

MARINHA DO BRASIL  
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA  
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM  
GUERRA ELETRÔNICA



ONDAS IONOSFÉRICAS E CARACTERÍSTICAS DAS RADIOCOMUNICAÇÕES DE  
LONGAS DISTÂNCIAS

1T(QC-CA) DANILO JOSÉ ALFREDO

Rio de Janeiro  
2018

1T(QC-CA) DANILO JOSÉ ALFREDO

ONDAS IONOSFÉRICAS E CARACTERÍSTICAS DAS RADIOCOMUNICAÇÕES DE  
LONGAS DISTÂNCIAS

Monografia apresentada no Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica.

Orientador: CT (EN) Antônio José Ferreira Vieira.

CIAW  
Rio de Janeiro  
2018

1T(QC-CA) DANILO JOSÉ ALFREDO

ONDAS IONOSFÉRICAS E CARACTERÍSTICAS DAS RADIOCOMUNICAÇÕES DE  
LONGAS DISTÂNCIAS

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica.

Aprovada em \_\_\_ de Junho de 2018.

**Banca Examinadora:**

CT Antônio José Ferreira Vieira, MSc – CGEM \_\_\_\_\_

Erasmus Couto Brazil de Miranda, P.h.D – PUC Rio \_\_\_\_\_

CMG(RM1-EN) Gian Karlo Huback Macedo de Almeida, MSc – CIAW \_\_\_\_\_

Dedico esse trabalho a minha esposa Samara Murano A. C. Alfredo, que me incentivou e me motivou nos momentos de maiores dificuldades até a conclusão do mesmo. Em especial dedico também à minha mãe, Maria de Fátima Alfredo, que é minha inspiração para tudo que realizo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado a caminhos de luz e de fé. À minha esposa, pelo apoio nos dias de dificuldades e por sempre me auxiliar e incentivar nos momentos de maior dificuldade. Aos meus pais, por serem os responsáveis pela minha exemplar educação e aos meus irmãos, pelo companheirismo. Agradeço também aos meus orientadores, pelos importantes conselhos e ensinamentos e pelo empenho em fazer deste trabalho, o melhor possível.

## ONDAS IONOSFÉRICAS E CARACTERÍSTICAS DAS RADIOCOMUNICAÇÕES DE LONGAS DISTÂNCIAS

### Resumo

O presente trabalho tem como objetivo auxiliar os militares dos navios da Marinha do Brasil no tocante às comunicações na faixa de frequência de 3MHz a 30MHz (High Frequency), devido à dificuldade e complexidade de abordagem e operação destes equipamentos. Será realizada uma grande abordagem de propriedades relacionadas as ondas eletromagnéticas e descrita as leis que regem tais fenômenos elétricos de propagação. Para equalizar os conhecimentos necessários para a fiel operação do equipamento em Alta Frequência (HF), precisa-se tomar conhecimento de conceitos como: comprimento de onda, frente de onda, impedância intrínseca ao meio em que se propaga, velocidade de propagação e os possíveis tipos de ondas emitidas. Após nivelado o conhecimento através da apresentação inicial dos conceitos de eletromagnetismo, o trabalho irá abordar os conceitos relacionados ao processo de estabelecimento de comunicações à longa distância, do conteúdo teórico até os resultados de ensaios de pesquisas relacionadas via software de predição em propagação HF. Apresentado os dados, o operador poderá tomar decisões acertadas diante de cada cenário específico, adotando frequências plausíveis e corretos níveis de potências do equipamento, de acordo com sua localização. Ao final do trabalho será apresentada uma operação com o equipamento Datron Link, que é amplamente utilizado pelos meios navais, suas limitações e sua utilização em conjunto com a tecnologia *Slow Scan TeleVision* (SSTV). Para um melhor entendimento da tecnologia SSTV, foi realizado um experimento através de um software de manipulação matemática e demonstrado o resultado passo-a-passo. Por fim, é concluída a pesquisa citando o ocorrido em algumas cidades Canadenses, demonstrando que a tecnologia HF pode não ser a mais avançada para determinadas aplicações, porém esta se destaca pela robustez e dissuasão devida grande utilização por rádios amadores.

**Palavras- chave:** [propagação ondas eletromagnética ionosférica]

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Orientação dos campos elétrico e magnético e direção de propagação.....	25
Figura 2: Frente de Onda Plana.....	27
Figura 3: Frente de Onda Plana distante da Fonte e Frente de Onda em torno de um condutor.....	27
Figura 4: Onda resultante de duas senóides com frequências distintas.....	28
Figura 5: Composição da Onda eletromagnética.....	29
Figura 6. Propagação de onda plana linearmente polarizada.....	29
Figura 7: Onda com polarização Circular.....	30
Figura 8: Onda plana com polarização elíptica.....	30
Figura 9: Variação típica da temperatura da atmosfera em função da altura.....	32
Figura 10: Atividade solar ao longo dos anos.....	33
Figura 11: Representação das Camadas Atmosféricas.....	34
Figura 12: Grau de concentração de elétrons e função da altitude.....	35
Figura 13: Ilustração do comportamento da onda que incide com a ionosfera.....	36
Figura 14: Ilustração da trajetória da onda eletromagnética na ionosfera.....	36
Figura 15: Representação de comunicação entre estações.....	39
Figura 16: Plataforma de acesso ao VOACAP.....	42
Figura 17: Representação do link entre estação e navio no mar mediterrâneo.....	43
Figura 18: Tópicos de configurações do VOACAP.....	43
Figura 19: Confiabilidade de se estabelecer comunicação.....	44
Figura 20: Intensidade do nível de sinal no receptor.....	45
Figura 21: Esquema de ligação entre modulador SSTV.....	46
Figura 22: Ilustração de Imagem transmitida após aplicação da tecnologia SSTV.....	47
Figura 23: Imagem que será transmitida em tons de cinza.....	48
Figura 24: Imagem com a Transformada de Fourier Desajustada.....	49
Figura 25: Imagem com a Transformada de Fourier e Ajustada a Banda de Passagem.....	50
Figura 26: Representação da imagem após aplicada a Transformada de Fourier inversa.....	51
Figura 27: Ilustração da Rede de Celulares HF.....	52
Figura 28: Representação das possibilidades de comunicação via Rede de Celulares HF.....	53

**LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
HF	Alta Frequência
ALE DATRON LINK	Equipamento de Comunicações de longas distancias
SSTV	Slow Scan TeleVision
TEM	Onda eletromagnética Transversal
MUF	Máxima Frequência de Utilização
LUF	Mínima Frequência de Utilização
FOT	Frequência Ótima de Trabalho
VOACAP	Programa de Análise de Cobertura da Voz da América
ALE	Automatic link establishment
LQA	Qualidade de Link



**LISTAS DE SÍMBOLOS**

$q$	Carga elétrica
$\vec{e}$	Campo elétrico
$\vec{b}$	Indução eletromagnética
$\vec{F}$	Força de Lotentz
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vácuo
$\varepsilon$	Permissividade elétrica
$\sigma$	Condutividade elétrica
$\vec{J}$	Densidade de corrente elétrica
$\omega$	Frequência angular
$\alpha$	Fator de atenuação
$\Omega$	Ohms
$\beta$	Fator de Fase
$V_p$	Velocidade de Fase
$c$	Velocidade da luz no vácuo.
$N$	Índice de Refração

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Apresentação do Problema .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Justificativa e Relevância .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>16</b>
1.3.1 Objetivo Geral .....	16
1.3.2 Objetivos Específicos .....	16
<b>1.4 Etapas do Trabalho.....</b>	<b>17</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
<b>3 METODOLOGIA – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Quanto aos fins.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 Quanto aos meios.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Limitações do Método .....</b>	<b>20</b>
<b>3.4 Coleta e Tratamento dos Dados.....</b>	<b>21</b>
<b>4 CONCEITOS DE ELETROMAGNETISMO.....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 O Campo Eletromagnético.....</b>	<b>22</b>
<b>4.2 Influencia do Meio no Campo Eletromagnético.....</b>	<b>22</b>
<b>4.3 Condutividade Elétrica do Meio Condutor.....</b>	<b>23</b>
<b>4.4 A Onda Eletromagnética.....</b>	<b>24</b>
<b>4.5 Propagação da Onda Eletromagnética.....</b>	<b>25</b>
<b>4.6 Impedância de Onda e Impedância Intrínseca do Meio.....</b>	<b>26</b>
<b>4.7 Frente de Onda.....</b>	<b>26</b>
<b>4.8 Velocidade da Onda Eletromagnética.....</b>	<b>27</b>
<b>4.9 Índice De Refração.....</b>	<b>28</b>
<b>4.10 Polarização da Onda Eletromagnética.....</b>	<b>28</b>
<b>5 COMUNICAÇÕES DE LONGAS DISTÂNCIAS.....</b>	<b>31</b>
<b>5.1 Composição da Atmosfera e seus Aspectos.....</b>	<b>31</b>
<b>5.2 Manchas Solares.....</b>	<b>32</b>
<b>5.3 Ondas Ionosféricas ou Ondas Celestiais.....</b>	<b>33</b>

<b>5.4 A Ionosfera.....</b>	<b>33</b>
<b>5.5 Reflexão de Ondas na Ionosfera.....</b>	<b>35</b>
<b>6 LINK DE COMUNICAÇÕES EM ALTA FREQUÊNCIA.....</b>	<b>38</b>
<b>6.1 ALE Datron Link.....</b>	<b>38</b>
6.1.1 Visão Geral.....	38
6.1.2 Parâmetros e Operação.....	40
<b>6.2 Programa de Análise de Cobertura da Voz da América (VOACAP).....</b>	<b>41</b>
<b>6.3 A Guerra Eletrônica Envolvendo Comunicações HF.....</b>	<b>45</b>
6.3.1 Slow Scan TeleVision (SSTV).....	46
<b>6.4 Rede de Celulares HF (RCHF).....</b>	<b>51</b>
6.4.1 Funcionamento da Rede de Celulares HF.....	52
<b>6.5 A importância da Comunicação em HF.....</b>	<b>53</b>
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>7.1 Considerações Finais .....</b>	<b>55</b>
<b>7.2 Sugestões para futuros trabalhos .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>61</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à dificuldade e complexidade da abordagem das características das ondas eletromagnéticas, de seus princípios de propagação e interações com o meio ambiente, faz-se necessário um profundo estudo. O conteúdo em análise é de difícil entendimento e poucos o dominam, devido poucas publicações de autores nacionais, medições e/ou ensaios de campo.

Com o avanço das tecnologias e desenvolvimento exponencial de armas de guerra, é necessário antever as ações do inimigo e para isso qualquer ajuda que possa proporcionar esta vantagem é substancialmente importante neste cenário.

As propagações em Alta frequência (HF), se bem utilizadas, podem estimar a posição do inimigo além do horizonte, ou mesmo estabelecer link de comunicações de extensões mundiais. Isto pode proporcionar vantagem significativa no confronto e garantir batalhas essenciais para o êxito da missão.

Vislumbrando este cenário, temos em conjunto a preocupação com as interceptões e quebra de sigilo das comunicações, assim é necessário empregar formas de criptografar os dados enviados, desenvolvendo técnicas de criptográficas para a comunicação com segurança.

Contudo, os capítulos que se seguem exemplificam tais conjunturas e abordam propriedades para o estudo proposto.

### 1.1 Apresentação do Problema

O campo eletromagnético possui suas peculiaridades. A partir de suas características foi possível descrever as propriedades e leis que o regem, tais como as equações das ondas eletromagnéticas com suas polarizações. Esta desenvoltura contribuirá para o enriquecimento teórico do assunto, sendo evidenciado em linguagem de fácil compreensão para leitores com pouca familiaridade ao tema. Após isto, foi possível realizar uma interpretação da solução da equação de onda, o que facilita a concepção de sua natureza eletromagnética.

Além destes conceitos, para o bom manuseio de equipamentos e total eficácia do modo de propagação escolhido para os enlaces, é necessário dominar as características das ondas, como seu comprimento, o conceito de frente de onda, sua impedância intrínseca ao meio em que se propaga sua velocidade e quais os possíveis tipos de ondas emitidas. Contudo, a dificuldade em encontrar publicações e estudos que abordam estes conceitos faz com que este trabalho se torne importante para o auxílio ao leitor, ajudando nas tomadas de decisões e escolhas quando se é desejável fechar enlaces de comunicações.

Outra limitação encontra-se em artigos e estudos que visam auxiliar a tripulação dos navios da Marinha do Brasil, no que tange a comparação dos equipamentos encontrados nos meios navais com os sistemas de comunicações de ondas HF mais avançados. Assim, é plausível levar em conta a falta de apresentações de dados de pesquisas e ensaios realizados em território Brasileiro, estes que poderiam evidenciar possível defasagem dos equipamentos presentes nos meios navais.

## **1.2 Justificativa e Relevância**

Em comissões ou exercícios realizados em portos, encontramos diversos problemas relacionados ao fechamento de enlace via rádio, em diversos sistemas de transmissões, como também, pelo sistema HF ALE DATRON LINK, utilizado para comunicações de longa distância entre meios navais e estações radiogoniométricas da Marinha do Brasil. A complexibilidade envolvendo enlaces de longas distâncias abrangem condições operacionais e meteorológicas, além de horários específicos para sua operação.

Este trabalho pretende abordar estes conceitos relacionados ao processo de estabelecimento de comunicações à longa distância, desde o conteúdo teórico até os resultados de ensaios e pesquisas relacionadas. Com estes dados será possível auxiliar o operador a tomar as decisões acertadas e escolhas corretas diante de cada cenário específico, adotando corretas frequências e potências de acordo com sua localização. O projeto se justifica por auxiliar os operadores de rádio dos navios da Marinha do Brasil, com uma comparação aos seus sistemas de comunicações HF com os mais avançados atualmente, levando em conta pesquisas e ensaios realizados em território Brasileiro.

Virtude a escassez de obras, ensaios e medições direcionados aos sistemas encontrados nos meios navais, o estudo procura contribuir para a área relacionada, apresentando em linguagem de fácil entendimento, importante conhecimento teórico das características das radiocomunicações, mais especificamente para a faixa de frequência de 3MHz a 30MHz, com ilustrações, tabelas, gráficos e comparativos técnicos.

Esta monografia pode ser de apoio aos oficiais e praças integrantes de navios em comissões, ou em porto, principalmente quando forem exigidos em situações de contratempo para as comunicações de longa distância. De maneira fácil e ágil, esta composição pode ser consultado a fim de dirimir as dúvidas teóricas ou de ensaios.

Com a apresentação de softwares para a definição de melhores horários para fechamento de enlace e melhores frequências para as comunicações, pode ser alternativa caso aconteça algum imprevisto com sistemas já utilizados.

### **1.3 Objetivos**

Os objetivos desta obra foram definidos de forma a auxiliar os militares da Marinha do Brasil frente à utilização dos equipamentos de comunicações em Alta Frequência.

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

De forma geral, o objetivo em resumo é revisar/apresentar o conteúdo teórico específico relacionado à propagação de ondas, visando contribuir com o aumento do conhecimento na área a fim de melhorar a operabilidade dos equipamentos HF nos navios. Para que isto seja alcançado, será necessário abordar ramos do eletromagnetismo, assim como seus conceitos.

Posteriormente iremos abordar as características das radiocomunicações. Isto dará ao leitor um bom conhecimento sobre os meios de transmissão, mais especificamente sobre a estrutura da atmosfera terrestre e as possíveis propagações e seus fenômenos associados.

Para que o leitor seja capaz de realizar avaliação de desempenho de um enlace, será demonstrado as características da irradiação num meio ilimitado, sua propagação e atenuação, até a captura do sinal pela antena receptora. Desta forma, o trabalho visa dar o poder de discernimento necessário ao leitor para estabelecer o alcance máximo de um enlace.

Outra passagem importante é em relação às ondas ionosféricas. Dentre conceitos, figuras e tabelas, serão abordados temas significativos como a ionização da atmosfera terrestre, as reflexões das ondas na faixa de HF, a atenuação na ionosfera, a frequência de tráfego e a sua influência nas ondas HF na ionosfera.

Por fim, a apresentação de ensaios e testes realizados em território Brasileiro, além de abordar modelagens matemáticas e softwares de previsões.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Para enriquecer o conhecimento baseado em eletromagnetismo, será dada a atenção ao HF DATRON LINK, as ressonâncias do meio e sua frequência ótima de propagação.

Juntamente com a tecnologia Slow Scan TeleVision (SSTV), dará outra perspectiva ao olhar do leitor/militar que consulte este trabalho.

