (*High*)” se fossem 33 1/3 ou “S (*Slow*)” (para equipamentos posteriores) se fossem 20. Foram criadas 8 variantes para

¹³ (Proc, n.d.-c)

cada P.R.R. demonstradas na Tabela 1; e os últimos 4 números que correspondiam à diferença de tempo, em microssegundos, que se obtinha no indicador LORAN.

H0 = 33 3/9 pps	L0 = 25 pps	S0 = 20 pps
H1 = 33 4/9 pps	L1 = 25 1/16 pps	S1 = 20 1/25 pps
H2 = 33 5/9 pps	L2 = 25 2/16 pps	S2 = 20 2/25 pps
H3 = 33 6/9 pps	L3 = 25 3/16 pps	S3 = 20 3/25 pps
H4 = 33 7/9 pps	L4 = 25 4/16 pps	S4 = 20 4/25 pps
H5 = 33 8/9 pps	L5 = 25 5/16 pps	S5 = 20 5/25 pps
H6 = 34 pps	L6 = 25 6/16 pps	S6 = 20 6/25 pps
H7 = 34 1/9 pps	L7 = 25 7/16 pps	S7 = 20 7/25 pps

Tabela 1 - Variantes do P.P.R. ¹⁴

3.1.3 O Fim

O sistema LORAN-A em breve seria substituído, primeiro pelo LORAN-B que, devido a problemas técnicos nunca chegou a ser um sistema de navegação comercial e pelo LORAN-C, em 1957, que oferecia maior alcance e informação mais viável. O LORAN-A foi descontinuado nos EUA em dezembro de 1980 e na maior parte do mundo até 1985. No entanto continuava a operar em alguns locais do mundo, tais como China e Japão.

3.2 LORAN-C

O LORAN-C é um sistema hiperbólico de radionavegação de longo alcance com uma precisão alta que opera com sinais alternados na gama LF (100 kHz) através dos métodos de comparação de fase e de medição de diferença de tempo. Tem alcances na ordem das 800 a 1200 milhas náuticas quando a usar ondas terrestres, sendo as mesmas o seu modo normal de transmissão. No entanto também transmite através de ondas ionosféricas¹⁵, que apresentam uma precisão mais reduzida, mas que conseguem atingir distâncias até às 2300 milhas náuticas.

¹⁴ (Proc, n.d.-c)

¹⁵ Ondas que se propagam sendo refletidas ou refratadas pela ionosfera, uma camada da atmosfera que está eletricamente carregada. (C. Jones, n.d.)

3.2.1 História

Após o término da Segunda Guerra Mundial, houve uma preocupação a nível internacional de se criar regulamentos para as comunicações rádio, tendo em conta vários fatores tais como as consequências da própria guerra em si. Numa conferência da ITU (*International Telecommunication Union*) foi estabelecida uma frequência base de 90 – 110 kHz com o intuito de se desenvolver um sistema com maior alcance e que funcionasse a nível mundial. Além disso era também necessário diminuir a interferência de sinal que tinha vindo a aumentar consideravelmente após a guerra, sobretudo porque os sistemas, que eram apenas usados por militares, passavam a ser usados também por civis.

A guerra travada no Pacífico demonstrou a necessidade de se criar um sistema que operasse melhor que o LORAN-A, principalmente em longas distâncias durante o dia. A solução apresentada consistia em experimentar um sistema em frequências mais baixas, 180 kHz, ao qual se chamou LF Loran. Este funcionava de maneira semelhante ao Loran a operar a 2 MHz, no entanto as suas estações funcionavam em grupos de três em vez de pares. O equipamento normal do LORAN-A conseguia receber LF LORAN, desde que um conversor especial, CV-27/UPN (Figura 5), tivesse instalado entre a antena LORAN-A e o equipamento em si. O conversor trabalhava numa largura de banda entre 160 a 195 kHz e conseguia amplificar o sinal em 10 vezes na posição “L.F. Distant”. O sistema acabou por ser descontinuado após o fim da guerra.



Figura 5 - Conversor CV-27/UPN ¹⁶

¹⁶ (Proc, n.d.-c)

Em 1952, um sistema denominado CYTAC (*Cycle Matching Tactical Bombing and Navigation System*) começou a ser desenvolvido. Era um sistema de navegação hiperbólico alternado, a operar na banda entre 90 a 110 kHz e em 1955 já existiam 3 estações construídas em Forestport, Nova Iorque, em Carolina Beach, Carolina do Norte e em Carrabelle, Flórida. Essas estações transmitiam sinais a 100 kHz com a duração de 100 microssegundos a potências máximas de 60 kW, exceto a de Forestport, que tinha uma torre que media aproximadamente 390 metros e que transmitia a uma potência máxima de 200 kW.

Os resultados dos testes realizados às estações transmissoras, durante o ano de 1956, demonstraram que as ondas terrestres de dia tinham um alcance a rondar as 2250 milhas náuticas e durante a noite de 1650 e as ondas ionosféricas com um alcance de 3000 milhas náuticas. Demonstraram também que usar certos automatismos ao nível dos instrumentos poderia solucionar o problema relacionado com a identificação de ciclo da frequência rádio e poderia ainda medir a diferença de tempo sum sistema hiperbólico com um erro médio de apenas algumas décimas de microssegundo.

O sistema CYTAC, acabou por ser, devido a razões operacionais, abandonado. No entanto, o seu uso como uma ajuda à navegação foi imediatamente visível.

O desenvolvimento e uso do CYTAC era classificado, dada a sua natureza ser militar, mais concretamente de bombardeamentos táticos, sendo que a sua distribuição para a navegação civil era limitada. No entanto, a Força Aérea Americana desclassificou a utilização do CYTAC para a população em geral chamando-lhe de LORAN-C.

O LORAN-C era muito preciso e era um sistema que operava a longo alcance, independente das condições meteorológicas e disponível 24 horas por dia. «*For the user, LORAN-C was just a simpler technology. Ron Caswell (2011), who worked on LORAN Station Attu during the transition period, explained: "LORAN-C was just a big step up, you could just dial in your numbers and you didn't have to look at a scope and line anything up. It was a stronger signal. It was a more accurate signal. With the LORAN-A, you almost had to go to operator school, learn how to read your receiver, where with LORAN-C you could read the book and figure out where you were at with it."*»(Voellinger et al., 2015, p. 2-3)

Em 1957, o sistema LORAN-C é instalado nas estações: Carolina Beach, Marthas's Vineyard e Jupiter Inlet.

Iniciava-se o processo de descontinuação do LORAN-A para o LORAN-C e no dia 14 de março de 1958, o secretário da Defesa escreveu uma carta ao Secretário do Tesouro a pedir mais fundos para a construção de 7 estações LORAN-C, «“*Construction funds for this priority requirement are being provided by reallocation from the 1958 LORAN-A construction program for which funds have been made available to the Coast Guard by transfer from a defense appropriation.*”»(Voellinger et al., 2015, p. 2-3). Os fundos seriam utilizados no treino e formação de equipas para operar nas novas estações. Para a fase de substituição de sistemas, inicialmente a ideia era que as estações de ambos seriam combinadas até o LORAN-A ser descontinuado e estudos indicavam que os dois podiam ser integrados sem afetar as coberturas de cada um. Era importante que o processo fosse lento e gradual, visando as possibilidades financeiras dos utilizadores, e acessibilidade que os mesmos poderiam ter ou não aos novos recetores.

O processo do fim do LORAN-A e do início de LORAN-C foi anunciado pelo Secretário dos Transporte dos Estados Unidos da América a 16 de maio de 1974.

3.2.2 Princípios básicos do sistema

O LORAN-C funcionava com estações *Master* e *slaves* dispostas como demonstrado na Figura 6. A primeira transmitia impulsos em todas as direções e as segundas recebiam esses mesmos impulsos e transmitiam sinais semelhantes rigorosamente sincronizados com os transmitidos pela *Master*. A diferença de tempo entre a receção dos impulsos da estação *Master* e os impulsos correspondentes das *slave* estabeleciam as LDP's (linhas de posição). (Hefley, 1972, p. 1)

Os impulsos das estações *Master* e correspondentes *slave* não eram transmitidos em simultâneo, sendo que as transmissões das estações secundárias eram atrasadas de forma controlada de maneira que os sinais da estação principal chegassem sempre primeiro.

O LORAN media as diferenças de tempo da receção dos sinais, consultava cartas e tabelas especiais inseridas no sistema e interpolava entre as LDP's tabeladas para determinar a LDP correspondente ao tempo medido.

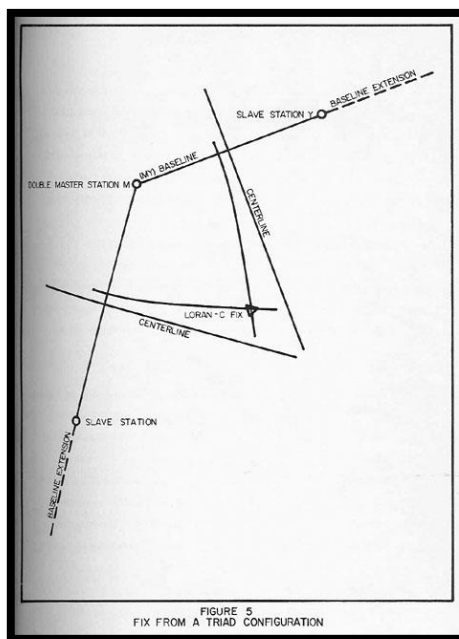


Figura 6 - Disposição estações LORAN-C/ Posição determinada ¹⁷

As estações LORAN-C estavam localizadas de maneira a que os sinais de diferentes pares pudessem cobrir a mesma área desejada e que o *fix* pudesse conter mais que uma LDP. As *slave* encontravam-se entre 500 a 600 milhas da estação *Master*.

3.2.3 Características do sinal

As estações transmissoras LORAN-C estavam agrupadas em cadeias de 3 a 5 estações, sendo uma delas a *Master* (M) e as outras *slave* ou secundárias (W, X, Y, Z).

Por volta de 1989, existiam 16 cadeias LORAN-C constituídas por 67 estações que transmitiam a 100 kHz. Número esse que aumentou de 16 para 28 em 2000. Os níveis de potência podem alternar entre os valores de 11 kW e 1.2 MW. A disponibilidade do sinal transmitido é superior a 99.9%. (Proc, n.d.-c)

O LORAN-C opera numa banda de frequência de 100 kHz com um espectro contido na banda dos 90 aos 110 kHz e os seus sinais eram transmitidos num *group repetition interval* (GRI). Para cada cadeia é selecionado um GRI mínimo com dimensão suficiente para conter o tempo da transmissão do grupo de impulsos «[...] 10,000 microseconds for the master and 8,000 microseconds for each secondary [...]»(Bowditch, 1977, p. 992)

¹⁷ (Bailey, Washington, & Alexandria, 1962)

mais o tempo entre cada grupo de impulsos, de forma a que os sinais transmitidos por duas ou mais estações não se sobreponham. Ao nomear-se as cadeias inclui-se o GRI, «As an example the Great Lakes Chain has a GRI of 8970. This means the time interval is 89700 microseconds.»(Proc, n.d.-c). Houve uma evolução nos recetores sendo que nos antigos o operador tinha que colocar este número para conseguir receber o sinal da cadeia pretendida e nos novos esse processo é automático.

Como é escolhido o GRI? Os parâmetros para se escolher são: distância entre a *master* e as *slaves* devido ao tempo que o sinal demora a percorrer a mesma; número de *slaves*, visto ser preciso “atrasos” nos sinais para não se cruzarem; geografia; cadeias presentes nas “redondezas” tendo-se em consideração uma possível interferência; interferência do *cross-rate* da onda ionosférica; ciclo dos transmissores, sendo que um GRI mais rápido implicará que a média da potência transmitida também seja maior o que significa que na fase final o transmissor precisará de um arrefecimento maior. (Proc, n.d.-c).

O grupo de impulsos da estação *master* consiste em 8 impulsos espaçados em 1000 microssegundos entre si e um nono impulso que ocorre 2000 microssegundos após o oitavo, enquanto que nas *slave* consiste em 8 impulsos espaçados em 1000 microssegundos. «The master's ninth pulse is used for visual identification of the master, and for blink.»(Bowditch, 1977, p. 992). O *blink* serve para avisar os recetores se alguma das estações está com erros a nível de transmissões.

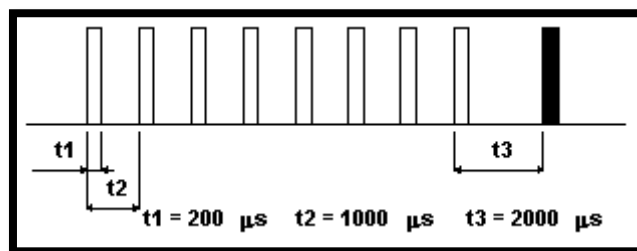


Figura 7 - Impulso LORAN de uma estação *master* ¹⁸

¹⁸ (Proc, n.d.-c)

3.2.4 Ondas terrestres e ionosféricas

As ondas terrestres ocorrem quando alguma da energia libertada pela transmissão viaja paralelamente à superfície da terra. As ondas ionosféricas, por sua vez, resultam também de parte da energia libertada viajando, no entanto, para cima e para baixo, sendo refletidas numa camada eletrificada da atmosfera. (Figura 8)

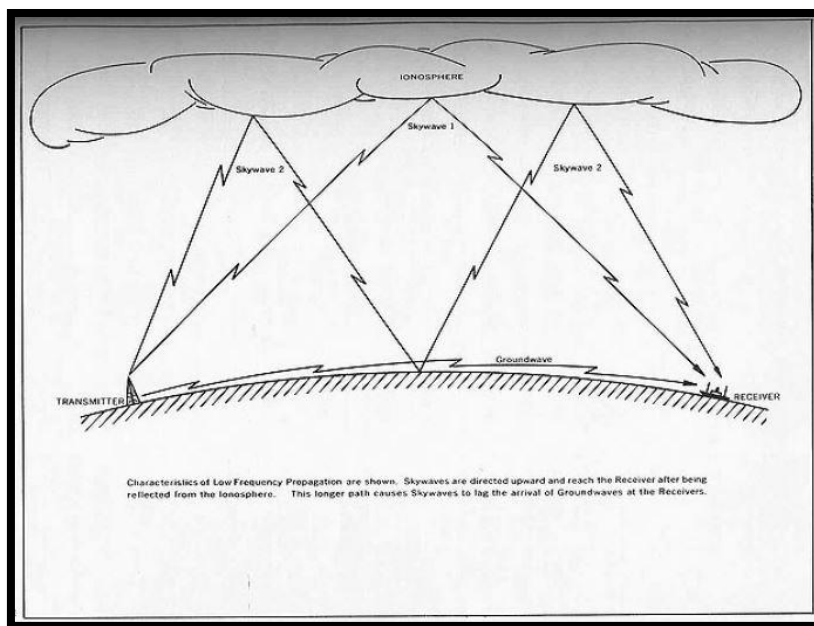


Figura 8 - Percurso das ondas terrestres e das ondas ionosféricas ¹⁹

A cobertura da onda terrestre deste sistema estendia-se até cerca de 1200 milhas náuticas. No entanto podia ser inferior, durante períodos de maior ruído e interferência, ou superior, durante períodos de boa propagação.

A estabilidade da ionosfera, a frequências de cerca de 100 kHz, é relativamente elevada. Era raro existirem variações de fase consideráveis durante períodos de uma hora ou mais.

Foram observadas ondas ionosféricas durante o dia e durante a noite que podiam ser utilizadas. Estas ondas tanto eram ondas que tinham uma primeira reflexão, ou duas reflexões, atingindo alcances de 2300 e 3400 milhas náuticas respetivamente.

Operando o sistema com ondas terrestres e ionosféricas, por vezes as últimas podiam “contaminar” o sinal recebido. As ondas ionosféricas podiam chegar ao recetor

¹⁹ (Bailey et al., 1962)

desde 35 a 1000 microssegundos depois das ondas terrestres. Em qualquer dos extremos causava distorção do sinal recebido e levava a grandes erros na determinação de posições se não se tivesse em conta esses fatores, aquando a escolha do tipo de sinal para o LORAN-C e do próprio *design* dos aparelhos recetores.

Para os sinais que chegavam mais cedo, a solução era fazer a medição dos tempos de chegada da primeira parte do impulso. «*This ability is enhanced by the fast-rising pulse [...] achieving high power prior to the arrival of the skywaves.*» (Bowditch, 1977, p. 993). O formato do impulso permitia ao recetor identificar um ciclo do sinal de 100 kHz.

