



Sistema de Comunicações de Emergência Via Ionosfera para Ligação ANPC-Pedrógão Grande

Rafael Dias Grou

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor António Luís Campos da Silva Topa

Júri

Presidente: Prof. Doutor José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Prof. Doutor António Luís Campos da Silva Topa

Vogal: Prof. Doutor Paulo Sérgio de Brito André

Junho de 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Declaration

I declare that this document is an original work of my own authorship and that it fulfills all the requirements of the Code of Conduct and Good Practices of the Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Está a terminar mais uma etapa da minha vida académica, e é com grande orgulho e satisfação que agradeço a todos aqueles que contribuíram, de uma forma ou de outra, para que esta fase fosse concluída com sucesso.

Antes de mais, gostaria de agradecer à Academia da Força Aérea, instituição que fez de mim a pessoa e o militar que sou hoje, que foi a minha casa durante boa parte da minha vida, e onde tive a oportunidade de receber uma educação e um ensino de excelência.

Gostaria também de agradecer ao Instituto Superior Técnico pela sua contribuição no meu percurso académico, e em especial ao Professor Doutor António Topa, pelo acompanhamento incansável e pela disponibilidade que teve, bem como pela preciosa ajuda que me deu nesta etapa final do meu percurso académico.

Queria deixar também um agradecimento especial à minha família, que sempre me apoiou, nos bons e nos maus momentos, e dedicar este trabalho aos meus pais, João Carlos Pinto Grou e Idalina Maria Pereira Dias, e à minha irmã, Inês Dias Grou, dos quais espero ser um motivo de orgulho, bem como aos meus amigos, que estiveram e estarão sempre lá para mim quando eu preciso, qualquer que seja o momento.

Finalmente, gostaria de agradecer à minha namorada, Rita Féteira, pelo apoio e compreensão demonstrados nesta fase final do meu percurso académico.

A todos, do fundo do coração, o meu mais sincero Obrigado.

O trabalho realizado nesta dissertação teve como instituição de acolhimento o IT – Instituto de Telecomunicações.

Resumo

Este trabalho teve como inspiração a tragédia que assolou o país em 2017, em que, resultado de falhas no sistema de comunicações existente para situações de emergência, milhares de pessoas acabaram por ser vítimas de um incêndio de proporções gigantescas.

Como tal, surgiu a ideia de criar um sistema de comunicações alternativo, para que possa ser acautelada a comunicação entre entidades responsáveis em Portugal, caso o sistema em vigor volte a falhar.

Esta dissertação tem como objetivo o estudo de um sistema de comunicações que permita que seja feita uma comunicação viável e de qualidade entre vários pontos do país, quer em situações de catástrofe natural, quer em possíveis cenários de conflito. Então, verificar-se-á se é possível fazer uma ligação entre a sede da ANPC, na Amadora, e a sede dos BV de Pedrógão Grande, através de uma comunicação NVIS.

Neste estudo usou-se um dipolo de meia-onda para fazer a transmissão do sinal, e uma antena AS-2259/GR para fazer a receção do sinal. Foram calculados os dados referentes à ligação pretendida e, após os cálculos do ângulo de elevação e da atenuação referente à ligação em estudo, chegou-se à conclusão que, para uma potência de alimentação de 20 W, será possível fazer a ligação entre a ANPC e Pedrógão Grande com grande viabilidade, uma vez que a sensibilidade calculada na receção acaba por ser relativamente superior à sensibilidade necessária para que seja feita uma comunicação com qualidade.

Palavras-chave: NVIS, Comunicações de Emergência, Ionosfera, Proteção Civil, Atenuação, Radiopropagação

Abstract

This work was inspired by the tragedy that devastated the country in 2017, when, as a result of failures in the existing communications system for emergency situations, thousands of people ended up being victims of a fire of gigantic proportions.

As such, the idea arose of creating an alternative communications system, so that communication between responsible entities in Portugal could be safeguarded if the current system fails again.

This dissertation aims at the study of a communications system that allows a viable and quality communication between various parts of the country, both in natural disasters and in possible conflict scenarios. It will then be verified whether it is possible to make a connection between the ANPC headquarters in Amadora and the BV headquarters in Pedrógão Grande through a NVIS communication.

In this study we used a half-wave dipole to transmit the signal, and an AS-2259 / GR antenna to receive the signal. The data concerning the desired connection were calculated and, after calculations of the elevation angle and attenuation for the connection under study, it was concluded that, for a power supply of 20 W, it will be possible to connect the ANPC and Pedrógão Grande with great viability, since the sensitivity calculated in the reception turns out to be relatively superior to the sensitivity necessary for communication to be made with quality.

Keywords: NVIS, Emergency Communications, Ionosphere, Civil Protection, Attenuation, Radiopropagation

Índice

Agradecimentos	5
Resumo	7
Abstract	9
Cap. 1 – Introdução	19
1.1. Motivação	19
1.2. Objetivos.....	19
1.3. Estado da Arte.....	20
Cap. 2 – Propagação Via Ionosfera	25
2.1. A Ionosfera	25
2.2. Camadas da Ionosfera.....	26
2.2.1 <i>Camada D</i>	27
2.2.2 <i>Camada E</i>	27
2.2.3 <i>Camada F</i>	28
2.2.4 <i>Camada esporádica Es</i>	28
2.3. Variações na Ionosfera	29
2.3.1. <i>Variações com a altitude</i>	29
2.3.2. <i>Variações com o ciclo solar diário</i>	30
2.3.3. <i>Variações com o ciclo solar</i>	31
2.3.4. <i>Variações sazonais</i>	32
2.3.5. <i>Variações com a latitude</i>	33
2.4. Efeitos das Perturbações Solares	34
2.4.1 <i>Fade-outs de Ondas Curtas</i>	34
2.4.2 <i>Eventos de Absorção nas Calotas Polares</i>	35
2.4.3 <i>Tempestades Ionosféricas</i>	36
2.5. Plasma Ionosférico	36
2.5.1. <i>Modelos Teóricos do Plasma Ionosférico</i>	37
2.5.1.1. <i>Modelo de Chapman</i>	37
2.5.1.2. <i>Modelo Linear</i>	39
2.5.1.3. <i>Modelo Exponencial</i>	40
2.5.1.4. <i>Modelo Parabólico</i>	40
2.5.2. <i>Frequência de Plasma</i>	41
2.5.3. <i>Constante de Atenuação num Plasma Ionosférico</i>	44
2.6. Altura Virtual.....	47
2.7. Frequência Máxima Utilizável.....	48
Cap. 3 – Atenuação numa Comunicação Via Ionosfera	51

3.1. Ângulo de Fogo.....	53
3.2. Atenuação em Espaço Livre	54
3.3. Atenuação na Ionosfera	55
3.4. Atenuação no Solo	58
3.5. Atenuação Total	61
Cap. 4 – Antenas NVIS	63
4.1. Seleção das Antenas	63
4.2. Ganho da Antena.....	64
4.3. Tipos de Antenas.....	65
4.4. Escolha e estudo teórico da antena transmissora.....	76
5. Ligação NVIS ANPC-Pedrogão Grande	81
5.1. Cálculo da Sensibilidade na Ligação.....	82
6. Conclusão	89
6.1. Principais Conclusões.....	89
6.2. Perspetivas Futuras.....	90
Referências Bibliográficas	91
Anexos	93

Índice de Figuras

Figura 1 – Reflexão de ondas VLF na ionosfera (adaptado de [16])	25
Figura 2 – Estratificação da ionosfera.....	26
Figura 3 – Reflexão do sinal na camada Es (adaptado de [11]).....	29
Figura 4 – Variação da densidade de elétrons com a altura.....	30
Figura 5 – Máximas frequências para as camadas E, F1 e F2 ao longo do dia (adaptado de [11])	31
Figura 6 – Variação da densidade de elétrons com o número de manchas solares (adaptado de [11])	32
Figura 7 – Variação da frequência máxima com a latitude geomagnética (adaptado de [11])	34
Figura 8 – Influência dos fade-outs na força do sinal (adaptado de [11])	35
Figura 9 – Interações entre o plasma e a radiação eletromagnética	37
Figura 10 – Geometria de Chapman	38
Figura 11 – Densidade de elétrons para o modelo linear (retirado de [1])	39
Figura 12 – Densidade de elétrons para o modelo parabólico (retirado de [1]).....	40
Figura 13 – Formação do plasma (retirado de [1])	41
Figura 14 – Altura virtual.....	47
Figura 15 – Representação da MUF	49
Figura 16 – Representação de ligações com um e dois saltos	51
Figura 17 – Ligação com um salto.....	52
Figura 18 – Representação do ângulo de fogo.....	53
Figura 19 – Ângulos de fogo em função da altura virtual.....	54
Figura 20 – Ligação com dois saltos.....	59
Figura 21 – Representação das polarizações (retirado de [1])	59
Figura 22 – Exemplo de um diagrama de radiação.....	65
Figura 23 – Exemplo de montagem de uma antena AS-2259/GR (retirado de [4]).....	66
Figura 24 - Diagrama de radiação da antena AS-2259/GR (Harris RF1936).....	67
Figura 25 – Exemplo do diagrama de radiação de um dipolo de meia-onda montado à altura $\lambda/2$ (retirado de [4]).....	68
Figura 26 - Exemplo do diagrama de radiação de um dipolo de meia-onda montado à altura $\lambda/4$ (retirado de [4]).....	68
Figura 27 – Exemplo de montagem de um dipolo de meia-onda (adaptado de [4])	69
Figura 28 – Comparação dos diagramas de radiação de um dipolo montado a 8 metros de altitude.....	70
Figura 29 - Comparação dos diagramas de radiação de um dipolo montado a 10 metros de altitude.....	70
Figura 30 - Comparação dos diagramas de radiação de um dipolo montado a 12 metros de altitude.....	71
Figura 31 – Exemplo de montagem de uma antena em V invertido (adaptado de [4]).....	72
Figura 32 - Comparação dos diagramas de radiação de um V invertido.....	73
Figura 33 – Exemplo de montagem de uma antena em L invertido (adaptado de [4])	74
Figura 34 - Comparação dos diagramas de radiação de um L invertido de 45,72 metros.....	75
Figura 35 - Comparação dos diagramas de radiação de um L invertido de 24,38 metros.....	76
Figura 36 - Comparação dos diagramas de radiação de um L invertido de 30,48 metros.....	76
Figura 37 – Distribuição de corrente num dipolo de meia-onda	77
Figura 38 – Diagrama de um dipolo de meia-onda.....	78
Figura 39 – Diagrama de um dipolo de meia-onda para zona distante	80
Figura 40 – Demonstração de uma comunicação NVIS (adaptado de [4])	82
Figura 41 – Ligação APNC – BV Pedrogão Grande obtida através do Google Earth.....	83
Figura 42 – Perfil da ligação APNC – BV Pedrogão Grande obtido através do Google Earth...	83
Figura 43 – Ângulo de fogo da ligação ANPC–Pedrogão Grande	84

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valores da atenuação em espaço livre	55
Tabela 2 – Distância percorrida pelo sinal em cada uma das camadas da ionosfera	56
Tabela 3 – Valores de N_e e de ϑ para as diferentes camadas da ionosfera	57
Tabela 4 – Constante de atenuação para as diferentes camadas da ionosfera	57
Tabela 5 – Atenuação nas diferentes camadas da ionosfera	58
Tabela 6 – Atenuação total na ionosfera	58
Tabela 7 – Valores de g	60
Tabela 8 – Atenuação no solo	61
Tabela 9 – Atenuação total de um salto	62
Tabela 10 – Atenuação total de dois saltos	62
Tabela 11 – Distância horizontal mediante o ângulo de fogo	64
Tabela 12 – Antenas compatíveis com as características de uma ligação NVIS	66
Tabela 13 – Comprimento do elemento horizontal do L invertido em função da frequência	74
Tabela 14 – Características da ligação ANPC – BV Pedrogão Grande	83
Tabela 15 – Atenuação em espaço livre na ligação ANPC – BV Pedrogão Grande	85
Tabela 16 – Atenuação exercida pela ionosfera na ligação ANPC – BV Pedrogão Grande	85
Tabela 17 – Atenuação total da ligação ANPC – BV Pedrogão Grande	85
Tabela 18 – Ganho da antena de recepção	86
Tabela 19 – Dados da antena de emissão	86
Tabela 20 – Valores da sensibilidade do recetor para uma potência de transmissão de 20 W	87

Lista de abreviaturas

AFA	Academia da Força Aérea
ANPC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
BV	Bombeiros Voluntários
FAP	Força Aérea Portuguesa
HF	<i>High Frequency</i>
IST	Instituto Superior Técnico
MUF	<i>Maximum Usable Frequency</i>
NVIS	<i>Near Vertical Incidence Skywave</i>
PCA	<i>Polar Cap Absorption</i>
SIRESP	Sistema Integrado de Redes de Emergência e Segurança de Portugal
SNR	<i>Signal-to-noise-ratio</i>
SWF	<i>Short Wave Fade-out</i>
UV	Ultra Violeta
VLf	<i>Very Low Frequency</i>

Cap. 1 – Introdução

1.1. Motivação

Com o crescendo de situações de catástrofe, sejam estas de origem natural ou causadas pelo Homem, cresce também a necessidade de ser feita uma comunicação eficaz nestas mesmas situações. É necessário que seja feita uma comunicação viável, sem interrupções, quer em casos de conflitos, tais como em cenários de guerra, quer também em catástrofes naturais, para que o número de casualidades seja o mais baixo possível, ou de preferência nulo. Em relação às catástrofes naturais, no caso do nosso país, o estudo deste tema poderá ser aplicável mais concretamente aos casos dos incêndios florestais, que tantas vezes assolam Portugal, e também às cheias, que vitimizam milhares de pessoas todos os anos, seja através de danos morais, físicos ou colaterais, mas também a um hipotético cenário de conflito que possa vir a tomar conta do país.

Este trabalho foi inspirado na tragédia que assolou o país em Outubro de 2017, mais especificamente a região centro, em que, resultado de falhas no sistema de comunicações existente para situações de emergência, o SIRESP, milhares de pessoas acabaram por ser vítimas de um incêndio de proporções nunca antes vistas em Portugal. Como tal, surgiu a ideia de criar um sistema de comunicação alternativo ao existente, para ser utilizado em situações de emergência, para que possa ser acautelada a comunicação entre as entidades responsáveis em Portugal, caso o sistema em vigor volte a falhar, através de uma comunicação NVIS. A comunicação NVIS é bastante utilizada, especialmente em cenários de guerra, uma vez que permite a comunicação HF a curtas e médias distâncias, permitindo mesmo a ligação aquando da presença de obstáculos, não sendo necessários muitos meios materiais para que seja feita a montagem do sistema

1.2. Objetivos

Esta tese de mestrado tem como objetivo o estudo de um Sistema de Comunicação de Emergência alternativo, caso haja uma falha no SIRESP, que permita que seja feita uma comunicação viável entre vários pontos do país, quer em situações de catástrofe natural, quer em possíveis cenários de conflito.

Vai ser feito um estudo da camada da atmosfera através da qual é possível fazer-se a comunicação NVIS, a ionosfera, bem como das particularidades da sua estratificação, a influência exercida na densidade de eletrões por vários fatores externos à mesma, e vão ser apresentados alguns modelos teóricos.

Será também estudada a atenuação em dois tipos de ligações via ionosfera, com diferentes características, para ser determinada a gama de frequências mais benéfica para uma comunicação NVIS.

Posteriormente, serão estudados os diferentes tipos de antenas compatíveis com uma comunicação NVIS, com recurso ao *software* MMANA-GAL, e será escolhido o tipo de antena mais adequado à ligação que se pretende fazer, de acordo com as características necessárias para tal.

Por fim, será feito o estudo para verificar se é possível fazer uma ligação entre a sede da ANPC, na Amadora, e a sede dos BV de Pedrógão Grande, por forma a aferir a possibilidade de ser feita uma rede de comunicações NVIS em Portugal.