No que tange a reflexão ionosférica, para complementar o objetivo geral apresentado anteriormente, será exibido testes com softwares de predição de propagações em HF, que levantando a curiosidade, aumentando o interesse nos resultados mostrados posteriormente.

Para complementar o conteúdo sobre as características das Radiocomunicações, um exemplo de telefones celulares em HF será abordado, estes equipamentos entrarão em foco para mostrar a distinção entre o modo atual de telefonia e o modo de transmissão via HF.

Por fim, constataremos que a comunicação via HF não pode ser deixada de lado, pois seus parâmetros de robustez são extremamente relevantes para casos em que sistemas mais complexos e avançados podem deixar de funcionar.

#### **1.4 Etapas do Trabalho**

Esse trabalho de conclusão de curso foi dividido em três capítulos de desenvolvimento sobre o assunto proposto, sendo eles: Conceitos de Eletromagnetismo, Comunicações de longas distâncias, Link de comunicações em alta frequência.

- **Conceitos de Eletromagnetismo:** Visa lembrar os principais conceitos relacionados às propagações eletromagnéticas e leis que regem tais fenômenos.
- **Comunicações de longas distâncias:** Aborda as técnicas e procedimentos para que seja possível estabelecer link de comunicações em HF. Cita a possibilidade de envio criptografado de imagens táticas com informações valiosas para o cenário de guerra.
- **Link de comunicações em alta frequência:** Apresenta os aspectos que envolvem o início de uma transmissão até a sua recepção, detalha o meio de propagação de utilização e seu comportamento frente à onda que se propaga por ele. Alinhado ao tema proposto por este trabalho, foca nos aspectos relacionados às propagações ionosféricas.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

RIBEIRO, JOSÉ ANTÔNIO JUSTINO.: Apresentada grande conteúdo teórico para a monografia. Aborda os conceitos básicos para eletromagnetismo, características das radiocomunicações, das refrações e reflexões, a propagação no espaço livre e conteúdo relacionado às ondas ionosféricas.

AMENDOLA, V. GIUSEPPE.: Neste trabalho o autor apresenta toda teoria básica envolvendo as camadas ionosféricas e todos os fenômenos que ocorrem nas transmissões em HF influenciadas pelo ao sol.

VIEIRA, ANTÔNIO J. F.; BALOD, Y. C.; Este estudo aborda a tecnologia SSTV e sua aplicação juntamente com os transmissores de Alta Frequência.

THOR A. SIMENSEN.: Este artigo apresenta ao leitor uma visão geral do sistema Datron Link e os recursos de telecomunicações necessários para operar o sistema.

SERWAY, JOHN W. JEWETT JR.: Neste livro encontramos toda base em eletromagnetismo necessária ao trabalho e boa abordagem às ondas eletromagnéticas.

ALENCAR, M. S.: Neste livro encontram-se os fundamentos de propagação de ondas eletromagnéticas, além das características da propagação em canais de comunicações não guiados e modelos de predição.

WENTWORTH, STUART M.: Livro contribui com a abordagem às Ondas Planas e suas equações, as relações de campos propagantes em meios livres de cargas e sem perdas.

VIEIRA.: Esta tese contribui com reflexão e refração na interface entre duas superfícies, dispersão das ondas, atenuações e interferências na ondas.

PEREIRA.: Tese que contribui com índices de refração da atmosfera, trajetórias em atmosfera horizontalmente estratificada, estratificação da ionosfera, propagação em dutos, simulações e estudos de campo.



MARTINS.: Tese que apresenta novos modelo de predição de perda de percurso na propagação e técnicas de otimizações recentes, além de modelos estatísticos.

M. FRANCESCHETTI, J. BRUCK E L. J. SCHUMLMAN.: Contribui com análise de modelos de predição para propagação eletromagnética.

### **3. METODOLOGIA – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA**

Dentre as diversas formas de pesquisa para trabalhos de conclusão de curso, aqui serão apresentados os métodos utilizados, quanto aos fins e aos meios, como foi realizada a forma de coleta e tratamento de dados, além das limitações do método aplicado.

#### **3.1 Quanto aos fins**

A metodologia utilizada na parte teórica será explicativa, onde analisará e interpretará causas e efeitos do mundo eletromagnético, buscando generalizar leis de uma forma mais ampla, estruturar e definir teorias relacionando com o meio de transmissão.

A parte de ensaios e medições abordará a metodologia descritiva, que tem como foco registrar análise e fatores que se relacionam com um determinado fenômeno eletromagnético. Assim, após coleta de dados e resultados, buscará relacioná-las a teoria previamente explicada.

#### **3.2 Quanto aos meios**

Com o relacionado à teoria, utilizaremos a metodologia bibliográfica, baseando em livros, artigos e teses, descrevendo informações realizando uma compilação sobre os temas abordados.

Por outro lado, a parte de ensaios e apresentação de seus resultados, a metodologia abordada é considerada experimental, sendo uma investigação empírica onde o autor manipulará variáveis e observará e apresentará os resultados destes testes e ensaios.

#### **3.3 Limitações do Método**

Apesar de abordar dados bibliográficos e de fazer uma compilação de elementos de várias publicações e livros, o direcionamento é bastante específico, voltado para os navios militares, cujo ambiente de operação geralmente é o espaço livre. Não serão abordados os efeitos de obstáculos de grandes proporções e ambientes urbanos. Outra limitação, devido tempo e disponibilidade, é a abordagem de diferentes camadas de ionização da atmosfera e seu tratamento frente às ondas de rádio na faixa de HF. Este tipo de análise não se faz

necessária para o êxito do trabalho proposto, porém é desejável, visando complementação de seu conteúdo.

Com relação aos ensaios e medições, serão abordadas, mas com pouca profundidade em suas especificações. A obra busca resultados pouco complexos e de fácil entendimento para leitores, onde possibilitará ser de consulta rápida em determinadas situações.

### **3.4 Coleta e Tratamento de Dados**

Os dados e informações que irão compor o trabalho serão distribuídos em gráficos, tabelas e figuras. No que tange aos gráficos e figuras, estes se dividirão de itens retirados de livros referenciados, teses de doutorado ou mestrado, de artigos científicos, ou mesmo de ensaios realizados pelo próprio autor. As tabelas, exclusivamente, podem ser meramente alteradas em alguns itens, tendo por base outros trabalhos, artigos e afins, como também as tabelas comparativas provenientes de ensaios.

## 4. CONCEITOS DE ELETROMAGNETISMO

Neste capítulo são apresentadas as diversas características e propriedades relacionadas à propagação de ondas eletromagnéticas e as leis que regem tais fenômenos.

### 4.1 O Campo Eletromagnético

Partindo do princípio em que uma carga elétrica  $q$  de massa desprezível, está se deslocando com módulo, direção e velocidades conhecidas, dentro de uma região o qual exista um campo eletromagnético, descartando os efeitos gravitacionais, nota-se que seu movimento será alterado pela existência de uma força advinda do meio eletromagnético. Sabe-se que velocidade e força podem ser representadas por vetores, assim, em posse das grandezas vetoriais originais do movimento da partícula, podemos encontrar a força do campo eletromagnético que atua sobre a partícula.

Após experiências realizadas, e um consenso estudioso da área, chegou-se ao conceito de campo elétrico e indução magnética, responsáveis pela força sobre a partícula. O campo elétrico é representado pelo símbolo  $\vec{E}$  e medido em volts/metro[V/m]. Por sua vez, a indução eletromagnética é representada pelo símbolo  $\vec{B}$  e medida em teslas [T].

A força, a carga, o campo elétrico e a indução eletromagnética se relacionam pela fórmula conhecida como a força de Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

Analisando a fórmula apresentada, podemos notar que se a velocidade da partícula for nula, apenas o campo elétrico terá influência no seu movimento, que usualmente se classifica como força coulombiana (força de origem elétrica).

### 4.2 Influência do Meio no Campo Eletromagnético

O campo eletromagnético sofre influências do ambiente que o cerca. Assim, suas propriedades podem ser alteradas dependendo do meio material ao seu redor. Uma das propriedades é denominada permeabilidade magnética ( $\mu$ ), medida em henrys/metro (H/m).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2)$$

Perceba que a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) é de grandeza escalar e diretamente proporcional a indução magnética. Quando o meio for vácuo, temos:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad (3)$$

A variação da permeabilidade magnética se dá por diferente capacidade de imantação dos materiais. Então classificados como diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

Outra propriedade é denominada permissividade elétrica ( $\epsilon$ ), que se associa às polarizações atômicas e moleculares do material, medida em farads/metro (F/m). Em outras palavras, a polarização interna do material reduz a intensidade de campo em seu interior, sendo menor que no vácuo. A permissividade elétrica está relacionada com a permissividade e com a velocidade da luz ( $c$ ) no meio, onde  $c=2,9979 \times 10^8$ .

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8,8542 \times \frac{10^{-12} F}{m} \cong \frac{10^{-9}}{36\pi} \left[ \frac{F}{m} \right] \quad (4)$$

Alguns valores para permissividade elétrica e permeabilidade magnética, de acordo com determinado material, são apresentados no Apêndice B.

### 4.3 Condutividade Elétrica do Meio Condutor

No tópico anterior, mostrou-se como o meio influencia o campo eletromagnético através da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética. Outra propriedade importante é a condutividade elétrica, que demonstra a facilidade de condução de corrente elétrica do material sob a ação de um campo elétrico. A condução é relacionada com a densidade de corrente elétrica e o próprio campo elétrico. Assim, designa-se  $\sigma$  para a condutividade, medido em siemens/m (S/m). Para a densidade de corrente elétrica atribui-se  $\vec{j}$ , expressa em ampères/m ( $A/m^2$ ).

$$\vec{j} = \sigma \vec{e} \quad (5)$$

Se o meio condutor for perfeito, a condutividade tenderá para o infinito, indicando que seria impossível existir um campo eletromagnético em seu interior. Em contra partida, um dielétrico perfeito teria sua condutividade nula, indicando que não existiria um deslocamento de cargas dentro de seu interior. Para se classificar se o material é um bom condutor ou mal condutor, leva-se em consideração a velocidade de deslocamento de cargas em seu núcleo. Assim podemos classificar os meios em “Condutor”, “Dielétrico” ou “Quase Condutor”. Considerando que  $\omega=2\pi f$ , que é a frequência angular, temos:

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \geq 100 \quad \Rightarrow \quad \text{Meio Condutor} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \leq 100 \quad \Rightarrow \quad \text{Meio Dielétrico} \quad (7)$$

$$\frac{1}{100} < \frac{\sigma}{\omega\epsilon} < 100 \quad \Rightarrow \quad \text{Meio quase-condutor} \quad (8)$$

Os materiais podem se comportar como meio condutor ou dielétrico dependendo da frequência de operação. Como apresentado pelo autor Ribeiro (2004), “A água do mar, em sua composição média, apresenta uma condutividade de 4 S/m e uma permissividade de 81 Eo. O seu comportamento como bom condutor ocorrerá para frequências inferiores a 9MHz e será um meio dielétrico para frequências superiores a 90GHz”.

Para um determinado equipamento que opera por ondas de superfície na faixa de HF, a distância de comunicação pode se estender de 200 a 250 milhas ao longo de um caminho condutivo sob a água do mar. Por outro lado, quando em terrenos áridos ou rochosos, no entanto, o intervalo pode cair para menos de 20 milhas, com o mesmo equipamento.

#### 4.4 A Onda Eletromagnética

Em 1883, após ensaios experimentais, Hertz conseguiu comprovar a existência das ondas eletromagnéticas, isto baseado nos cálculos matemáticos e afirmações de Maxwell, que defendia que a eletricidade e o magnetismo estavam intimamente relacionados. Segundo Maxwell, tais ondas deveriam se propagar na velocidade da luz.

Após tais verificações, estudos mais profundos se tornaram necessários. Assim, Heaviside publicou uma obra chamada “Teoria Eletromagnética”, a qual já previa a existência de uma camada gasosa e ionizada na atmosfera terrestre (Ionosfera), capaz de refletir ondas eletromagnéticas. Região esta comprovada por Edward Victor Appleton em 1925. Trabalho o qual lhe rendeu Prêmio Nobel de Física em 1947.

Ondas eletromagnéticas geradas por dispositivos eletrônicos e transmitidas por antenas são usadas nas comunicações de longas distâncias, em sinais de televisão, rádio e amplamente difundido para outras aplicações. Isto devido ao avanço de pesquisas e descobertas que aconteceram ao longo dos últimos séculos. Por exemplo, ao aquecermos uma molécula de hidrogênio, estas entram em vibração e geram um movimento harmônico, dando origem a uma onda eletromagnética de frequência da ordem de  $1,3 \times 10^{14}$  Hz. Outro modo de se gerar uma onda eletromagnética é na transição de elétrons nos níveis de energia existentes nos átomos. Quando um elétron sai de um nível de energia mais alto para outro mais baixo, a

correspondente diferença é emitida sob a forma de ondas de altas frequências. Este processo é bastante difundido nos sistemas laser e diodos emissores de luz. Outras formas de emissões podem ser descritas, como as de raios-x ou raios-gama, bastante utilizadas em aplicações industriais e ciências, porém pouco aproveitadas para as comunicações.

#### 4.5 Propagação da Onda Eletromagnética

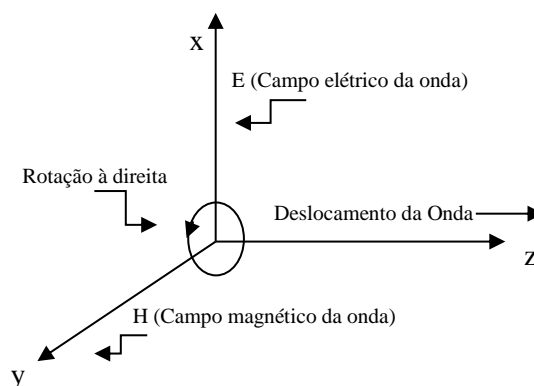
Em consideração a lei de conservação de energia, num meio que não seja o vácuo, a onda eletromagnética sofre atenuação de acordo com a sua propagação. As amplitudes do campo elétrico e magnético decrescem de acordo com determinada dissipação de sua energia em forma de calor. Esta atenuação é representada numericamente pelo fator de atenuação  $\alpha$ , medido em nepers/metro (Np/m), que podem também ser descritas em decibel. Assim:

$$1\text{Np} = 8,686\text{dB}$$

Deve-se considerar que o vetor campo elétrico é normal ao plano formado pela direção de propagação e vetor campo magnético. Esta afirmativa também vale para o campo magnético, que é normal ao plano formado pelo vetor de deslocamento e vetor campo elétrico. Portanto, os três vetores são mutuamente perpendiculares. Assim, conclui-se que os vetores campo elétrico e campo magnético são perpendiculares entre si e estão em um plano transversal à direção do vetor de propagação. Por esta razão, dizemos que esta onda é do tipo TEM, *Onda Eletromagnética Transversal*. Em resumo, trata-se de soluções para quando a onda estiver em regiões afastadas da fonte de emissão, onde sua frente de onda pode ser considerada plana. Em meios confinados, como cabos ou guias de ondas, outros tipos de ondas são encontradas, mas não será abordado por este trabalho.

O sentido de propagação obedece à regra do produto vetorial entre campo elétrico e campo magnético, dando origem ao movimento parafuso no sentido anti-horário.

Figura 1: Orientação dos campos elétrico e magnético e direção de propagação.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2004).