Para os sinais que, por sua vez, chegavam mais tarde, era efetuada uma alteração na fase em cada impulso da onda transportadora. Os diferentes códigos de fase do sistema LORAN-C tanto para a estação *Master*, como para as estações *slave*, permitiam que os recetores automáticos usassem esses mesmos códigos para identificação das estações. (Bowditch, 1977, p. 995).

4. Sonne/Consol

O Consol era um sistema de radionavegação de longo alcance e pouca precisão que indicava azimutes através de radiofaróis e que tinha um alcance de cerca de 1500 quilómetros. Era primariamente utilizado para navegação aérea, no entanto o sistema podia ser útil para o marinheiro que praticasse navegação oceânica. Incorporava uma cadeia de estações rádio independentes e transmitia sinais na banda MF. Cada uma das suas estações transmitia dois sinais direcionais com a mesma frequência e eram distinguidos através de uma modulação em código Morse, usando-se um traço num sinal e um ponto noutra. Através da contagem de traços e pontos entre o sinal de sincronização e a altura na qual os sinais eram iguais, conseguia-se determinar um azimute com um rigor de 0.6°. (Bowditch, 1977, p. 1013; Brown, 1947, p. 968; Groves, 2009, p. 9)

4.1 História

Em 1938, na *Standard Elektrik Lorenz*, empresa alemã que construía aparelhos eletrónicos, foi desenvolvida uma versão melhorada da *American Radio Range* pelo Dr. Ernst Kramar. Esta versão, denominada Elektra, era capaz de definir várias *routes* através de *multiple fixed equisignals*²⁰. Este sistema foi usado pelos alemães no início da Segunda Guerra Mundial e foi, entretanto, melhorado por Kramar de forma a fornecer informação direcional entre os sinais. Renomeado Sonne, por influência do sol, o nome de Consol era, na realidade, o nome que os britânicos lhe atribuíram. (Blanchard, 2008)

Enquanto os aliados se focavam nos sistemas hiperbólicos, os alemães concentraram-se nos aparelhos que operavam com ondas contínuas. O sistema Sonne era um desses e conseguia, com um recetor da banda MF e cartas e tabelas adequadas, determinar posições relativamente a radiofaróis posicionados em terra. (Brown, 1947, p. 968)

²⁰ *Equisignal* define-se como: «of or relating to a radio system used in navigation in which two distinguishable signals of different amplitude emitted by a radio range station merge and become indistinguishable when the receiver is in the on-course region», ou seja, como o sinal era composto por uma emissão de pontos, que se ouviam em determinadas direções e de traços que se ouviam noutras, a região equisignal é uma zona onde se detetam traços e pontos, que formam um sinal contínuo, não se distinguindo os traços dos pontos.

Este sistema foi comissionado em 1940 com dois transmissores em Espanha e um na Noruega. Posteriormente, após o término da Segunda Guerra Mundial, foram adicionados mais transmissores em França e na Irlanda do Norte e entre 1958 e 1960, tanto os Estados Unidos da América como a Rússia adicionaram mais dois cada. A maior parte das estações do sistema Consol estavam desligadas no ano de 1980. (Groves, 2009,)

As estações localizadas em França, Espanha e Noruega serviam como ajuda à navegação de aeronaves alemãs que faziam a rota entre França e Noruega sobre o Atlântico e também para os conhecidos *U-boats*. O sistema era um sistema hiperbólico “falhado”, *«It is an example of a ‘collapsed’ hyperbolic system where in the baseline between the transmitting aerials is made so short that the hyperbola degenerate into radials at a very short distance and the system becomes a bearing system rather than a hyperbolic one.»*(Blanchard, 2008).

Durante a Segunda Guerra Mundial os ingleses conseguiram capturar cartas do sistema Sonne e o chefe do serviço de navegação do Comando de Costa em Northwood, Comandante Richardson, com um recetor, conseguiu um bom azimute à sua posição e, com o a cooperação do departamento de mapas da Força Aérea, foram criadas cartas com especificações britânicas.

A Figura 9 representa o interior de umas estações, mais especificamente, a estação localizada em Lugo, Espanha.



Figura 9 - Equipamento de transmissão²¹

4.2 Princípios de funcionamento

Uma estação Consol consistia num transmissor de rádio a operar na banda MF, 300 kHz, com três antenas em linha, igualmente espaçadas a uma distância de três vezes o comprimento de onda do sinal transmitido²². As antenas eram injetadas com sinais que criavam padrões radiais de setores de pontos e traços alternadamente, separados pelo *equisignal*. Um observador ouvia o *equisignal* entre os sinais de pontos e traços uma vez por cada ciclo de transmissão e uma contagem desses mesmos pontos e traços dava uma posição angular dentro de um setor. (Bowditch, 1977, p. 1013; Brown, 1947, p. 968)

Os setores radiais não eram formados junto aos locais de transmissão criando uma limitação ao nível do alcance mínimo onde o sistema não podia ser utilizado, nomeadamente até às 30 milhas náuticas. Existia ainda, devido a uma distorção no padrão, um setor com 30° para cada lado da linha base que não podia ser utilizado.

²¹ (Ramón, n.d.)

²² $\lambda = 1 \text{ km}$; $3 \times 1 = 3 \text{ km}$

Como se usava então este sistema? Publicações como as 117A e 117B, *Radio Navigational Aids* e o volume 5 da *Admiralty List of Radio Signals* demonstravam todos os procedimentos para se usar o Consol e as tabelas de conversão dos pontos e traços em valores de azimutes reais das estações.

A Figura 10 apresentada a seguir representa uma carta experimental da Força Aérea Inglesa onde mostra a cobertura do sistema Consol para a maior parte do Reino Unido e Irlanda. Está datada de setembro de 1942.

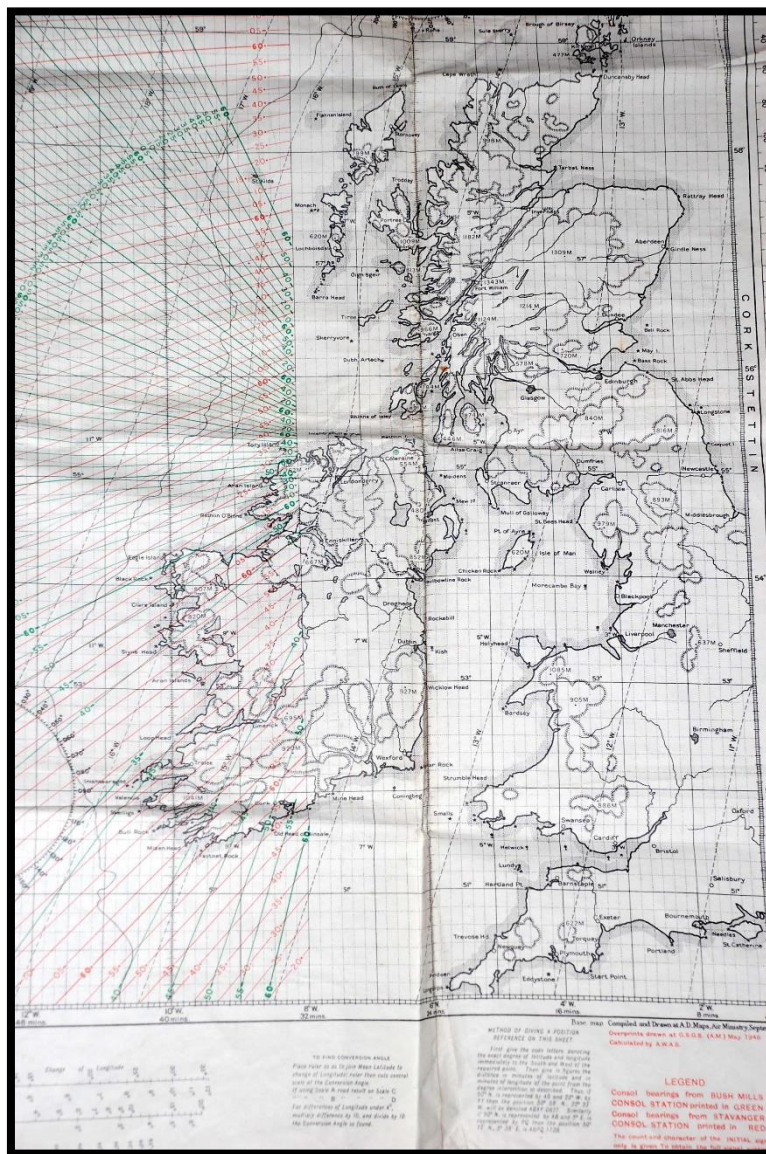


Figura 10 - Carta experimental da Força Aérea Inglesa²³

²³ (Blanchard, 2008)

4.3 O sinal

O sinal do transmissor era composto por duas partes: a transmissão do indicativo de chamada e a transmissão do padrão rotatório (período de navegação). O tempo de transmissão não era igual para todas as estações, no entanto o período de navegação tinha sido padronizado nos 30 segundos. A onda de sinal contínuo e o indicativo de chamada apenas eram transmitidos pela antena central e podiam ser utilizados para ajustes grosseiros (coarse tuning) ou para efeitos de descoberta de azimutes.

Os sinais podiam ser recebidos por qualquer recetor de banda MF, no entanto foram criados adaptadores especiais e outros recetores para o uso do sistema Consol que ajudavam na contagem dos pontos e traços. Um adaptador usava um indicador no qual os pontos eram indicados por uma deflexão para um lado e os traços por uma deflexão para o outro. Os recetores automáticos do sistema Consol, por sua vez, mostravam uma leitura da quantidade de pontos e traços. (Bowditch, 1977, p. 1014)

4.4 Alcance e precisão do sistema

4.4.1 Alcance

As estações Consol transmitiam um sinal contínuo com chave, sendo que o seu alcance máximo seria tanto maior quanto mais aproximado do valor 1 o rácio do sinal/ruído fosse. Foram disponibilizadas duas cartas que continham informação sobre o ruído nos diferentes locais do mundo. Essa informação era retirada do *International Radio Propagation Laboratory Handbook*. As cartas dividiam o mundo em 5 regiões de nível de ruído. Também a intensidade do campo necessária para a receção do sinal estava representada também nas 5 regiões.

O alcance operacional do sistema era em função da potência transmitida pelas suas três antenas. A potência total do transmissor é dividida pelas três antenas durante o período de navegação, sendo que a potência da antena central é maior que as restantes por um fator de “ k ”. Este fator influencia o alcance do Consol, no entanto quanto maior for “ k ” menor será a potência disponível das restantes antenas, tornando a tarefa de contagem de pontos e traços mais dificultada sob a influência de ruído. O valor atribuído a “ k ” é normalmente 4 para o funcionamento ótimo do sistema.

Os alcances do sistema, para o dia e para a noite, eram entre 500 a 1200 milhas náuticas e entre 900 a 1500 milhas náuticas respectivamente. Durante a noite, como as ondas eram refletidas, os sinais conseguiam atingir distâncias maiores. (Bowditch, 1977, p. 1014; Brown, 1947, p. 974)

4.4.2 Precisão

O número de setores de pontos e traços e por sua vez a precisão das LDP deste sistema dependiam do tamanho da linha base, λ , entre a antena central e as restantes. O número de setores dependia de λ , «*Since the wavelength is fixed for each station, the number of sectors will therefore depend upon λ .*»(Bowditch, 1977, p. 1015) Para qualquer valor de λ haviam 8 λ linhas *equisignal* nos 360° de cobertura. Por razões práticas normalmente λ assume o valor de 3. Neste caso as linhas estariam aos seguintes ângulos: 0°, ±9.6°, ±19.5°, ±30°, ±41.8° e ±90°. No último setor de cada lado, com cerca de 34° de amplitude, a velocidade de rotação da linha *equisignal* não era constante, especialmente no início de cada ciclo de navegação, onde seria um máximo. «*The readings in these sectors are therefore normally taken as unreliable*»(Bowditch, 1977, p. 1015)

A curtas distâncias o erro apresentado também era grande e por duas razões: a curto alcance as linhas *equisignal* são hiperbólicas em vez de azimutais e devido à presença de curvas *equisignal* fixas.

Com o aumento da distância o erro diminuía e a 50 km da estação o erro médio correspondia a 2 minutos de arco. O erro mínimo variava com a posição do observador dentro do setor e a distância e azimute a que se encontrava da estação. Este erro era unicamente devido ao sistema em si, sendo o erro mínimo do sistema.

A precisão do Consol durante o dia era maioritariamente devida a erros instrumentais dos equipamentos de transmissão e por irregularidades no terreno envolvente.

As ondas predominantes durante o dia até às 150 milhas náuticas eram as terrestres enquanto que as ionosféricas eram predominantes a distâncias superiores a 500 milhas náuticas.

A propagação dos sinais do sistema era maioritariamente feita através de ondas terrestres. No entanto, à noite, as ondas ionosféricas têm amplitudes com valores inferiores, iguais ou maiores do que as ondas terrestres, dependendo da localização do observador relativamente à estação. Quando havia combinação de ambas ondas terrestres e ionosféricas dava aso a erros nos azimutes determinados.

4.5 Descrição das estações terrestres

4.5.1 Equipamento de transmissão

O equipamento de transmissão consistia num transmissor padrão associado a uma unidade de controlo separada para as operações de *phase-shifting* e de *keying*. Na Figura 11 podemos verificar o esquemático de uma estação Consol. (Brown, 1947, p. 970)

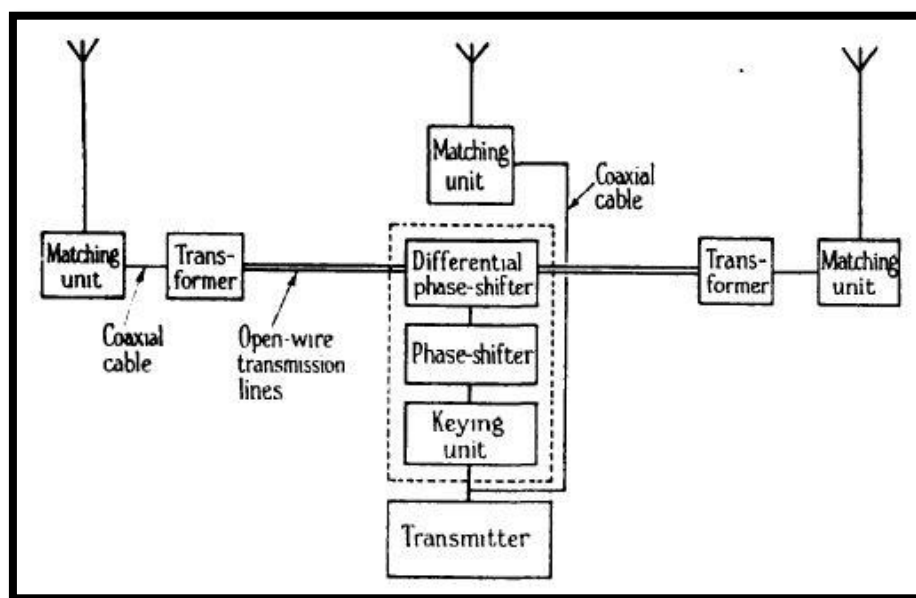


Figura 11 - Esquemático de uma estação Consol ²⁴

A unidade de controlo consistia numa unidade de *keying*, um *phase-shifter* manual e ajustável e um *phase-shifter* diferencial. A unidade de *keying* revertia a fase das antenas exteriores explicando os padrões de pontos e traços; o *phase-shifter* manual e ajustável era usado para o ajuste inicial das fases das correntes das antenas exteriores relativamente à antena central; e o *phase-shifter* diferencial avançava a fase da corrente para uma das antenas exteriores e atrasava a fase de corrente da outra pelo mesmo valor fazendo com

²⁴ (Brown, 1947)

que houvesse a rotação do padrão do sistema de antenas. Na Figura 12 podemos ver um esquemático da configuração da unidade de controlo.