1.3. Estado da Arte

NVIS retrata o modo de propagação rádio que usa antenas com um ângulo de radiação muito alto, aproximando-se dos 90 graus na vertical, combinado com a utilização de uma frequência abaixo da frequência crítica, por forma a estabelecer comunicações fiáveis num raio de aproximadamente 320 quilómetros. Este modo de propagação é utilizado normalmente para fazer contactos próximos.

Há dois tipos de propagação HF, conhecidas como *groundwave* e *skywave*. A propagação *groundwave* ocorre quando a estação de receção está suficientemente perto da estação de transmissão, e é capaz de receber a percentagem do sinal de transmissão que se propaga junto à superfície terrestre. O alcance da propagação *groundwave* varia com o tipo de antena presente na estação de transmissão, com as características do chão entre a estação de transmissão e a estação de receção, entre outros fatores. Este alcance pode ter qualquer valor entre alguns quilómetros e algumas dezenas de quilómetros. As distâncias que vão para além do alcance do sinal *groundwave* são cobertas pelas *skywaves*. Estas são as ondas que radiam na direção da atmosfera, num ângulo que as

permite serem refletidas pela atmosfera e regressarem à superfície da Terra, num ponto um pouco mais à frente.

A ideia do NVIS é então, como foi referido anteriormente, radiar um sinal a uma frequência que é mais baixa que a frequência crítica, a um ângulo quase vertical, e ter esse sinal refletido pela ionosfera a um ângulo muito alto de incidência, voltando para terra a uma distância relativamente próxima de onde o sinal fora radiado. Uma vez que é impossível que uma antena radie o seu sinal a um ângulo exato, o que se obtém é um conjunto de ângulos, que variam entre quase verticais até perfeitamente verticais. A parte do sinal que é radiada a ângulos verticais ou quase verticais, reflete de volta para terra a um raio que é determinado pelo ângulo mais baixo a partir do qual a antena radia mais sinal. Tendo em conta a camada D da ionosfera, a absorção da mesma, entre outros fatores, determina-se uma frequência mínima abaixo da qual o sinal não será passível de ser utilizado, bem como uma distância em que para lá da mesma o sinal também não se irá propagar.

Para áreas que estão dentro do alcance de *groundwave* da estação de transmissão, a presença da mesma pode interferir com a reflexão de *skywave*. Contudo, também pode servir como uma ajuda, dependendo se elas chegam em fase, fora de fase, ou um desfaseamento entre as duas, dependendo também das potências relativas dos sinais. Uma vez que a altura a que o sinal reflete na ionosfera varia, o alinhamento de fase pode derivar entre estar em fase ou fora de fase, resultando no *fading* do sinal. Por esta razão, é necessário que se minimize a radiação por *groundwave* aquando do uso de técnicas NVIS, para que seja menos provável que se interfira com a *skywave*.

No que diz respeito à receção de sinais, existe uma vantagem, para além das vantagens de transmissão de sinais já referidas, que é o facto de, se a antena favorecer ângulos de transmissão altos, também irá favorecer ângulos de receção altos. Para além disso, uma antena otimizada para radiar a ângulos altos usada para NVIS, também será otimizada para receber *skywaves* que chegarão provenientes da ionosfera a um ângulo alto. Além disso, uma antena que não radia muitos sinais *groundwave* também não receberá, muito provavelmente, muitos sinais *groundwave*. Quando ambas as estações usam antenas que estão otimizadas para NVIS, este modo é favorecido tanto em transmissão como em receção, o que aumenta a probabilidade de haver uma comunicação mais fiável.

Existe ainda uma vantagem inerente ao uso de antenas do tipo NVIS que se aplica unicamente à recepção. A gama de frequências (entre 2 e 10 MHz) que é vantajosa para NVIS, é também a mesma gama de frequências que se encontra mais suscetível a ruído atmosférico, em que uma das maiores fontes do mesmo são as tempestades distantes. Obviamente que as tempestades mais próximas são piores, como é natural, mas nas tempestades distantes, o ruído de todas as possíveis fontes junta-se. A não ser que haja uma tempestade próxima, a maior parte do ruído será o somatório do ruído de fontes distantes que será todo propagado para a antena recetora. Uma vez que as antenas otimizadas para NVIS captam a maior parte dos sinais propagados de áreas relativamente próximas, e não favorece a recepção de sinais, falhas estáticas e outras fontes de ruído ou interferência de fontes mais distantes, não captará tanto ruído como uma antena otimizada para operar em DX. Isto acaba por resultar então num melhor SNR.

Habitualmente, são realizadas medidas que otimizam as capacidades das estações NVIS e que baixam substancialmente o nível de ruído das mesmas. Outras vezes, o abaixamento do ruído pode ser maximizado à custa de alguma força do sinal e resultar num circuito de comunicação que tem níveis baixos de sinal, mas níveis ainda mais baixos de ruído, para um SNR ainda melhor que pode ser alcançado focando-se apenas na maximização dos níveis do sinal. Então, é essencial ser selecionada uma frequência abaixo da frequência crítica, mas não muito abaixo da mesma, selecionando uma antena que radie *skywaves* a um ângulo alto e minimizando as *groundwaves* e a recepção de ruído, para estabelecer uma comunicação fiável num raio de 320 quilómetros, que acaba por ser um desafio para uma operação em gamas altas de frequências.

Vantagens do NVIS:

- Cobre a área que se encontra habitualmente na *skip zone*, ou seja, a área que se encontra normalmente muito distante para que possa receber sinais *groundwave*, mas que ainda não está longe o suficiente para receber *skywaves* refletidas pela ionosfera;
- Não requer qualquer estrutura como repetidores ou satélites, uma vez que duas estações que utilizem técnicas NVIS conseguem estabelecer comunicações fiáveis sem precisarem do auxílio de uma terceira parte;
- A propagação NVIS pura é praticamente livre de atenuação;

- Normalmente, as antenas otimizadas para NVIS são baixas (dipolos simples funcionam perfeitamente). Uma boa antena NVIS pode ser elevada facilmente, num curto período de tempo, por uma pequena equipa ou apenas por uma única pessoa;
- Áreas baixas ou vales não se revelam um problema para a propagação NVIS;
- O percurso de ida e volta da ionosfera é curto e direto, acabando por ter poucas perdas;
- As técnicas NVIS podem ainda reduzir fortemente o ruído e a interferência, o que leva a um aumento do SNR;
- Uma vez que tem um alto SNR e baixas perdas, o NVIS acaba por operar bem a baixa potência.

Desvantagens do NVIS:

- Para que sejam obtidos melhores resultados, ambas as estações (transmissão e receção) deverão estar otimizadas para operar em NVIS. Se uma antena da estação der prioridade à propagação *groundwave*, dando a antena da estação oposta prioridade a propagação NVIS, pode levar a resultados pobres. Algumas estações têm antenas que são aptas para o uso de NVIS, mas outras estações não funcionam dessa forma;
- Não funciona em todas as altas frequências, portanto deve ter-se o cuidado de se escolher a frequência apropriada, que será uma gama em que o ruído será um problema, o comprimento das antenas é longo, e as larguras de banda são relativamente pequenas para transmissão digital;
- Devido a diferenças de propagação entre dia e noite, deverá ser usado um mínimo de duas frequências diferentes para assegurar comunicações fiáveis 24 horas por dia.

Cap. 2 – Propagação Via Ionosfera

2.1. A Ionosfera

A ionosfera é definida como a camada da atmosfera que está ionizada por radiação cósmica e solar. Está situada entre os 50 e os 1000 km acima da crosta Terrestre. Esta camada da atmosfera inclui a termosfera, bem como algumas partes da mesosfera e da exosfera. É uma camada em que, devido à alta energia do Sol e dos raios cósmicos, os átomos perdem um ou mais eletrões, e ficam carregados positivamente, ou seja, ficam ionizados. Estes iões comportam-se como partículas livres.

Durante a noite, sem a interferência do Sol, os raios cósmicos ionizam a ionosfera, embora não tão fortemente como os raios UV. Estes raios cósmicos são provenientes de diversas fontes, estando elas presentes na nossa Galáxia ou no resto do Universo – tais como supernovas, quasares ou buracos negros. É devido ao facto de a ionosfera estar muito menos carregada durante a noite que alguns fenómenos que se passam nela são mais fáceis de observar.

A ionosfera tem uma grande importância porque, entre outras coisas, influencia a propagação rádio para sítios distantes na Terra, e a propagação entre satélites e a Terra. Para ondas de frequência muito baixas, a ionosfera e a superfície terrestre produzem um guia de ondas pelo qual os sinais rádio podem ressaltar e traçar o seu caminho à volta da Terra, como representado na figura 1.

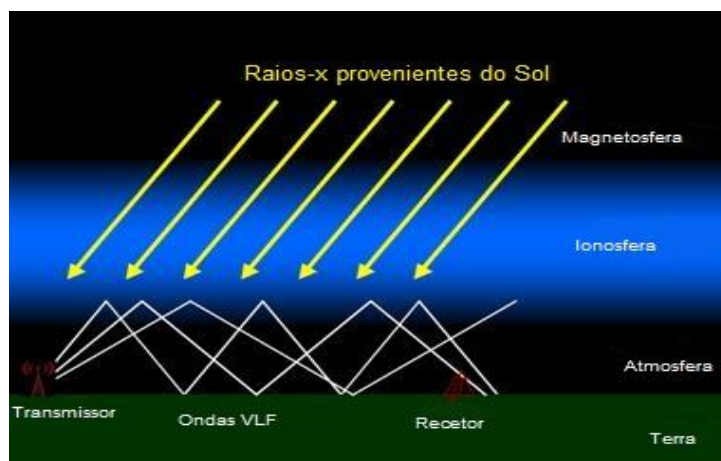


Figura 1 – Reflexão de ondas VLF na ionosfera (adaptado de [16])

2.2. Camadas da Ionosfera

Historicamente, pensava-se que a ionosfera era composta por um número de camadas relativamente distintas identificadas pelas letras D, E e F. A camada F foi posteriormente dividida em F1 e F2. A nomenclatura foi atribuída por Edward V. Appleton, um pioneiro na propagação rádio, que utilizou a letra E porque estava acostumado a usar essa letra para descrever o campo elétrico da onda refletida pela primeira camada da ionosfera que ele estudou. Mais tarde identificou uma segunda camada a uma maior altitude e utilizou a letra F para a onda refletida. Suspeitando que existisse uma camada a uma altitude mais baixa, resolveu utilizar a letra D para a caracterizar. Com o passar do tempo, as letras passaram a ser associadas às camadas em si e não ao campo ou às ondas refletidas. É agora do conhecimento geral que a densidade de elétrons aumenta mais ou menos uniformemente com a altura a partir da camada D, atingindo o máximo na camada F2.

A figura 2 permite demonstrar a existência das diferentes camadas da ionosfera durante o dia e durante a noite. É possível verificar que todas as camadas estão presentes na ionosfera durante o dia, mas durante a noite só existem as camadas E e F.

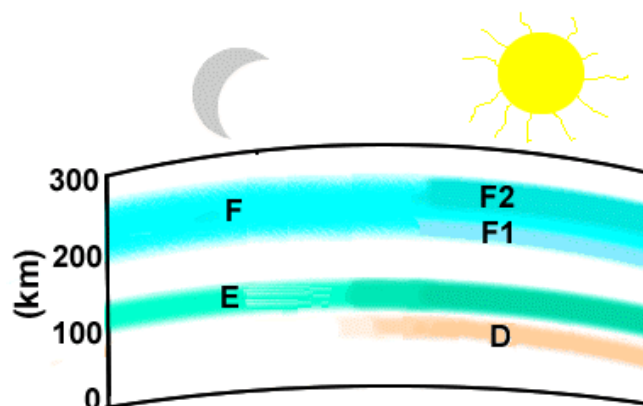


Figura 2 – Estratificação da ionosfera

2.2.1 Camada D

A camada D é a camada mais baixa da ionosfera, presente aproximadamente entre os 50 e os 90 km de altitude. Esta camada difere das camadas E e F na medida em que os elétrons livres desaparecem quase completamente durante a noite, porque são recombinados com iões de oxigénio e formam moléculas de oxigénio eletricamente neutras. Durante este período, as ondas rádio atravessam a camada D e refletem nas camadas E e F. Durante o dia, é possível que aconteça alguma reflexão na camada D, contudo, a potência das ondas rádio é reduzida. Esta é a causa da redução de transmissões rádio durante o dia.

Durante eventos de tempestades de protões, esta camada pode atingir níveis pouco habituais de ionização. Estes eventos, por aumentarem a ionização, aumentam também a absorção dos sinais rádio que passam na camada. De facto, os níveis de absorção podem aumentar em dezenas de dB's neste período, o que é suficiente para absorver todos os sinais HF. Estes eventos duram tipicamente entre 24 e 48 horas.

2.2.2 Camada E

Esta camada estende-se por uma altitude entre aproximadamente 90 e 140 km de altitude. Ao contrário da camada D, a ionização da camada E mantém-se durante a noite, contudo é consideravelmente mais baixa do que durante o dia. Esta camada foi a responsável pelas reflexões envolvidas na primeira comunicação rádio transatlântica, feita por Guglielmo Marconi em 1902. A densidade de ionização desta camada é tipicamente de 10^5 elétrons por centímetro cúbico durante o dia, sendo possível que hajam períodos de maior ionização. Normalmente, a uma incidência oblíqua, esta camada apenas consegue refletir ondas de rádio numa gama de frequências abaixo dos 10 MHz e pode contribuir para a absorção de ondas numa gama de frequências superior. Contudo, durante eventos esporádicos nesta camada (E_s), é possível que sejam refletidas ondas de gamas de frequências superiores a 50 MHz.

2.2.3 Camada F

A camada F está presente acima dos 140 km de altitude. Esta camada tem a maior concentração de eletrões livres. Apesar de o seu grau de ionização persistir, ainda que com pouca mudança, durante a noite, existe uma alteração na distribuição de iões. Durante o dia, é possível fazer a distinção de duas camadas: uma camada mais pequena conhecida como F1, e acima desta uma camada dominante mais ionizada denominada F2. Durante a noite, estas camadas fundem-se ao nível da camada F2. Esta camada reflete ondas de rádio com frequências que poderão atingir os 35 MHz. O valor exato depende do pico da concentração de eletrões, que tipicamente atinge o valor de 10^6 eletrões por centímetro cúbico. Esta é a camada responsável pela maior parte propagação *skywave* de ondas rádio e de comunicações rádio de alta frequência a longas distâncias.

2.2.4 Camada esporádica Es

A camada esporádica Es refere-se à imprevisível formação de regiões com uma enorme densidade de eletrões na camada E. Esta região pode formar-se a qualquer altura do dia ou da noite e, ocorrendo na camada E, situa-se entre os 90 e os 140 km de altitude. Pode variar muito na área que ocupa, sejam alguns quilómetros ou algumas centenas de quilómetros, e também no tempo que esta região se mantém (pode estar presente entre apenas alguns minutos até várias horas). Esta região pode ter uma densidade de eletrões comparável com a camada F, o que quer dizer que pode refletir as gamas de altas frequências que são utilizadas para comunicações através da camada F. Por vezes, a camada esporádica é transparente e permite que a maior parte das ondas rádio a atravessem, e reflitam na camada F. Contudo, noutras vezes, esta camada consegue bloquear totalmente a camada F, e fazer com que o sinal não chegue à mesma, e conseqüentemente ao recetor. Uma vez que a camada é parcialmente transparente, a onda rádio pode refletir-se algumas vezes na região F e outras vezes na camada Es. Isto pode levar a uma transmissão parcial ou intermitente do sinal, ou até levar ao *fading*, tal como apresentado na figura 3.

A camada Es, quando presente em baixas e médias latitudes, é provável que tenha sido formada durante o dia ou ao início da noite, e que aconteça predominantemente nos

meses de verão. Já quando se apresenta em altas latitudes, tende a formar-se durante a noite.