#### 4.6 Impedância de Onda e Impedância Intrínseca do Meio

A impedância de onda, medida em ohms ( $\Omega$ ), atua para garantir as dimensões corretas entre campos elétricos e magnéticos em um ambiente de distâncias ilimitadas. Suponha-se que em uma dada frequência, a onda sofra influência somente das características eletromagnéticas do meio em que se propaga. Assim, se o meio não possuir obstáculos, deve-se assumir que a impedância de onda seja considerada a impedância intrínseca do meio. Em outras palavras, se uma onda estiver propagando em um meio dielétrico perfeito, onde a condutividade é nula, a impedância de onda será uma grandeza real pura. Logo, os campos elétricos e magnéticos estão em fase no tempo, analogamente, um ao inverso do outro.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \quad (9)$$

Se o meio de propagação for o vácuo e substituirmos a permeabilidade e permissividade, teremos:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi\Omega = 377\Omega \quad (10)$$

Usualmente o meio de propagação utilizado é o ar, acrescido de outros elementos como poluição ou mesmo alterações de humidade e pressão, aproximasse a expressão anterior para:

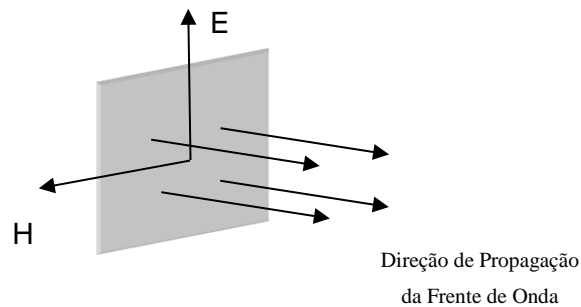
$$\eta = 120\pi \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (11)$$

#### 4.7 Frente de Onda

Frente de onda é uma região isofásica, onde pontos de onda estão na mesma fase das grandezas associadas ao campo eletromagnético. Pelo principio de Huygens, uma frente de onda pode ser considerada um conjunto de ondas secundárias de menor dimensão que se espalham ao decorrer a propagação, com mesma velocidade de deslocamento. Assim, um campo eletromagnético em todos os pontos desse plano de onda possui a amplitude constante, que caracteriza uma onda plana e uniforme.



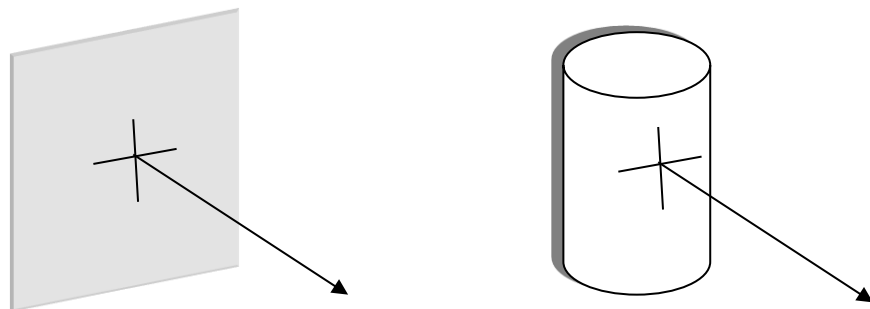
Figura 2: Frente de Onda Plana.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2004).

Não necessariamente a frente de onda deve ser plana. Podem existir diferentes formatos para uma onda, como na proximidade de um condutor cilíndrico comprido, encontra-se uma frente de onda cilíndrica. Porém, isso só é possível a distâncias próximas deste emissor. Caso seja observada a mesma frente de onda gerada pelo condutor cilíndrico a uma grande distância da fonte de emissão, esta, antes cilíndrica, pode ser considerada uma onda plana.

Figura 3: Frente de Onda Plana distante da Fonte e Frente de Onda em torno de um condutor.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2004).

#### 4.8 Velocidade da Onda Eletromagnética

Ao se deslocar no espaço, a frente de onda vai se expandindo conforme se passa o tempo. A rapidez com que esta frente de onda se desloca no espaço é denominada velocidade de fase. Uma vez que o fator de fase ( $\beta$ ) não é uma função linear da velocidade angular e a velocidade de fase é dependente da frequência de operação, descrevemos a expressão a seguir:

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (12)$$

Por outro lado, se o meio for um dielétrico sem perdas, não temos condutividade, assim  $\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$ . Então:

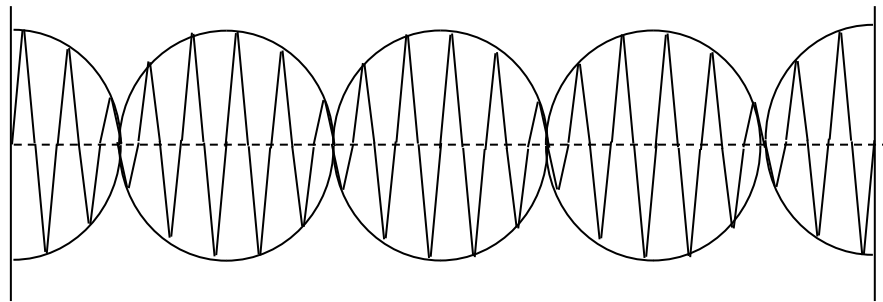
$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\omega \epsilon}} \quad (13)$$

Isto induz que a velocidade de fase não depende da frequência de oscilação de uma onda. Por este motivo, quando uma frente de onda está se propagando no ar ou no vácuo, aproxima-se sua velocidade de propagação para:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$$

Outro conceito importante relacionado à velocidade das ondas eletromagnéticas é denominado velocidade de grupo. Quando uma onda modulada está se propagando no espaço, sua resultante é composta por ondas de diferentes frequências e de diferentes amplitudes. Contudo, a onda resultante é o produto final das interferências construtivas e destrutivas entre ondas. Por fim, a velocidade de grupo implica no espaço percorrido pelo conjunto ao todo, preservado, e não somente pela velocidade de uma única componente de onda. A figura 4 mostra a combinação de duas ondas de frequências e amplitudes diferentes.

Figura 4: Onda resultante de duas senóides com frequências distintas.



Fonte: O autor.

#### 4.9 Índice De Refração

A relação entre a velocidade de uma onda no vácuo e a velocidade desta mesma onda em outro meio qualquer, é denominado *índice de refração* ( $N$ ).

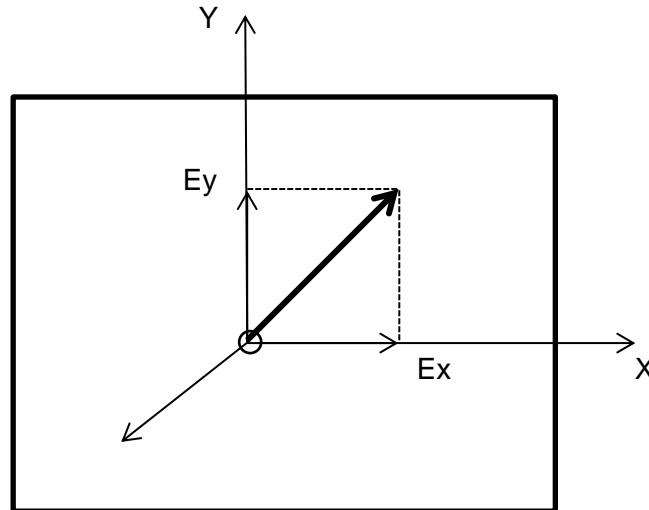
Em meios onde não há perdas, denominados os dielétricos perfeitos, gera-se uma relação com um número real, descrita pela fórmula:

$$N = \frac{c}{v_p} = \sqrt{\frac{\omega \epsilon}{\omega_0 \epsilon_0}} = \sqrt{\omega_r \epsilon_r} \quad (14)$$

#### 4.10 Polarização da Onda Eletromagnética

Para elucidar o tema, observe a Figura 5, que ilustra a composição de onda eletromagnética.

Figura 5: Composição da Onda Eletromagnética.

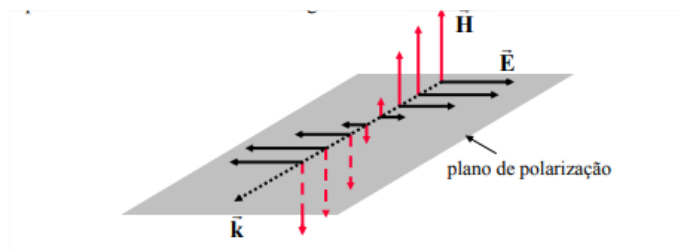


Fonte: Adaptado de Ribeiro (2004).

Os campos elétrico e magnético variam de posição conforme a onda se desloca no meio. Tomemos por base um vetor normal ao plano de propagação que, de momento, coincide com o campo elétrico. Assim, ao realizar amostras da posição deste vetor normal e ligar estes pontos, será gerada uma figura representativa a polarização do deslocamento da onda. Se as sucessivas projeções resultarem em uma reta, temos então a polarização linear. Quando a figura geométrica for um círculo, teremos a polarização circular e, por fim, quando a figura for uma elipse, teremos a polarização elíptica.

Levando em consideração a posição do campo elétrico em relação à superfície da terra, uma onda com polarização linear pode ser subdividida em vertical ou horizontal. Na polarização horizontal, o campo elétrico é paralelo ao plano de polarização. Por outro lado, na polarização vertical, o campo elétrico fica perpendicular ao plano da terra.

Figura 6. Propagação de onda plana linearmente polarizada.



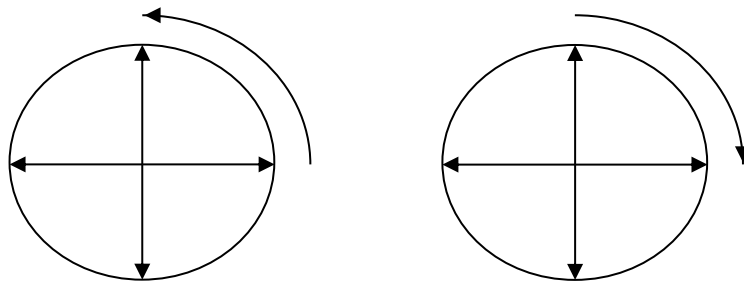
Fonte: Zilio (2005).

Para as comunicações navais, a escolha do método de polarização deve-se levar em consideração o terreno, a faixa de frequência de operação do equipamento e outros fatores.

Por exemplo, em baixas frequências, a água do mar se comporta como um condutor, assim não deve haver campo elétrico tangenciando o plano de propagação, pois a indução gera uma diferença de potencial entre a onda e a superfície, que implicaria em uma grande atenuação da onda transmitida. Conclui-se que para tais frequências e tipo de superfície, a polarização mais eficaz são as lineares verticais.

Nas transmissões polarizadas circularmente, teremos duas componentes de campo elétrico defasados de  $90^\circ$ . À medida que a onda se propaga, o plano destes campos elétricos vai circundando o eixo de deslocamento formando então a polarização circular. A polarização pode ser circular a direita ou circular a esquerda, dependendo a defasagem dos campos elétricos serem de  $90^\circ$  ou de  $-90^\circ$ . Este tipo de polarização é menos comum que as de polarização linear. Eles possuem a vantagem de poder ser recebida por antenas na vertical ou mesmo na horizontal e são mais imunes a ruídos e interferências.

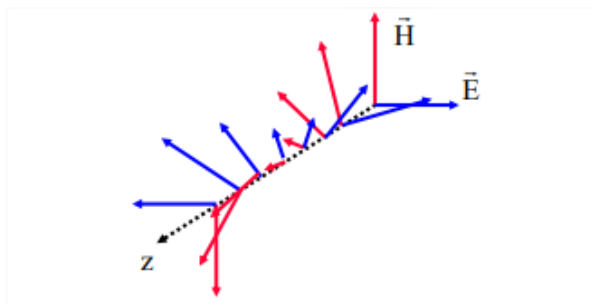
Figura 7: Onda com polarização Circular.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2004).

Para ondas polarizadas elípticamente, teremos uma semelhança à onda de polarização circular. Ressalta-se que uma onda circular pode se tornar uma elíptica devido à influência de atenuações e defasagens. A onda elíptica não pode conter as componentes de campo defasado de  $180^\circ$ , porém qualquer outra defasagem satisfaz a condição de onda elíptica.

Figura 8: Onda plana com polarização elíptica.



Fonte: Zilio (2005).

## 5. COMUNICAÇÕES DE LONGAS DISTÂNCIAS

No Capítulo 4, foram apresentadas diversas características e propriedades que estão relacionadas à propagação de ondas eletromagnéticas. Para a comunicação relacionada aos navios, o meio de propagação é o próprio ambiente, estando sujeito a variações de clima, efeitos atmosféricos ou mesmo do terreno (água do mar). É necessário discernir que há uma dissipação de potência no meio, chegando à antena receptora parte da energia de irradiação advinda da antena transmissora, assim, muitos aspectos estão envolvidos neste processo, os quais serão objetivos de estudo e apresentação em seguida.

Para a eficácia entre sistemas de comunicações, é necessário conhecer todos os aspectos que envolvem o início de uma transmissão até a sua recepção, em meio a isto, encontra-se o próprio meio de propagação. Desta forma, é importante conhecer com maior exatidão possível o comportamento de uma onda ao se propagar pelo meio. Alinhado ao tema proposto por este trabalho, daremos foco aos aspectos relacionados às propagações ionosféricas.

### 5.1 Composição da Atmosfera e seus Aspectos

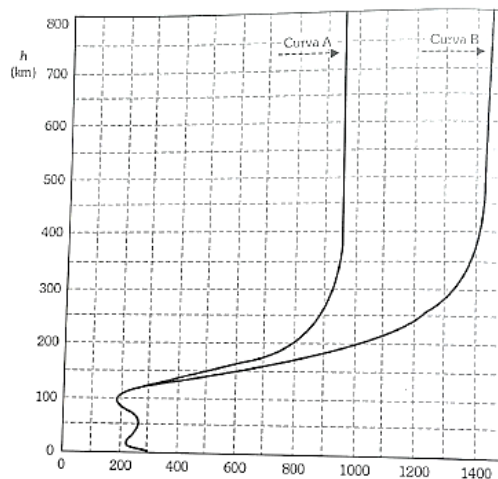
A atmosfera terrestre varia principalmente com as características de ionização, umidade, pressão e temperatura de uma determinada região. A altitude é o fator relacionado a todas estas características e influencia basicamente todos os modos de propagação. Um aumento considerável de ionização começa a acontecer a partir de 50 km de altura, em consequência da radiação solar, formando regiões que influenciam as características das ondas eletromagnéticas. Esta ionização acontece principalmente na altura de 500 km e 800 km, formando o meio designado como ionosfera terrestre.

Com elevada condutividade para baixas frequências, a ionosfera é fortemente dependente da radiação solar, estações do ano e determinadas horas do dia, viabilizando comunicações a longas distâncias neste período.

Na parte mais baixa, chamada de troposfera, está concentrada a maior parte do vapor d'água, é onde se formam as nuvens e são observadas as condições meteorológicas. Uma propriedade dessa faixa é devida sua temperatura diminuir com a altura. Acima da troposfera tem-se uma região de alguns quilômetros chamada tropopausa, na qual a temperatura mantém praticamente constante. Imediatamente acima da tropopausa, encontra-se a estratosfera, na qual a temperatura aumenta com a altura. Esse aumento é atribuído à maior concentração de gás ozônio, que tem efeito protetor para os seres vivos. Acima tem-se a mesosfera, em que

novamente a temperatura decresce com a altitude a uma taxa de variação quase constante, atingindo um valor mínimo de 190 a 200 Kelvins entre 90 km e 100 km. Entre essas duas regiões, tem-se novamente uma faixa estreita de temperatura quase constante, denominada estratopausa, com espessura de 2 km e 5 km. A região superior à mesosfera é caracterizada por um aumento na temperatura com a altura e é chamada termosfera. Em geral, inicia-se em torno de 110 km, com uma temperatura média ao redor de 280k. A elevada ionização na termosfera permite que se identifique a região denominada ionosfera. Em parte mais elevada da termosfera, alguns átomos e moléculas que se movem verticalmente tem uma probabilidade de escapar completamente da atmosfera. A exosfera ou zona de escape e a maior parte da ionosfera estão incluídas na termosfera. Ribeiro (2005)

Figura 9: Variação típica da temperatura da atmosfera em função da altura.



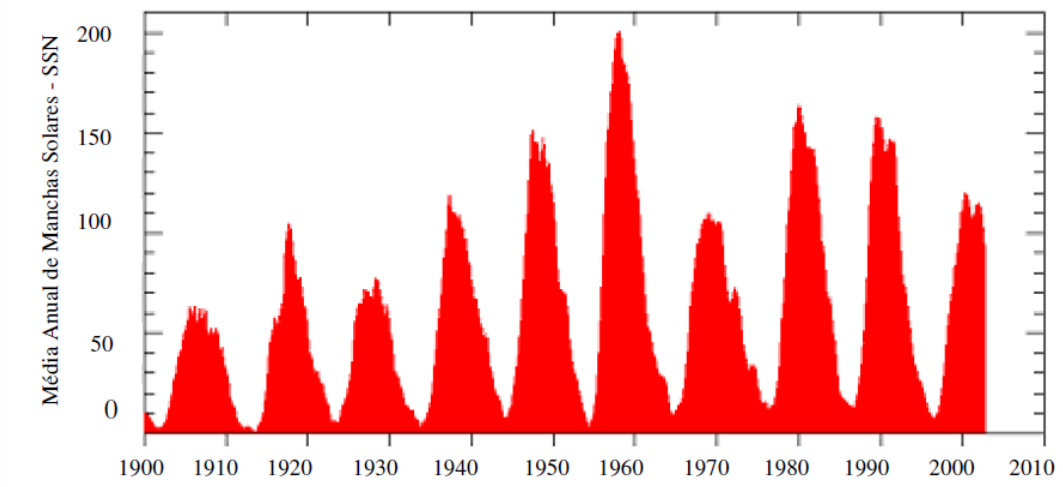
Fonte: Ribeiro (2004).