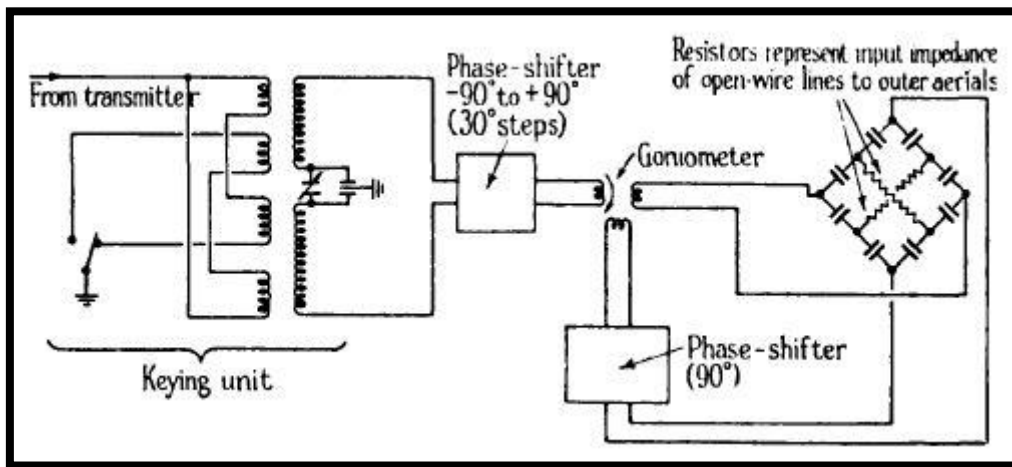


Figura 12 - Esquemático da unidade de controlo²⁵

4.5.2 Sistema de antenas

Era importante, num sistema destes, que a energia radiada não tivesse qualquer tipo de componente polarizada horizontalmente, visto que as ondas terrestres com essas características eram atenuadas muito rapidamente e não tinham qualquer efeito em distâncias curtas. De forma a evitar essas situações é importante garantir que a energia radiada fosse polarizada verticalmente por completo.

4.5.3 Instalações de Controlo

De forma a fazer-se um controlo contínuo dos sinais irradiados era instalado, a cerca de uma milha e meia da estação, um recetor de controlo. O *output* desse recetor estava ligado ao edifício transmissor por cabos soterrados. (Brown, 1947)

²⁵ (Brown, 1947)

5. Decca Navigator System (DNS)

O sistema Decca é um sistema de radionavegação hiperbólico que foi estabelecido no Reino-Unido após a Segunda Guerra Mundial e foi usado, mais tarde, em vários locais no mundo. Este sistema usava comparação de fases de ondas contínuas de baixa frequência, LF (70-130 kHz), não-moduladas.

5.1 História

As origens deste sistema remetem aos Estados Unidos da América, mas o seu desenvolvimento num sistema operacional ocorreu no Reino-Unido pela *Decca Radio and Television Ltd. Of London*, empresa estabelecida em 1938 como uma subsidiária com o objetivo de dominar o mercado de construtores e negociadores de rádios e que em 1944 foi “absorvida” pela *Decca Record Company*. (“Decca Radio and Television,” n.d.)

Inicialmente era um método de medição de *ground speed*, velocidade de superfície, de aeronaves em teste, criado pelo engenheiro americano W. J. O’Brien e foi chamado de *Aircraft Position Indicator*. A ideia inicial deste engenheiro era utilizar o efeito de Doppler²⁶, mas era algo que a tecnologia de então não permitia, não se conseguindo adquirir uma estabilidade de transmissão favorável. O’Brien mudou de rumo e pensou que uma solução seria a utilização de duas estações transmissoras, sendo uma delas, uma estação de referência para a outra. O método utilizado na altura teria que ser o de comparação de fases dos sinais, o que só era alcançável com ondas da mesma frequência. Isto tornou-se, no entanto, um problema, quando se tentou estender este método a mais estações. O norte-americano concluiu que era preciso utilizar estações a transmitirem sinais com frequências diferentes, mas que fossem relacionadas harmonicamente. Uma maneira de incorporar isso no sistema era adicionar uma estação complementar que monitorizasse todas as estações e sincronizasse a que estivesse com uma fase diferente, restabelecendo o equilíbrio e o alinhamento das estações. (Blanchard, 2015b, p. 222)

O’Brien trabalhou independentemente entre 1936 e 1939 e não foi bem-sucedido na tentativa de obter a atenção das Forças Armadas dos Estados Unidos da América. O’Brien, com a ajuda de um amigo americano que trabalhava para a “Decca Record

²⁶ O efeito de Doppler consiste numa alteração da frequência das ondas emitidas produzida pelo movimento da fonte emissora relativamente a um observador. (Weisstein, n.d.)

Company” em Londres, H. F. Schwartz, apresentou a sua ideia ao Ministério Britânico do Ar. Watson Watt, pioneiro britânico do radiogoniómetro e da tecnologia radar, e que trabalhava como consultor científico para o Governo inglês, rejeitou a ideia alegando ser favorável à prática do *jamming*²⁷ e sujeito a interferência. Watt acabaria por reconhecer que estava enganado, após o término da Segunda Guerra Mundial.

Um sistema protótipo foi testado, na Califórnia, utilizando um transmissor mestre a 300 kHz e uma *slave* a 600 kHz. Foi feita a comparação a 1200 kHz e a exatidão do sistema foi demonstrada num carro. Problemas de identificação e de comparação de fases no mínimo múltiplo comum das ondas transportadoras foram resolvidos sem ser preciso qualquer tipo de modulação.

As baixas frequências que o Decca usava fez crescer o interesse Naval visto que permitiam que o sistema fosse usado ao nível do mar, atingindo alcances consideráveis, ao contrário do sistema GEE que ao usar VHF, funcionava na linha de visão. Finalmente, em setembro de 1942 a Marinha Britânica decide fazer um teste a sério ao Decca. (Blanchard, 2015b)

Iniciou-se uma colaboração entre o Decca e a *Admiralty Signals Establishment* (ASE), que viria a tornar-se muito fortuita. A Figura 13 representa uma carta enviada pelo Decca à ASE.

²⁷ Obstrução deliberada da passagem de informação rádio através de aparelhos especiais. (Pleikys, n.d.)

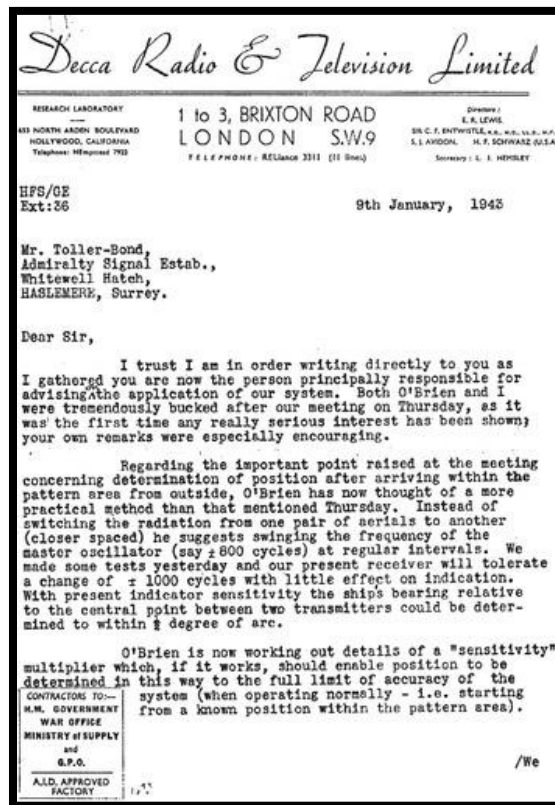


Figura 13 - Carta para a ASE ²⁸

Em simultâneo o Almirantado Britânico, que planeava eventuais desembarques em terras francesas, precisava de um sistema de navegação preciso, o que lhes guiou a atenção para o Decca, em 1941. Era necessário um sistema de navegação de “reserva” para dar alguma redundância caso houvesse *jamming* ao sistema GEE utilizado na altura.

Em 1942 foram efetuados testes na ilha de Anglesey utilizando o mesmo equipamentos e frequências que haviam sido usados na Califórnia com grande sucesso, resultando assim, com o apoio da ASE, em mais pesquisa. Nestes testes o recetor utilizado era um simples «[...] *centre-zero meter driven by a “half” phase discriminator circuit which measured phase changes up to $\pm 90^\circ$, as opposed to the full discriminator later developed to drive a circular 360° Reading phasemeter (“Decometer”) through one revolution for one cycle of phase difference.*» (Blanchard, 2015^a, p. 223)

Em março de 1943, foram produzidos 27 recetores mais a driver e unidades de controlo de fase precisas para os transmissores e todo o equipamento foi então entregue

²⁸ (Blanchard, 2015b)

à *Royal Navy* que, em janeiro de 1944, fez testes usando novas frequências e comparando com os resultados do sistema GEE da Força Aérea.

Os testes feitos no Mar do Norte Irlandês, antecederam a invasão das forças aliadas das praias francesas. Foi usada, mais uma vez, uma grelha com linhas de posição singulares, geradas pelas estações localizadas em Drummore e Calderton, e um recetor a bordo do HMS *Saltburn*. Os resultados eram satisfatórios num teste onde, pela primeira vez, os sinais transmitidos eram na frequência de 6f (85 kHz). Fizeram-se ainda testes comparativos entre este novo sistema e o GEE, tendo o Decca melhores resultados em termos de alcance e de rigor.

O Decca foi o sistema escolhido para as operações de caça-minas e teve um grande impacto no desembarque da Normandia efetuado na Segunda Guerra Mundial. Para a Operação Neptuno (Dia D) foram instaladas quatro estações Decca em locais que, na altura, lhes foi atribuído o maior nível de secretismo possível pois, a descoberta das suas localizações, colocaria em causa as intenções de desembarque nas respetivas praias. Foi mais tarde transmitido que a estação *Master*, “A”, foi colocada nos arredores de Chichester, a estação Vermelha, “B”, perto de Swanage em Dorset e a estação Verde, “C”, em Beachy Head. De referir que a quarta estação não era a estação Roxa, considerada desnecessária para aquela operação, mas sim uma estação de engodo, isto se os alemães descobrissem alguma parte do plano engendrado, colocada na ilha de Sheppey.



Figura 14 - Logotipo do Sistema Decca ²⁹

Padrões hiperbólicos formaram-se a partir dos sinais dos transmissores das estações Vermelha e Verde e os mesmos foram traçados nas cartas e eram designados por “linhas de grelha” (*lines of lattice*). Essas linhas eram calculadas por uma equipa de mulheres que trabalhavam a pares num barracão da ASE com direito a segurança armada. Foram construídos pela empresa dezanove recetores Decca e incorporados em 5 lanchas de desembarque, doze navios chefes de flotilhas de dragagem de minas e duas lanchas de defesa de porto.

A 18ª Flotilha de Draga Minas, naquele dia, estava apenas 4 minutos atrasada e 400 jardas fora de posição de atingir o ponto estabelecido na praia, mesmo apesar dos ventos fortes e das marés sentidas, o que para a altura era uma margem de erro mais que aceitável. Um dos oficiais responsáveis pela navegação referiu: «*It was uncanny. It seemed as if we had some sort of overhead cable which not only showed us the direction but also our speed.*»(Proc, n.d.-b).

O Instituto Hidrográfico propôs, em 1977, ao Almirante CEMA, que fosse instalada uma cadeia Decca em Portugal. No entanto, após a queda do governo na altura, o negócio acabou por morrer e nunca mais retornou à agenda política.

²⁹ (Proc, n.d.-a)

5.2 Princípios Básicos

O Decca utilizava grupos de pelo menos três estações de transmissão à qual chamavam de cadeias. Cada cadeia correspondia a uma estação *Master* e duas ou três estações secundárias, “slave stations”, normalmente localizadas entre 80 a 110 quilômetros (outra referência, refere entre as 60 e as 120 milhas náuticas (Bowditch, 1977)) da estação *master* e separadas por ângulos a rondarem os 120 graus o que conferia uma grande cobertura e, como ondas terrestres desta banda de frequências não são muito atenuadas por passarem por cima de terra, as estações podiam estar situadas, de forma vantajosa, mais para o interior.

O usual era, a cada cadeia Decca, corresponderem quatro estações que operavam em três pares: estação *Master/slave* vermelha, *Master/slave* verde, *Master/slave* roxa. A função da estação secundária era transmitir um sinal harmonicamente relacionado e ter uma relação de fase fixa com a estação *master*.

Sendo impossível, na prática, separar duas ondas de frequências idênticas num recetor para se comparar diferenças de fase, visto as duas tornarem-se em apenas uma, utilizava-se um equipamento que alcançava o efeito de enviar sinais de igual frequência tanto da estação *master* como da *slave*. O efeito que os sinais enviados de cada estação chegam com frequências similares ao medidor de fase, livres de interferência ou de distorção de onda, era alcançado através da atribuição de valores harmonicamente relacionados às próprias frequências transmitidas por cada estação. Assim, os circuitos de multiplicação dos recetores, derivavam um valor harmónico comum, sabendo-se assim, a frequência de comparação.

Cada estação na cadeia transmitia uma onda portadora com fase estável não modulada. As ondas portadoras estavam harmonicamente relacionadas com uma referência de uma estação interna que tinha uma frequência entre os 14.00 e os 14.33 kHz, retratada como “f”.

Usando a referência “f” sabemos que a Estação *Master* normalmente transmitia uma onda transportadora não modulada a “6f” na banda dos 85 kHz.

Essas transmissões eram recebidas por um recetor especial e um circuito que multiplicava a frequência produzindo as fases de comparação: 24f para a *Master* e a Vermelha, 18f para a *Master* e a Verde e 30f para a *Master* e a Violeta.

Esse recetor era, na realidade constituído por 4 recetores, sintonizados para as diferentes harmónicas da frequência fundamental “f”.

	<i>Master</i>	Vermelha	Verde	Violeta
Frequência de transmissão (kHz)	85,000	113,333	127,500	70,833
Harmónica	6f	8f	9f	5f
Frequência de comparação de fase	-	340,000	250,000	425,000
Harmónica	-	24f	18f	30f
Largura do canal sobre a linha base (m)	-	440,735	587,647	352,588
Frequência de comparação para identificação do canal (1f)	-	14,166	14,166	14,166
Largura da zona na linha base (km)	-	10,56	10,56	10,56

Tabela 2 - Transmissão e comparação de frequências de uma cadeia³⁰

Cada hipérbole da grelha do Decca sobreposta na carta de navegação com a cor correspondente à estação *slave* é uma hipérbole *in-phase* ou *zero phase-difference*. A área entre cada uma dessas hipérboles é denominada por *lane*.

As hipérboles são baseadas na velocidade de propagação das ondas rádio, partindo do princípio que o seu percurso é todo efetuado acima do mar, de maneiras que são recomendadas correções se passarem em terra também.

O sistema Decca não utilizava ondas ionosféricas, sendo que as reflexões na ionosfera alteravam as fases das mesmas. O alcance do sistema era reduzido, sendo de aproximadamente 350 milhas durante o dia com erros na ordem das centenas de jardas e de aproximadamente 175 milhas durante a noite com erros até 2 milhas.

A Figura 15 representa uma carta Decca.

³⁰ (Bowditch, 1977)

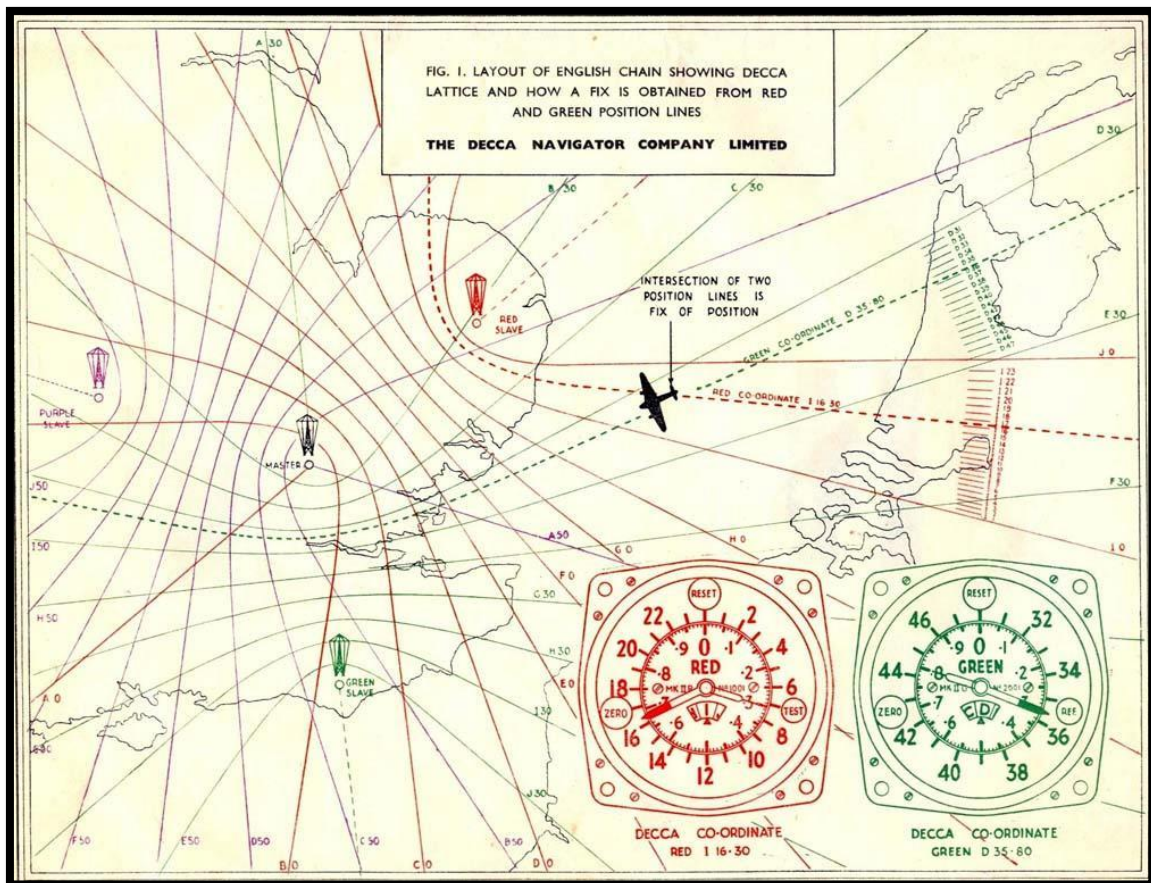


Figura 15 - Carta Decca

Os sistemas Decca e GEE eram bastante similares em termos dos seus princípios gerais, sendo o Decca mais preciso e mais *user-friendly*, porque os resultados do mesmo eram apresentados diretamente nos indicadores do relógio, denominados decómetros, em vez dos tubos de raios catódicos utilizados no GEE.