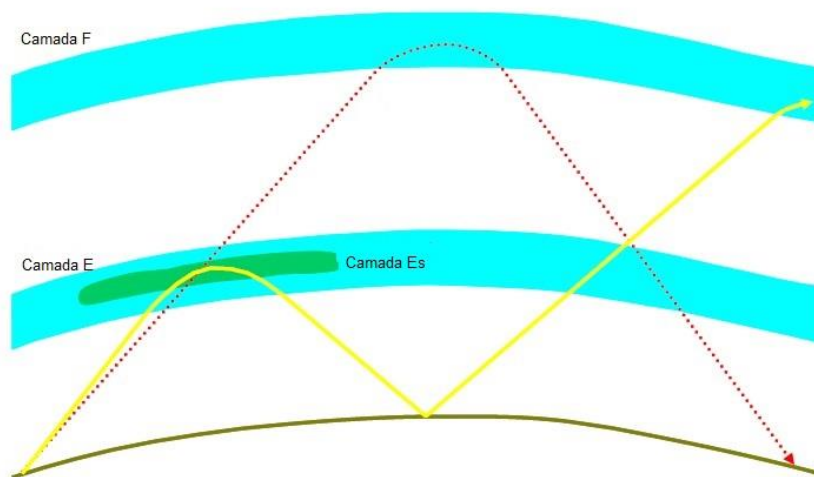


Figura 3 – Reflexão do sinal na camada Es (adaptado de [11])

2.3. Variações na Ionosfera

A ionosfera não permite a utilização da mesma frequência para que sejam feitas comunicações durante todo o ano, ou mesmo durante 24 horas, uma vez que a densidade de elétrons na ionosfera não é sempre a mesma. Pode variar devido a vários fatores, tais como a altitude, a latitude, o ciclo solar ao longo de vários anos, o ciclo solar diário, bem como da altura do ano (variação sazonal).

2.3.1. Variações com a altitude

A baixas altitudes, o ar tem uma densidade bastante elevada de partículas, e por isso é praticamente impossível obter densidades de iões comparáveis à densidade de partículas neutras. À medida que se vai subindo, uma vez que a altura aumenta, a densidade do ar torna-se mais baixa, e os iões que estão presentes nessas regiões tendem a viajar longas distâncias antes de se recombinarem, e isso leva a que o tempo de vida dos iões aumente, e, uma vez que a intensidade da radiação é maior, a densidade de iões cresce e atinge valores bastante mais elevados que a densidade de partículas neutras. A figura 4

apresenta a constituição das várias camadas da atmosfera, bem como a variação da densidade de elétrons presentes na ionosfera.

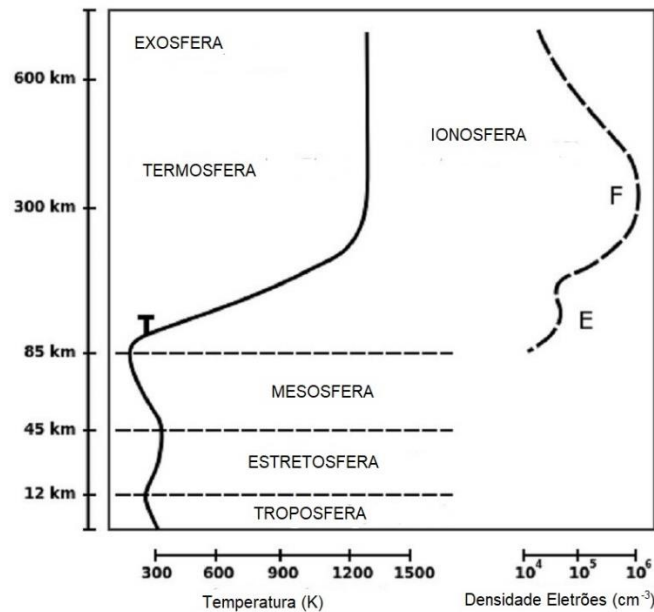


Figura 4 – Variação da densidade de elétrons com a altura

2.3.2. Variações com o ciclo solar diário

A ionosfera é variável em espaço e tempo. Algumas das mudanças são químicas na sua origem e podem ser imediatamente entendidas. Existe uma variação sistemática, por exemplo, de acordo com a altura do dia. De manhã cedo, o sol está relativamente baixo, então a radiação deve penetrar numa grande coluna de ar antes de atingir um certo nível na atmosfera. Resultado disso, os índices de ionização são mais baixos, e a localização de camadas ionizadas transfere-se para altitudes maiores. À medida que o sol se distancia, as camadas D, E e F1 mudam de altitude. Ao meio-dia, as camadas estão mais baixas e a densidade de elétrons é a mais elevada do dia. Por outro lado, durante a noite, a ionização nas camadas D, E e F1 tende a desaparecer à medida que elétrons e iões se recombinam para formarem gases neutros.

A variação diária da camada F2 é menos drástica. Os iões produzidos a altas altitudes durante o dia, mantêm uma densidade de elétrons considerável no pico de F2 durante o dia e depois difundem-se para baixo à noite. Isto tem em consideração o facto

da recepção rádio (nas bandas de *broadcast* e de ondas curtas) ser geralmente melhor durante a noite. A ionização a baixas altitudes, principalmente correspondente à camada D, tende a interferir, como foi referido anteriormente, com as transmissões rádio durante o dia, e tem uma interferência mínima durante a noite, uma vez que a ionização na camada D desaparece efetivamente quando o sol se põe.

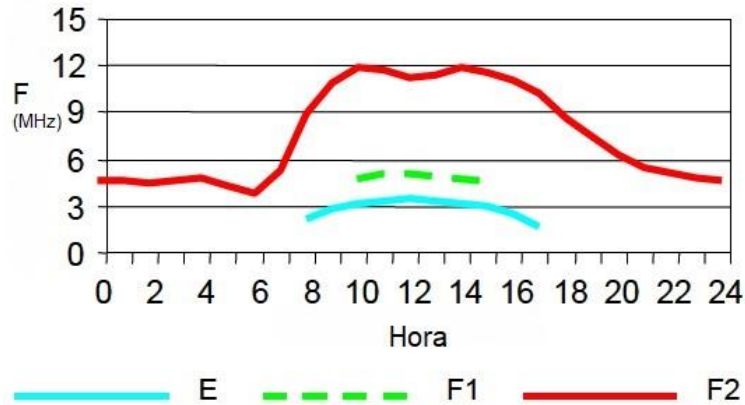


Figura 5 – Máximas frequências para as camadas E, F1 e F2 ao longo do dia (adaptado de [11])

2.3.3. Variações com o ciclo solar

O sol varia num período de subida e queda na sua atividade que acaba por afetar as comunicações HF. Estes ciclos solares podem variar entre 9 e 14 anos. No seu mínimo, apenas as frequências baixas da banda HF são refletidas pela ionosfera, enquanto que no seu máximo, as frequências altas também se propagam com sucesso, tal como apresentado na figura 6.

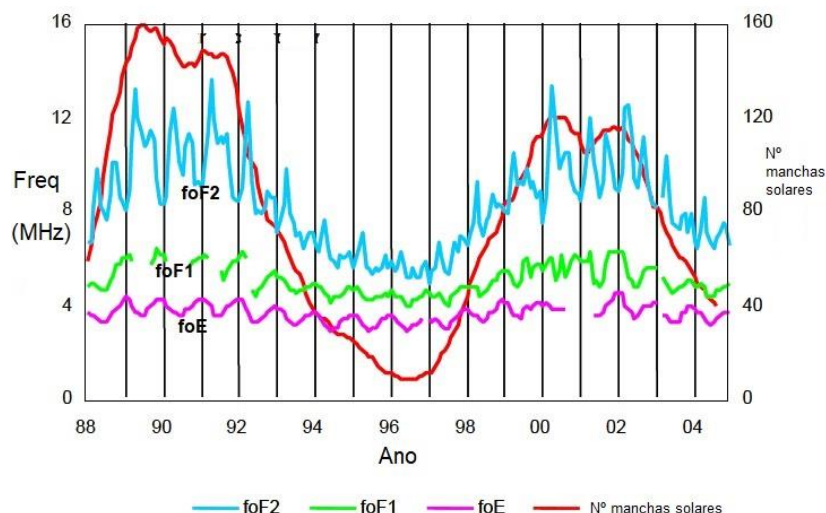


Figura 6 – Variação da frequência máxima com o número de manchas solares (adaptado de [11])

Isto acontece porque existe uma maior radiação a ser emitida pelo sol no seu pico solar, produzindo mais elétrons na ionosfera, o que permite o uso de altas frequências. Mas existem outras consequências deste ciclo solar. Durante este pico existe uma maior probabilidade de ocorrerem clarões solares. Este fenómeno trata-se de enormes explosões do sol que emitem radiação que ioniza a camada D, causando um aumento na absorção de ondas HF. Uma vez que esta camada apenas está presente durante o dia, apenas os trajetos que passem pela luz do dia são afetados. A absorção de ondas HF que viajam pela ionosfera depois de um clarão solar é chamada de *fade-out*. Os *fade-outs* ocorrem instantaneamente e afetam maioritariamente as frequências baixas. Se se suspeita que tenha ocorrido um *fade-out*, então é aconselhável que se usem altas frequências. A duração deste fenómeno pode variar entre 10 minutos e algumas horas, estando dependente da duração e da intensidade do clarão solar.

2.3.4. Variações sazonais

As variações sazonais são o resultado da translação da Terra em torno do Sol. As frequências na camada E são maiores no verão do que no inverno. Contudo, a variação das frequências na camada F é mais complicada. Em ambos os hemisférios, as frequências na camada F geralmente têm o seu pico por volta dos equinócios (Março e Setembro). Por volta do mínimo solar no verão, as frequências são, como esperado, geralmente maiores que as apresentadas no inverno, mas por volta do pico máximo solar, as

frequências no inverno tendem a ser maiores que no verão. Para além disso, as frequências por volta dos equinócios são maiores que as do verão e inverno para o pico e para o mínimo solar. A observação das frequências de inverno serem habitualmente maiores que as do verão é denominada anomalia sazonal.

2.3.5. Variações com a latitude

A figura 7 mostra as variações nas camadas E e F das frequências máximas ao meio-dia (Hemisfério-Dia) e à meia-noite (Hemisfério-Noite) desde o pólo até ao equador. Durante o dia, com o aumento da latitude, a radiação solar atinge a atmosfera mais obliquamente, então a intensidade da radiação e a produção diária de eletrões livres diminui. Na camada F, esta variação de latitude continua durante a noite devido à ação de correntes de ar atmosféricas.

Os desvios da latitude de baixas para altas latitudes são também notórios. O pico das frequências na camada F não são no equador geomagnético, mas sim 15 a 20 graus a norte ou a sul do mesmo. Isto é chamado de anomalia equatorial. Para além disso, à noite, as frequências atingem um mínimo por volta dos 60 graus a norte ou a sul do equador geomagnético. Esta é a chamada latitude de depressão. Os comunicadores que requerem comunicações perto do equador durante o dia e uma latitude de 60 graus durante a noite, devem ter em atenção estas características. Por exemplo, na figura 7 pode ver-se o quão rápido as frequências podem mudar perto da latitude de depressão e da anomalia equatorial, portanto uma variação no ponto de reflexão perto destas, pode levar a uma variação grande na frequência suportada.

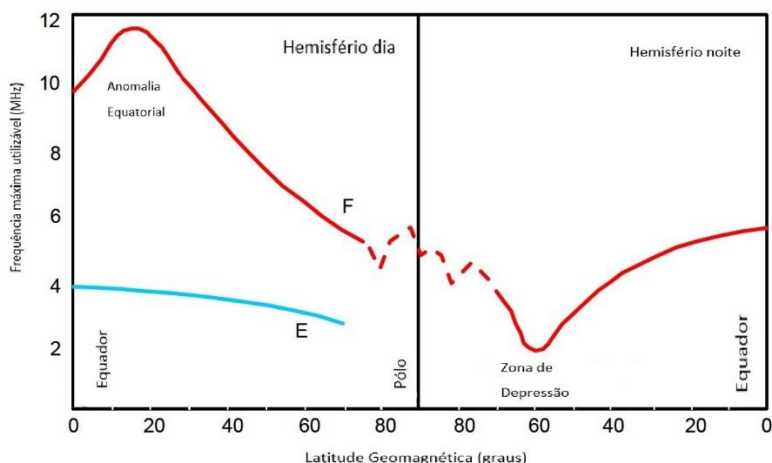


Figura 7 – Variação da frequência máxima com a latitude geomagnética (adaptado de [11])

2.4. Efeitos das Perturbações Solares

Para além de todos os fatores já apresentados, existem ainda alguns eventos que influenciam a densidade de eletrões presentes na ionosfera. São estes os *fade-outs* de ondas curtas, a absorção nas calotas polares, e as tempestades ionosféricas.

2.4.1 *Fade-outs* de Ondas Curtas

A radiação proveniente do Sol durante grandes clarões solares causa a ionização da camada D, o que resulta numa maior absorção de ondas rádio HF. Se o clarão for grande o suficiente, todo o espectro HF pode ficar inutilizável durante um período de tempo. Estes *fade-outs* são mais passíveis de acontecer durante os máximos solares. As características principais dos SWF's são:

- Apenas serão afetados circuitos que transmitam durante o dia;
- Os *fade-outs* duram normalmente entre alguns minutos e algumas horas, com um começo rápido e uma recuperação lenta. A duração do *fade-out* dependerá sempre da duração do clarão solar;
- A intensidade do *fade-out* depende do tamanho do clarão solar e da posição do Sol relativamente ao ponto onde a onda rádio passa através da camada D. Quanto maior a altura do Sol em relação a esse ponto, maior será a absorção;

- A absorção é maior nas gamas de frequências mais baixas, que são as primeiras a serem afetadas e as últimas a recuperar. Gamas de frequências mais altas são normalmente menos afetadas e poderão continuar a ser utilizáveis, tal como apresentado na figura 8.

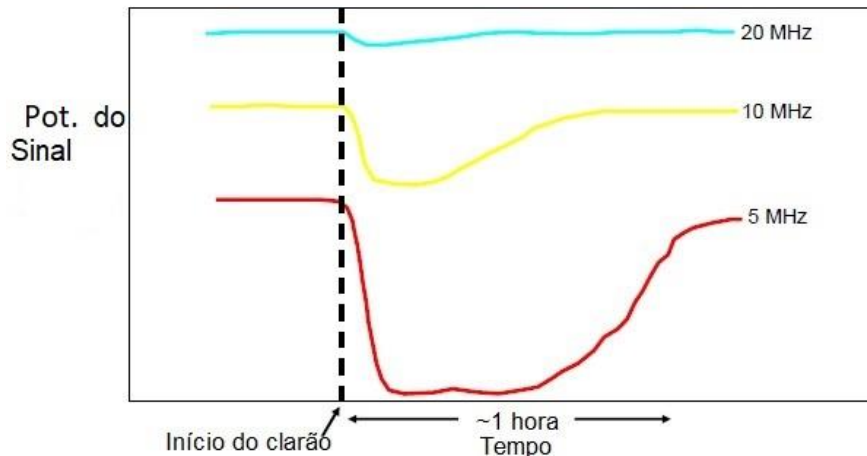


Figura 8 – Influência dos fade-outs na potência do sinal (adaptado de [11])

2.4.2 Eventos de Absorção nas Calotas Polares

Os PCA's são atribuídas a prótons de alta energia que escapam do Sol quando os grandes clarões solares acontecem e movem-se ao longo das linhas do campo magnético da Terra em direção às regiões polares. Aí, eles ionizam a camada D, causando uma grande absorção de ondas HF.

Os PCA's podem começar logo 10 minutos após o começo de um clarão solar e podem durar até 10 dias. Até a zona polar de inverno (uma região de escuridão permanente) pode sofrer os efeitos dos PCA's, uma vez que a camada D ionizada é formada por prótons em vez de luz solar. Os efeitos dos PCA's podem por vezes ser ultrapassados por mensagens de retransmissão em circuitos que não requeiram pontos de reflexão polares. Os PCA's, tal como os SWF's, ocorrem maioritariamente durante os máximos solares, no entanto não são tão frequentes como estes.