## 5.2 Manchas Solares

As manchas solares são manchas escuras que aparecem esporadicamente na superfície solar, podendo ser de centenas de milhares de quilômetros e ter vida média de horas ou de dezenas de dias terrestres, sendo que seu ciclo tem duração de dezenas de anos. As manchas solares são caracterizadas por fortes campos magnéticos entre outros fenômenos. Suas emissões magnéticas em direção a terra alteram de forma significativa a atmosfera, em particular, a ionização da camada ionosfera.

Durante períodos de atividade solar baixa, frequências acima de 20 MHz tendem a ser inutilizável, porque as camadas E e F são muito fracamente ionizada para refletir sinais de volta à terra. No auge do ciclo das manchas solares, no entanto, não é incomum ter em todo o mundo propagação em frequências acima de 30 MHz.

Figura 10: Atividade solar ao longo dos anos.



Fonte: Amendola (2013).

Além dessas variações, há uma classe de fenômenos imprevisíveis, conhecido como distúrbios ionosféricos repentinos que podem afetar as comunicações HF também. Distúrbios ionosféricos repentinos são eventos aleatórios devido a erupções solares, que pode interromper as comunicações por rádio frequência por horas, ou dias. Erupções solares produzem intensa ionização da camada D, fazendo-a absorver a maioria dos sinais de HF.

### 5.3 Ondas Ionosféricas ou Ondas Celestiais

Um dos tipos de propagação é por ondas ionosféricas, onde a onda irradiada pela antena transmissora, geralmente em baixas frequências, na faixa de HF, incide em determinada região da ionosfera e volta para a terra alcançando a antena receptora. Existem dois modos diferentes para a este tipo de propagação: o primeiro consiste na onda incidir com a base da ionosfera e sofrer uma reflexão, outro modo consiste em uma reflexão continuada, que acontece no interior da ionosfera.

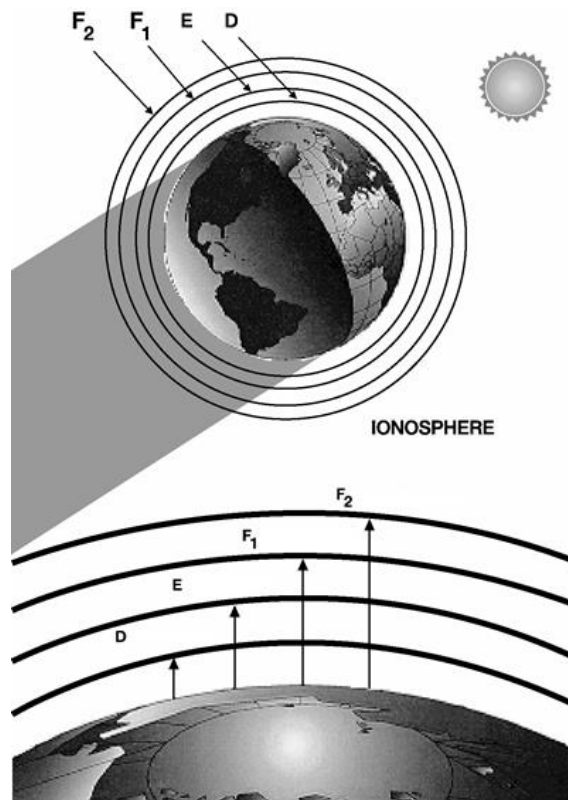
Esta região é importante para comunicações próximas a faixa de ondas HF, entre 2MHz a 50Mhz. Para frequências superiores, esta região pode ser considerada transparente. O alcance das comunicações ionosféricas chega a 4000 km de distância.

### 5.4 A Ionosfera

A ionosfera é a região mais elevada da atmosfera, localizada de 50 km a 600 km de altitude e de forma em geral, o seu nível de ionização cresce de acordo com a altitude. Para as comunicações de longas distâncias na faixa de HF, é necessário levar em consideração toda

sua extensão. Considera-se que a ionosfera é dividida em camadas, que se denominam D, E, F (pode ser subdividida em F1 e F2). Devido a grande concentração de carga elétrica nesta região, ocorrem alterações de fase e amplitude em ondas que nelas se propagam, principalmente quando se propagam na camada F. Esta influência é ainda mais forte quando as propagações ocorrem em latitudes acima de 55°.

Figura 11: Representação das Camadas Atmosféricas.



Fonte: Reimer (2003).

A camada D é a região da ionosfera mais próxima ao solo terrestre, situando-se de 50 km a 90 km de altitude e possui uma concentração de 1020 moléculas por metro cúbico, formadas por oxigênio e nitrogênio. Esta camada pode desaparecer por completo no período noturno e influencia consideravelmente na atenuação das ondas eletromagnéticas em frequências mais baixas da faixa de HF.

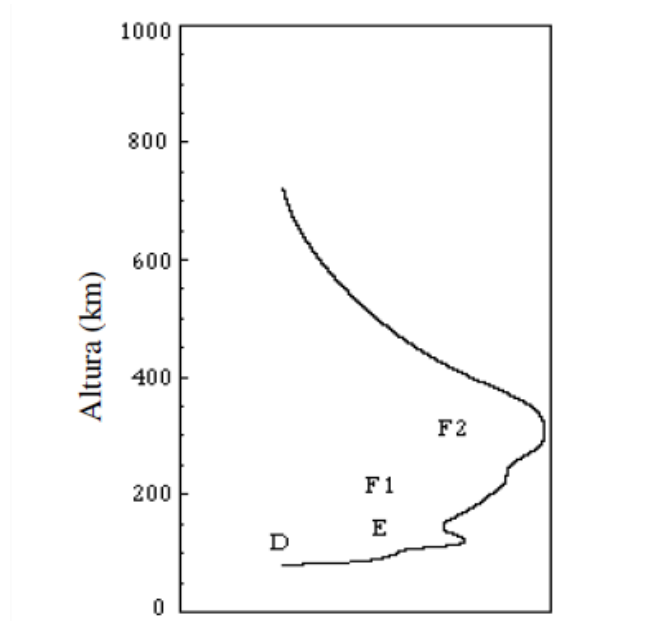
A camada E é formada por gases ionizáveis de oxigênio e nitrogênio que durante o dia sua concentração chega a 1011 elétrons/m<sup>3</sup> e 3x1010 elétrons/m<sup>3</sup> durante o período noturno. Seus limites encontram-se entre 95 km a 150 km de altitude podendo ter até 1000 km de extensão na horizontal. Sua existência tem maior concentração na proximidade da linha do equador geomagnético, surgindo durante o dia, exceto nos polos, onde é encontrado por



fenômenos noturnos. Como acontece com a camada D, a camada E também quase desaparece no período noturno.

A camada F é a camada de maior extensão, variando de 150 km a 600 km de altitude. Pesquisas e testes apontam que a camada F é constituída principalmente por ionizações de oxigênio. Usualmente a camada F é subdividida em F1 e F2, devida as propriedades distintas destas subcamadas. A subcamada F1 possui uma concentração de  $2 \times 10^{11}$  elétrons/m<sup>3</sup> durante o período diurno. Por outro lado a camada F2 possui uma concentração de  $3 \times 10^{12}$  elétrons/m<sup>3</sup>, em uma altitude média de 300 km e devido a colisões entre íons e elétrons ocorre uma pequena atenuação por absorção.

Figura 12: Grau de concentração de elétrons e função da altitude.



Fonte: Amendola (2013).

### 5.5 Reflexão de Ondas na Ionosfera

Mostrou-se através de diversos testes que a onda eletromagnética penetrando na região da ionosfera, se refletirá de volta a superfície terrestre quando a sua frequência coincidir com a frequência de plasma dos gases ionizados presentes na ionosfera. A frequência de plasma depende da concentração de elétrons. De modo em geral, para considerar que a onda seja encurvada para baixo, o índice de refração da ionosfera é de acordo com:

$$N = \frac{c}{v_{po}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2} = \sqrt{1 - \frac{81n_e}{f^2}} \quad (15)$$

Testes e medições demonstraram que a densidade de elétrons tende a aumentar de acordo com o aumento da altitude e o índice de refração tende a diminuir. Por dedução, a relação

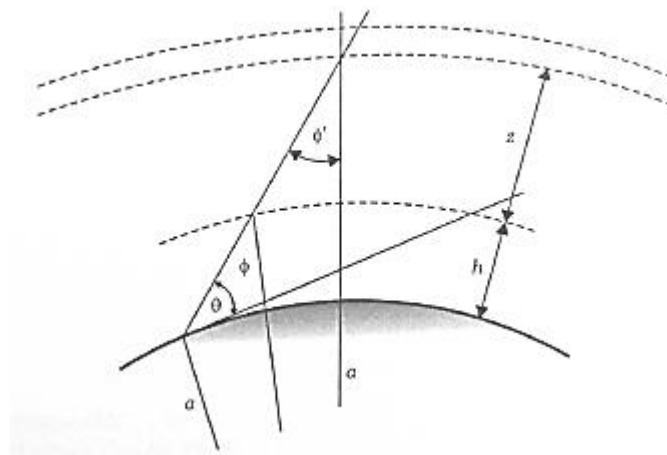
entre o ângulo de incidência na fronteira inferior do meio de propagação e o ângulo a uma altura acima desta base é:

$$N_0 \operatorname{sen} \alpha_0 = \left(1 + \frac{h}{a}\right) N \operatorname{sen} \alpha \quad (16)$$

Esta solução é adaptada para que  $\alpha_0$  represente  $\Phi$  e o ângulo  $\alpha$  corresponda a  $\Phi'$ . Da mesma forma, no lugar  $a$  é representado por  $a + h$ , sendo  $h$  a altura a partir da qual se inicia a ionosfera. No lugar de  $h$ , utiliza a coordenada  $z$ . Assim temos a seguinte adaptação:

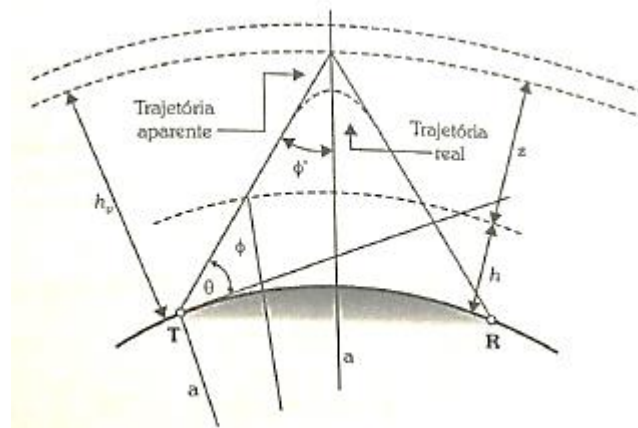
$$N_0 \operatorname{sen} \phi = \left(1 + \frac{z}{a+h}\right) N \operatorname{sen} \phi' \quad (17)$$

Figura 13: Ilustração do comportamento da onda que incide com a ionosfera.



Fonte: Ribeiro (2004).

Figura 14: Ilustração da trajetória da onda eletromagnética na ionosfera.



Fonte: Ribeiro (2004).

Outra análise que é importante abordar é os limites para que a reflexão ionosférica aconteça. Assim, é necessário encontrar qual a frequência máxima do plasma na região, que é referente à densidade máxima de elétrons na região ionosférica. Esta frequência máxima é denominada *Máxima Frequência de Utilização (MUF)*. Seu valor é:

$$MUF = \frac{\omega_{pm\acute{a}x}}{1 - \left(\frac{a \cos \theta}{a + h_p}\right)^2} \quad (18)$$

A fórmula 18 apresentada, pode ser aproximada para facilitar os cálculos. Sabendo o número de concentração de elétrons momentâneo da atmosfera, lembrando que este valor pode sofrer alterações de acordo com inúmeros fenômenos, então teremos:

$$(MUF)_0 = \frac{\omega_{pm\acute{a}x}}{2\pi} = 9\sqrt{n_{em\acute{a}x}} \quad (19)$$

Os fatores que influenciam a máxima frequência de utilização são: grau de ionização da atmosfera, taxa de colisões, hora do dia, época do ano e altura. Para levantar estes parâmetros é necessária a utilização de satélites de sondagens, assim pode-se levantar uma média mensal e criar uma tabela de com tais valores.

Em contra partida ao MUF, teremos a *Mínima Frequência de Utilização (LUF)*. Entretanto, entre tais frequências existe a *Frequência Ótima de Trabalho (FOT)*, válida em mais de 90% dos dias do mês. Para reflexões na camada F2 a *FOT* representa 85% da MUF.

Sabe-se que muitas das variáveis que afetam a propagação seguem ciclos repetitivos e podem ser previstas, então foram desenvolvidas técnicas para determinar a efetivamente FOT.

Um programa amplamente utilizado e eficaz de análise é o VOACAP, que prevê o desempenho do sistema em dado horário do dia em função da frequência para um determinado local de transmissão.

Claro, desde que os métodos de previsão computadorizada são baseados em cálculos físicos e dados históricos, estes podem não considerar condições que afetam a comunicação no dia de utilização, tais como mudanças na ionosfera causadas por fenômenos aleatórios (interferência e ruído).

## 6 LINK DE COMUNICAÇÕES EM ALTA FREQUÊNCIA

Inicialmente, forças navais estavam limitadas a atacar e defender de forças inimigas que estavam dentro do horizonte visual, mas a introdução de armas de longo alcance trouxe mudanças radicais nos combates.

Hoje, os comandantes precisam ser capazes de detectar atividades hostis o mais longe possível de seu navio. A tecnologia ALE Link-11, dentre outras, permite que unidades de um grupo de navios troquem informações táticas em tempo real. Ao compartilhar estas informações, os comandantes ampliam seus próprios recursos de detecção.

Este capítulo aborda técnicas e procedimentos para que seja possível estabelecer link de comunicações em HF com segurança. O recurso provém dados criptografados e alta capacidade quando bem utilizados.

A possibilidade de envio criptografado de imagens táticas com informações valiosas para o cenário de guerra torna imprescindível o completo domínio deste recurso.

### 6.1 ALE Datron Link

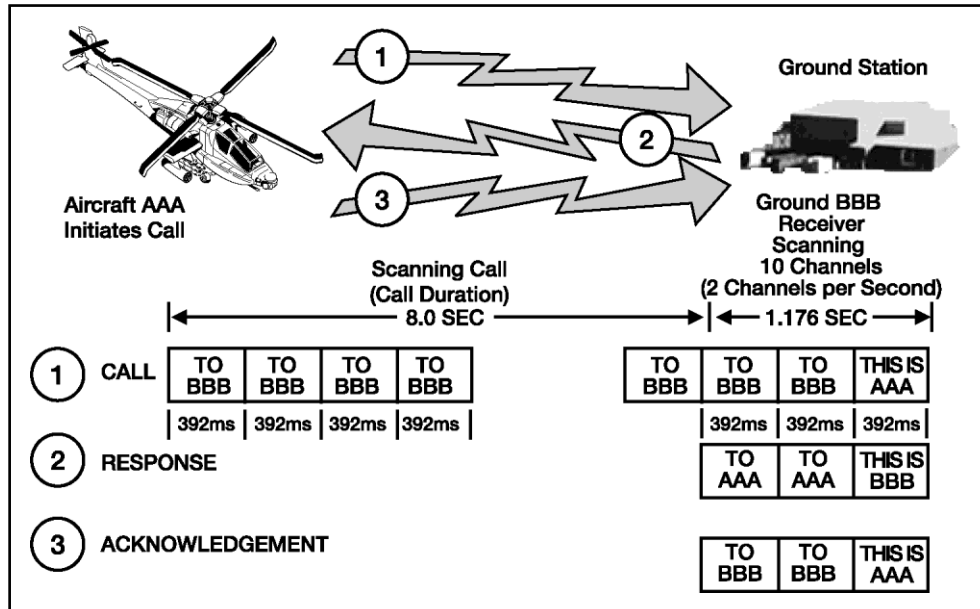
Automatic link establishment (ALE) é um sistema de comunicação que permite que estações de rádio HF chamar e estabelecer link sobre o melhor canal de HF automaticamente, sem auxílio de operador. Normalmente, os sistemas ALE fazem uso das características de canal de rádio utilizados recentemente e que estão armazenados em uma matriz de memória para selecionar a melhor frequência. O sistema funciona como um telefone onde cada rádio em uma rede possui um endereço atribuído. Quando não estiver em uso, cada receptor de rádio verifica constantemente através de suas frequências, se existem chamadas dirigidas a ele.