Segundo a edição original do Dicionário da IALA (1970-1989) o decómetro (Figura 16) é um medidor de fase usado como *display* da informação de posição-linha dentro de um modelo. As leituras do decómetro e do identificador de *lanes* em conjunto determinam a linha de posição sob a qual a embarcação se encontra. Cada volta que o ponteiro desse equivalia à extensão de uma *lane*. Conseguia providenciar uma posição do recetor bastante precisa entre duas linhas de posição, mas era, no entanto, incapaz de identificar a lane na qual se encontrava. «*Since lane width varies from less than a mile near the base line to 3 miles or so at 300 miles range, this would cause a high degree of ambiguity, which a ship, entering the coverage area after an ocean passage, might not be able to resolve. Once the initial position has been established, however, the decometer, which is*

capable of continuous rotation, can integrate its movements in the lattice pattern by a set of counters geared to the fractional pointer.»(Proc, n.d.-a)



Figura 16 – Decómetro

5.3 Transmissores Decca

As transmissões iniciais do sistema Decca eram num modo denominado “V”. No entanto, no ano de 1962, é introduzido um novo modo, os sinais MP (*Multi Pulse*).

No modo “V” as transmissões normais das estações eram interrompidas. Ocorria um reagrupamento e comutação das frequências nos recetores devido a sinais transmitidos da estação *master*. As transmissões de identificação ocorriam uma vez por minuto com intervalos de 15 segundos para cada par estação *Master-slave*.

As 4 frequências, 5f, 6f, 8f e 9f, que são transmitidas, não se alteram, sendo a única alteração a sua distribuição pelas diferentes estações. No recetor, por sua vez, o que se altera em relação às transmissões normais é apenas o tratamento dado às frequências recebidas, com foco na obtenção da “f” e “6f”, mais especificamente.

O mostrador no decómetro apresentava um ponteiro múltiplo com 6 braços espaçados em 60°, sendo que em cada transmissão de identificação estavam logo

Mas esse cenário viria a mudar, quando foi desenvolvido o *Decca Navigator Unit Type Transmitter*, que dispensava a necessidade de criar redundância ao ter-se mais que um transmissor. Este transmissor continha 8 amplificadores e duas unidades “drive” que trabalhavam em paralelo e que forneciam um “output” de 640 watts de potência.

Amplificadores e unidades drive sobressalentes eram usadas, caso fosse necessário, no local e, visto as unidades trabalharem independentemente e com fontes de energia próprias, a transmissão nunca parava.

De forma a que as transmissões das estações *slave* fossem *phase locked* com a transmissão da respetiva estação *master* foram instaladas nas mesmas uma unidade de controlo de fase (PCU). Esta recebia a transmissão da estação *master* e sincronizava ambas as fases num processo contínuo de comparação e correção das transmissões efetuadas pelas estações *slave*.

5.4 Alcance do Sistema

O alcance de uma cadeia Decca rondava as 240 milhas, no entanto, o sistema podia ser utilizado até uma distância de 450 milhas das estações.

Para além da distância às estações também o ângulo com que se cruzavam as linhas de posição e fatores diurnos e sazonais tinham impacto no rigor das posições determinadas por este sistema.

A partir das 240 milhas, tal como está referido na Tabela 3, normalmente apenas uma linha de posição era utilizável. No entanto, onde houvessem cadeias adjacentes em que as zonas de cobertura das mesmas tivessem sobreposição, era possível obter pontos utilizando LDP's das duas cadeias simultaneamente.

Distância às estações	Erro associado
Zonas restritas (próximo do centro da cadeia)	±15 m
0 – 50 milhas	< 50 m
50 – 240 milhas	±2 milhas
240 – 450 milhas	(normalmente só era utilizada uma LDP)

Tabela 3 - Erros nas posições

O *Inter-chain Fixing*, como era chamado esse processo, só era possível usando os recetores «[...] MK 12 ou MK 21 e com cadeias cujo sistema de identificação de canais fosse do tipo MP (MULTIPULSE).»(Germano, 1973, p. 25). Era um método vantajoso em situações de maior alcance onde o utilizador era incapaz de resolver a ambiguidade de zona. Os transmissores para as duas cadeias não eram *phase locked*, não sendo possível usar combinações de transmissores das duas cadeias para fornecerem novas famílias de hipérboles.



Figura 18 - Recetor Mark 21 (MK 21)

Era também necessário dispor-se de cartas Decca especiais, *Multi-chain Decca Charts*, que tinham as linhas de posição referentes às duas cadeias traçadas.

5.5 Erros do Sistema

O sistema Decca tem 2 tipos de erro associados:

1. Sistemáticos (*Fixed*):

«A localização geográfica das linhas de posição DECCA é função da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas.»(Germano, 1973, p. 26)

O comprimento de onda dos sinais transmitidos pelo sistema Decca era cerca de 3000 metros, sendo que a banda de frequência correspondente apresentava características de propagação muito estáveis. Apesar dessa estabilidade, e de ser uma onda de superfície considerada “sem anomalias”, sazonais ou diurnas, existiam variações na velocidade de propagação, resultantes do comportamento das ondas em diferentes superfícies.

A linha de posição técnica, «[...] velocidade de propagação constante para cada direção e uniforme em todas as direções [...]»(Germano, 1973, p. 27) que seria uma hipérbole, difere da linha de posição real, «[...] velocidade não uniforme para diferentes direções [...]»(Germano, 1973, p. 27).

De forma a contornar estas anomalias, adotou-se uma velocidade média de propagação, com a qual se traçava as linhas de posição, e elaboraram-se Tabelas de Correções. Essa velocidade adotada era muito próxima da velocidade de propagação sobre a água do mar e correspondia, nas cartas Decca, à média das velocidades prováveis calculadas para uma grande quantidade de pontos na zona de cobertura da cadeia. Os erros mais significativos ocorriam quando os sinais tinham trajetos terrestres consideráveis.

Os erros eram considerados sistemáticos porque, apesar de variarem de lugar para lugar, a estabilidade de propagação mantinha-se.

Para além das Tabelas de correções são também criadas as cartas de erros sistemáticos (*pattern fixed error corrections*). As correções eram «[...] dadas em centésimos de canal e aplicadas à leitura do decómetro respetivo, antes de se marcar na carta a linha de posição. As correções envolvidas por um círculo são subtractivas, as outras são aditivas.»(Germano, 1973, p. 28). A divulgação das correções era feita ou

através dos Avisos aos Navegantes, ou através das “*DECCA DATA SHEETS*”, atualizadas e distribuídas pela “*Decca Company*”

Nas zonas da carta onde não aparecessem correções não significava que nas mesmas fosse zero, mas sim que era zonas não observadas. Nas zonas em que de facto fosse “0” o mesmo seria indicado. Nas zonas não observadas todo o cuidado era imperativo.

Apesar da importância da determinação destes erros e consequentes correções os valores dos mesmos tinham um carácter meramente estatístico, pois, através de observações posteriores, demonstravam nem sempre ser os mais corretos.

2. **Acidentais (*Variable*):**

Como já foi referido o sistema Decca usava ondas de superfície para a propagação dos seus sinais, no entanto, isso seria o cenário perfeito, visto que, na realidade, era impossível eliminar a onda ionosférica, que acabava por interferir com a onda de superfície e perturbar o normal funcionamento do sistema, com leituras incorretas nos decómetros.

A onda ionosférica, que durante o dia tinha muito pouco efeito atuando maioritariamente durante a noite, restringia o alcance das cadeias, dando origem a erros consideráveis e incorrigíveis.

O erro provável era, normalmente, maior quanto maior fosse a distância, sendo que a área de probabilidade do mesmo aumentava devido a 3 fatores: erro, largura do canal e ângulo de cruzamento.

O erro acidental dependia da posição do navio, da época do ano e hora do dia e o primeiro passo para o determinar era exatamente descobrir onde é que o navio se encontrava, através de uma carta especial que ditava que, em cada área identificada, havia uma probabilidade de 68% do erro não exceder um determinado valor. Estes erros, como já foi referido, variavam ainda sazonalmente e diariamente, de maneira que foram criados “Períodos Decca”. Os períodos eram os seguintes: dia, meia-luz, crepúsculo, noite de verão e noite de inverno, por ordem crescente de frequência.

Nas *Data Sheets* existiam, para cada cadeia, tabelas e ábacos, com os quais se determinavam os erros dos pontos obtidos. Um ábaco servia para determinar a que “Período Decca” a leitura feita pelos decómetros correspondia. Era importante saber-se que esses períodos nem sempre correspondiam à realidade vivida.

Obviamente que, e mesmo com valores de erro precisos, devia-se ter em mente que os valores apresentados não podiam ser tomados como absolutos.

6. OMEGA

O sistema Omega foi um sistema distribuído mundialmente de radionavegação usando bases terrestres. Operava na banda VLF, entre os 10 e os 14 kHz, e tinha como objetivo fornecer uma ajuda constante à navegação marítima e aérea.

Era um sistema que dependia de 8 estações transmissoras que emitiam, de forma contínua, sinais VLF. Um recetor determinava a posição através de medições de alcance com base na fase dos sinais recebidos de duas ou mais estações Omega, ou através de comparação de fases entre sinais de pares selecionados de estações, que formava linhas de posição que se intersectavam.

6.1 História

As transmissões de ondas de rádio na banda VLF não surgem com o desenvolvimento do sistema Omega. Essas remetem ao início do século XX, antes até da Primeira Guerra Mundial. Nessa altura já existiam várias estações pelo mundo a transmitirem e a receberem sinais. Entre as grandes guerras estações mais potentes foram construídas, mas eventualmente, e com o aparecimento de estações de rádio comerciais fazendo uso de bandas de frequências mais elevadas, transmissões em VLF eram utilizadas maioritariamente pelas Forças Armadas.

Apenas em 1947 é que um professor da Universidade de Harvard, John Alvin Pierce (Figura 19), e outros investigadores do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) propõem um sistema hiperbólico de navegação chamado Radux, utilizando frequências de 40 kHz com uma modulação de 200 Hz que fazia medições de diferença de fase, ao invés de diferença de tempo, visto funcionar com ondas contínuas. Esta frequência de modulação servia para atenuar a ambiguidade que a comparação de fase originava nos 40 kHz. O sistema foi sujeito a testes que, embora satisfatórios, «[...] a atenuação da ambiguidade resultava em diminuição do rigor técnico das linhas de posição determinadas e assim em 1955, às transmissões moduladas em 40 kHz foi adicionada uma outra transmissão em 10 kHz para aumentar o rigor na determinação das linhas de posição.»(Germano, 1974, p. 2). O sistema passou a ter o nome de Radux-Omega. O nome Omega surge por John Pierce acreditar que as frequências utilizadas se

encontravam no fim do espectro das ondas rádio (a letra “Omega” corresponde à última letra do alfabeto grego).

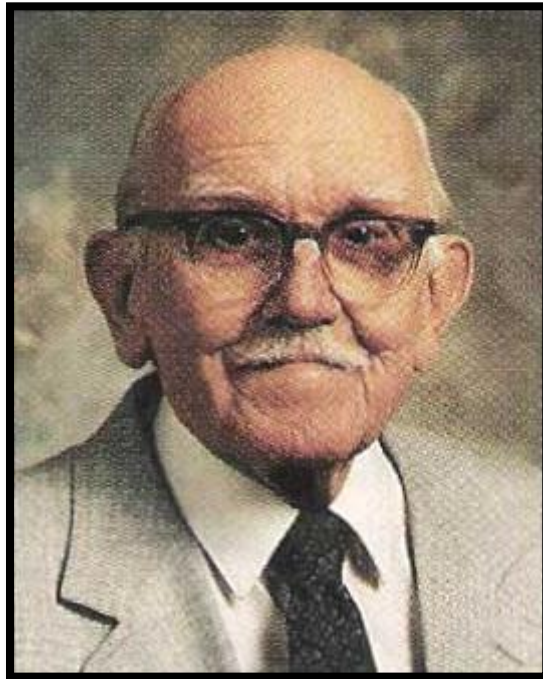


Figura 19 - John Pierce ³¹

O sistema não ficou logo operacional porque o alcance do sinal de 40 kHz era muito menor que o do sinal de 10 kHz; porque os erros das posições medidas eram maiores que o esperado; e porque, como o alcance dos sinais de 40 kHz eram bastante limitados, seriam precisas muitas estações para o poder tornar num sistema à escala mundial.

A modulação de 200 Hz foi trocada, «[...] lane identification was to be achieved through the use of multiple VLF CW transmissions at closely spaced frequencies.»(Morris, Gupta, Warren, & Creamer, 1994, p. 2-2) nascendo assim o Sistema Omega.

Os custos para a construção de antenas VLF eram muito elevados o que fez com que as primeiras estações Omega estivessem localizadas em sítios onde já existissem estações de VLF/LF. A potência das transmissões era muito baixa, mas os sinais eram facilmente detetados. No final dos anos 50, fizeram-se transmissões experimentais de estações navais em várias frequências da banda VLF com o intuito de descobrir qual a mais estável e os seus comportamentos durante o dia.

³¹ (Sally, 2011)

No início da década seguinte foram estabelecidas mais 3 estações experimentais enquanto que algumas, no seguimento da descontinuação do Radux-Omega, tinham sido encerradas. A rede ficava assim com 4 estações em Haiku (Havai), Forestport (Nova Iorque), Summit (Canal Zone) e Criggion (País de Gales), que funcionavam no modo “master/slave” onde a estação secundária sincroniza a sua transmissão para o sinal da estação principal. «*As historical note, the station at Criggion was built during World War II to serve as a back-up to the VLF communication station at Rugby (GBR).*»(Morris et al., 1994)

«*Based on the success of the initial experiments with Omega signals, the U.S. Navy formed an Omega Implementation Committee in 1963, chaired by J.A. Pierce to establish the transmitting, receiving, and operational characteristics of a worldwide Omega Navigation system.*»(Morris et al., 1994) O *Omega Implementation Committee* foi criado com o objetivo de tornar o sistema de navegação Omega global. Objetivamente visava principalmente a navegação marítima, mas não descartava nem a aérea nem a submarina. O comité era constituído por vários especialistas na área dos sinais de banda VLF, tais como Pierce, W. Palmer, A.D. Watt e R.H. Woodward.

Em maio de 1966 é publicado o relatório do comité que continha os princípios básicos de utilização do sistema, propagação do sinal, formato do sinal, etc. Incluía ainda as especificações iniciais dos locais de transmissão, dos equipamentos necessários, cartas de navegação, etc. Nesse ano a marinha norte americana iniciou preparativos para a implementação do Omega e bastante equipamento foi movido de estações antigas para novas e o sistema dava largos passos rumo à sua globalização e iniciação de operações. O modo “master/slave” acabou por ser deixado para trás, com a implementação do relógio atómico em todas as estações.