2.4.3 Tempestades Ionosféricas

Devido a eventos que acontecem no Sol, por vezes o campo magnético da Terra fica afetado. O campo geomagnético e a ionosfera estão ligados de uma maneira muito complexa e um distúrbio no campo geomagnético pode muitas vezes causar distúrbios na ionosfera.

Estes distúrbios, chamados Tempestades Ionosféricas, por vezes começam com um aumento da densidade de elétrons, permitindo que gamas mais altas de frequências sejam suportadas, seguidas de um decréscimo na densidade de elétrons até serem suportadas apenas gamas de baixas frequências pela ionosfera. Isto não irá normalmente preocupar um comunicador HF, mas a depressão pode levar a que frequências que habitualmente sejam utilizadas para fazer a comunicação sejam muito altas.

As tempestades ionosféricas podem durar alguns dias e geralmente acontecem mais em latitudes mais altas do que em latitudes mais baixas. Ao contrário dos *fade-outs*, afetam maioritariamente altas frequências. Então, para reduzir os efeitos destas tempestades nas comunicações, deverão ser utilizadas frequências mais baixas, onde for possível.

2.5. Plasma Ionosférico

Duas propriedades fundamentais de um plasma, a frequência de plasma (f_p) e o índice de refração (n), determinam as interações entre o plasma e a radiação eletromagnética. A figura 9 representa essas mesmas interações.

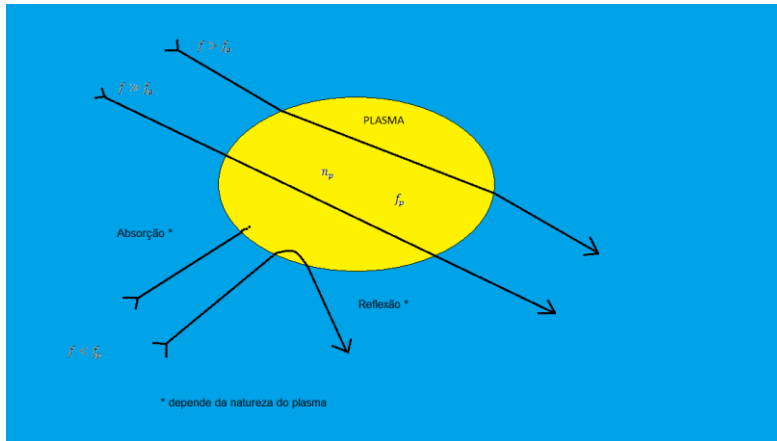


Figura 9 – Interações entre o plasma e a radiação eletromagnética

2.5.1. Modelos Teóricos do Plasma Ionosférico

A ionosfera é composta essencialmente por um plasma, plasma esse que apresenta uma variação na densidade de elétrons, dependendo de vários fatores, como já foi referido anteriormente.

Para que se estabelecesse uma expressão analítica para a ionosfera em função da densidade de elétrons presentes na mesma, Sydney Chapman baseou-se na densidade de elétrons em função da altura e da inclinação do sol. Visto que este modelo tinha várias limitações, seguiram-se vários modelos para o cálculo de trajetórias de raios na ionosfera, tendo por aproximação o modelo de Chapman.

2.5.1.1. Modelo de Chapman

Sydney Chapman assumiu algumas hipóteses para desenvolver um modelo teórico simplificado, tais como:

- A atmosfera é constituída por um único gás;
- A radiação proveniente do Sol é monocromática;
- A densidade atmosférica diminui exponencialmente com a altura;
- A radiação solar é atenuada exponencialmente;
- A Terra é plana (como forma de simplificar as contas).

Neste modelo, a densidade de elétrons é dada pela expressão:

$$N_e = N_{eM} e^{\left(\frac{1-y-\sec(\chi)e^{-y}}{2}\right)} \quad (2.1)$$

Em que N_{eM} é a densidade máxima de eletrões, e χ é o ângulo que o Sol faz com a vertical da Terra, tal como se verifica na figura 10.

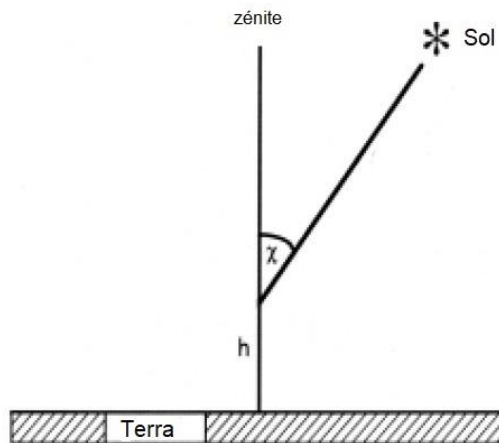


Figura 10 – Geometria de Chapman

O valor de y é dado pela expressão:

$$y = \frac{h - h_m}{H} \quad (2.2)$$

Em que h é o valor da altura, e h_m é o valor da altura correspondente a N_{eM} . O valor de H é dado pela fórmula:

$$H = \frac{kT}{Mg} \quad (2.3)$$

Em que k é a constante de Boltzman, T é a temperatura absoluta em função da altura, em Kelvin, M é a massa molar, e g é a aceleração gravítica.

Contudo, este modelo contém várias limitações, uma vez que:

- Não considera o efeito magnético;
- Não considera a colisão entre partículas;
- A escala de altura não é constante;
- Assume um estado estável, uma vez que não considera outras fontes de ionização, e assume uma intensidade solar constante;
- Dá apenas uma descrição qualitativa;
- Subestima severamente a camada D durante a noite.

2.5.1.2. Modelo Linear

Através da leitura da figura 11, é possível verificar que o modelo linear assume que, a partir de certa altura, a densidade de eletrões aumenta, possibilitando decompor um perfil complexo em estratos sucessivos, dado pela expressão:

$$N_e - N_0 = a(h - h_1) \quad (2.4)$$

Em que a é o declive e h_1 é a altura em que se inicia a ionosfera, dada em km.

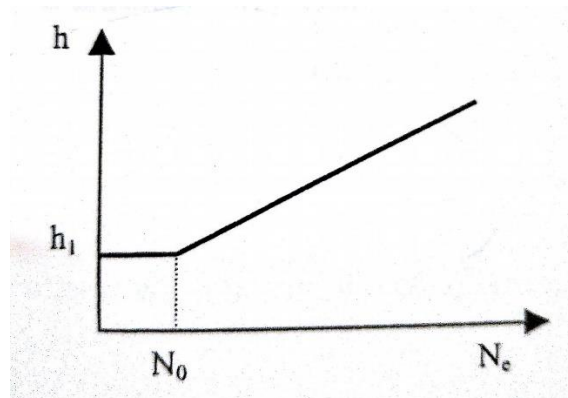


Figura 11 – Densidade de eletrões para o modelo linear (retirado de [1])

2.5.1.3. Modelo Exponencial

Outro dos modelos é o modelo exponencial, em que h_r é um nível de referência com $N = N_r$; o sinal (-) representará o topo da ionosfera, e o sinal (+) a base da ionosfera [1]. Este modelo é dado pela expressão:

$$N_e = N_r \cdot e^{\left[\mp \frac{h-h_r}{2H}\right]} \quad (2.5)$$

2.5.1.4. Modelo Parabólico

O modelo parabólico, apresentado na figura 12, assume que os valores de y e de χ são muito pequenos e a expressão que dá a densidade de elétrons é:

$$N_e = N_{eM} \left[\frac{2(h-h_1)}{y_m} - \frac{(h-h_1)^2}{y_m} \right] \quad (2.6)$$

Em que y_m é a “meia espessura” da ionosfera. É muitas vezes uma boa representação da base da ionosfera até ao pico de ionização [1].

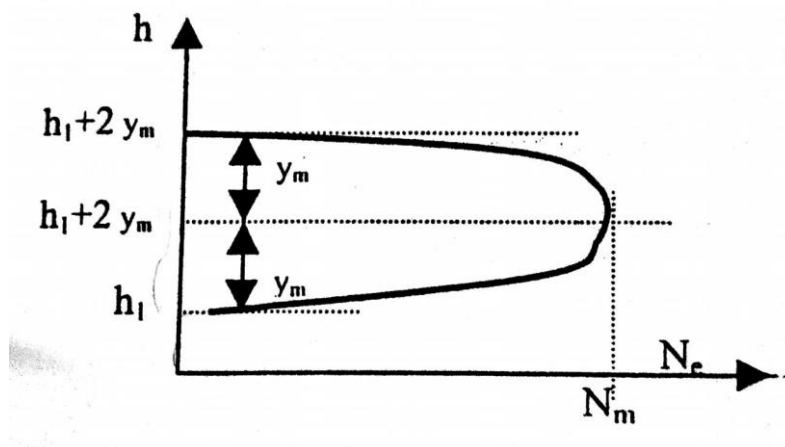


Figura 12 – Densidade de elétrons para o modelo parabólico (retirado de [1])

2.5.2. Frequência de Plasma

A frequência de plasma trata-se de uma frequência característica definida na ausência de campo magnético imposto e observa-se quando se introduz uma perturbação inicial que separe as partículas carregadas em presença. Assim separando os elétrons e os íons segundo uma direção \underline{x} forma-se uma dupla camada de espessura dx , e densidade de carga superficial $q \cdot N_e \cdot dx$, onde a carga de um elétron é dada por $-q$ [1], tal como apresentado na figura 13.

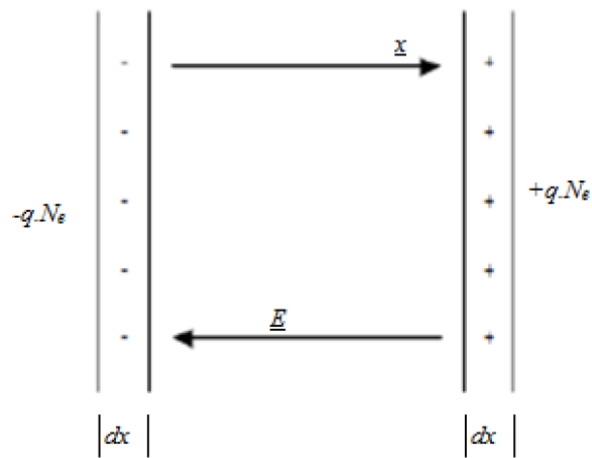


Figura 13 – Formação do plasma (retirado de [1])

Através desta separação é criado um campo elétrico que é dado (a partir da equação $\nabla \cdot D = \rho$) por

$$E = \frac{-q \cdot N_e \cdot x}{\epsilon_0} \quad (2.7)$$

Os elétrons e os íons ficam submetidos a uma força de compensação dada por $q \cdot N_e \cdot E$, e considerando por agora só os elétrons pode-se escrever para estes a igualdade da força de inércia à força de atração elétrica [1]:

$$m_e \cdot N_e \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = q \cdot N_e \cdot E \quad (2.8)$$

Resultando então a equação

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{q^2 N_e}{m_e \cdot \epsilon_0} x = 0 \quad (2.9)$$

Sendo que

$$x = A \sin(\omega_{pe} x) \quad (2.10)$$

Resultando daí a frequência de plasma, dada por:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{q^2 N_e}{m_e \epsilon_0}} \quad (2.11)$$

Daqui, podemos concluir que:

$$f_{pe} = \frac{\omega_{pe}}{2\pi} = \omega_{pe} = \sqrt{\frac{q^2 N_e}{m_e \epsilon_0}} \quad (2.12)$$

Para outras espécies iônicas presentes ter-se-á idênticamente frequências de plasma correspondentes em que figuram as respectivas densidades, carga e massas.

Convém ter uma ordem de grandeza destas frequências na ionosfera. Para isso utilizam-se os seguintes dados [1]:

$$N_e = 10^{12} \text{ eletrões} \cdot m^{-3} \text{ (característico do máximo de ionização na ionosfera)}$$

$$q_e = -1.59 \times 10^{-19} \text{ C (carga de um eletrão)}$$

$$m_e = 9.107 \times 10^{-31} \text{ Kg (massa de um eletrão)}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F.m}^{-1}$$

Com estes valores vem

$$f_{pe} = 9 \text{ MHz} \quad (2.13)$$

Esta frequência cai no domínio da onda curta. Repete-se então este cálculo para um átomo de oxigénio para o qual se tem [1]

$$q_{ox} = -1.59 \times 10^{-19} \text{ C (simplesmente ionizado)}$$

$$m_{ox} = 9.107 \times 10^{-31} \times 1840 \times 16 = 2.68 \times 10^{-26} \text{ Kg}$$

Toma-se $N_{ox} = N_e$, vindo

$$\frac{f_{pox}}{f_{pe}} = \sqrt{\frac{m_e}{m_{ox}}} = \frac{1}{\sqrt{1840 \times 16}} \approx 50 \text{ KHz} \quad (2.14)$$

Esta frequência de plasma, característica das várias espécies de iões presentes na atmosfera, cai no domínio do VLF (abaixo da onda longa). Em geral não tem interesse considera-la em problemas de propagação em que as frequências são muito mais elevadas, e em consequência só se faz intervir a frequência de plasma dos eletrões f_{pe} (que se vai passar a designar simplesmente por f_p). Neste caso diz-se que se considera os iões imóveis (devido à sua muito maior inércia), e só os eletrões são postos em movimento pelos campos de ondas [1].

2.5.3. Constante de Atenuação num Plasma Ionosférico

Para se obter a constante de atenuação α , considerar-se-á um modelo em que se despreza a ação do campo magnético e as perdas por colisão, sendo a força devido ao campo elétrico a única a exercer atenuação sobre os eletrões.

A equação fundamental da dinâmica dos eletrões é dada pela expressão

$$m_e \frac{dv_e}{dt} = qE \quad (2.15)$$

Em que m_e e q tomam os valores referidos no subcapítulo 2.5.2.

A densidade de corrente de convecção criada nas moléculas de gases, em Am^{-2} , vem dada por

$$J = Nqv_e \quad (2.16)$$

Em que N representa a densidade de eletrões do plasma, expressa em *eletrões*. m^{-3} .

Substituindo a equação (2.16) em (2.15), obtém-se

$$J = -jE \frac{N_e^2}{\omega m_e} \quad (2.17)$$

Tem-se agora a equação de Maxwell

$$\nabla \times H = J + j\omega\epsilon_0 E \quad (2.18)$$

Substituindo a equação de Maxwell em (2.17), chega-se à expressão

$$\nabla \times H = j\omega\varepsilon_0 E \left(1 - \frac{N_e^2}{\omega^2 m_e \varepsilon_0 - j\vartheta \omega m_e \varepsilon_0} \right) \quad (2.19)$$

A partir desta equação, é possível definir a constante dielétrica equivalente para o plasma ionosférico, dada pela expressão

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{N_e^2}{\omega^2 m_e \varepsilon_0 - j\vartheta \omega m_e \varepsilon_0} \right) \quad (2.20)$$

Uma vez que a frequência de plasma é dada por

$$f_{pe} = \frac{w_{pe}}{2\pi} = w_{pe} = \sqrt{\frac{q^2 N_e}{m_e \varepsilon_0}} \quad (2.21)$$

Tem-se para ε_{eq} a expressão

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\vartheta)} \right) \quad (2.22)$$

Sabendo que $\varepsilon_{eq} = \varepsilon_r \varepsilon_0$ e que a expressão da constante de propagação é

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0} \quad (2.23)$$

Substituindo (2.22) em (2.23), obtém-se a constante de propagação para um plasma ionosférico dada por

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\vartheta)}} \quad (2.24)$$

É preciso ter-se em atenção que:

- Se $\omega > \omega_p$, k é real, o que quer dizer que ao penetrar na ionosfera a onda irá propagar-se sem ser atenuada;
- Se $\omega < \omega_p$, k tomará valores imaginários, tendo-se portanto uma onda evanescente;
- Se $\omega = \omega_p$, $k = 0$. A este caso dá-se o nome de frequência crítica. Para $k = 0$ não há propagação dentro da ionosfera e a onda é refletida para a superfície terrestre.