#### 6.1.1 Visão Geral

Para chegar a uma estação específica, o operador de rádio simplesmente insere um endereço, como discar um número de telefone. O rádio consulta sua matriz de memória e seleciona a melhor frequência disponível. Em seguida, envia uma breve mensagem digital contendo a identificação (ID) do destino. Quando a estação receptora ouve seu endereço, ela para a varredura e ativa a determinada frequência. As duas estações automaticamente

conduzem um "handshake" para confirmar que uma ligação está estabelecida, e eles estão prontos para se comunicar.

Figura 15: Representação de comunicação entre estações.



Fonte: Reimer (2003).

ALE também pode ser usado para um grupo de estações simultâneas, utilizando a chamada rede. Nesta situação, cada estação receptora responde para a estação de chamada em uma sequência predeterminada, que é configurada durante a programação de ALE.

Quando uma chamada é iniciada, o rádio verifica a matriz de memória para determinar a melhor frequência, visando à qualidade da chamada. Se o link não pode ser estabelecido sobre essa frequência, ele tentará novamente na segunda melhor frequência, e assim por diante até que seja estabelecido um link. Às vezes, quando usando o espectro de HF, as comunicações entre quaisquer dois pontos podem não ser possíveis. Nesses casos, é importante ser persistente nas tentativas de se comunicar e considerar o uso de outra estação como um retransmissor para obter uma mensagem.

Na matriz abaixo, é demonstrado para uma determinada estação, o canal e o número que representa os escores de qualidade deste canal. Neste exemplo, pontuações variam de 0 para o pior, até 100 para o melhor. Um espaço em branco ("--") significa que as duas rádios não poderiam usar esse canal para se comunicar.

Tabela 1: Tabela de scores de link de rádios.

Rádio	Canal				
	01	02	03	04	05
ALPHA 1	62	35	14	84	22
ALPHA 2	12	--	46	84	25
ALPHA 3	--	--	27	54	77

Fonte: Adaptado de Reimer (2003).

Assim, se o operador quer chamar ALPHA 3, o rádio poderá chamar no canal 05, que tem a maior pontuação. Se não for bem-sucedido, ele irá tentar ligar no canal com a segunda maior pontuação (canal 04) e assim por diante.

Ao fazer chamadas multi-estações ou uma ligação de rede, o rádio seleciona o canal com a melhor pontuação média entre os endereços. Assim, para uma chamada de rede para todos os endereços na matriz, canal 04 será usado.

Limitações:

- ALE é uma ferramenta que automatiza a ligação em HF efetuando automaticamente a seleção de frequência. Porém, não substitui um operador de HF devidamente treinado. Todo conhecimento sobre o equipamento de rádio, a propagação e as antenas, ainda é essencial para utilizar efetivamente o ALE.
- ALE não melhora a propagação das ondas eletromagnéticas, ele só funciona bem como as frequências que inserimos nele. Portanto, a gestão de frequências é essencial e necessita de pessoal qualificado.

### 6.1.2 Parâmetros e Operação

A seguir temos uma serie de parâmetros do ALE DATRON fornecidos aos usuários.

- Número do canal.
- Frequência (ambas recebem e transmitem).
- Emissão de energia (Controle de potência).
- Tipo de modulação (também conhecido como modo de emissão).
- Controle de ganho automático (AGC).
- Largura de banda do canal.
- Receber (RX) Somente (se definida como Sim, esse canal é utilizado apenas como receptor).
- Ativar/desativar som.
- Intervalo de sondagem.
- Proteção de link (criptografia).

Quando necessário tais parâmetros devem ser alterados para que seja atendida a segurança das comunicações. O Plano de comunicações deve assegurar que todas as estações estão utilizando configurações compatíveis com o estabelecido pelo comando.

Quanto maior o número de frequências, mais ampla é a sua distribuição na faixa de HF. Desta forma, melhor o HF-ALE executará o estabelecimento de link. O tamanho mínimo para um plano eficaz de canal é dependente da missão. Normalmente, o plano de canal ideal

de frequências é de 10 a 12, distribuídos por faixa de frequência, apoiando tanto voz como dados. Se houver uma diminuição do número de frequências no plano de canal, as escolhas de link tornam-se limitadas e podem tornar-se zero. Além disso, à medida que o número de frequências no plano de canal aumenta além do número ideal (frequências de 10 a 12), aumenta o tempo necessário para realizar o link e estabelecer comunicações.

Por tanto, um especialista deve realizar as seleções de frequência e usar o número ideal destas por plano de canal, assegurando o melhor desempenho possível de HF-ALE.

#### Detecção de Erros:

O receptor é capaz de fazer correções na mensagem recebida se houver erros mínimos na palavra de dados, com a ajuda do “sistema de correção código”. Cada palavra de dados é composta de vinte e quatro bits. Seis bits de controle são adicionados à palavra de dados para verificar a paridade do padrão de bits. Ao verificar a paridade do padrão de bits, se um bit estiver com erro, os bits de controle poderão determinar qual bit está com erro e corrigi-lo.

#### Controle de transmissões:

O controle de transmissões é o que permite que o sistema opere automaticamente depois de iniciado. O equipamento gera e reconhece dados de protocolo que controlam o tipo e a característica da transmissão. Cada mensagem que é transmitida pela rede Link-11 e tem um código de início e parada, que marca o início e o fim da transmissão de cada navio. Existem códigos na mensagem que identificam qual estação está transmitindo a mensagem atual e qual estação transmitirá em seguida.

Com temporização precisa e códigos de protocolo, todas as unidades são capazes de atualizar continuamente umas às outras sobre as informações de contato em segundos.

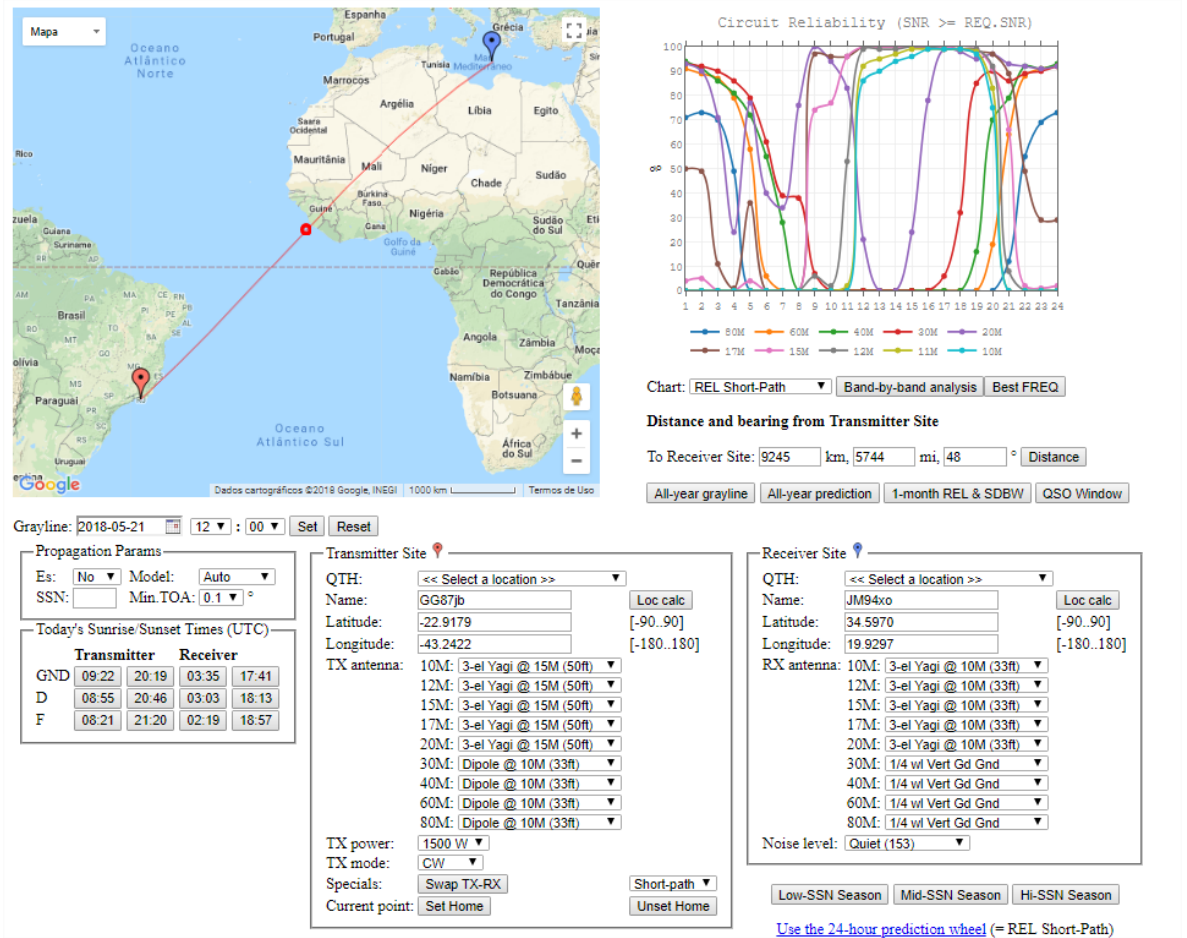
## **6.2 Programa de Análise de Cobertura da Voz da América (VOACAP)**

O VOACAP é um software de predição e análise de frequências para o uso profissional de equipamentos que utilizam a propagação de alta frequência (HF).

Será feito um guia de trabalho que deve ajudar o leitor a entender o software. Para maiores informações é necessária uma consulta ao livro de George Lane, *Signal-to-Noise Predictions Using VOACAP*.

Esta é a plataforma a qual iremos realizar as estimativas.

Figura 16: Plataforma de acesso ao VOACAP.

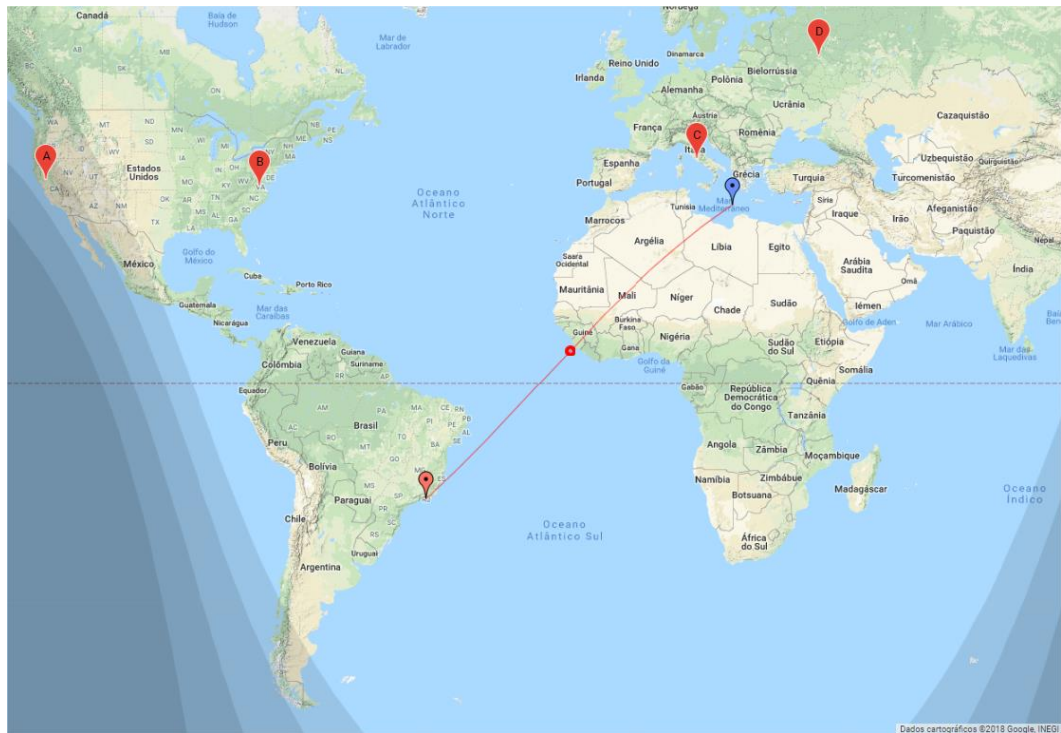


Fonte: O autor.

Primeiramente, é necessário estimar a localização do receptor, levando em conta que o ponto do transmissor é conhecido. Basta ajustar os pontos de Transmissor/Receptor no mapa do software para maior exatidão das previsões, como a seguir.



Figura 17: Representação do link entre estação e navio no mar mediterrâneo.



Fonte: O autor.

Neste caso, é considerada uma transmissão do Rio de Janeiro, às 12:00 do dia 21 de maio de 2018, para a região de mar mediterrâneo, simulando uma transmissão com um navio da Marinha Brasileira em missão exterior.

Outro ponto relevante para ajuste é sobre as características de equipamento do transmissor e, se possível, do receptor. Isto filtrará ainda mais as opções e trará exatidão maior para as frequências de utilização.

Figura 18: Tópicos de configurações do VOACAP.

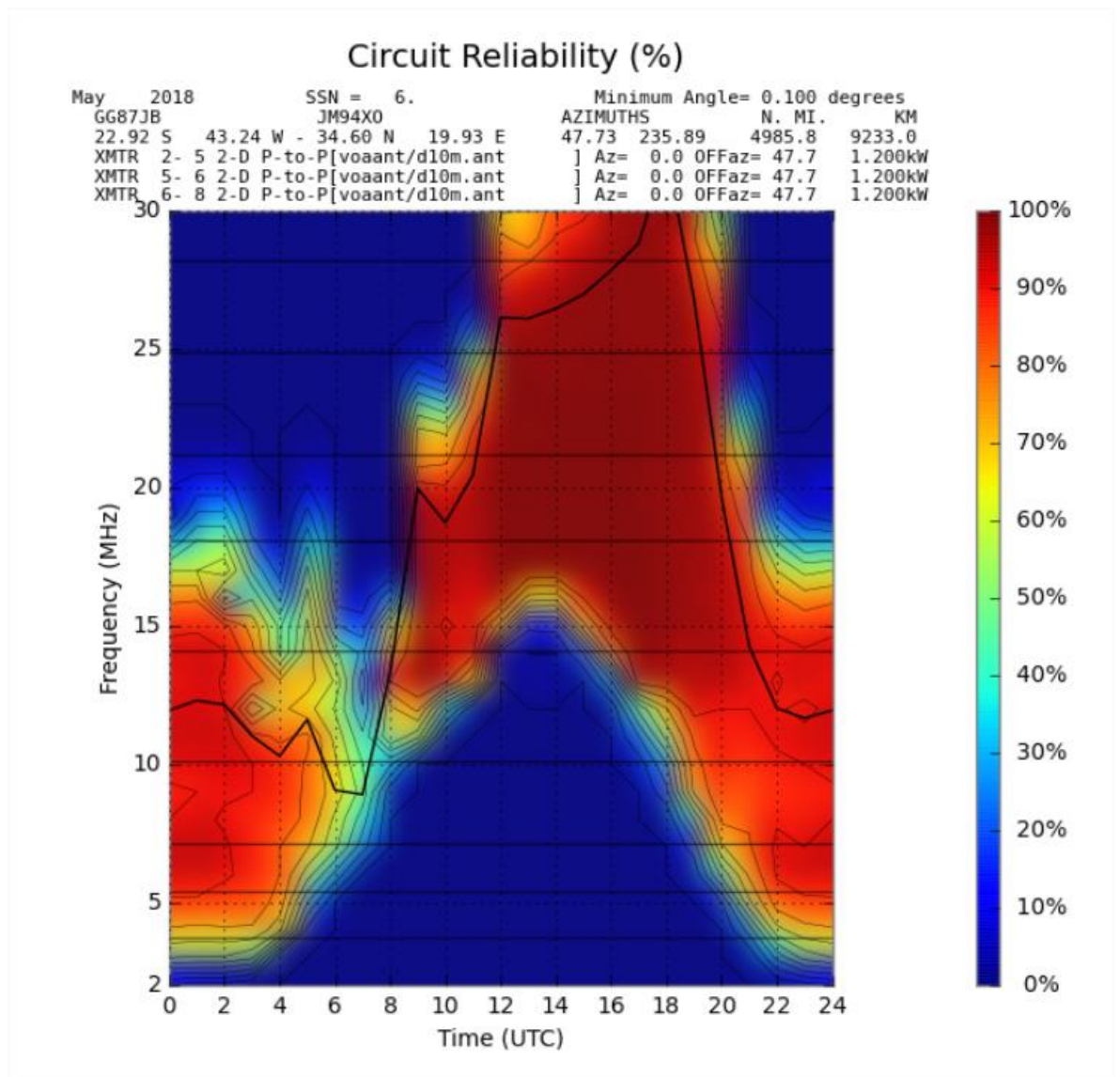
Transmitter Site	Receiver Site
QTH: << Select a location >>	QTH: << Select a location >>
Name: GG87jb	Name: JM94xo
Latitude: -22.9179	Latitude: 34.5970
Longitude: -43.2422	Longitude: 19.9297
TX antenna: 10M: 3-el Yagi @ 15M (50ft)	RX antenna: 10M: 3-el Yagi @ 10M (33ft)
12M: 3-el Yagi @ 15M (50ft)	12M: 3-el Yagi @ 10M (33ft)
15M: 3-el Yagi @ 15M (50ft)	15M: 3-el Yagi @ 10M (33ft)
17M: 3-el Yagi @ 15M (50ft)	17M: 3-el Yagi @ 10M (33ft)
20M: 3-el Yagi @ 15M (50ft)	20M: 3-el Yagi @ 10M (33ft)
30M: Dipole @ 10M (33ft)	30M: 1/4 wl Vert Gd Gnd
40M: Dipole @ 10M (33ft)	40M: 1/4 wl Vert Gd Gnd
60M: Dipole @ 10M (33ft)	60M: 1/4 wl Vert Gd Gnd
80M: Dipole @ 10M (33ft)	80M: 1/4 wl Vert Gd Gnd
TX power: 1500 W	Noise level: Quiet (153)
TX mode: CW	Low-SSN Season
Specials: Swap TX-RX	Mid-SSN Season
Current point: Set Home	Hi-SSN Season
Short-path	<a href="#">Use the 24-hour prediction wheel (= REL Short-Path)</a>
Unset Home	

Fonte: O autor.