O sistema ficou disponível em Portugal em 1976, quando as estações que serviam o Atlântico Norte começaram a transmitir, no entanto, é apenas no ano de 1982 que todas as 8 estações Omega ficam operacionais. (Figura 20)

Station	Bilateral Agreement Signed	Station Declared Operational
A – Norway	November 1971	December 1973
B – Liberia	November 1973	February 1976
C – Hawaii (U.S.)	N/A	January 1975
D – North Dakota (U.S.)	N/A	October 1972
E – La Reunion (Fr.)	April 1981	March 1976
F – Argentina	December 1970	July 1976
G – Australia	September 1977	August 1982
H – Japan	August 1972	April 1975

Figura 20 - Datas importantes das Estações Omega ³²

Para contrariar o erro associado ao Omega de 2 a 4 milhas, foram instaladas em Portugal, em 1979, 3 estações de Omega diferencial, que transmitiam correções aos sinais Omega. Localizadas em Lagos, Porto Santo e Horta essas estações vinham melhorar a exatidão dos utilizadores para valores entre 0.3 e 1 milha, providenciando muito mais rigor ao Sistema Omega.

Quando o GPS vem revolucionar a navegação em todo o mundo, nos anos 90, os navegantes começaram a abandonar progressivamente o sistema Omega e a 30 de setembro de 1997 são desligadas as estações Omega e estações diferenciais correspondentes. «[...] em Portugal, passou-se diretamente do sistema Omega para o GPS, uma vez que nunca dispusemos nem de estações Decca nem de estações Loran-C.»(Monteiro, 2002)

6.2 Sistema de Transmissão

O Sistema de Transmissão do Omega consistia em oito estações transmissoras e nos procedimentos necessários para manter e sincronizar as mesmas. Essas estações eram identificadas por letras começando na “A” até à “H”. (Figura 21)

³² (Morris et al., 1994, p. 2-4)

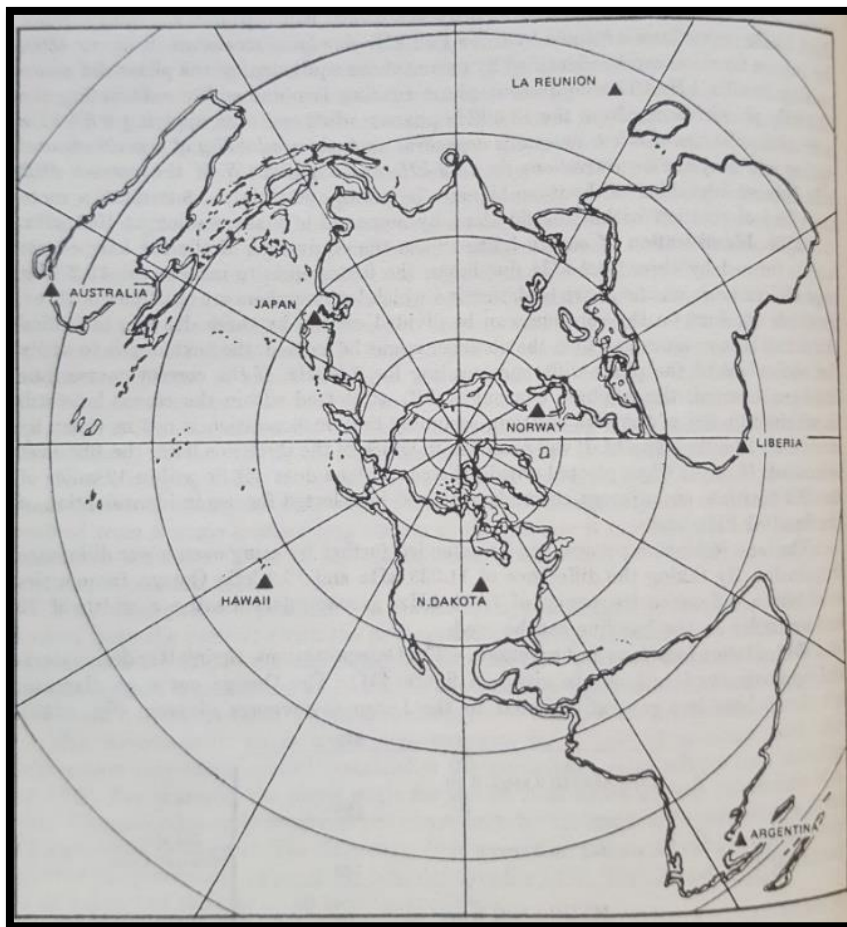


Figura 21 - Localizações de estações Omega ³³

Os equipamentos utilizados para gerar os sinais eram praticamente iguais em todas as estações, ao contrário das antenas que podiam diferir bastante uma das outras, como demonstrarei mais à frente.

Foi criada uma parceria internacional entre a Argentina, Austrália, França, Libéria, Japão, Noruega e Estados Unidos da América para operar com o sistema Omega e cada estação era equipada e operada por agências pertencentes ao país onde a mesma se encontrava.

O processo de sincronização dos sinais tornava possível calcular uma posição fixa. Os sistemas de radionavegação controlavam as transmissões de cada estação de maneira a estarem sincronizadas. Visto as estações Omega estarem separadas por milhares de

³³ (Bowditch, 1977)

quilômetros, não era exequível a utilização de apenas uma fonte de frequência para os oito transmissores.

Os três principais componentes de uma estação transmissora eram o equipamento de sincronização, o transmissor VLF e o sistema de antenas. O sistema utilizava três antenas distintas: *valley-span*, torres terrestres e antenas isoladas (Figura 22). As oito estações emitiam a uma potência nominal de 10 kW e, devido às diferenças da eficiência do sistema de antenas de cada local a potência gerada pelos transmissores ia de 90 a 165 kW.

As antenas transmissoras do sistema Omega, localizadas na superfície terrestre, eram monopolos elétricos orientadas verticalmente, que excitavam os campos elétricos orientados na direção perpendicular à superfície da terra. As antenas receptoras eram, no entanto, ou dipolos elétricos verticais, chamadas *whip* ou *E-field antennas*, que mediam o campo elétrico vertical, ou *loop antennas*, que mediam a componente horizontal de um campo magnético.

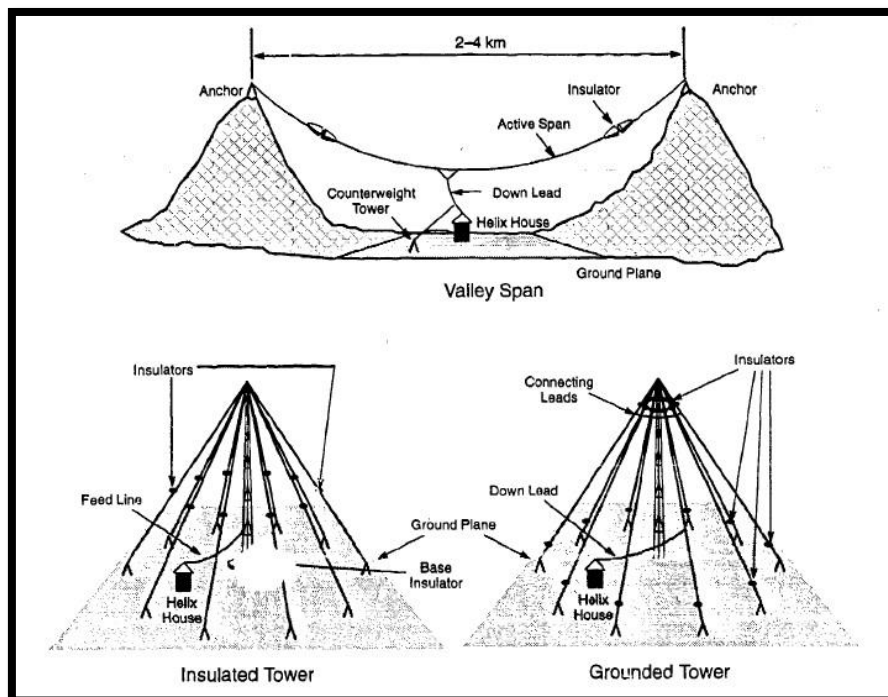


Figura 22 - Tipos de antenas Omega³⁴

³⁴ (Morris et al., 1994, p. 2-21)

Cada estação tinha ainda um edifício associado que monitorizava a *performance* da estação, fornecia dados necessários para a sincronização de fase das mesmas, entre outras funções.

As estações Omega transmitiam todas em quatro frequências comuns: 10.2 kHz, 11.05 kHz, 11.33(3) kHz e 13.6 kHz. Fora estas frequências, cada estação emitia ainda uma frequência única, com a qual o recetor conseguia identificar de onde o sinal provinha. De forma a garantir que não existia mais que uma estação a emitir a uma determinada frequência ao mesmo tempo, foi criada uma sequência específica de transmissão. As emissões das estações seguiam sempre a mesma ordem e a duração de cada transmissão variava de estação para estação, sendo 0.9, 1.0, 1.1, e 1.2 segundos. Entre cada segmento havia um intervalo de 0.2 segundos e a sequência toda tinha a duração de 10 segundos. Todo o esquema é apresentado na Figura 23.

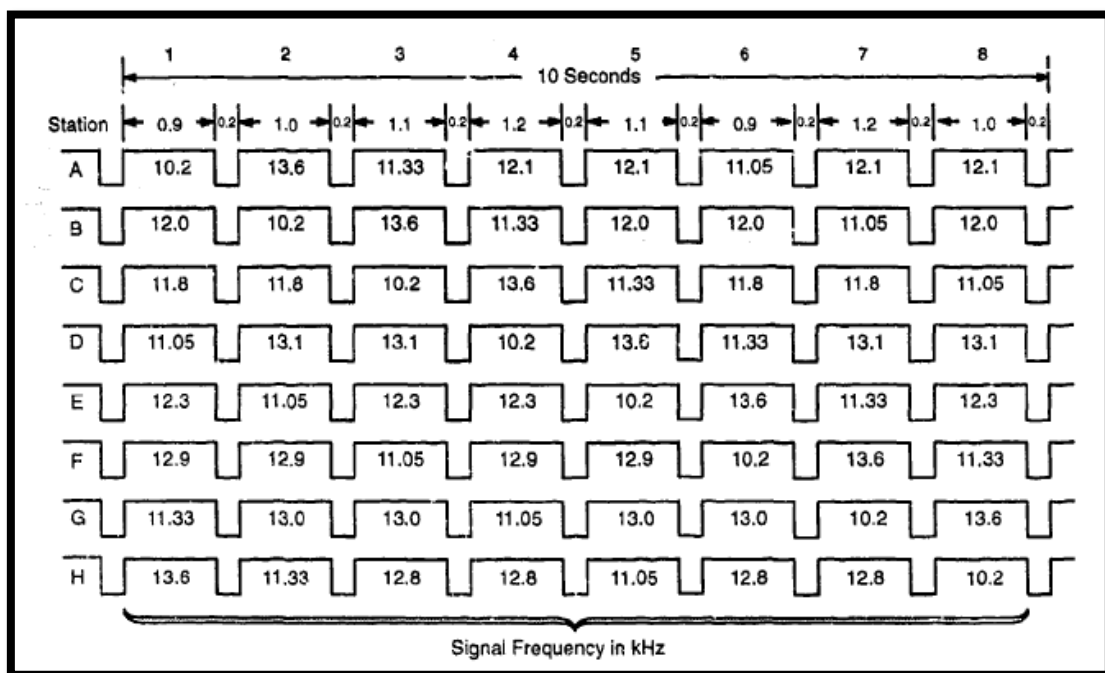


Figura 23 - Formato de transmissão do Sinal Omega ³⁵

Em cada estação todos os equipamentos e estruturas eram divididos em 4 subsistemas diferentes: *timing and control*, transmissor, afinação da antena e estrutura da antena.

³⁵ (Morris et al., 1994, p. 2-17)

- *Timing and control* – fornecia o sinal de input a uma frequência e fase controladas;
- Transmissor – responsável por amplificar o sinal para se atingir cobertura mundial;
- Afinação da antena – responsável por corresponder a frequência do sinal amplificado com a impedância do sistema da antena em tempo real;
- Estrutura da antena – enviar o sinal para a *earth-ionosphere waveguide*.

De forma a reduzir possíveis falhas neste sistema global e contínuo, era importante criar redundância, especialmente nos equipamentos das estações. Eram criados, nesse sentido, planejamentos de substituição de componentes. Qualquer manutenção que envolvesse “desligar” a estação decorria em épocas do ano específicas, com intuito de minimizar problemas tanto a nível de cobertura como de necessidade.

6.3 Recetores e equipamento de navegação

O equipamento de navegação do utilizador consistia numa antena, recetor e de um computador de navegação. O sistema da antena era composto por duas possíveis antenas «*The antenna system includes a loop (H-field) antenna, or a whip/blade (E-field) antenna*»(Morris et al., 1994) e um pré-amplificador.

O processamento de receção consistia no recetor detetar e localizar os sinais recebidos de cada estação e medir as fases dos sinais relativas a um local de referência ou oscilador. No processo, o recetor distinguia e identificava as diferentes estações em cada segmento de transmissão. «*The received signal is of no use if it cannot be associated with its transmission source because the goal is to obtain a measure of the range between the receiver and each transmitting station.*»(Morris et al., 1994).

A principal frequência de navegação do sistema Omega é de 10.2 kHz, na qual o comprimento de onda é de, aproximadamente, 16 milhas náuticas. Cada comprimento de onda, medido a partir de uma estação é denominado de *lane*, na qual a fase do sinal varia entre os 0 e os 360 graus. A distância ao transmissor é calculada através da soma do número de *lanes* mais uma fração da *lane* que a medição de fase indique.

6.4 Propagação dos sinais Omega

O sinal VLF do sistema Omega era muito estável, sendo capaz de se propagar mantendo as suas características sem distorção e praticamente a qualquer distância da estação transmissora, dentro dos alcances da mesma.

O efeito de *waveguide* ocorre quando a onda passa através de uma cavidade que reflete a onda e confina-a para o espaço fechado dentro da cavidade. Os sinais emitidos pelos transmissores Omega propagavam-se na sua maioria através da *earth-ionosphere waveguide*, espaço entre a superfície da terra e a parte inferior da ionosfera, ao longo do círculo máximo entre o transmissor e o recetor. Estas ondas em específico podem ser descritas pelos “modos naturais de propagação”, ou simplesmente “modos”.

A taxa de atenuação, o fator de excitação e a velocidade de fase são os três parâmetros que demonstram como é que um “modo” se vai propagar na *EI waveguide*. Os primeiros dois são, respetivamente, medidas de energia perdida pelo modo por unidade de distância e com que intensidade a fonte de energia gera o modo em comparação com outros modos. O terceiro corresponde à velocidade de propagação do modo.

Os modos são ordenados tendo em conta as taxas de atenuação de cada um, sendo que o modo 1 é o que tem menos. Mas, visto que o modo 2 é o que era mais facilmente excitado pelos transmissores Omega, temos que considerar os dois modos para distâncias intermédias.

Outro aspeto que se tem em consideração é as diferentes velocidades de fase que os modos têm, sendo que, neste caso em particular, o modo 2 tem uma velocidade superior à do modo 1. Estas velocidades de propagação diferentes fazem com que os dois modos estejam constantemente a entrar e a sair de fase um com o outro à medida que o sinal se afasta do transmissor.

As características dos sinais Omega eram determinadas, na sua maioria, pelas propriedades eletromagnéticas da zona inferior da ionosfera e da superfície da terra. A altura efetiva da ionosfera era uma das propriedades mais importantes, podendo variar entre os 90 km durante a noite e os 70 km durante o dia. A velocidade de fase do modo 1

era muito dependente da altura da ionosfera, sendo inversamente proporcionais. Com isto as fases do sinal avançavam e atrasavam consoante as alterações da altura significativa da ionosfera.

No limite inferior, a superfície da terra é constituída por substâncias tais como água, solo e gelo. A condutividade elétrica da sub-superfície e a constante dielétrica associada são os dois parâmetros que descrevem as propriedades eletromagnéticas da *waveguide*. O primeiro relaciona o campo elétrico com a corrente elétrica que flui sobre a superfície da terra enquanto que o segundo relaciona o campo elétrico com o fluxo elétrico na superfície da terra.

No geral a superfície da terra era um bom condutor para os sinais Omega, tendo como exceções locais com água doce no seu estado sólido. Um sinal a ser propagado na *EI waveguide* era atenuado em apenas 0.5 dB por cada 1000 km quando sobre água do mar, mas em 30 dB (60 vezes mais) por cada 1000 km quando sobre gelo.