A expressão de k no plano complexo é dada por $k = \beta - j\alpha$, em que a componente real β corresponde à variação de fase e a componente imaginária α que corresponde à constante de atenuação da ionosfera.

Partindo da equação (2.24), tem-se

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2(\omega^2 + j\omega\vartheta)}{\omega^4 + \omega^2\vartheta}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \vartheta^2} - j \frac{\omega_p^2\vartheta}{\omega(\omega^2 + \vartheta^2)}} \quad (2.25)$$

Usando o desenvolvimento em série de Taylor de $\sqrt{1+x}$ com a forma $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8}$, e recorrendo à aproximação de primeira ordem, tem-se:

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{2(\omega^2 + \vartheta^2)} - j \frac{\omega_p^2\vartheta}{2\omega(\omega^2 + \vartheta^2)}} = \beta - j\alpha \quad (2.26)$$

A constante de atenuação α é então dada pela expressão

$$\alpha = \frac{\omega_p^2 \vartheta}{2c(\omega^2 + \vartheta^2)} \quad (2.27)$$

2.6. Altura Virtual

A altura virtual é a altura acima da superfície terrestre da qual uma onda refratada aparenta ter sido refletida. A onda radiada é refratada de volta para a Terra e segue o trajeto B. A altura máxima real que é atingida é a altura h_a . Contudo, o trajeto A mostra o caminho projetado que uma onda refletida poderia ter tido e ainda ter voltado para a Terra, atingindo a mesma localização. A altura máxima que esta onda hipoteticamente refletida atinge é a denominada altura virtual (h_v).

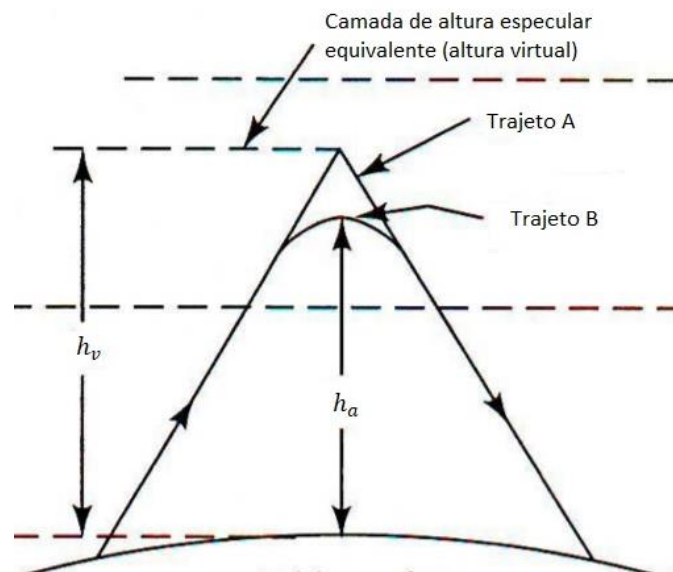


Figura 14 – Altura virtual

Tendo em conta que o sinal de onda rádio viaja à velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), e tendo em conta o tempo entre a emissão e receção do sinal (Δt), a altura real h_a é calculada através da expressão

$$h_a = \frac{3 \times 10^8 \times \Delta t}{2} \quad (2.28)$$

2.7. Frequência Máxima Utilizável

A Frequência Máxima Utilizável é a maior frequência que pode ser utilizada em transmissão entre dois pontos, através de reflexão na ionosfera, em determinado instante de tempo, independentemente da potência de transmissão. Esta frequência é dada pela expressão

$$MUF = \frac{f_c}{\cos \theta} \quad (2.29)$$

Em que f_c é a frequência crítica e θ é o ângulo de incidência da onda curta estabelecido entre o raio da mesma e o zênite, como representado na figura 15. A frequência crítica trata-se da frequência máxima a partir da qual a ionosfera deixa de refletir um sinal, para uma incidência perpendicular à superfície terrestre. Se o sinal emitido tiver uma frequência superior a esta, acaba por não ser refletido, atravessando a ionosfera, e é dada pela expressão

$$f_c = \sqrt{80,55N_{e_{max}}} \quad (2.30)$$

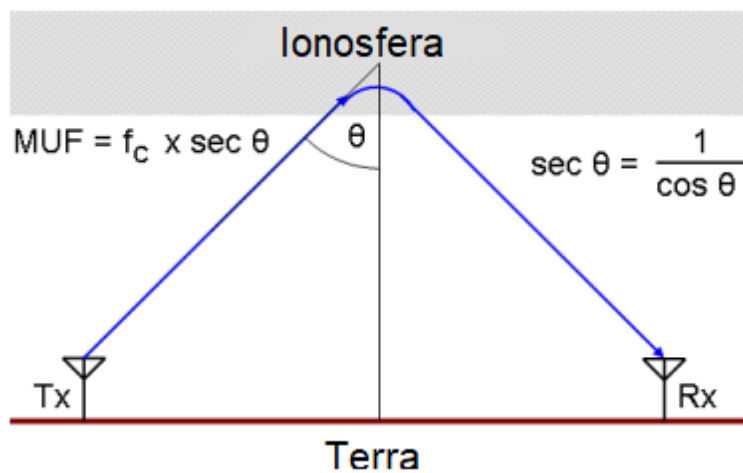


Figura 15 – Representação da MUF

Cap. 3 – Atenuação numa Comunicação Via Ionosfera

A comunicação via ionosfera continua a ser uma opção bastante viável e é importante em situações, por exemplo, de catástrofes naturais, em que possa não existir qualquer outro tipo de meio de comunicação, devido a possíveis falhas dos mesmos. É também um tipo de comunicação muito utilizado em cenários de guerra e conflitos.

Como já foi referido anteriormente, a ionosfera funciona como uma camada refletora para as ondas rádio nalgumas gamas de frequência, ainda que só para frequências não muito elevadas (no máximo frequências na ordem de grandeza entre os 3 e os 30 MHz). Como tal, para que seja feita uma ligação, é necessário que o sinal seja transmitido pela antena transmissora, e atinja a ionosfera, com um ângulo, denominado ângulo de fogo, oblíquo. Para frequências acima de 30 MHz, o sinal, mesmo que seja transmitido num ângulo oblíquo, acaba por atravessar a ionosfera, perdendo-se no Espaço. Quando o sinal é refletido pela ionosfera, volta para a superfície terrestre, permitindo que seja feita a comunicação. Este fenómeno é denominado por salto, e está representado na figura 16.

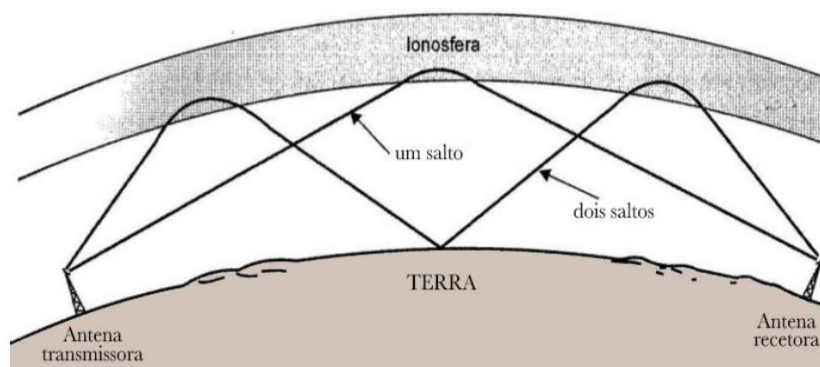


Figura 16 – Representação de ligações com um e dois saltos

Após ser refletido na ionosfera, e voltar para a superfície terrestre, o sinal poderá ser novamente refletido no chão e voltar para a ionosfera, obtendo-se assim mais do que um salto, como representado na figura. Assim poderão haver várias reflexões, que poderão corresponder a n saltos, que permitem ao sinal propagar-se em longas distâncias.

Essas reflexões várias que o sinal pode sofrer acabam por causar uma atenuação no mesmo, nomeadamente devido ao facto de atravessar as várias camadas da ionosfera, e devido às superfícies rugosas que poderá encontrar ao refletir na Terra.

Como tal, e visto que pode haver mais do que um salto na comunicação via ionosfera, será feito um estudo para dois casos – o primeiro, para o caso de haver apenas um salto, e o segundo, para o caso de haverem dois saltos. A distância que vai ser considerada será de 200 km entre antena emissora e antena recetora no primeiro caso, e de 400 km no segundo. O estudo de ambos os casos tem como objetivo calcular a atenuação total sofrida pelo sinal na comunicação via ionosfera entre dois pontos da superfície terrestre.

Para o primeiro caso, em que apenas ocorre um salto, temos a representação do mesmo na figura 17.

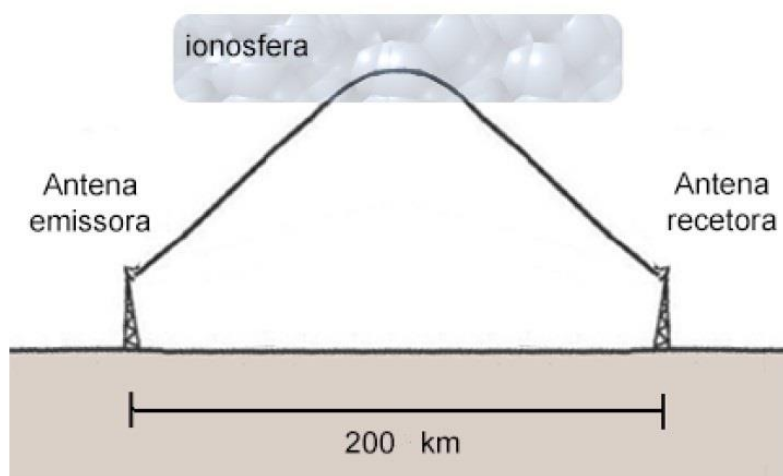


Figura 17 – Ligação com um salto

Visto que estamos a falar de comunicações NVIS, a gama de frequências a ser utilizada situa-se entre 3 e aproximadamente 10 MHz, por isso as frequências consideradas para os cálculos serão de 3 MHz, 5 MHz, 8 MHz e 10 MHz.

3.1. Ângulo de Fogo

Para definir com precisão o trajeto percorrido pelo sinal enviado pela antena emissora, é necessário calcular a relação entre a distância de salto d , a altura virtual h' e o ângulo de fogo ψ . Para tal, será utilizada a aproximação da Terra plana para calcular o ângulo de fogo a uma determinada frequência f .

A geometria da trajetória da onda, que reflete na ionosfera, está representada na figura 18.

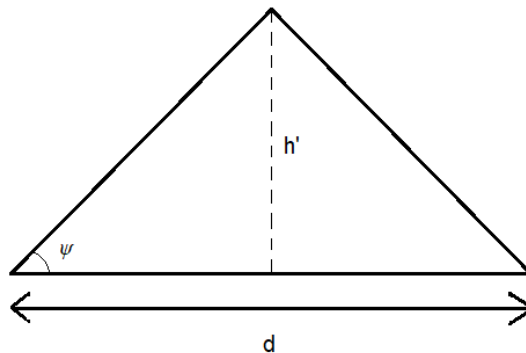


Figura 18 – Representação do ângulo de fogo

A expressão que permite calcular o valor do ângulo de fogo ψ é dada, então, por

$$\psi = \tan^{-1} \frac{2h'}{d} \quad (3.1)$$

3.1.1. Simulação de ψ

Na figura 19, é apresentado um gráfico que faz o estudo do ângulo de fogo ψ de acordo com as alturas virtuais $h'=80$ km, 100 km, 250 km e 350 km, sendo que é possível notar que ψ é inversamente proporcional à distância entre antenas, ou seja, quanto maior a distância entre antenas, menor é o ângulo de fogo, sendo que este tem uma variação maior para distâncias mais pequenas, e quando atinge distâncias mais altas, tende para uma assíntota horizontal.

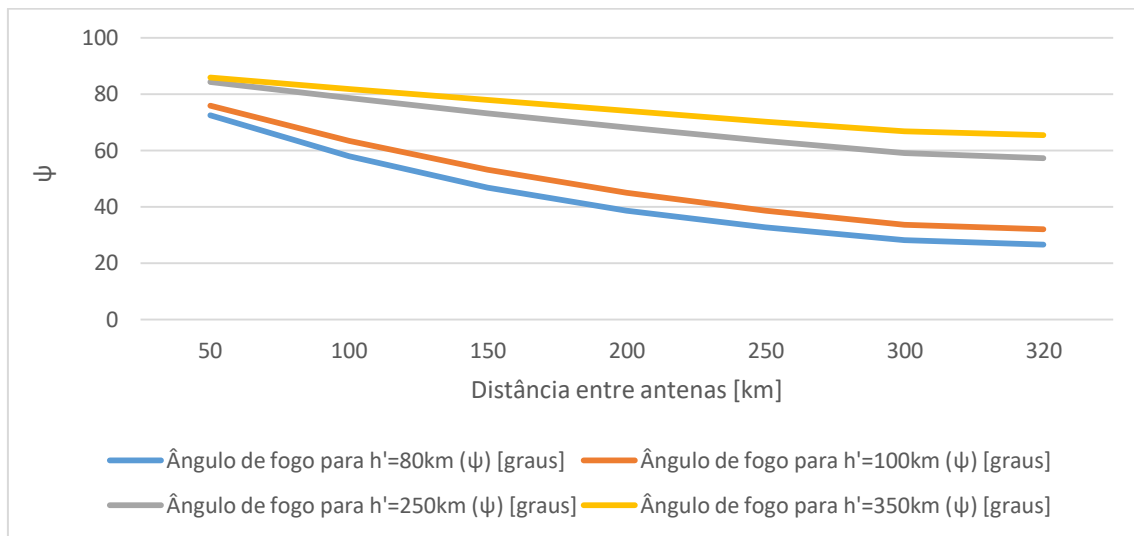


Figura 19 – Ângulos de fogo em função da altura virtual

3.2. Atenuação em Espaço Livre

A atenuação em espaço livre é a perda da força do sinal que ocorre quando uma onda eletromagnética se propaga em espaço livre. Neste caso em específico, não existem obstáculos que possam causar a reflexão ou refração do sinal, ou que possam causar atenuação adicional. O cálculo da atenuação em espaço livre (A_0) refere-se às perdas durante o trajeto do sinal em si e não se relaciona com a potência de transmissão, com os ganhos das antenas, ou com a sensibilidade da antena recetora. De resto, a fórmula através da qual é calculada a atenuação em espaço livre, que é uma adaptação da fórmula de Friis, assume que o ganho das antenas é unitário para a antena transmissora e para a antena recetora. As antenas são, portanto, isotrópicas ($G_e = G_r = 0$), e a atenuação em espaço livre é então expressa em dB e dada pela fórmula

$$A_0 = 32,44 + 20 \log(d_{[km]}) + 20 \log(f_{[MHz]}) \text{ [dB]} \quad (3.2)$$

Tendo em conta o alcance considerado de 200 km, e aplicando o Teorema de Pitágoras para calcular a distância percorrida pelo sinal, que toma um valor de $d =$

728,01 km, e varrendo as frequências definidas previamente, os valores obtidos para a atenuação A_0 são apresentados na tabela 1.

Frequência [MHz]	A_0 [dB]
3	99,3
5	103,7
8	107,8
10	109,7

Tabela 1 – Valores da atenuação em espaço livre

Através da leitura da tabela, e como era expectável, é possível verificar que a atenuação em espaço livre aumenta com a frequência, para uma distância de 200 km, apesar de esse aumento ser cada vez menor à medida que se varre a gama de frequências.