Parâmetros de antenas e potência podem ser ajustadas, além do modo de transmissão e nível de ruído estimado para o receptor, dependendo do ambiente em que se encontra, como na simulação o navio situa-se afastado da costa, aderimos um baixo nível de ruído.

Após ajustado os parâmetros, executamos o software para chegar as seguintes conclusões: A Figura 19 representa a predição para a confiabilidade de comunicação, onde a área avermelhada indica melhor faixa de frequência de utilização. Nota-se que há grande possibilidade da comunicação não se estabelecer no horário de 6 a 8 horas da manhã. A linha preta que passa pelo gráfico representa a Frequência Máxima de Operação (MUF) para determinado horário.

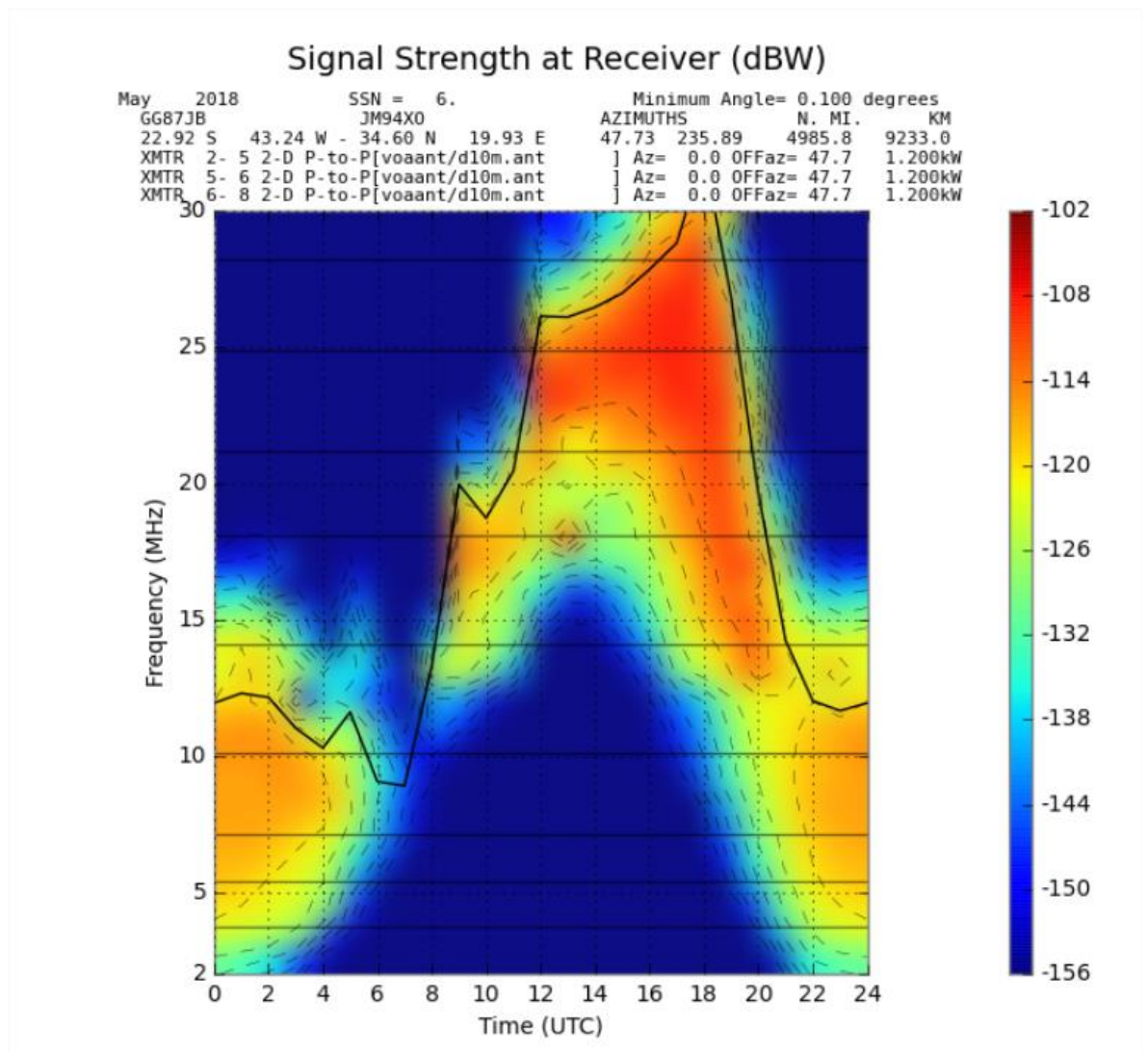
Figura 19: Confiabilidade de se estabelecer comunicação.



Fonte: O autor.

Por outro lado, Figura 20 representa a intensidade para o nível de sinal de recepção.

Figura 20: Intensidade do nível de sinal no receptor.



Fonte: O autor.

### 6.3 A Guerra Eletrônica envolvendo Comunicações HF

As comunicações em HF são utilizadas quando se quer alcançar longas distâncias e, mesmo que na utilização de reflexão ionosféricas, estarão sujeitas a intervenções e interceptações pelo inimigo.

O link estabelecido entre navio-navio ou navio-terra, como já citado anteriormente, são criptografados e possuem comunicações seguras. Para assegurar que as informações estão chegando de modo seguro ao seu destino, a Marinha do Brasil visa acrescentar criptografia em seus códigos, além dos que são aplicados pelo próprio equipamento, e assim, torna-os embaralhados, para que dificulte ainda mais uma interceptação, visto que o equipamento não é de fabricação própria.

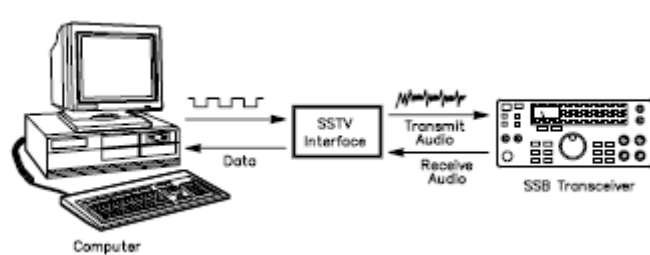
Vislumbrando este cenário e adaptando às comunicações de dados via ALE DATRON, quando a intenção é transmitir uma imagem com dados táticos, podemos acrescentar uma forma de se embaralhar o conteúdo da informação utilizando a Transformada de Fourier e em conjunto transmiti-la utilizando a técnica de Slow Scan TeleVision (SSTV).

### 6.3.1 Slow Scan TeleVision (SSTV)

A técnica SSTV foi desenvolvida para suprir a necessidade de quando se quer compartilhar imagens a distâncias de milhares de quilômetros sem a necessidade de utilizar transmissões via satélites. Ela se resume em digitalizar lentamente uma imagem fixa (sem movimento) linha por linha, convertendo as variações de cor e brilho em tons de áudio. Após esta transformação, estes tons de áudio podem ser alimentados a um transceptor de voz comum e assim, enviar esta informação.

No final do recebimento, os tons de áudio são convertidos novamente em imagem e apresentada na tela do computador. Embora não tenha nem o movimento ou a alta resolução, a vantagem do SSTV é que você pode enviar fotos em grandes distâncias sem a necessidade de utilizar dispositivos avançados como os satélites.

Figura 21: Esquema de ligação entre modulador SSTV.



Fonte: Glidden (1990).

Em resumo, utilizaremos o SSTV em conjunto com o HF DATRON como forma de se transmitir de forma analógica uma imagem colorida convertida em tons de cinza, preto ou branco e o canal utilizado é o de voz.

Para a utilização do SSTV é necessário um software de conversão, que consiste em transformar uma imagem em tons de cinza em sinais de áudio, e conseqüentemente, captar um sinal de áudio e converte-lo em uma imagem com tons de cinza.

Por exemplo: um pixel preto da imagem pode ser transformado em uma frequência da banda inferior de passagem, como 3MHz, e um pixel branco pode ser reportado numa frequência de 3,6MHz, que é então o ponto mais alto na banda do canal. Ainda, os pixels que

variem em tons de cinza, analogamente são representados por frequências entre 3MHz a 3,6MHz, com proporcional ao seu grau de cinza. Para a recepção este procedimento é realizado de forma inversa.

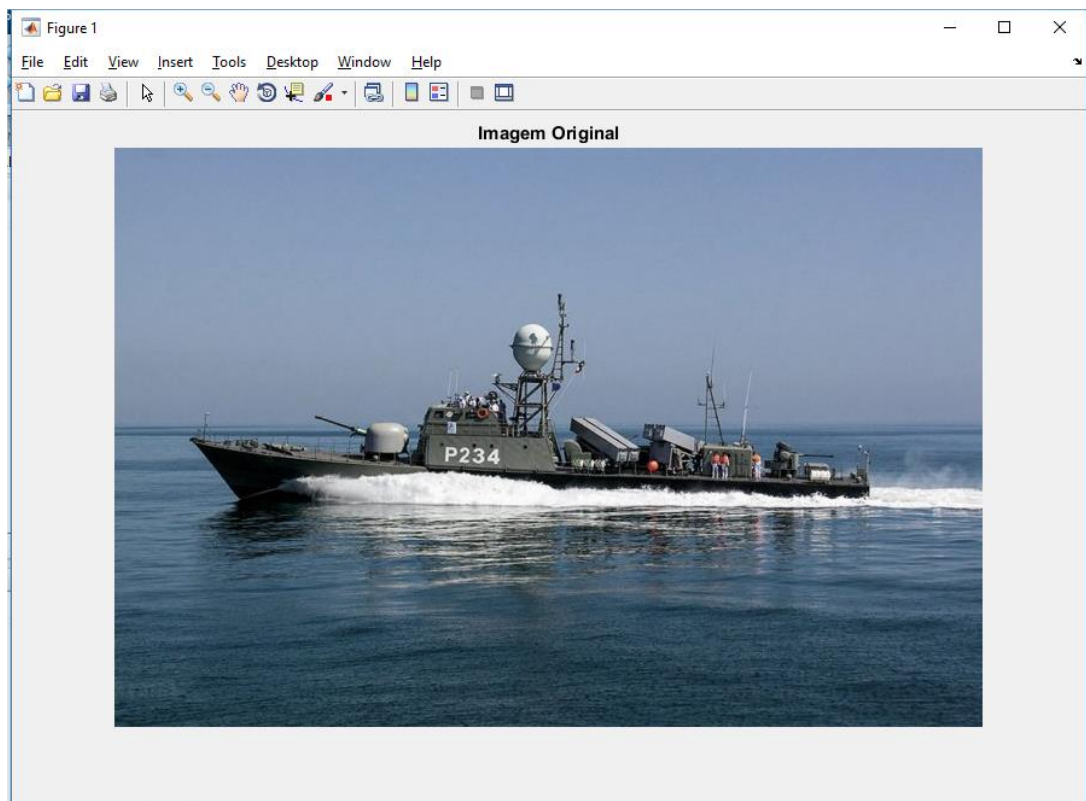
### 6.3.2 Transformada de Fourier aplicada em conjunto ao SSTV:

No cenário de guerra, as buscas por interceptações e quebra de sigilo de informações aumentam consideravelmente. Basicamente todo espectro eletromagnético é monitorado em busca de informações sigilosas. Isto faz com que as forças busquem aumentar o nível de criptografia fim de dificultar tais interceptações e análise de dados pela força inimiga.

Aplicado a esta forma de transmissão e a técnica SSTV, pode-se adicionar a Transformada de Fourier nas imagens que serão transmitidas. Esta aplicação se faz através de um software de manipulação matemática (MATLAB), possibilitando a manipulação dos dados de forma a dificultar a interceptação.

A seguir temos um exemplo de transmissão de uma imagem que representa hipoteticamente um navio inimigo.

Figura 22: Ilustração de Imagem que será transmitida após aplicação da tecnologia SSTV.

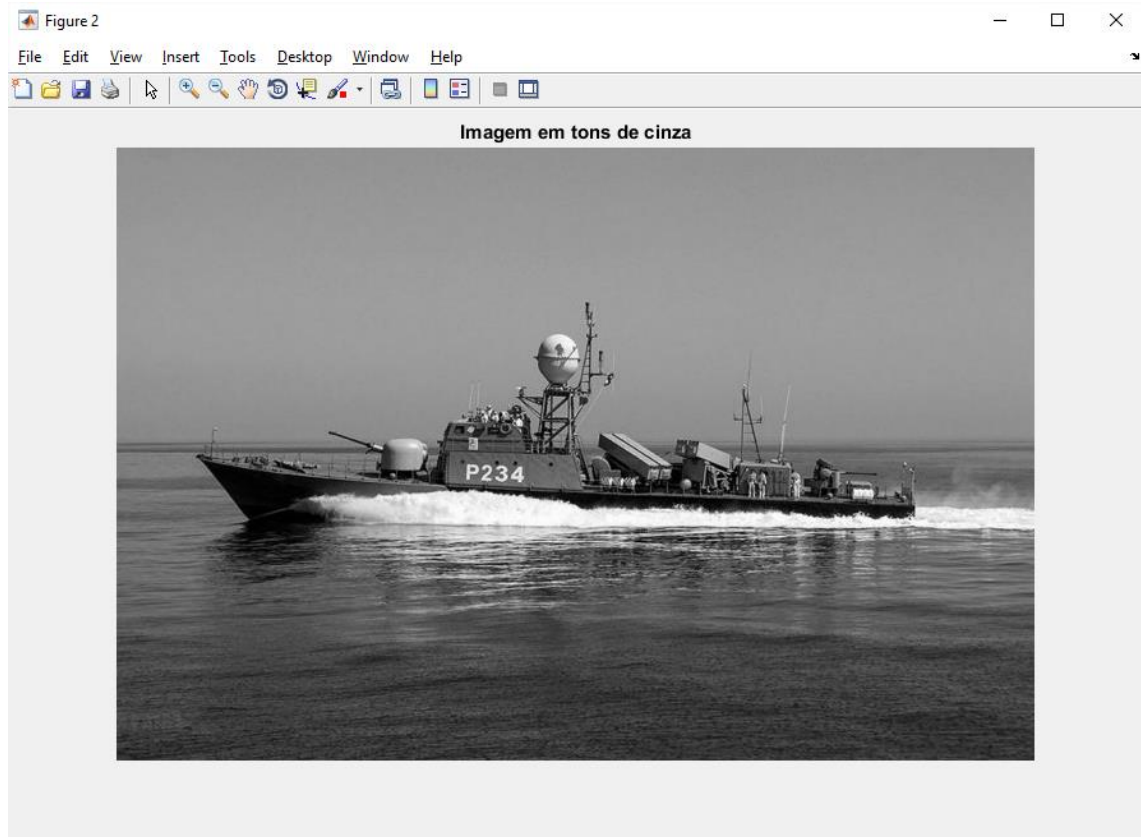


Fonte: O autor.