No limite superior, a ionosfera é uma região ionizada acima da mesosfera que tem uma influência bastante significativa no que toca à transmissão de sinais VLF. Existem inúmeras fontes de energia ionizante que produzem partículas carregadas, iões e eletrões livres, sendo a principal o sol. A ionosfera estende-se desde os 50 aos 1000 km de altitude, estando dividida em várias camadas. As mesmas diferem umas das outras em várias propriedades diferentes. A zona inferior da ionosfera, mais concretamente a camada D e um pouco da camada E, possibilita a propagação a longas distâncias dos sinais rádio, devido à sua refletividade elevada.

A ação do campo magnético terrestre nas partículas carregadas torna a ionosfera num plasma magnetizado, introduzindo anisotropia no comportamento dos sinais VLF aquando a passagem dos mesmos pela ionosfera, ou seja, as características da propagação do sinal dependem da direção de propagação do mesmo. «*Because of this anisotropy, a wave traveling from east to west (perpendicular to the geomagnetic field) is reflected much less efficiently from the ionosphere relative to west-east propagation*»(Morris et al., 1994). Este fenómeno em que os sinais que se propagam para leste têm menos atenuação que os que se propagam para oeste é chamado de efeito *east-west*.

A iluminação solar tem um efeito muito pronunciado na estrutura da ionosfera e a diferença da altitude a que se dá a reflexão dos sinais de dia e de noite é notável. A quantidade de ionização durante o dia depende do ângulo entre o sol e o ângulo solar zenital do local, sendo a ionização máxima quando o último é igual a 0. Por outro lado, durante a noite a ionosfera tem como principal fonte ionizante a radiação dispersada pelo lado de onde é dia. A camada D, durante a noite, quase que desaparece por completo, fazendo com que os sinais VLF passem a ser refletidos pela zona inferior da camada E (80 a 90 km de altitude).

Os problemas começam quando o transmissor está num local onde é dia e o recetor num local onde é de noite ou vice-versa, com as fases dos sinais a avançarem e a atrasarem. Essas mudanças têm um efeito grande nas LDP's. Outro ponto importante de referir é o facto de no hemisfério de noite ambos os modos estão presentes, enquanto que no hemisfério de dia apenas o modo 1 está presente. O que se sucede, quando o sinal passa da noite para o dia, é que o modo 2 é convertido num modo 1 diurno, mas o modo 1 noturno mantém-se inalterado, tornando possível uma interferência entre ambos os modos.

Existem algumas situações anómalas de propagação que são importantes de referir por serem relativamente frequentes:

- Perturbações Súbitas da Ionosfera (SIDs) – ocorrem quando há emissões súbitas de raios X pelo Sol, durante um *solar flare*. Apenas se sente o seu efeito nas zonas da ionosfera iluminadas e causam sempre um avanço de fase dos sinais com trajetos nesse hemisfério, ao qual se pode chamar de *sudden phase anomaly*. O que normalmente ocorre é um avanço de fase muito rápido, durante um período de 5 a 10 minutos, com um retorno à situação normal em 30 a 60 minutos. Os SIDs podem gerar erros de posição de entre 2 a 3 milhas.
- Absorção da Calote Polar (PCA) – as situações de PCA são perturbações ionosféricas causadas pela emissão anormal de protões pelo sol durante um *solar proton event* que concentram partículas de alta energia na região do polo magnético cortando as transmissões normais VLF. A perturbação

causada origina um avanço de fase nos sinais com trajetos sobre a calote polar e depende da proximidade do trajeto estação-navio. Ocorre em ambos os períodos noturnos e diurnos. Estas situações ocorrem de forma esporádica e imprevisível podendo gerar erros na determinação de posições de aproximadamente 8 milhas e chegam a durar até uma semana. Quando eram detetadas situações de PCA significativas o *Defence Mapping Agency Hydrographic Center* promulgava “avisos aos navegantes”, nos quais mencionava as anomalias prováveis e a respectiva área onde as mesmas se iam sentir.(Germano, 1974)

6.5 Cartas e publicações Omega

Inicialmente a maior parte dos navios com recetores Omega não possuíam conversores de coordenadas, tendo que ser disponibilizadas cartas e publicações especiais unicamente destinadas ao uso do sistema Omega.

Para cada carta eram usadas velocidades de propagação diferentes, com tabelas de correções das mesmas e era ainda possível o utilizador extrapolar linhas de posição para outras frequências a partir da frequência básica de 10.2 kHz.

Começaram por ser publicadas cartas de pequena escala, 1:2 187 400, pelo *Defense Mapping Agency Hydrographic Center*, nos EUA, que cobriam praticamente o hemisfério norte todo. (Figura 24)

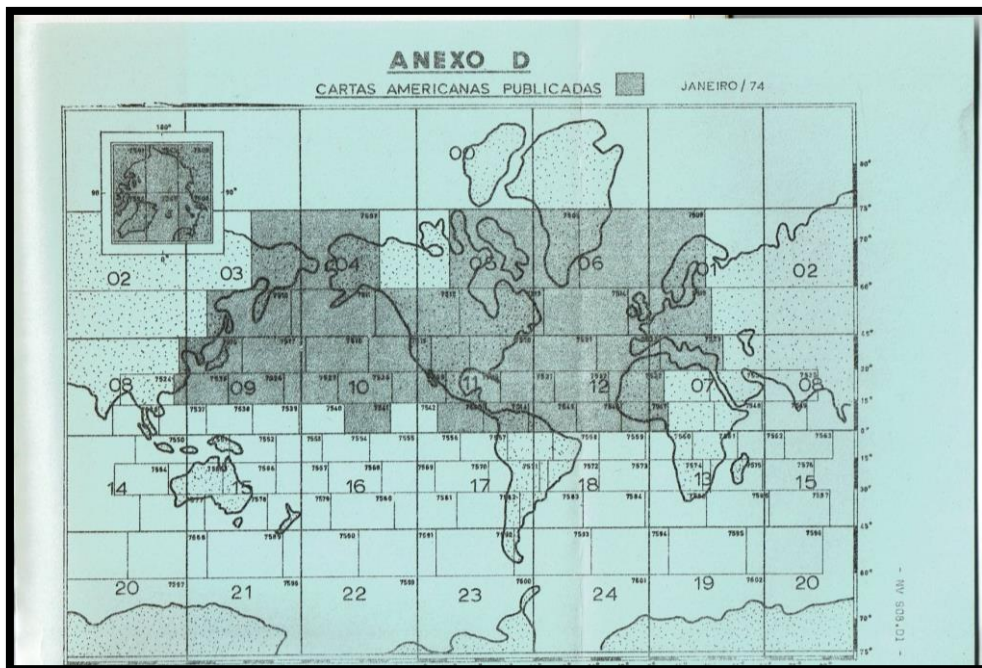


Figura 24 - Cartas Omega³⁶

A Figura 25 demonstra, por sua vez, um diagrama das LDP's de uma das áreas.

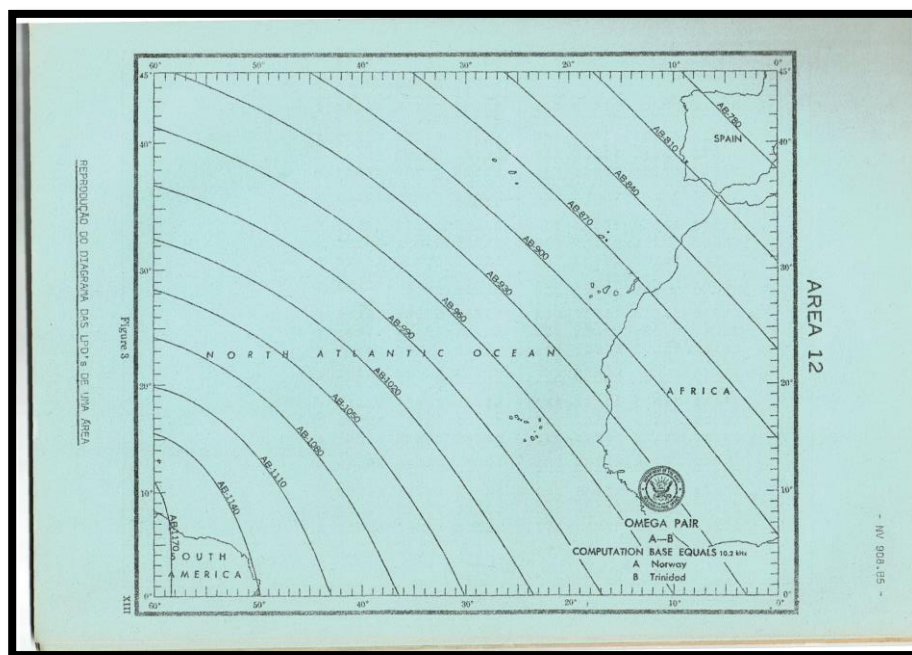


Figura 25 - Diagrama das LDP's da área 12³⁷

³⁶ (Germano, 1974)

³⁷ (Germano, 1974)

O traçado de linhas de posição Omega fazia-se, em grande parte, com recurso a tabelas de coordenadas, «[...] que conjuntamente com folhas de registo de posição permitem maior rigor gráfico do que as cartas publicadas.»(Germano, 1974).

As tabelas de coordenadas eram usadas especialmente pelo utilizador, para este criar as suas próprias linhas de posição em qualquer carta ou quadrícula Mercator (Figura 26). Cada uma era produzida para cada linha de posição, o que tornava as LDP's independentes umas das outras. A única correção que uma tabela precisava era se uma das estações transmissoras mudasse.

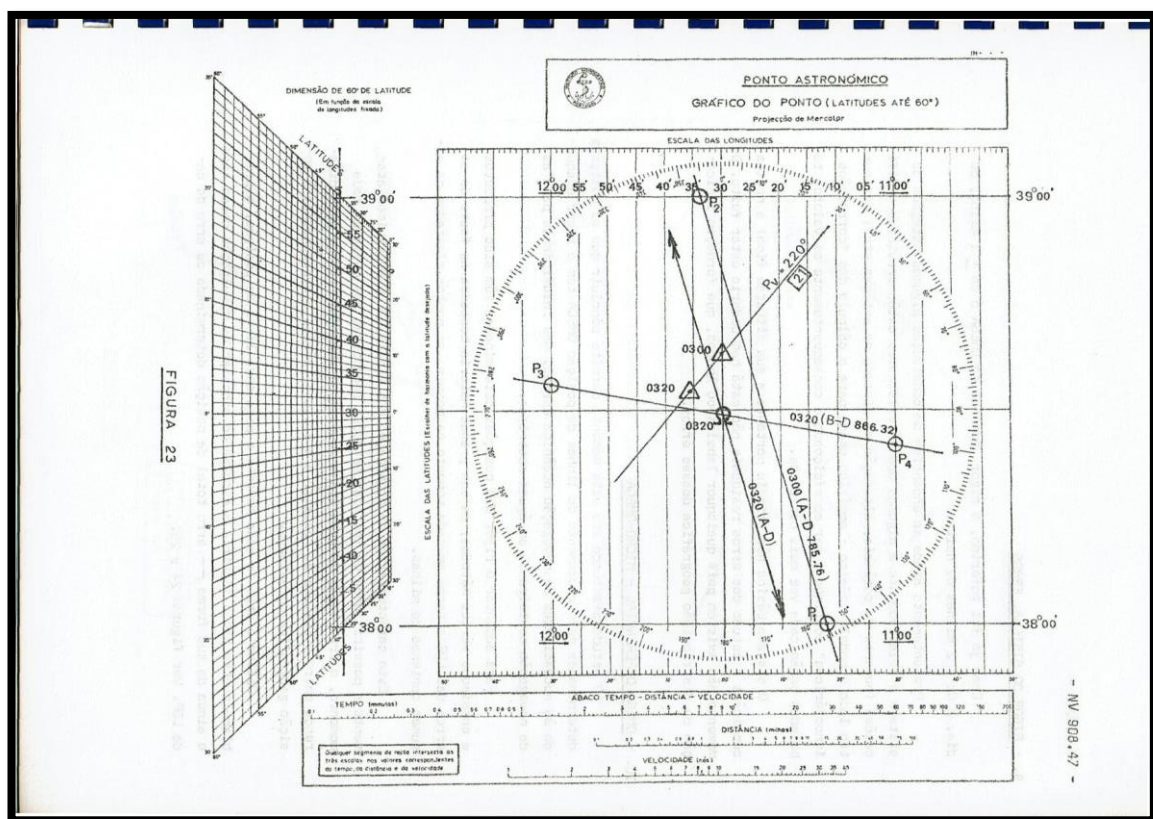


FIGURA 23

Figura 26 - Ponto numa quadrícula Mercator ³⁸

As cartas Omega, quando na posse de tabelas de coordenadas para a área em que se navegava, eram dispensáveis, acrescentando ainda o facto de que, trabalhando com as tabelas, obtinham-se resultados mais rigorosos.

Os sinais recebidos eram, quase na sua totalidade, correspondentes a ondas ionosféricas, tendo em conta a distância a que as estações estavam uma das outras. As

³⁸ (Germano, 1974)

linhas de posição desenhadas nas cartas Omega eram calculadas considerando um valor fixo para a velocidade de propagação – 300.574 km/s;

«Dado que a situação da ionosfera está sujeita a variações diurnas e sazonais, em cada momento e para cada ponto de superfície, o valor a considerar para velocidade de propagação, será diferente do valor constante utilizado na construção das cartas e tabelas.»(Germano, 1974)

Tinham que se aplicar sempre correções ionosféricas às determinações efetuadas com o equipamento recetor. A não correção podia dar origem a erros nas posições determinadas, na ordem das 35 milhas náuticas. No entanto, até à distância de 650 milhas de uma estação, não devia ser utilizado nenhum par em que a mesma estivesse incluída, porque nesses casos o recetor recebia, da mesma estação e em simultâneo, ondas de superfície e ondas ionosféricas, que podiam causar grande interferência e os respetivos erros associados.

O modelo de correções de propagação das ondas ionosféricas era um modelo de previsão de fase semi-empírico construído com base em fundamentos teóricos, que lhe dava uma estrutura analítica, e em observações, que forneciam dados numéricos precisos de posições conhecidas e medidas de tempo.

Os parâmetros utilizados para criar as correções eram os seguintes: hora do dia, época do ano, posição geográfica, atividade solar, condutividade da superfície sobre a qual se efetuava o trajeto estação-recetor, latitude, intensidade do campo magnético terrestre, azimute do trajeto estação-recetor, entre outros.

As tabelas de correções ionosféricas eram regularmente renovadas, saindo, de 2 e 2 anos novas edições das mesmas.

7. Navegação por Satélite

A exatidão conseguida pelos sistemas de radionavegação era tanto pior quanto menor fosse a frequência do sinal, ou seja, quanto maior fosse o comprimento de onda do mesmo. O sistema Omega, apesar da sua cobertura mundial, tinha uma exatidão sofrível, sendo que variava entre 2 a 4 milhas. *«Estava-se portanto num impasse: com baixas frequências obtinham-se alcances significativos, mas a exactidão conseguida era sofrível; com frequências elevadas conseguiam-se boas exatidões mas os alcances eram muito limitados.»*(Monteiro, 2007, p. 73)

7.1 Sputnik

A 4 de outubro de 1957, a União Soviética enviou para o espaço o primeiro satélite artificial, Sputnik 1. Este foi o primeiro a ser colocado em órbita em redor da Terra com sucesso. Lançado a partir do Cosmódromo de Baikonur, no Cazaquistão (parte da antiga União Soviética), o nome Sputnik significava “satélite” em Russo. (R. Williams, n.d.)

O Sputnik 1 era uma esfera composta por alumínio com um diâmetro de 58 centímetros e que pesava 83,6 quilogramas. Tinha quatro antenas que tinham tamanhos compreendidos entre os 2,4 e os 2,9 metros, como se pode verificar na Figura 27.



Figura 27 - Sputnik 1³⁹

³⁹ (“Getty Images,” n.d.)

Na esfera, dentro de uma cápsula selada, encontravam-se as fontes de energia do satélite e ainda transmissores, que enviavam sinais espaçados em 0,3 segundos, a operar entre os 20,005 e os 40,002 MHz, que corresponderia a comprimentos de onda de aproximadamente 15 e 7,5 metros respetivamente.