3.3. Atenuação na Ionosfera

Para além da atenuação em espaço livre, há também que ter em conta a atenuação sofrida pelo sinal nas diversas camadas da ionosfera. Tendo em consideração que a estratificação das camadas da ionosfera é considerada plana, a atenuação em cada camada da mesma é dada por

$$A_i = e^{-2\alpha\kappa} \quad (3.3)$$

Na qual α corresponde à constante de atenuação, e κ corresponde à distância percorrida pelo sinal dentro da ionosfera. O cálculo da constante de atenuação foi obtido anteriormente através da expressão (2.27)

Uma vez que as características das camadas da ionosfera são diferentes, a cada uma delas irá corresponder uma constante de atenuação diferente.

A distância percorrida pela onda dentro da ionosfera é obtida para cada camada adaptando o segundo teorema de Martyn sobre a absorção. Este teorema indica que, assumindo que a estratificação da ionosfera é plana, a absorção de uma onda incidente, com um ângulo \emptyset_0 , complementar ao ângulo de fogo, correlaciona-se com a absorção da onda vertical equivalente, com uma frequência $f \cos \emptyset_0$. Assumindo que se passa o que está representado na figura 18, e adaptando-se o teorema para o ângulo de fogo ψ em que se substitui a altura virtual pela espessura da camada em questão (esp), a expressão que permite obter a distância percorrida pela onda dentro da ionosfera é dada por

$$\kappa = \frac{esp}{\sin \psi} \quad (3.4)$$

Aplicando esta expressão, e recorrendo à figura 19 para obter o valor dos ângulos de fogo das camadas D, E, F1 e F2 para um alcance de 200 km, serão obtidos os valores de κ apresentados na tabela 2.

	<i>esp</i> [km]	ψ [graus]	κ [km]
Camada D	40	38,65981	64,03124237
Camada E	50	45	70,71067812
Camada F1	70	68,19859	75,3923073
Camada F2	190	74,05460	197,6029827

Tabela 2 – Distância percorrida pelo sinal em cada uma das camadas da ionosfera

Verifica-se, através da leitura da tabela, que a distância percorrida pela onda aumenta da camada D para a camada F2, aumentando significativamente na camada F2, uma vez que esta camada tem uma espessura consideravelmente maior que todas as outras.

No que diz respeito ao cálculo da constante de atenuação α , tomam-se como referência, para cada camada da ionosfera, para o número de colisões ϑ e para a densidade de elétrons N_e , os valores apresentados em [1]. Esses valores estão explícitos, para as camadas da ionosfera em estudo, na tabela 3.

	N_e	ϑ
Camada D	10^{10}	10^6
Camada E	10^{11}	10^4
Camada F1	10^{12}	10^3
Camada F2	10^{12}	10^2

Tabela 3 – Valores de N_e e de ϑ para as diferentes camadas da ionosfera

Através destes valores é possível então fazer-se o cálculo da constante de atenuação em cada uma das camadas da ionosfera, para cada uma das frequências em estudo. Pela leitura da tabela 4, é possível verificar-se que a camada D é aquela que provoca uma atenuação maior no sinal emitido, sendo a camada F2 aquela que apresenta um valor menor para a constante de atenuação. É também possível de se verificar que existe uma diminuição notória e gradual da constante de atenuação de 3 MHz para 10 MHz.

α	f = 3 MHz	f = 5 MHz	f = 8 MHz	f = 10 MHz
Camada D	0,000146858	5,2964E-05	2,07018E-05	1,32511E-05
Camada E	1,47271E-05	5,30176E-06	2,071E-06	1,32544E-06
Camada F1	1,47271E-05	5,30176E-06	2,071E-06	1,32544E-06
Camada F2	1,47271E-06	5,30176E-07	2,071E-07	1,32544E-07

Tabela 4 – Constante de atenuação para as diferentes camadas da ionosfera

Calculado o valor da constante de atenuação e da distância percorrida pela onda na ionosfera, é possível então proceder-se ao cálculo da atenuação na ionosfera. Para isso, utiliza-se a expressão (2.27). Os valores da atenuação obtidos estão apresentados na tabela 5.

A_i [dB]	f = 3 MHz	f = 5 MHz	f = 8 MHz	f = 10 MHz
Camada D	0,081677687	0,029456878	0,011513695	0,007369814
Camada E	0,009045175	0,003256264	0,001271978	0,000814066
Camada F1	0,009644043	0,003471855	0,001356194	0,000867964
Camada F2	0,0025277	0,000909972	0,000355458	0,000227493

Tabela 5 – Atenuação nas diferentes camadas da ionosfera

Através da análise da tabela, é possível verificar que o valor da atenuação vai diminuindo desde a camada D até à camada F2 e que, quanto maior é o valor da frequência, menor é o valor da atenuação. O valor acaba por ser quase insignificante quando comparado com a atenuação sofrida pelo sinal em espaço livre. Para o cálculo da atenuação total na ionosfera, faz-se a soma de todas as camadas, de cada uma das frequências, e vem dada pela tabela 6.

	f = 3 MHz	f = 5 MHz	f = 8 MHz	f = 10 MHz
A_{itotal} [dB]	0,1029	0,0371	0,0145	0,0093

Tabela 6 – Atenuação total na ionosfera

Apesar de os valores serem bastante baixos, verifica-se através da análise da tabela, que há uma grande diminuição da atenuação total sofrida pelo sinal na ionosfera à medida que aumenta o valor da frequência.

3.4. Atenuação no Solo

Enquanto até agora foi apenas considerado um salto, neste subcapítulo irá ser abordada uma comunicação com dois saltos, em que o sinal se refletirá na superfície terrestre. Neste caso, tem de se considerar a atenuação sofrida pelo sinal quando é refletido no chão, considerando que é uma superfície rugosa. O esquema dessa ligação está representado na figura 20.

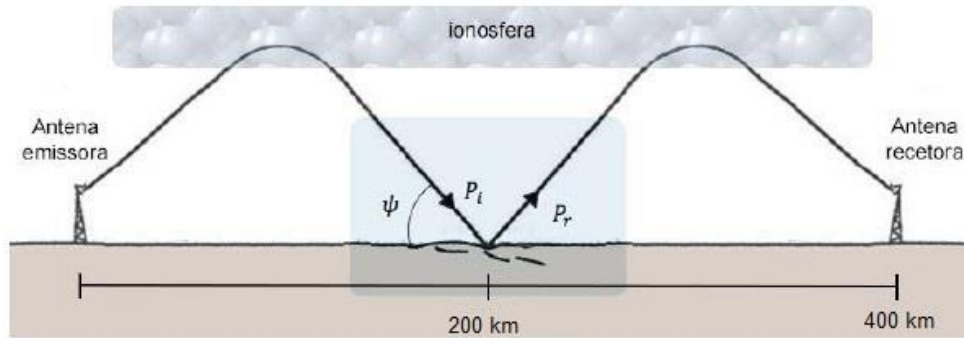


Figura 20 – Ligação com dois saltos

Neste caso em específico, a atenuação sofrida pelo sinal, ao ser refletido pela superfície terrestre, é dada pela expressão

$$A_s = |\Gamma|^2 e^{-g^2 D} \quad (3.5)$$

Em que Γ é o fator de reflexão, g é o parâmetro de Rayleigh, e D é o fator de divergência. Uma vez que se considera a utilização da aproximação à Terra plana, o valor do fator de divergência é de $D = 1$.

A polarização é definida pela polarização horizontal e pela polarização vertical, representadas na figura 21.

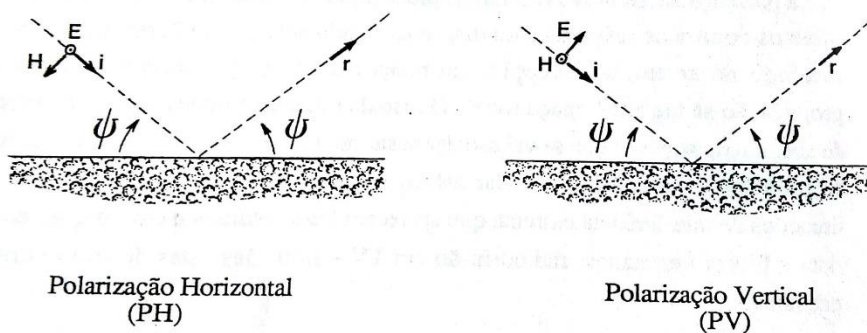


Figura 21 – Representação das polarizações (retirado de [1])

Estando as polarizações horizontal e vertical definidas pela figura acima representada, os campos refletidos vêm dados pelos “coeficientes de Fresnel” que têm como expressões

$$PH: \Gamma_h = \frac{E_{refletido}}{E_{incidente}} = \frac{\text{sen } \psi - \sqrt{n^2 - \text{cos}^2 \psi}}{\text{sen } \psi + \sqrt{n^2 - \text{cos}^2 \psi}} \quad (3.6)$$

$$PV: \Gamma_v = \frac{H_{refletido}}{H_{incidente}} = \frac{n^2 \text{sen } \psi - \sqrt{n^2 - \text{cos}^2 \psi}}{n^2 \text{sen } \psi + \sqrt{n^2 - \text{cos}^2 \psi}} \quad (3.7)$$

Em que n é dado por $\sqrt{\frac{\epsilon_s}{\epsilon_0}}$, e em que se assume que, dado que é um terreno normal, através do que está apresentado em [1], $\frac{\epsilon_s}{\epsilon_0} = 15$ e $\sigma_s = 0,005 [\Omega^{-1} \cdot m^{-1}]$. Para o valor do ângulo de fogo (ψ), assumindo que o primeiro salto tem 200 km, e considerando a altura virtual de 350 km, que representa a altura da camada F2, tem-se um valor de $\psi = 74,05460$ graus. Para estes valores, e utilizando as expressões das polarizações, chega-se à conclusão de que $|\Gamma_h| = 0,6014203$ e $|\Gamma_v| = 0,5774681$.

O valor do parâmetro de Rayleigh é calculado pela expressão

$$g = \frac{h_e}{\lambda} \text{sen} \psi \quad (3.8)$$

Em que h_e toma um valor típico de 20. Através desta expressão, obtêm-se os valores de g para as quatro frequências em estudo, representado na tabela 7.

	f = 3 MHz	f = 5 MHz	f = 8 MHz	f = 10 MHz
λ [metros]	100	60	37,5	30
g	0,192305	0,320508	0,512813	0,641016

Tabela 7 – Valores de g

Por fim, é possível calcular os valores da atenuação, para a polarização horizontal e para a polarização vertical, representados na tabela 8, em unidades lineares e em dB's.

A_{solo}	$f = 3 \text{ MHz}$		$f = 5 \text{ MHz}$		$f = 8 \text{ MHz}$		$f = 10 \text{ MHz}$	
	lineares	[dB]	lineares	[dB]	lineares	[dB]	lineares	[dB]
PH	0,348574	4,57	0,3263947	4,86	0,2780652	5,56	0,2398303	6,20
PV	0,321363	4,93	0,3009143	5,22	0,2563577	5,91	0,2211076	6,55

Tabela 8 – Atenuação no solo

Através da análise da tabela é possível verificar-se que, quanto maior a gama de frequências, maior é a atenuação provocada pela superfície terrestre. Também é possível verificar que a polarização vertical tem um maior impacto na atenuação do que a polarização horizontal, ainda que esta diferença de valores seja relativamente baixa.

3.5. Atenuação Total

Neste capítulo será calculada a atenuação total para as duas situações estudadas anteriormente – para o caso em que há um salto na ligação e para o caso em que existem dois saltos na ligação.

Para o caso em que existe apenas um salto, é considerada a atenuação em espaço livre e a atenuação sofrida quando o sinal reflete na ionosfera. Para esta situação, a expressão que dá a atenuação total é dada pela expressão

$$A_{total \ 1 \ salto} = A_0 + A_{i \ total} \quad (3.9)$$

Os valores da atenuação total, no caso de haver apenas um salto, vêm apresentados, para as quatro frequências analisadas, na tabela 9.

	f = 3 MHz	f = 5 MHz	f = 8 MHz	f = 10 MHz
$A_{total\ 1\ salto}$ [dB]	99,39	103,76	107,82	109,75

Tabela 9 – Atenuação total de um salto

Já para o caso em que existem dois saltos na ligação, é considerada a atenuação em espaço livre para uma distância de 400 km, a atenuação sofrida pelo sinal quando reflete na superfície terrestre, para a polarização horizontal e para a polarização vertical, e a atenuação sofrida pelo sinal quando reflete na ionosfera, duas vezes. A expressão que dá a atenuação total sofrida pelo sinal, neste caso em particular, é dada por

$$A_{total\ 2\ saltos} = A_0 + 2A_{i\ total} + A_{solo} \quad (3.10)$$

Os valores da atenuação total, no caso de haver uma ligação com dois saltos, vêm dados, para as quatro frequências analisadas, na tabela 10.

	f = 3 MHz		f = 5 MHz		f = 8 MHz		f = 10 MHz	
	PH	PV	PH	PV	PH	PV	PH	PV
$A_{total\ 2\ saltos}$ [dB]	203,19	203,55	211,93	212,29	220,05	220,41	223,92	224,27

Tabela 10 – Atenuação total de dois saltos

Através da leitura da tabela, é possível verificar que gamas de frequência mais baixas proporcionam valores de atenuação mais baixas. Como tal, é benéfico fazer uma ligação nessas gamas de frequências.

Seria ainda possível fazer o cálculo para ligações em que existissem mais que dois saltos, no entanto, visto que estamos a usar curtas distâncias para fazer comunicações, é extremamente improvável que possam haver mais que dois saltos numa só ligação.

Cap. 4 – Antenas NVIS

Como já foi referido anteriormente, uma das particularidades da ionosfera é a sua capacidade para refletir ondas de rádio. Contudo, apenas ondas numa certa gama de frequências conseguem ser refletidas e esta gama depende de um conjunto de fatores, entre eles a altura do dia, do ano, a atividade do sol, o tipo de antena utilizado, o ruído e a absorção atmosférica. As antenas NVIS são um dos tipos de antenas que fornece grande parte da sua radiação a um ângulo extremamente elevado, o que permite uma comunicação omnidirecional excelente. O axioma usado em relação às antenas, “quanto mais alto, melhor”, é verdadeiro para estações bastante distantes umas das outras, uma vez que, geralmente, as antenas que são instaladas a alturas maiores tendem a ter a sua energia radiada a um menor ângulo, o que permite a comunicação a nível mundial numa gama de frequências entre os 14 e os 28 MHz.

Contudo, se for necessário fazer comunicações fiáveis que precisem de percorrer uma distância de apenas algumas dezenas ou centenas de quilómetros, a resposta não passa por usar *groundwaves* nem aumentar a potência de transmissão, instalar repetidores ou outras medidas mais drásticas. A solução passa por usar antenas NVIS, selecionar frequências de operação apropriadas, e torna-se possível fazer comunicações de confiança até 320 km de distância.

4.1. Seleção das Antenas

Selecionar uma antena para propagação NVIS é algo complexo. Primeiro, é necessário estabelecer a distância a que se quer fazer a comunicação para que o ângulo de fogo apropriado seja escolhido.

De seguida, é necessário determinar a cobertura necessária. Uma ligação de rádio com estações móveis ou diversas estações em diferentes direções do transmissor requer antenas omnidirecionais. Uma ligação ponto a ponto usa uma antena bidirecional ou direcional.

Antes de selecionar uma antena em específico, é necessário analisar os materiais para construir a mesma. Para além disso, é necessário examinar o sítio proposto para

alocar a antena. Se não for possível fazer a montagem no sítio escolhido, deve escolher-se outro local.

Geralmente, num ambiente militar, a situação tática determina a posição das antenas. O local ideal seria uma área livre e plana, isto é, sem árvores, edifícios, linhas de alta tensão ou montanhas. Infelizmente, um local desses raramente está disponível. Deve escolher-se então uma área o mais livre e plana possível. Se não houver um local destes, deve tentar manter-se a distância horizontal apresentada na tabela 11, assumindo-se uma antena instalada a uma altura de aproximadamente 10 metros e árvores com uma altura aproximada de 23 metros.