Através do software MATLAB, aplicamos a representação em tons de cinza. Então chegamos a seguinte imagem:

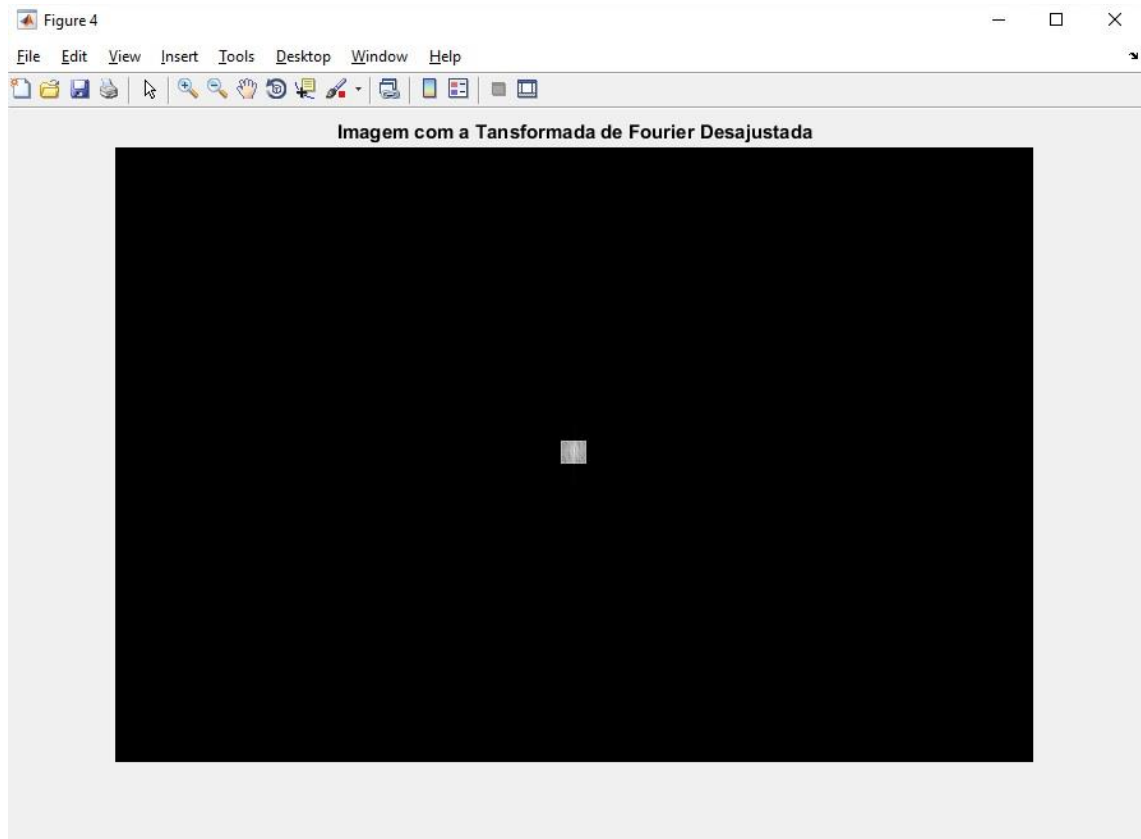
Figura 23: Imagem que será transmitida em tons de cinza.



Fonte: O autor.

Após esta representação, a imagem já poderia passar pelo conversor SSTV, que a transformaria em sinais de áudio. Visando dificultar a interceptação, iremos aplicar à imagem a Transformada de Fourier. Temos então uma imagem com pixels brancos no centro, devido não estar ajustada a banda de passagem.

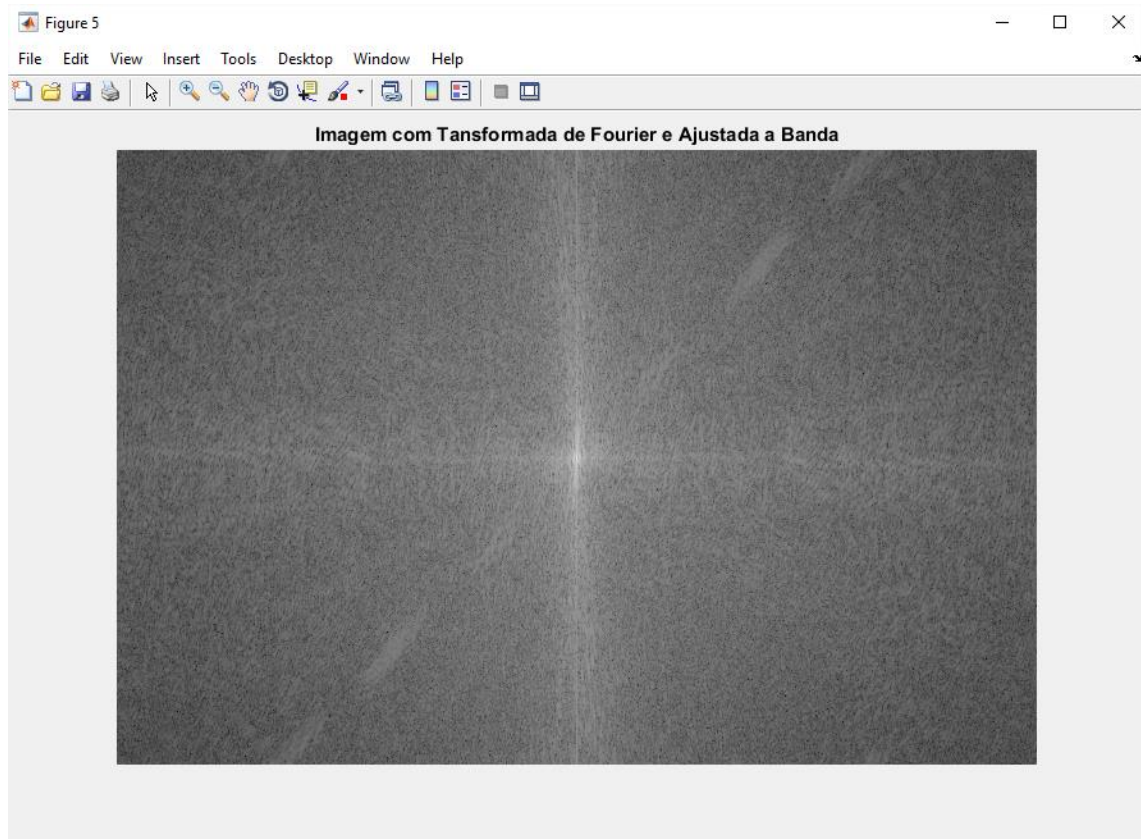
Figura 24: Imagem com a Transformada de Fourier Desajustada.



Fonte: O autor.

Para alongar e ajustar os pixels correspondentes à imagem original, de forma a minimizar perdas por transmissão, é necessário utilizar uma técnica chamada alongamento de histograma, que consiste em ajustar os níveis de cinza à banda passante.

Figura 25: Imagem com a Transformada de Fourier e Ajustada a Banda de Passagem.



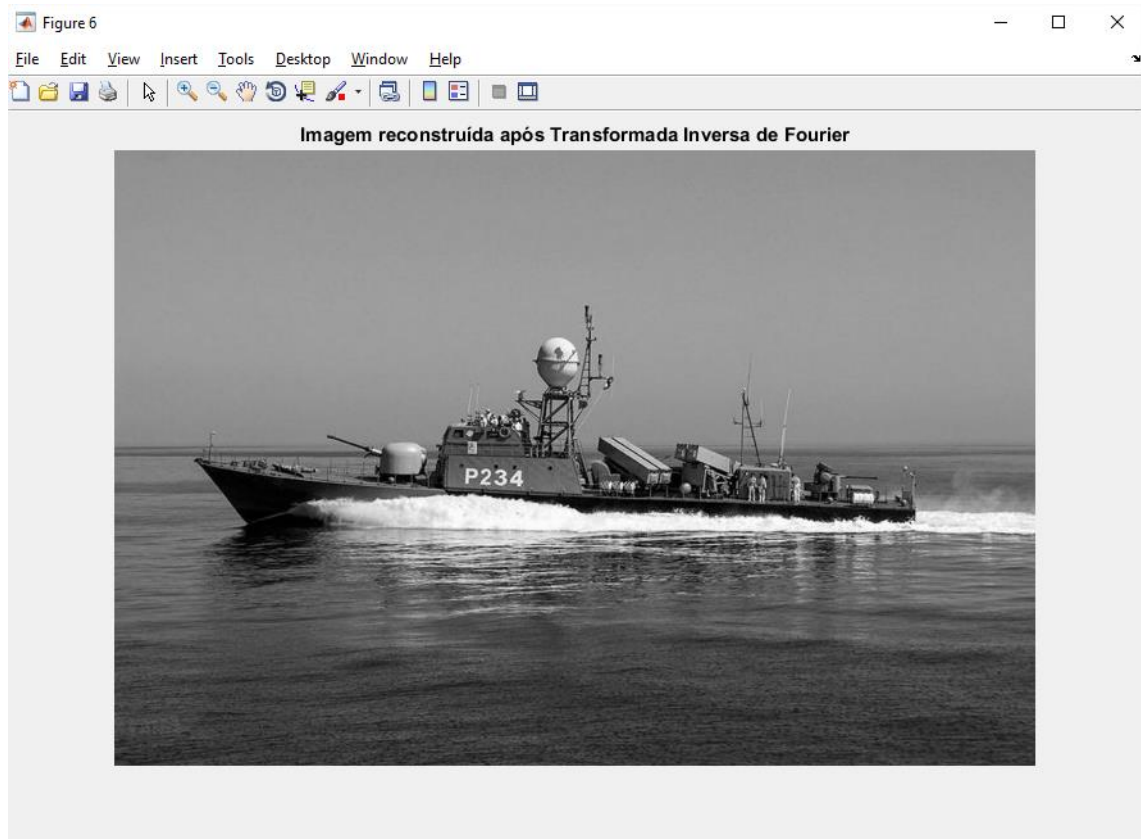
Fonte: O autor.

Esta é a imagem ajustada que poderá passar pelo software de conversão SSTV e ser transmitida em um canal de dados.

Para a recepção o processo é feito de forma inversa. Primeiramente passa-se pelo conversor SSTV e então é novamente aplicado ao filtro inversor e a Transformada Inversa de Fourier. Após todo o processo, é obtida novamente a imagem original em tons de cinza.



Figura 26: Representação da imagem depois de aplicada a Transformada de Fourier inversa.



Fonte: O autor.

Encontra no Anexo A o código aplicado para realizar todo este processo de criptografia pela Transformada de Fourier.

Este é apenas um exemplo de aplicação. É evidente que é limitada perante os códigos de criptografia existentes, porém fica a critério da força naval o desenvolvimento e aplicação de métodos semelhantes em cenário real das operações navais. No entanto, a utilização do SSTV em conjunto com o embaralhamento de dados pela Transformada de Fourier é uma opção para as transmissões de dados quando não se possuem formas mais eficazes de realiza-las.

#### **6.4 Rede de Celulares HF (RCHF)**

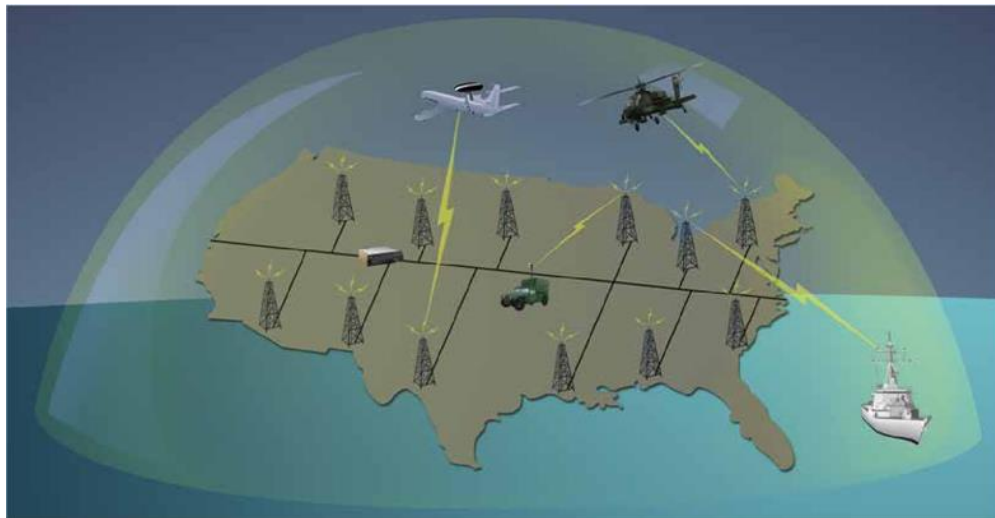
De forma análoga ao ALE DATRON LINK, existente na Marinha do Brasil a empresa Rockwell Collins, que oferece um serviço de celulares em HF que abrange grande parte do mundo.

Os celulares HF da Rockwell Collins possuem tecnologia de ponta, onde a estrutura da rede é baseada na topologia em árvore, na qual estações terrenas interligadas fazem a cobertura para todos os dispositivos habilitados baseando-se na técnica ALE.

Esta topologia torna a rede robusta e resistente aos vários fenômenos que influenciam as comunicações em HF convencionais como manchas solares, alterações ionosféricas, ou mesmos o horário.

Seu sistema de funcionamento é muito semelhante a cobertura de telefones celulares. O sistema de comunicação em HF também procura a melhor estação para se conectar para realizar suas chamadas. Este sistema pode ser implementado em qualquer cenário de aplicação. A empresa procura instalar suas antenas de cobertura em locais estratégicos, de forma a possibilitar excelente nível de sinal e considerável área de cobertura. Atualmente todo território americano possui esta cobertura de forma estável.

Figura 27: Ilustração da Rede de Celulares HF.



Fonte: Rockell Collins (2013).

#### 6.4.1 Funcionamento da Rede de Celulares HF

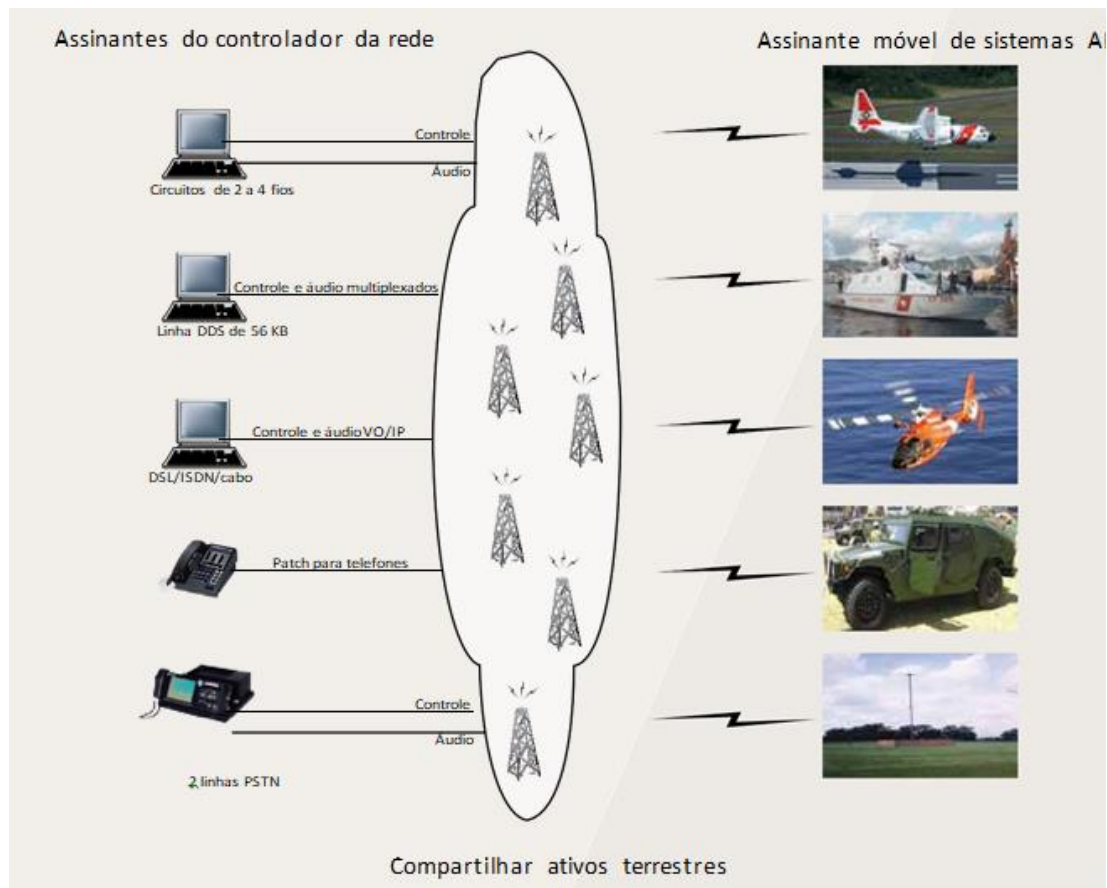
A forma de funcionamento da rede de celulares em HF é semelhante à rede de telefonia convencional. As rádios em HF constantemente buscam as melhores frequências para estabelecimento de link com os dispositivos móveis, sempre baseado na tecnologia ALE. A constante varredura é realizada por todos os dispositivos individualmente, eles ouvem a solicitação de atualização da torre e realizam a análise de qualidade de link (LQA) e atualizando assim a tabela de melhores frequências para estabelecimento de link a um servidor central.