Na altura do lançamento, muito pouca informação foi disponibilizada pela União Soviética, relativamente à órbita do Sputnik. No entanto, os investigadores americanos William Guier e George Weiffenbach conseguiram determinar a mesma através de um *bip* que o satélite transmitia. Como o fizeram? Usando estações de seguimento que, em localizações de coordenadas bem conhecidas, mediam o efeito de Doppler do sinal do satélite, «[...] ou seja, a variação da sua frequência devido ao seu movimento.»(Monteiro, 2007, p. 74). Anos mais tarde, e já depois do GPS ter sido introduzido, os dois investigadores sabiam que tinham sido pioneiros na navegação através de satélites, «*The present Global Positioning System is the result of APL's pioneering work with Transit, progress in electronics, and the global economy.*»(Guier & Weiffenbach, 1998). É então que surge a ideia de se fazer o percurso contrário, ou seja, e se se lançassem satélites com trajetórias conhecidas e se fizessem medições do efeito de Doppler das suas transmissões? Conseguia-se determinar a posição do observador na Terra. O princípio de funcionamento do Transit surgia.

William Guier e George Weiffenbach foram dois cientistas que tiveram um papel muito importante no desenvolvimento do primeiro sistema de navegação por satélite. O Dr. William foi um físico que fazia parte do *staff* do laboratório de físicas aplicadas da Universidade John Hopkins (APL). É o detentor da patente fundamental da navegação por integração de Doppler, um método que viria a ser utilizado nos recetores dos satélites do sistema Transit. Em 1960 tornou-se no supervisor do Grupo de Análise Teórica do Departamento Espacial do APL. George Weiffenbach, por sua vez, era um membro sénior do APL e foi diretor do seu Departamento Espacial. Colaborou com William Guier no desenvolvimento do rastreamento através do efeito de Doppler para se determinar órbitas precisas dos satélites. (“1986 Pioneer Award,” 1986)

7.2 Transit

O Transit foi um sistema de radionavegação por satélites que começou a funcionar em 1964 e que foi disponibilizado para o uso da comunidade civil em 1967. Era um sistema que utilizava cinco satélites em órbitas de baixa altitude.

Como surge então o sistema Transit? É no APL onde a ideia original aparece e onde a maior parte do trabalho de desenvolvimento do sistema é feita.

A configuração física dos satélites era a seguinte: 4 painéis solares que carregavam as baterias internas e uma antena “*lampshade*” que transmitia os sinais do satélite para a terra., como se pode verificar na Figura 28. Os satélites pesavam cerca de 63,50 kg cada um.

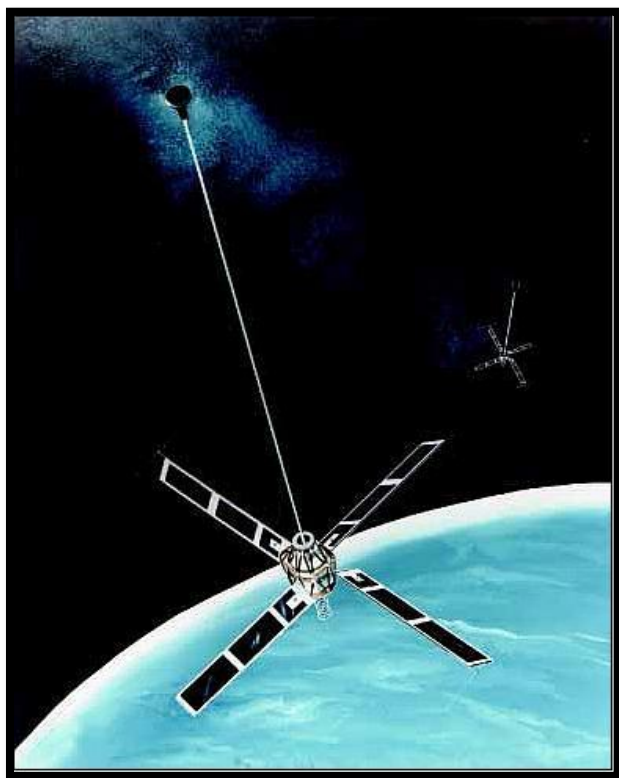


Figura 28 - Satélite Transit ⁴⁰

Os satélites descreviam uma órbita polar⁴¹, a cerca de 1075 km de altitude, fazendo uma volta completa à Terra a cada 107 minutos. Este tipo de órbita formava o efeito de

⁴⁰ (“Transit - US Navy Navigation Satellite System (NNSS),” n.d.)

⁴¹ Uma órbita polar é uma órbita na qual o satélite passa por cima, ou perto de ambos os polos.

“gaiola”, visível na Figura 29, visto que, os satélites descreviam um movimento que não acompanha a rotação da Terra.

Cada vez que o satélite passava acima da linha do horizonte era possível obter-se uma posição. A estação em terra recebia dois sinais de 150 e 400 MHz dos satélites, media o a mudança de frequência de Doppler e registava a frequência Doppler em função do tempo. O intervalo de tempo médio entre obtenção de posições com os 5 satélites variava entre 35 a 100 minutos dependendo da latitude, sendo que quanto maior a última fosse menor seria o tempo necessário para se obter uma posição. (Stansell, 1983, p. 5)

O sistema Transit era operado pelo *Navy Astronautics Group*, cuja sede era em Point Mugu, na Califórnia. Continha ainda estações de *tracking* (acompanhamento) localizadas em Prospect Harbor, Maine; Rosemount, Minnesota; e Wahiawa, Havai. (Stansell, 1983, p. 5)

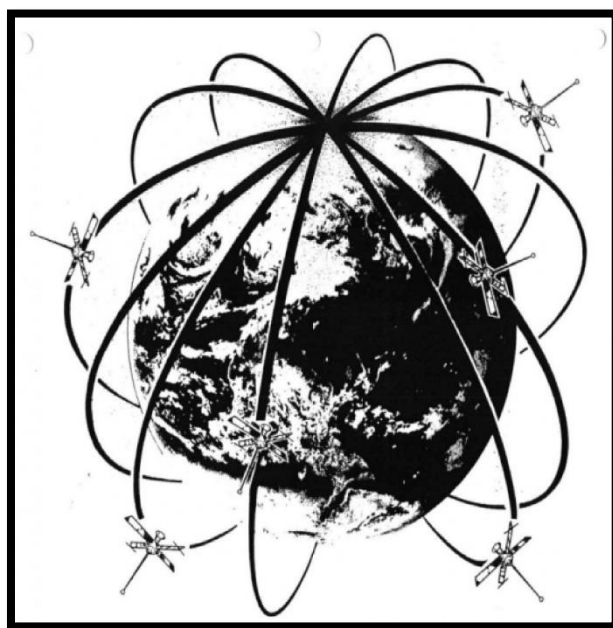


Figura 29 - Formato "gaiola" descrito pela órbita dos satélites Transit ⁴²

Cada satélite que orbitava a Terra transmitia continuamente os seguintes dados em duas mensagens diferentes usando duas frequências diferentes, 150 e 450 kHz: «[...] (1) *two-minute mark synchronization signals*, (2) *a 400 Hz audible "beep" signal*, and (3) *fixed and variable parameters describing its own orbit.*»(Bowditch, 1977, p. 1019). Os parâmetros fixos descreviam a órbita aproximada e eram normalmente utilizados apenas

⁴² (Parkinson et al., 2010)

num intervalo de 12 a 16 horas. Os parâmetros variáveis descreviam a estrutura da órbita em função do tempo e apenas estavam corretos na altura exata que eram transmitidos pelo satélite.

De forma a determinar de forma rigorosa a órbita presente e futura para o intervalo de 12 a 16 horas após a injeção de dados, cada satélite era monitorizado assim que passasse uma das quatro estações de *tracking* referidas anteriormente. Cada uma dessas estações tinha equipamento com capacidade para receber e decodificar transmissões satélite, e uma antena que era programada para apontar automaticamente na direção do satélite durante a duração da sua passagem. A antena conseguia ainda dar uma medida de discriminação contra sinais inválidos de transmissores locais e assegurava um *tracking* constante do satélite em questão mesmo se houvesse mais que um sobre o seu horizonte rádio. (Bowditch, 1977, p. 1021)

Ao contrário dos sistemas apresentados ao longo da dissertação, que determinavam as posições por fazerem medições de forma quase síncrona de diversos transmissores fixos, o sistema Transit fazia medidas relativamente a posições sequenciais à medida que o satélite passava. Era um processo no qual o satélite viajava entre 4400 e 7000 quilómetros, num tempo compreendido entre 10 e 16 minutos, e criava uma linha base excelente. (Stansell, 1983, p. 7)

Era preciso ter em consideração um fator importante: o movimento do navio durante a passagem do satélite. Cada satélite transmitia uma mensagem que permitia o cálculo da posição de forma bastante precisa em função do tempo. Para os cálculos complexos, nomeadamente as posições dos satélites e as informações sobre o movimento do navio, era necessário usar um pequeno computador digital.

7.3 GPS

O *Global Positioning System* é um sistema de navegação por satélite, controlado pelos Estados Unidos da América, que fornecia posição e horário rigorosos.

Em 1973 o Departamento de Defesa dos Estados Unidos “pediu” um sistema de navegação unificado. Os lançamentos de satélites começam a 1978 e em 1989, os satélites de segunda geração começavam a ser lançados para o espaço do Cabo Canaveral. Depois

disso, mais 23 satélites foram lançados para completar a constelação. Em 1996 o sistema estava totalmente operacional e disponível para a comunidade civil.

Para o GPS funcionar eram necessários três componentes: um segmento de controlo, estações em terra que controlavam o sistema, um segmento espacial, ou seja, uma configuração de satélites equipados com relógios atômicos; um segmento do utilizador, ou seja, recetores usados pelos utilizadores.

O segmento espacial consiste em 24 satélites. Os satélites estão posicionados nas suas órbitas de forma a que um utilizador tenha pelo menos quatro satélites “à vista” em qualquer local do mundo. Cada satélite transmite em duas frequências diferentes (1575.42 MHz e 1227.60 MHz), uma dedicada à navegação e a outra a dados do sistema, como correções relativamente a propagações na atmosfera, efemérides dos satélites, informações sobre erros do relógio do satélite, entre outros. Com órbitas a 20,200 quilómetros os satélites viajam por 6 planos orbitais, sendo que cada plano faz um ângulo de cerca de 55° com o equador, como é possível visualizar na Figura 30. Os satélites demoram cerca de 12 horas a completar uma órbita completa. (N Bowditch, 2002, p. 163)

O segmento de controlo tem uma estação principal de controlo, várias estações de monitorização e antenas terrestres espalhadas por todo o globo. A estação principal está localizada no Colorado, EUA, e fazia monitorização, telemetria, *tracking*, comando e controlo dos satélites, e gerava mensagens de navegação. As estações de monitorização fazem um *tracking* passivo dos satélites, recolhendo dados dos mesmos e enviando para a estação principal. Por fim as antenas terrestres são usadas para receber e transmitir informação sobre o controlo do satélite.

O segmento do utilizador retrata o equipamento que o utilizador tem para receber e processar os sinais de 4 ou mais satélites em órbita. O processador presente no equipamento faz a conversão desses sinais em informação de navegação.

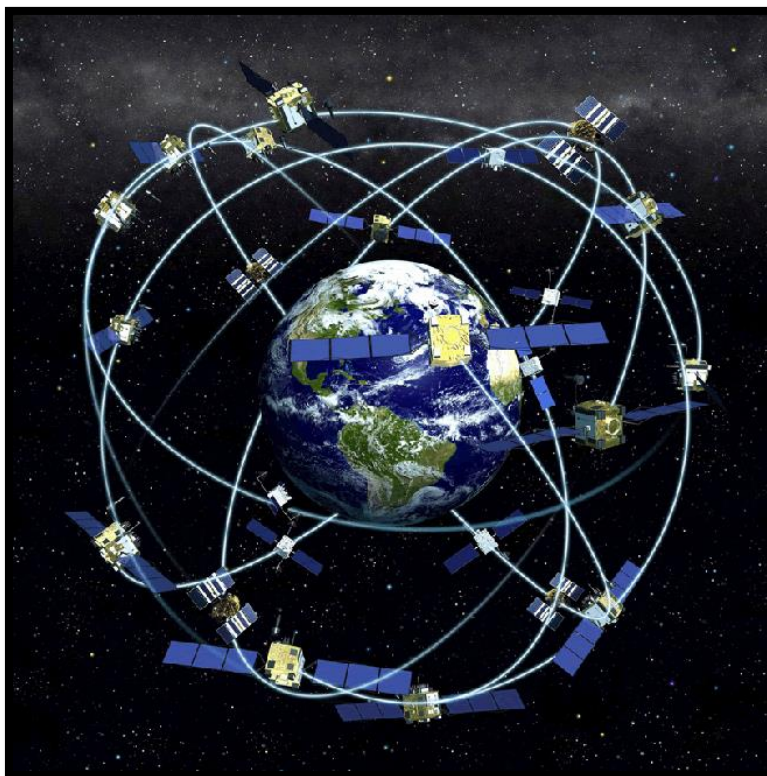


Figura 30 - Disposição dos satélites do GPS ⁴³

Como funcionava o sistema? O GPS faz medições de distâncias entre satélites em órbita e um recetor na Terra e gera esferas de posição através dessas mesmas distâncias. A interseção das várias esferas determina a posição do utilizador.

Em teoria apenas três satélites são necessários para determinar uma posição, no entanto, um quarto satélite e uma quarta medição eram necessários para se obter uma posição verdadeiramente precisa. O erro do relógio dos recetores é o que faz ser necessário o quarto satélite. Os satélites estão equipados com relógios atômicos, algo que sendo instalado nos recetores aumentava em muito o valor dos mesmos. (Bowditch, 2002, p. 164)

As maiores fraquezas que o sistema GPS pode demonstrar são a vulnerabilidade a interferências e ao *jamming* e a fraca integridade, no sentido em que o sistema é incapaz de avisar o utilizador prontamente de uma eventual falha. A fraca integridade é colmatada com a instalação de estações GPS diferencial. Sem estas estações, que a Marinha Portuguesa instalou em Portugal o utilizador podia estar a receber informação enganosa

⁴³ (Howell, 2018)

durante períodos de 6 horas, com erros de posicionamento até dezenas de quilômetros. (Monteiro, 2007, p. 81)

A vulnerabilidade a interferências e ao *jamming* ocorrem porque os sinais transmitidos pelos satélites são muito fracos, a nível de potência. Ficam sujeitos então a interferências não intencionais ou a *jamming* intencional. Relativamente ao *jamming*, «[...] um espastelador aero-transportado de apenas 1 W poderá impedir a recepção do sinal GPS de todos os satélites acima do horizonte, afetando uma área com um raio de aproximadamente 350 km.» (Monteiro, 2007, p. 82)

Quando se trata de se tentar arranjar maneira de reduzir os efeitos de um *jamming*, o melhor a fazer é arranjar-se antenas especiais com capacidade de rejeitar sinais em determinados setores e de usar filtros.

7.4 Outros Sistemas

Após o grande sucesso do GPS outros sistemas foram aparecendo. Sistemas como o europeu Galileu, o russo Glonass, o sistema regional indiano IRNSS, o chinês Beidou e ainda o sistema regional QZSS com foco no Japão.

8. Conclusão

Ao longo da presente dissertação foram apresentados diversos sistemas de rádio-posicionamento, desenvolvidos ao longo do século XX. O desenvolvimento destes sistemas apenas foi possível graças aos importantes desenvolvimentos que a eletrônica sofreu ao longo das várias décadas de Novecentos.

A história dos sistemas de rádio posicionamento remete ao ano de 1864 quando James Clerk Maxwell propôs uma teoria de que campos elétricos e eletromagnéticos podiam viajar no espaço sob a forma de uma onda eletromagnética. Mais tarde, no outono de 1886, durante umas experiências, Heinrich Hertz testemunhou, pela primeira vez, a produção e recepção de ondas rádio numa gama de alta frequência. Nos anos que se seguiram e com mais experiências em curso, Hertz viria a provar as teorias propostas décadas antes por Maxwell.

A Segunda Guerra Mundial teve um impacto muito grande na revolução da navegação. A navegação, tanto marítima como aérea, tinha um papel preponderante em quase todas as atividades militares que decorriam, e ter um sistema capaz de determinar a posição de forma rigorosa podia ser a diferença entre vencer ou sair derrotado. Algo que em contexto de guerra tem um peso muito grande. Com isto, várias foram as potências envolvidas no conflito que fizeram investimentos com o intuito de fazer progressos nesta área. Sistemas como o LORAN-A, desenvolvido pelos americanos, o Decca, com origens nos Estados Unidos e desenvolvimento posterior no Reino Unido, e o Consol, desenvolvido pelos alemães que, apesar de não ser um sistema hiperbólico foi desenvolvido na mesma altura, foram todos sistemas que, com o início e avanço da Segunda Guerra Mundial, começaram a aparecer e a ser um fator importante no desenrolar do grande conflito.