Ângulo de fogo [graus]	Distância horizontal a que a antena deve estar das árvores [metros]
0	18000
10	966
20	483
30	298
40	201
50	145
60	105
70	64
80	32
90	0

Tabela 11 – Distância horizontal mediante o ângulo de fogo

Após a seleção da antena, deve estudar-se a forma como a mesma será alimentada. A maior parte das antenas táticas são alimentadas através de um cabo coaxial.

4.2. Ganho da Antena

Para determinar o ganho de uma antena a um ângulo de fogo específico, a figura 22 apresenta um diagrama de radiação vertical da antena que permite o cálculo do mesmo. Os números ao longo do anel representam o ângulo de fogo em relação à Terra, sendo que os 90 graus dizem respeito a um ângulo na vertical, e os 0 graus representam um ângulo paralelo à superfície terrestre. Na zona inferior do diagrama estão representados

números de -10 (ao centro) até +15 (nos extremos). Estes valores representam o ganho da antena em dBi.

Para encontrar o ganho da antena numa certa frequência e ângulo de fogo, deve achar-se o ângulo de fogo desejado no gráfico. De seguida, segue-se essa linha em direção ao centro do gráfico, até encontrar o diagrama da frequência desejada.

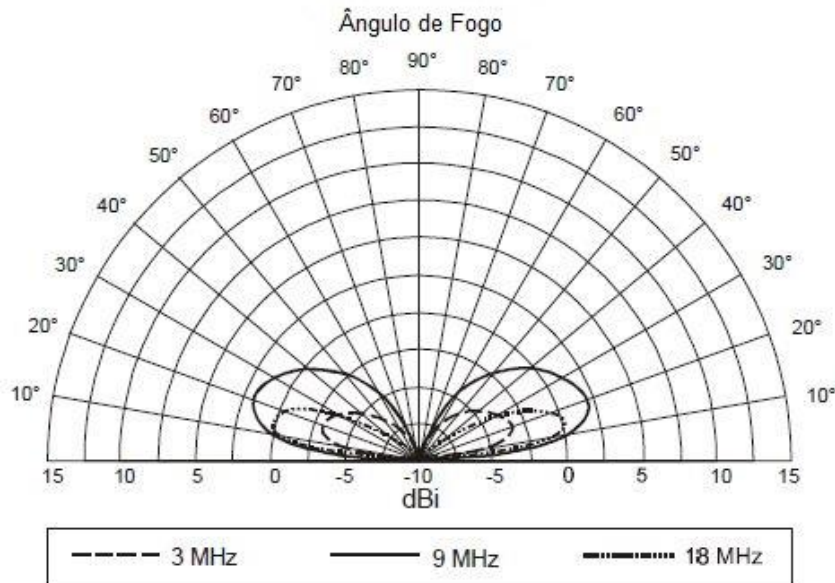


Figura 22 – Exemplo de um diagrama de radiação

A título de exemplo, se se desejar um ângulo de fogo de 40 graus, para uma frequência de 9 MHz, o ganho da antena é de 0 dBi.

4.3. Tipos de Antenas

Após todas as características da antena serem determinadas, deve escolher-se a antena necessária para a ligação. Na tabela 12 estão apresentados os vários tipos de antenas de possível utilização em ligações NVIS, bem como as suas características.

Antena	Diretividade		Polarização		Largura de Banda	
	Omnidirecional	Bidirecional	Horizontal	Vertical	Larga	Estreita
AS-2259/GR	X		X	X	X	
Dipolo de meia-onda		X	X			X
V invertido		X	X	X		X
L invertido		X	X	X		X

Tabela 12 – Antenas compatíveis com as características de uma ligação NVIS

4.3.1. Antena AS-2259/GR

A antena AS-2259/GR é a antena mais utilizada por militares, e proporciona propagação NVIS para ligações de curtas distâncias. A sua montagem consiste em dois dipolos inclinados e cruzados, posicionados num certo ângulo, e é suportada, ao centro, por um mastro de aproximadamente 4 metros. Aquando do seu uso, os componentes do dipolo fornecem suporte de orientação para o mastro. Uma montagem desta antena está representada na figura 23.

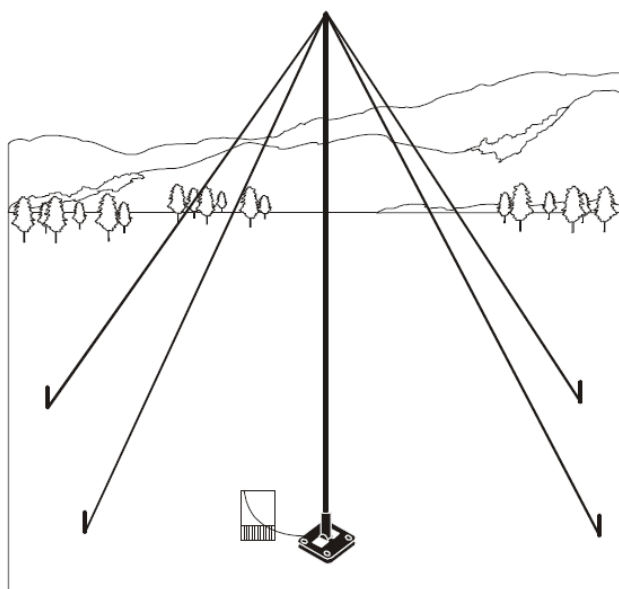


Figura 23 – Exemplo de montagem de uma antena AS-2259/GR (retirado de [4])

A sua gama de frequências varia entre os 2 e os 30 MHz, tem uma polarização simultaneamente horizontal e vertical, uma capacidade de potência de 1000 watts e uma diretividade omnidirecional. O seu diagrama de radiação vem apresentado na figura 24.

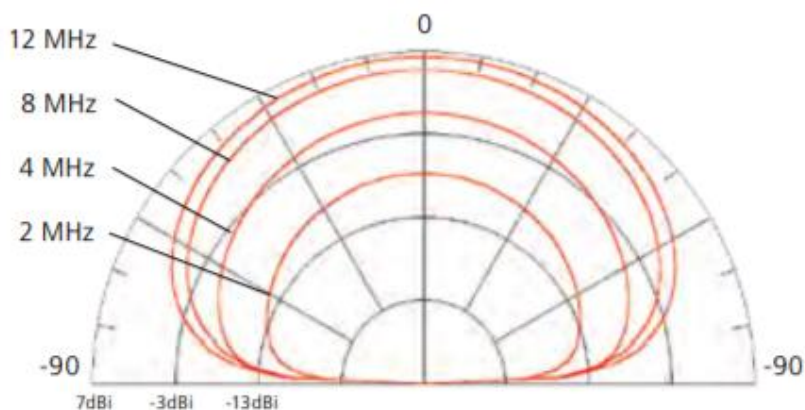


Figura 24 - Diagrama de radiação da antena AS-2259/GR (Harris RF1936)

4.3.2. Dipolo de meia-onda

O dipolo horizontal de meia-onda é usado em curtas e médias distâncias. Uma vez que é relativamente fácil de construir, esta é a antena mais comumente utilizada. É uma antena bastante versátil, e ajustando a altura da mesma em relação ao chão, o seu ganho máximo varia entre ângulos de fogo médios (para médias distâncias) e ângulos de fogo altos (para curtas distâncias). Quando esta antena é construída para uma altura de metade do comprimento de onda, acaba por ser uma antena bidirecional. A figura 25 apresenta o diagrama de radiação da antena nesse caso (bidirecional), onde A representa o diagrama para a zona central da antena, e B representa o diagrama de radiação para os extremos da antena.

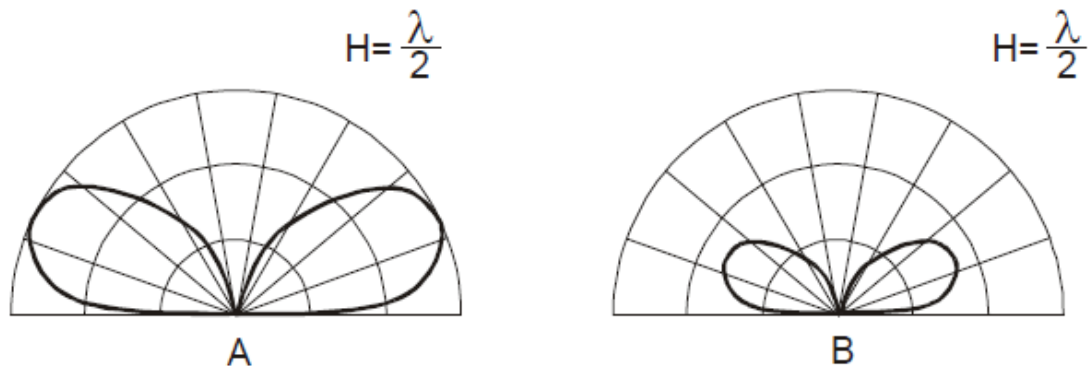


Figura 25 – Exemplo do diagrama de radiação de um dipolo de meia-onda montado à altura $\frac{\lambda}{2}$ (retirado de [4])

Comparando estes dois diagramas de radiação, é facilmente visto que, para um ganho máximo, um dipolo de meia-onda deve ser construído para que os lados da antena apontem na direção da estação com que querem comunicar.

Para o caso em que a antena seja montada a uma altura de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, o resultado do seu diagrama de radiação está apresentado na figura 26, no gráfico C. Esta antena de altura mais baixa produz um ganho máximo para ângulos de fogo altos. O gráfico D, que mostra o diagrama de radiação para os extremos do dipolo, também tem um ganho máximo para ângulos de fogo altos. Isto significa que, para ligações de curtas distâncias, que requerem ângulos de fogo elevados, um dipolo montado a uma altura de $\frac{1}{4}$ do seu comprimento de onda produz uma cobertura quase omnidirecional.

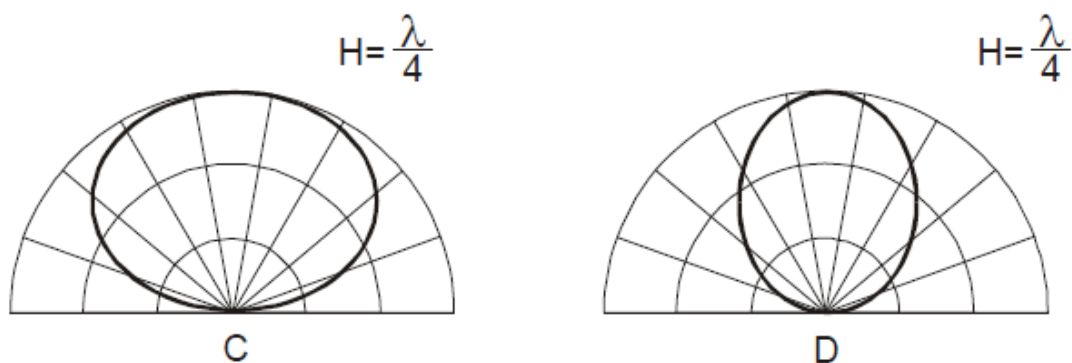


Figura 26 - Exemplo do diagrama de radiação de um dipolo de meia-onda montado à altura $\frac{\lambda}{4}$ (retirado de [4])

O dipolo de meia-onda é uma antena de ressonância equilibrada, e um exemplo da sua montagem está apresentado na figura 27. Esta antena consiste em dois condutores de $1/4$ do comprimento de onda, colocados de ponta a ponta, obtendo um tamanho total de metade com comprimento de onda.

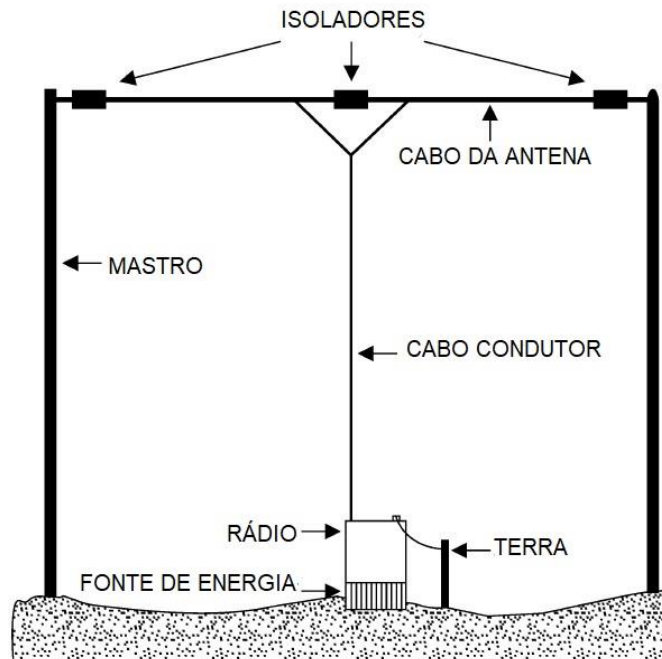


Figura 27 – Exemplo de montagem de um dipolo de meia-onda (adaptado de [4])

Esta antena produz um ganho máximo para uma gama de frequências muito estreita, normalmente 2% acima ou abaixo da sua frequência de operação. Uma vez que as frequências atribuídas estão separadas por alguns MHz, é necessário que se construa um dipolo separado para cada frequência atribuída. Como tal, nas figuras 28, 29 e 30 estão apresentados os diagramas de radiação para dipolos de 8, 10 e 12 metros, respetivamente obtidos através do *software* MMANA-GAL.

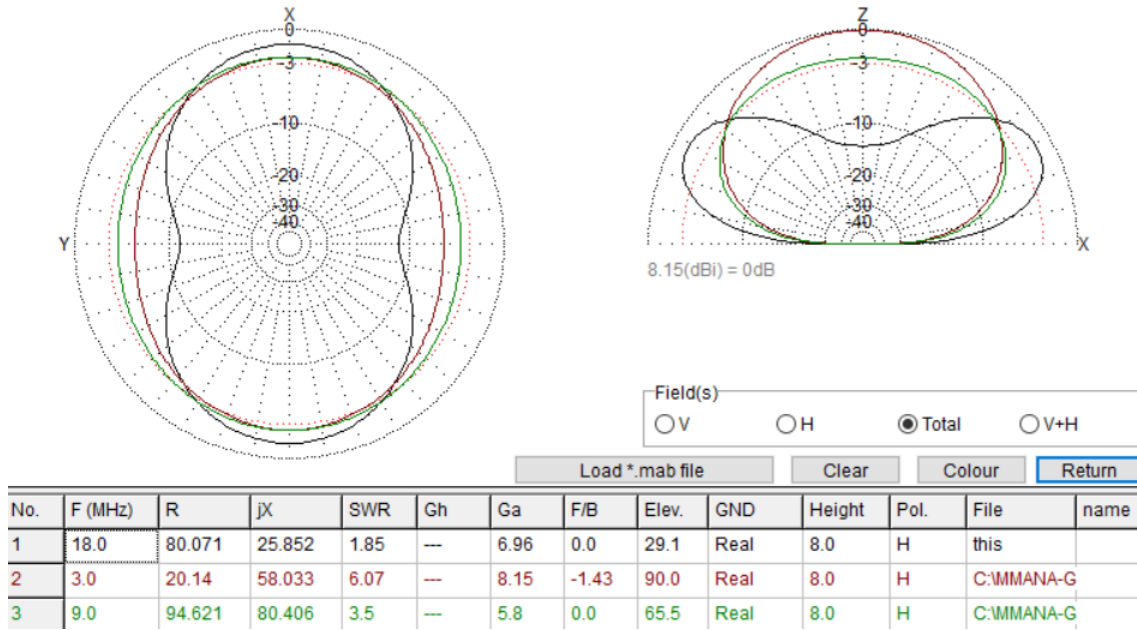


Figura 28 – Comparação dos diagramas de radiação de um dipolo montado a 8 metros de altitude