O servidor central é responsável por manter a tabela de LQA atualizada, fim de orientar qual rádio de link ALE é a melhor para estabelecer comunicação com o dispositivo.

O servidor central conecta o dispositivo móvel a torre mais próxima e de melhor link. Todo processo de interconexão é realizado de forma transparente para que os usuários usufruam a melhor chamada, sem ruídos ou quedas de ligações.

O sistema de cobertura foi implantando de forma redundante proporcionando variedades de frequências e diversidade de estações de rádio base, o qual o sistema ALE seleciona a mais apropriada para suas distribuições de chamadas. Como o sistema em HF utiliza naturalmente as propagações ionosféricas para se comunicar, o cliente não fica limitado à utilização de telefone mesmo a bordo de helicópteros, aviões ou navios em alto mar. Esta é a grande vantagem para os usuários na utilização dessa tecnologia.

Figura 28: Representação das possibilidades de comunicação via Rede de Celulares HF.



Fonte: Rockell Collins (2013).

Uma visão geral deste tipo de serviço no tocante ao estabelecimento de chamada é dividida em duas etapas: o antes do ALE, onde a taxa de sucesso de estabelecimento de link apresentava 30%, e após a implementação da tecnologia ALE, aumentando a taxa e sucesso do estabelecimento de chamadas para 90%.

## 6.5 A importância da Comunicação em HF

Mesmo sendo considerado um tipo de comunicação robusta e limitada quanto à capacidade de banda de passagem, a comunicação HF pode alcançar qualquer ponto do globo terrestre. Esta característica possibilita um meio de transmissão flexível e de comunicação de longo alcance.

Em casos que não exista a possibilidade de infraestruturas por meios de comunicação modernos, como: satélite, telefonia, fibras óticas ou via rádio; a comunicação HF é utilizada devido às particularidades apresentadas, ficando evidente a importância de sua utilização em cenários catastróficos, como será descrito adiante.

O colapso nomeado de “A Grande Tempestade de Gelo” (1998), ocorrido do leste de Ontário, ao sul de Quebec, Nova Brunaswick e Nova Escócia, ambos locais no Canadá, deixaram muitas linhas de transmissão de energia derrubadas, mais de 1000 torres de transmissão inativas, cerca de 1000 postes elétricos de aço e 35.000 postes de madeira esmagados pelo peso do gelo, cujos danos provocaram baixa em todos os meios de comunicações atual, resultando em 4 milhões de pessoas sem acesso à eletricidade.

Após semanas diante do caos, Ontário, Quebec e Nova Brunswick solicitaram ajuda as Forças Canadenses, o que levou o envio de mais de 15.000 militares para o auxílio na reconstrução e recuperação das cidades.

Com a intervenção das Forças Canadenses, a utilização do meio de transmissão HF começou a ser implementado e utilizado para prover, por exemplo, comunicações na divulgação de notícias dos fenômenos climáticos, a caráter de possíveis emergências, de informação, de localização de cidadãos feridos e necessidades de evacuações, objetivando apoio à Defesa Civil, socorristas e demais entidades vinculadas à causa humanitária.

## **7 CONCLUSÃO**

A base do que foi descrito neste trabalho, pode-se ter uma importante dimensão do quão abrangente são as comunicações em altas frequências (HF). Em ato contínuo, constata-se que a Marinha do Brasil não pode deixar de evoluir e aprimorar as técnicas de fallback elementar das comunicações.

Os conceitos de eletromagnetismo abordado no terceiro capítulo, busca dirimir dúvidas a respeito da base elétrica que estão incutidas às propagações das ondas eletromagnéticas e seus modos de transmissões. A ambientação às ondas ionosféricas, principal foco do trabalho, se justifica devido ser o principal meio de propagação de equipamentos que usufruem da faixa de frequências que variam de 3MHz a 30MHz.

Através da apresentação do equipamento Datron Link e do software de predição VOACAP, evidencia a importância de pessoal capacitado para poder realizar as devidas configurações do equipamento. Sem tal conhecimento, o militar pode encontrar dificuldade em conseguir estabelecer link de comunicação com outras estações rádio base. A aplicação da tecnologia SSTV faz a criptografia de um dado de imagem e realiza sua transmissão por canais de pequena largura de banda, como encontrado nos sistemas HF.

É concluído que as comunicações em HF no âmbito das forças armadas não devem ser descontinuadas pensando-se em contingência. Evidencia sua importância na utilização em momentos de catástrofes naturais, colapsos, de ajuda humanitária ou em casos de emergência, devido sua flexibilidade e facilidade em estabelecer uma comunicação de baixo custo e de longo alcance.

### **7.1 Considerações Finais**

É importante salientar que todos os exemplos apresentados no trabalho são de entendimento do autor, sendo necessário consultar as referências supracitadas, fim de sanar eventuais dúvidas relacionadas aos assuntos.

Os softwares de manipulações matemáticas utilizados no trabalho são simulações de possíveis cenários que o militar pode encontrar em seu dia-a-dia. Outros softwares de manipulações podem ser utilizados para o mesmo intuito.

### **7.2 Sugestões para Futuros Trabalhos**

Como o trabalho engloba as transmissões eletromagnéticas, amplas linhas de ação podem ser tomadas. A obra é voltada para aplicações de navios e seus modos de propagação apropriados. Algumas áreas foram abordadas, como exemplo: a modelagem e medições de ondas de rádio para predição em ambientes urbanos. Este assunto poderá ser abordado quando o objetivo não for voltado especificamente para navios.

Por outro lado, para aprimorar o trabalho neste mesmo segmento, estudos e criação modelagens de emissões em banda larga, fora do canal HF, podem ajudar a entender melhor como são as propagações em outras camadas da atmosfera, como por exemplo, na troposfera.

## REFERÊNCIAS

AMENDOLA, V. GIUSEPPE. **Análise do comportamento da ionosfera a partir de medidas em HF.** Rio de Janeiro, 2003.

RIBEIRO, JOSÉ ANTÔNIO JUSTINO. **Propagação das Ondas Eletromagnéticas – Princípios e Aplicações** – Santa Rita do Sapucaí, MG – 2004.

VIEIRA, ANTÔNIO J. F.; BALOD, Y. C. **Comunicação em Alta Frequência, versátil e imprescindível** – Simpósio de Comunicação em Alta Frequência – Rio de Janeiro, RJ – 2017.

ROCKWELL C. **HF Cellular Network.** Iowa, EUA - 2013.

REIMER, DENIS J. **Multi-service tatics, multi-service tactics, techniques, and procedures for the high frequency—automatic linkeestablishment(hf-ale) radios.** – Fort Moroe, VA - EUA. 2003.

GLIDDEN, RAMON L. **Getting Started with Slow Scan Television** - American Radio Relay League, Vinita, OK.EUA.1990.

THOR A. SIMENSEN. **Link-11 communications** - Naval Postgraduate School - Monterey, California, 1992.

ZILIO, S.C. **Óptica Moderna – Fundamentos e Aplicações.** Material didático de aula, Fotônica. Universidade Federal de Santa Catarina – SC. 2005

SERWAY, JOHN W. JEWETT JR; Tradução: Visconte, Solange Aparecida. **Física para cientistas e engenheiros: volume 3 : eletricidade e magnetismo.** - São Paulo, SP - 2017.

ALENCAR, MARCELO SAMPAIO DE. **Ondas eletromagnéticas e teoria de antenas - 1. ed.** - São Paulo-SP, 2010.

WENTWORTH, STUART M.; Tradução: Podcameni, Abelardo; Siqueira, Gláucio Lima. **Fundamentos de eletromagnetismo com aplicações em engenharia.** - Rio de Janeiro, RJ-2006.

VIEIRA, JAIRO SANTOS. **Estudo de propagação de onda eletromagnética em estrutura geológica extratificada.** 2003. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PEREIRA, SÉRGIO DANIEL DIAS. **Propagação e Radiação de Ondas Eletromagnéticas em Ambientes Urbanos.** 2014. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Técnico Lisboa, Lisboa, 2014.

MARTINS, RONALDO DE ANDRADE. **Modelagem e medições de ondas de rádio para predição de propagação em ambientes urbanos.** 2006. 151 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - Rn, 2006.

M. FRANCESCHETTI, J. BRUCK E L. J. SCHUMLMAN. **A Random walk model os wave propagation. IEE Transaction on antenas and propagation, Vol 52, 2004.**



## APÊNDICE A

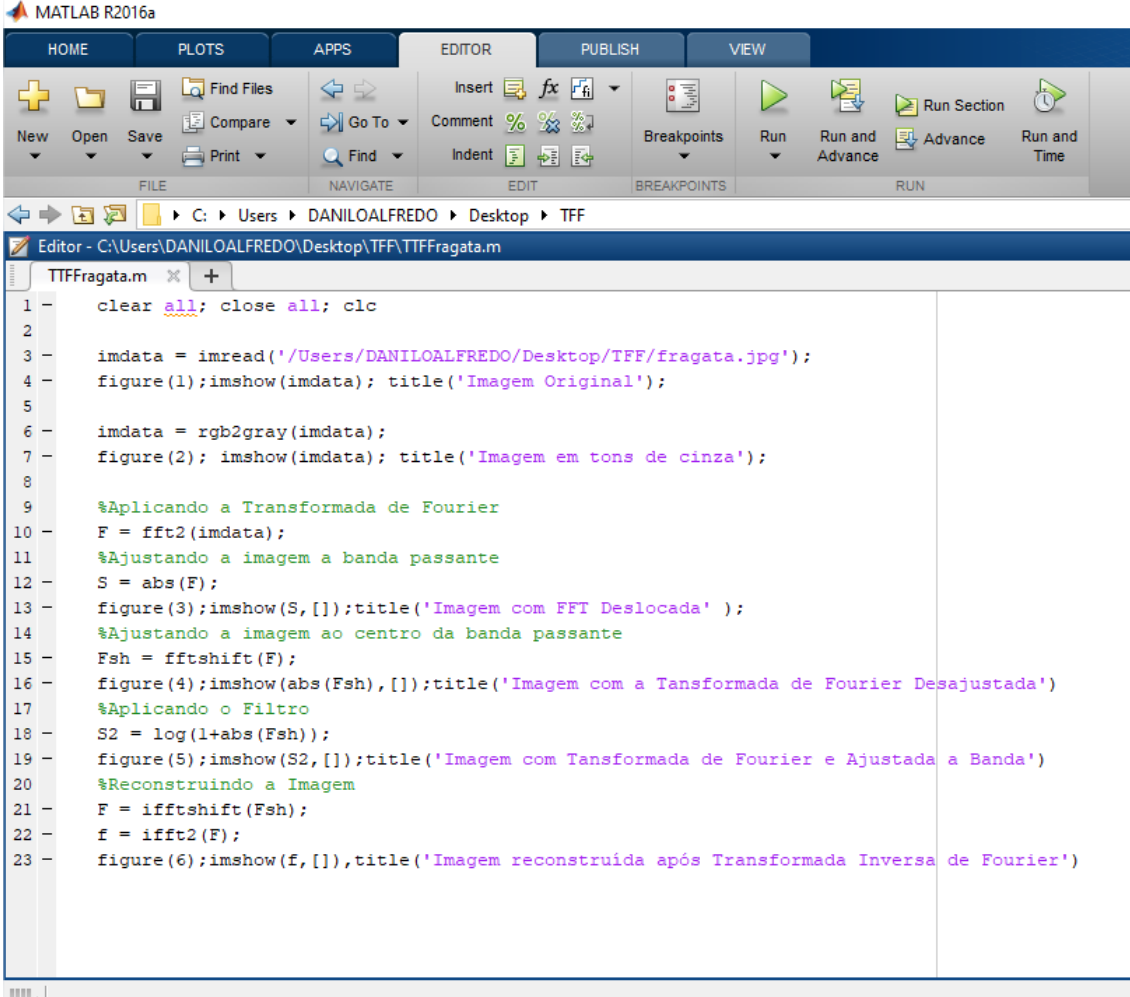
Tabela de Permissividade relativa típica de alguns materiais.

<b>Materiais</b>	<b>Tipo</b>	<b>Condutor Dielétrico</b>
Água destilada	Líquido	81
Água do mar	Líquido	80
Baquelite	Resina sólida	5
Benzeno	Solvente	2,30
Cloreto de polivinil (PVC)	Plástico	2,88
Cloreto de Sódio	Sal	6
Ebonite	Composto de borracha e enxofre	2,70
Gelo	Água em estado sólido	3
Germânio	Semi condutor	16
Glicerina	Subproduto do sabão	56,20
Óxido de alumínio	Cerâmica	8,80
Óxido de Tântalo	Cerâmica	27,60
Madeira	Sólido	2,5 a 8
Mica	Espécie de silicato monolítico	5,80
Neoprene	Borracha	6,26
Nylon Sódio	Plástico	3,80
Óleo obtido do petróleo	Líquido	2,10
Papel	Sólido	7
Parafina	Espécie de hidrocarboneto	2,10
Polietileno	Plástico	2,26
Polipropileno	Polímero	2.25
Polistireno	Plástico	2,56
PTFE (Teflon)	Plástico	2,10
Porcelana	Cerâmica	6
Quartzo fundido	Vidro	3,78
Rutila	Cristal	89 a 173
Sílica	Vidro	3,80
Silício	Semicondutor	12

Silicone	Borracha	3,20
Solo arenoso seco	Material sólido composto	3,40
Solo rochoso	Material sólido	7
Solo úmido	Material sólido composto	10 a 20

## ANEXO A

Código de aplicação da tecnologia SSTV para simulação no MATLAB. Resulta em imagens com a aplicação da Transformada de Fourier em tons de cinza.



```

MATLAB R2016a
HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Compare Go To Insert Comment Indent Breakpoints Run Run and Advance Run and Time
FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS RUN
C:\Users\DANILOALFREDO\Desktop\TFF
Editor - C:\Users\DANILOALFREDO\Desktop\TFF\TTFragata.m
TTFragata.m
1 - clear all; close all; clc
2
3 - imdata = imread('/Users/DANILOALFREDO/Desktop/TFF/fragata.jpg');
4 - figure(1); imshow(imdata); title('Imagem Original');
5
6 - imdata = rgb2gray(imdata);
7 - figure(2); imshow(imdata); title('Imagem em tons de cinza');
8
9 %Aplicando a Transformada de Fourier
10 - F = fft2(imdata);
11 %Ajustando a imagem a banda passante
12 - S = abs(F);
13 - figure(3); imshow(S, []); title('Imagem com FFT Deslocada ');
14 %Ajustando a imagem ao centro da banda passante
15 - Fsh = fftshift(F);
16 - figure(4); imshow(abs(Fsh), []); title('Imagem com a Transformada de Fourier Desajustada')
17 %Aplicando o Filtro
18 - S2 = log(1+abs(Fsh));
19 - figure(5); imshow(S2, []); title('Imagem com Transformada de Fourier e Ajustada a Banda')
20 %Reconstruindo a Imagem
21 - F = ifftshift(Fsh);
22 - f = ifft2(F);
23 - figure(6); imshow(f, []), title('Imagem reconstruída após Transformada Inversa de Fourier')

```