Foram criados sistemas hiperbólicos que mediam diferenças de tempo, ou de fase, entre a chegada de sinais de mais que uma estação. Os sistemas cobriam uma vasta área, usando alguns locais de transmissão e tinham boa precisão e cobertura.

O sistema LORAN-A foi um dos sistemas que teve como fator de desenvolvimento a Segunda Guerra Mundial. Surgiu em 1940, como uma necessidade para a entrada dos Estados Unidos da América entrarem na Guerra, através do físico norte-americano Alfred

Lee Loomis. Usou como base para o seu desenvolvimento um sistema já existente, o GEE, tendo sido inaugurado em outubro de 1942 e se tornado completamente operacional na primavera do ano seguinte. Foi um sistema que chegou a ter estações instaladas em Portugal, nomeadamente em Sagres, Porto Santo, Santa Maria e Flores, no entanto as mesmas acabaram por ser desativadas em 1977.

O sistema funcionava através de cadeias de pelo menos três estações, uma *Master* e duas *slave*, que emitiam impulsos radioelétricos em intervalos de tempo rigorosamente medidos numa banda de frequência entre 1750 e 1950 kHz. Após a medição da diferença de tempo de chegada dos impulsos aos recetores, conseguia-se, através de cartas especiais para o efeito adquirir linhas de posição.

O sistema foi rapidamente substituído por um com melhor alcance e precisão, o LORAN-C, e por volta de 1980 já tinha sido praticamente descontinuado.

Como foi referido anteriormente muitos dos sistemas apresentados surgiram por necessidade face um conflito internacional de grande escala. O LORAN-A, assim que entrou em funcionamento conseguiu ter um grande impacto no desenrolar de certas operações nas quais os americanos estavam envolvidos. De destacar a importância que o sistema teve principalmente na guerra travada no oceano Pacífico e nos bombardeamentos feitos a solo japonês.

Apesar do sucesso do LORAN-A na guerra no Pacífico, haviam algumas lacunas que precisavam de ser melhoradas, como por exemplo, a operação do sistema em longas distâncias durante o dia. Vários sistemas foram sendo desenvolvidos, culminando no CYTAC, que viria a chamar-se LORAN-C. Começou a ser desenvolvido em 1952 e operava na banda entre 90 e 110 kHz. O alcance durante o dia chegava às 2250 milhas náuticas e às 3000 durante a noite. Tinha sido criado um sistema hiperbólico de longo alcance, independente da meteorologia e sempre operacional.

O LORAN-C, a par do LORAN-A, também operava com cadeias compostas por estações master e slave que transmitiam impulsos assíncronos sendo que as transmissões das *slave* era sempre "atrasadas" em relação às da *Master*. O procedimento depois acabava por ser semelhante ao do LORAN-A, sendo que após serem medidas as diferenças de

tempo da receção dos sinais, eram consultadas tabelas e cartas especiais e determinadas as LDP's correspondentes.

As cadeias deste sistema continham entre 3 a 5 estações, contando com a Master e em 1989 existiam 16 cadeias perfazendo um total de 67 estações transmissoras que operavam numa banda de frequência de 100 kHz. Os sinais eram transmitidos num intervalo de tempo estipulado, chamado GRI.

O alcance do sistema LORAN-C estendia-se até às 1200 com o uso exclusivo de ondas terrestres, mas podia atingir valores de 3400 milhas, à noite, através das ondas ionosféricas.

O Sonne, ou Consol como viria a ser chamado pelos britânicos, era um pouco diferente dos outros sistemas abordados, visto não ser um sistema hiperbólico. Com um longo alcance que chegava aos 1500 quilómetros tinha, no entanto, uma precisão falível. Usado pelos alemães no decorrer da Segunda Guerra Mundial o Consol foi criado pelo Dr. Ernst Kramar em 1938.

Este sistema precisava apenas de um recetor de sinais MF, cartas e tabelas adequadas para determinar uma posição em relação a radiofaróis localizados em terra.

A maior parte das estações do sistema Consol estavam desativadas em 1980.

O sistema operava numa banda de frequência de 300 kHz e era composto por três antenas em linha separadas em 3 quilómetros umas das outras e os sinais correspondiam a pontos e traços.

Relativamente às suas limitações, o sistema não podia ser utilizado num alcance inferior a 30 milhas náuticas nem num setor com 30° para cada lado da linha base.

O sistema Decca, por sua vez, era um sistema de radionavegação hiperbólico que tem como origens a Califórnia, no entanto foi no Reino Unido que o seu desenvolvimento ocorreu, sob as mãos do engenheiro W.J. O'Brien. A história deste sistema tem um pormenor bastante interessante visto ser um sistema criado por uma entidade privada e não produto de iniciativas militares. O facto de o sistema usar frequências baixas, permitindo o sistema ter melhores alcances que o GEE, foi o que chamou a atenção à

Marinha Britânica. O Decca viria a desempenhar um papel de extrema importância no desembarque feito pelos Aliados nas praias francesas no que toca às operações de caças-minas. Mais um sistema que evoluiu com a necessidade de uso no contexto da Segunda Guerra Mundial.

O Decca, tal como outros sistemas, funcionava à base de cadeias de pelo menos três estações, neste caso uma Master e duas ou três slave posicionadas de uma forma que conferia ao sistema uma grande cobertura. As cadeias Decca funcionavam por pares de estações, sendo sempre composta por a master e cada uma das slave. A frequência de transmissão variava de estação para estação e tinha valores entre 70 a 130 kHz. Cada slave de cada par de estações transmitia um sinal harmonicamente relacionado e tinha uma relação de fase fixa com a master. O alcance do sistema era bastante limitado, de 350 milhas durante o dia e com erros nas centenas de jardas, e de 175 milhas durante a noite com erros até 2 milhas.

Apesar das similaridades com o sistema GEE, o Decca era um sistema com maior precisão e apresentava os valores diretamente nos decómetros.

O sistema Decca apresentava erros sistemáticos, que correspondiam às variações da velocidade de propagação e para os quais foram criadas tabelas e cartas de correções que previam e corrigiam este erro, e erros acidentais, que ocorriam quando a onda ionosférica interferia com a onda terrestre, principalmente durante a noite.

A grande diferença que o Sistema Omega vem trazer, comparativamente com os restantes sistemas foi a banda de frequência utilizada, 10-14 kHz (VLF), o que lhe conferia um alcance muito maior.

Surgiu na Universidade de Harvard pelas mãos de John Alvin Pierce e outros investigadores que pretendiam criar um sistema de radionavegação à escala mundial. Para o Omega poder avançar foi formalizada uma parceria entre vários países, que iriam possuir, dentro do próprio território, estações transmissoras. O sistema também ficou disponível em Portugal com a instalação de 3 estações de Omega diferencial.

O Omega consistia em 8 estações espalhadas mundialmente e o processo de sincronização dos sinais transmitidos pelas mesmas permitia determinar uma posição. O

sistema utilizava 3 tipos distintos de antenas e as estações transmitiam todas a 4 frequências comuns, no entanto cada uma transmitia uma frequência própria como forma de identificação. As estações transmitiam numa certa sequência.

Os sinais Omega viajavam através de ondas ionosféricas, tendo que se ter em conta as diferentes velocidades de propagação. As características dos sinais Omega eram determinadas pelas propriedades da ionosfera e da superfície da terra. Existiam fatores, como Perturbações Súbitas da Ionosfera, que ocorriam durante *solar flares*, que geravam erros entre 2 a 3 milhas; e a Absorção da Calote Polar, que ocorria quando haviam emissões anormais de prótons pelo sol. Podiam gerar erros até às 8 milhas e durarem até uma semana.

Foram criadas cartas e publicações especiais para o uso do sistema e ainda tabelas de correções ionosféricas, sendo estas últimas importantíssimas para a determinação de um bom ponto, visto que a sua não utilização podia gerar erros de até 35 milhas.

Apesar de ser um sistema com um alcance muito bom, tinha uma precisão falível. Era algo que os sistemas não conseguiam contrariar. Quanto menor a frequência, menor a precisão, mas maior o alcance, e quanto maior a frequência, maior a precisão, mas menor o alcance.

É então que surge a navegação por satélite, que iria conseguir juntar o melhor dos dois mundos.

Inicialmente com o Sputnik, lançado pelos soviéticos em 1957 abriu as portas da exploração espacial. Uma pequena esfera de alumínio que transmitia um bip do espaço. Bip esse que foi detetado e que, através dele e da integração de Doppler, tornou capaz a descoberta da órbita do satélite e que idealizou o futuro da radionavegação.

O futuro começava com o desenvolvimento do Transit, o primeiro sistema de navegação por satélite que começou a funcionar em 1964 e tinha 5 satélites em órbita polar, a 1075 km de altitude, que demoravam 107 minutos a dar uma volta completa à Terra. Demorava entre 35 a 100 minutos a determinar uma posição

Como é que o GPS revoluciona toda a navegação? A começar pela quantidade de satélites em órbita, 24 contra 5 que o Transit tinha, tinha uma cobertura global sempre com 4 satélites visíveis em qualquer local. Os lançamentos de satélites para o espaço ocorreram entre 1978 e 1989 e em 1996 o sistema estava totalmente operacional.

O GPS, apesar da sua qualidade como sistema de navegação apresenta as suas debilidades, nomeadamente a vulnerabilidade a interferência e ao empastelamento e a fraca integridade do sistema.

O séc. XX foi definitivamente um século de viragem no que toca a tecnologia de sistemas de posicionamento. A evolução foi tremenda num intervalo de tempo relativamente curto. Se pensarmos que o radiogoniómetro e o sistema GPS surgem com cerca de 100 anos de diferença, apercebemo-nos o quanto foram evoluindo os sistemas de radionavegação. O século passado fica então marcado por dois grandes saltos, sendo o primeiro, os sistemas de radionavegação hiperbólicos e o segundo os sistemas de navegação por satélite.

9. Lista Bibliográfica

- 1986 Pioneer Award. (1986). *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-22(4), 471–473. <https://doi.org/10.1109/taes.1986.310790>
- Alvarez, L. W. (1980). *Alfred Lee Loomis 1887—1975*. Washington D.C.
- Anglo-Boer: Britain's Vietnam (1899-1902). (n.d.). Retrieved from <https://web.archive.org/web/20161027014601/http://www1.american.edu/ted/ice/boerwar.htm>
- Appleyard, R. (1927). Pioneers of Electrical Communication - HEINRICH RUDOLF HERTZ-V. *Electrical Communication*, 6(2), 63–77.
- Bailey, J. &, Washington, D. C., & Alexandria, V. (1962). *THE LORAN-C SYSTEM OF NAVIGATION*.
- Beechey, F. S. (1876). *Electro-telegraphy*. London.
- Blanchard, W. (2008). SONNE/CONSOL. Retrieved from <http://jproc.ca/hyperbolic/consol.html>
- Blanchard, W. (2015a). *Journal of Navigation*, 68(219–237).
- Blanchard, W. (2015b). The genesis of the Decca Navigator system. *Journal of Navigation*, 68(2), 219–237. <https://doi.org/10.1017/S0373463314000666>
- Bortolotti, F. P. (2015). *O Sistema LORAN como contexto para o estudo da Hipérbole*.
- Bowditch, N. (1977). *American Practical Navigator - An epitome of Navigation*. Defense Mapping Agency Hydrographic Center.
- Bowditch, N. (2002). The American Practical Navigator. *Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic*, (9), 882.
- Brown, A. H. (1947). The Consol navigation system. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIIA: Radiocommunication*, 94(16), 968–976. <https://doi.org/10.1049/ji-3a-2.1947.0122>

- C. Jones, E. (n.d.). The Basics of Radio Wave Propagation. Retrieved from <http://ecjones.org/propag.html>
- Decca Radio and Television. (n.d.). Retrieved from https://www.gracesguide.co.uk/Decca_Radio_and_Television
- Fialho, J. F. (1946). A moderna rádio-navegação hiperbólica-CMG João Francisco Fialho.
- Germano, J. M. T. P. (1973). *NV 907 - O Sistema Decca*. Alfeite.
- Germano, J. M. T. P. (1974). *NV 908: Omega*. Alfeite.
- Getty Images. (n.d.). Retrieved from <https://www.gettyimages.it/immagine/sputnik?sort=mostpopular&mediatype=photography&phrase=sputnik>
- Groves, P. D. (2009). Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated - Navigation Systems. *Systems, Controls, Embedded Systems, Energy, and Machines*, 12-1-12–14. <https://doi.org/10.1201/9781420037043>
- Guier, W. H., & Weiffenbach, G. C. (1998). Genesis of satellite navigation. *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*, 19(1), 14–17.
- HARTGUMMI (EBONIT). (n.d.). Retrieved from <https://www.hug-technik.com/hartgummi.html>
- Hefley, G. (1972). The Development Of Loran-C Navigation And Timing, 159. Retrieved from <https://archive.org/details/TheDevelopmentOfLoranCNavigationAndTiming>
- Hitchcock, R. T. (2004). *Radio-Frequency* (Third). Fairfax, Virginia: American Industrial Hygiene Association.
- Howell, E. (2018). Navstar: GPS Satellite Network. Retrieved from <https://www.space.com/19794-navstar.html>
- Marconi, G. (1909). *Wireless telegraphic communication*.

- Monteiro, S. (2002). Da Milha ao Metro - Instalação da Rede DGPS Portuguesa. *Revista Da Armada*, (358).
- Monteiro, S. (2007). Navegação nos Sécs. XX e XXI. *Anais Do Clube Militar Naval*, CXXXVII, 67–87.
- Morris, P. B., Gupta, R. R., Warren, R. S., & Creamer, P. M. (1994). Omega Navigation System Course Book, 1298, 820. <https://doi.org/10.1515/gps-2015-0037>
- Nusser, F. (n.d.). Radio Direction Finding.
- Pansters, F. (2016). 720 - First time wireless telegraphy in 1897. Retrieved from <https://teylersmuseum.ning.com/profiles/blogs/720-wireless-telegraphy-in-1897>
- Parkinson, B. W., Powers, S., Green, G., Fruehauf, H., Strom, B., Gilbert, S., ... Stansell, T. (2010, May). Part 1: The Origins of GPS, and the Pioneers Who Launched the System. Retrieved from <https://www.gpsworld.com/origins-gps-part-1/>
- Pleikys, R. (n.d.). RADIO JAMMING IN THE SOVIET UNION, POLAND AND OTHER EAST EUROPEAN COUNTRIES. Retrieved from http://www.radiojamming.puslapiai.lt/article_en.htm
- Proc, J. (n.d.-a). DECCA NAVIGATOR - OVERVIEW. Retrieved from http://www.jproc.ca/hyperbolic/decca_oview.html
- Proc, J. (n.d.-b). HYPERBOLIC RADIONAVIGATION SYSTEMS. Retrieved from <http://www.jproc.ca/hyperbolic/index.html>
- Proc, J. (n.d.-c). LORAN-C SIGNAL CHARACTERISTICS. Retrieved from http://jproc.ca/hyperbolic/loran_c_sigchar.html
- R. Williams, D. (NASA). (n.d.). Sputnik 1. <https://doi.org/1957-001B>
- Ramón, J. (n.d.). CONSOL Station - Lugo, Spain. Lugo. Retrieved from http://jproc.ca/hyperbolic/consol_spain.html

Sally. (2011). John Alvin Pierce. Retrieved from <https://www.findagrave.com/memorial/71639846/john-alvin-pierce>

Smith-Rose, R. L. (1998). Guglielmo Marconi.

Stansell, T. A. (1983). *The Transit Navigation Satellite System*. <https://doi.org/R-5933A>

Transit - US Navy Navigation Satellite System (NNSS). (n.d.). Retrieved from <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/transit>

Voellinger, L. R., Asendorg, T. L., Butzke, J., & Lastufka-Taylor, F. (2015). *LORAN-C Legacy: the End of an Era Social History and Operations of Loran-C United States Coast Guard*. Retrieved from [http://ila.rin.org.uk/history/LORAN Social History - April 2015.pdf](http://ila.rin.org.uk/history/LORAN%20Social%20History%20-%20April%202015.pdf)

Weisstein, E. W. (n.d.). Doppler Effect. Retrieved from <http://scienceworld.wolfram.com/physics/DopplerEffect.html>