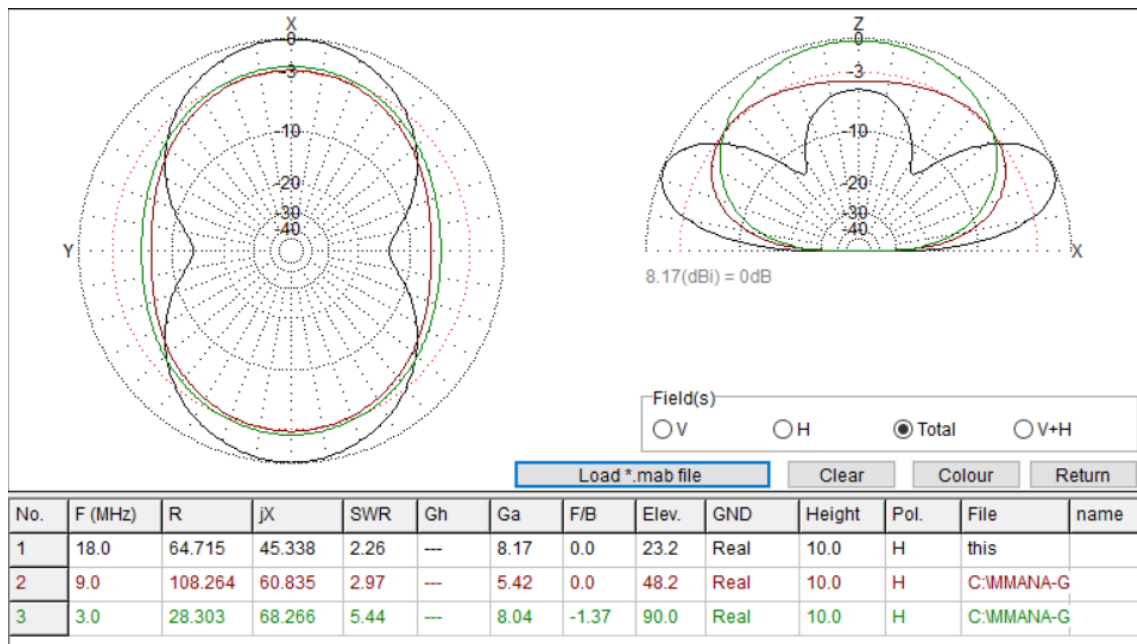


Figura 29 - Comparação dos diagramas de radiação de um dipolo montado a 10 metros de altitude

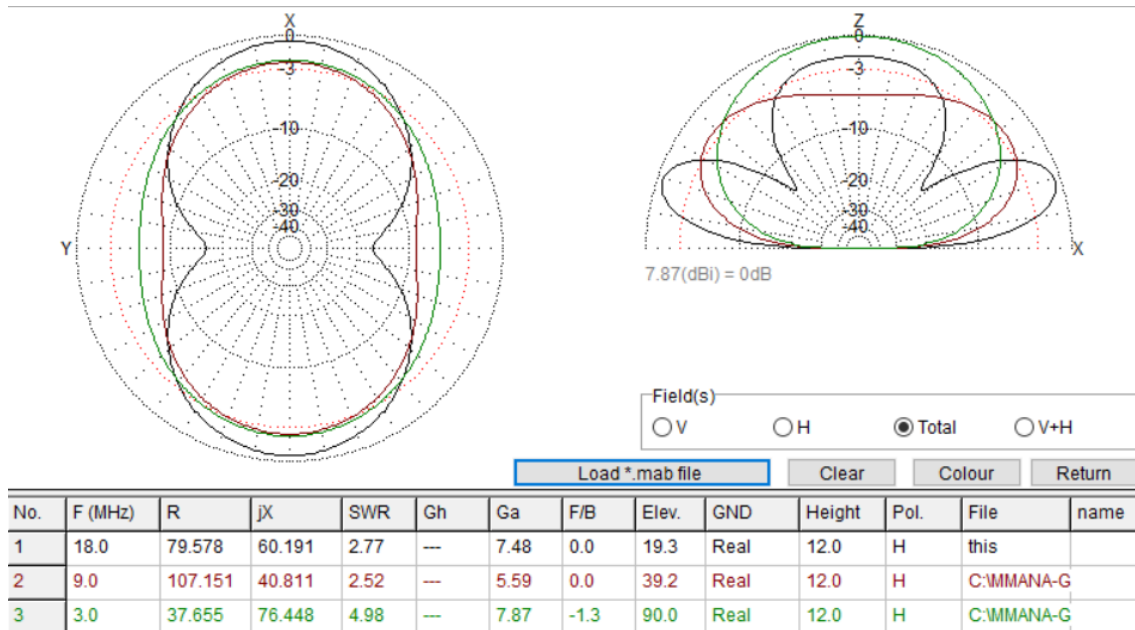


Figura 30 - Comparação dos diagramas de radiação de um dipolo montado a 12 metros de altitude

Se não houver espaço ou recursos disponíveis para construir dipolos separados, podem combinar-se três ou quatro para ocuparem o espaço normalmente necessário para construir um.

Na figura 27 pode observar-se que os dipolos estão ligados ao mesmo isolador central, e são alimentados por um único cabo coaxial. Quando a antena é alimentada por uma designada frequência, o dipolo correspondente a essa frequência é que irá radiar a potência. Desta maneira, podem ser combinados até 4 dipolos. Na construção da antena, deve ser examinada a frequência individual designada para determinar se uma frequência é três vezes maior que a outra. Se esta relação se verificar entre duas frequências, um dipolo cortado em comprimento para a menor das duas frequências irá funcionar bem para ambas as frequências.

O comprimento de um dipolo de meia-onda é calculado através da expressão

$$\text{Comprimento do dipolo} = \frac{\lambda}{2} = \frac{3 \times 10^8}{f} / 2 \quad (4.1)$$

Já a altura do dipolo de meia-onda, para um tamanho do dipolo de $1/4$ do comprimento de onda, é dada por

$$\text{Altura do dipolo} = \frac{3 \times 10^8}{f} / 4 \quad (4.2)$$

E para um tamanho de $1/2$ do comprimento de onda, é dada por

$$\text{Altura do dipolo} = \frac{3 \times 10^8}{f} / 2 \quad (4.3)$$

4.3.3. V invertido

A antena de V invertido é semelhante ao dipolo, mas utiliza apenas um único suporte ao centro, tal como apresentado na figura 31.

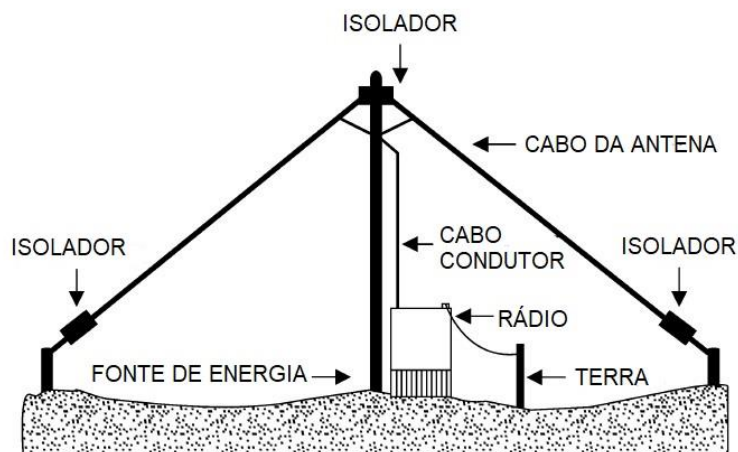


Figura 31 – Exemplo de montagem de uma antena em V invertido (adaptado de [4])

Tal como o dipolo, esta antena é desenhada para uma frequência específica e tem uma largura de banda de cerca de 2% acima ou abaixo da frequência de design. Devido aos seus lados inclinados, esta antena produz uma combinação de radiação horizontal e

vertical – horizontal junto aos bordos da antena e vertical nos extremos. Todos os fatores de construção do dipolo também se aplicam à antena em V invertido. Apesar do V invertido ter um ganho menor quando comparado com o dipolo, ao usar apenas um suporte, faz com que esta antena seja a preferida para algumas situações táticas. Tem uma capacidade de potência de 1000 watts, a sua radiação é basicamente omnidirecional, com uma polarização combinada, e o seu diagrama de radiação está apresentado na figura 32, obtido através do *software* MMANA-GAL.

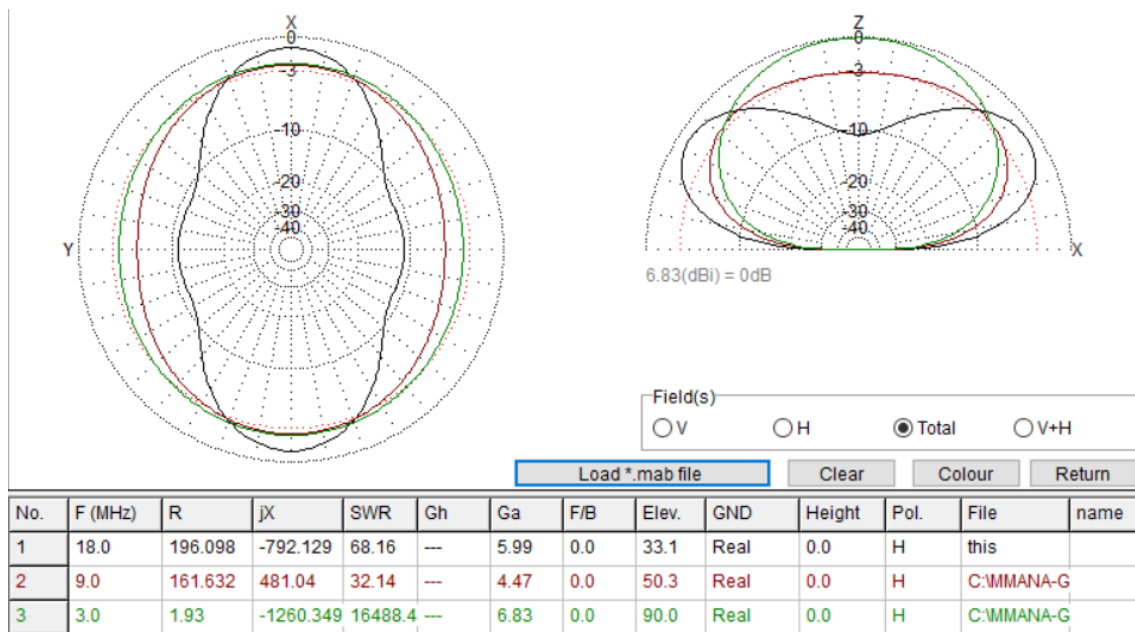


Figura 32 - Comparação dos diagramas de radiação de um V invertido

4.3.4. L invertido

A antena em L invertido é uma combinação entre uma secção horizontal e uma secção vertical, tal como apresentado na figura 33.

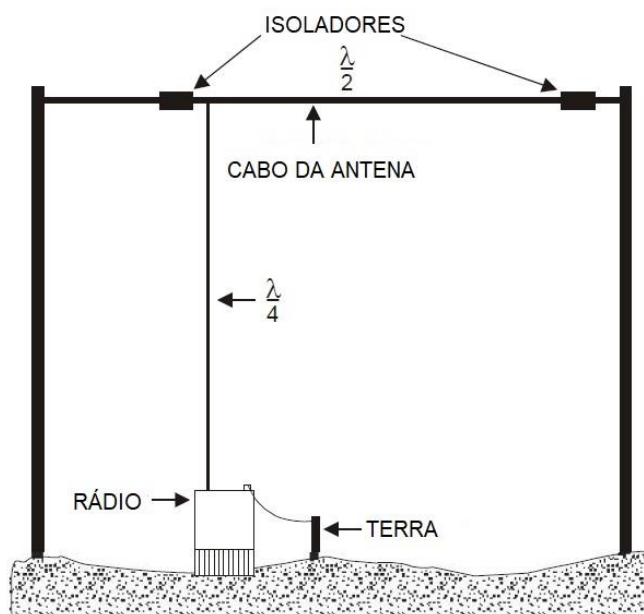


Figura 33 – Exemplo de montagem de uma antena em L invertido (adaptado de [4])

Esta antena proporciona uma radiação omnidirecional para propagação *groundwave* através do seu elemento vertical e radiação a um ângulo alto pelo seu elemento horizontal, para propagação *skywave* a curtas distâncias. A antena em L invertido clássica tem uma secção vertical de um quarto de onda e uma secção horizontal de meia-onda de comprimento, sendo utilizada para uma gama muito curta de frequências. Ao utilizar-se os acopladores da antena, as dimensões do L invertido podem ser modificadas para que permitam propagação *groundwave* e *skywave* dentro de uma determinada gama de frequências. Adaptando a antena para uma altura entre 10 e 12 metros, a tabela 13 apresenta o comprimento para o seu elemento horizontal que proporciona uma performance razoável para ligações *skywave* de curtas distâncias.

Gama de Frequências [MHz]	2,5 - 4,0	3,5 - 6,0	5,0 - 7,0
Comprimento do elemento horizontal [metros]	45,72	30,48	24,38

Tabela 13 – Comprimento do elemento horizontal do L invertido em função da frequência

Deve orientar-se a antena como um dipolo, ou seja, o lado mais amplo da mesma deve estar virado para a estação com que se quer comunicar. Os comprimentos do

elemento horizontal apresentados na tabela 13 não deverão ser utilizados fora das gamas de frequências apresentadas, uma vez que o diagrama de radiação da antena muda, e para frequências muito distantes da sua gama, a antena torna-se direcional na zona próxima dos extremos. A antena em L invertido pode ser utilizada como substituta do dipolo, contudo, tem um ganho inferior ao mesmo, e o seu diagrama de radiação varia com a frequência. As figuras 34, 35 e 36 apresentam os diagramas de radiação de antenas em L invertido, para comprimentos de cabos diferentes, obtidos através do *software* MMANA-GAL.

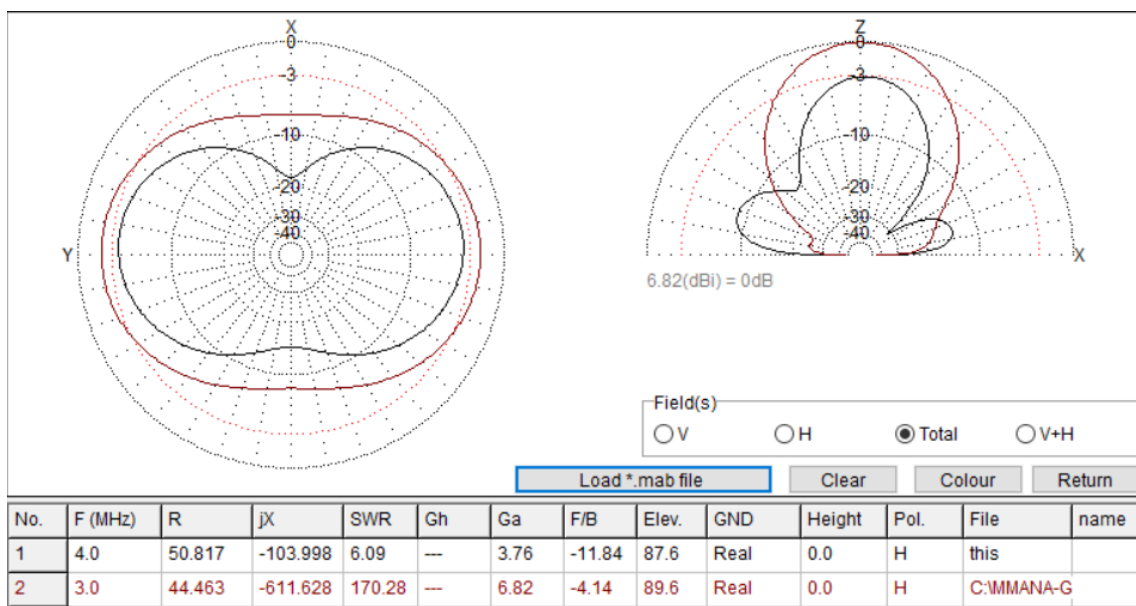


Figura 34 - Comparação dos diagramas de radiação de um L invertido de 45,72 metros

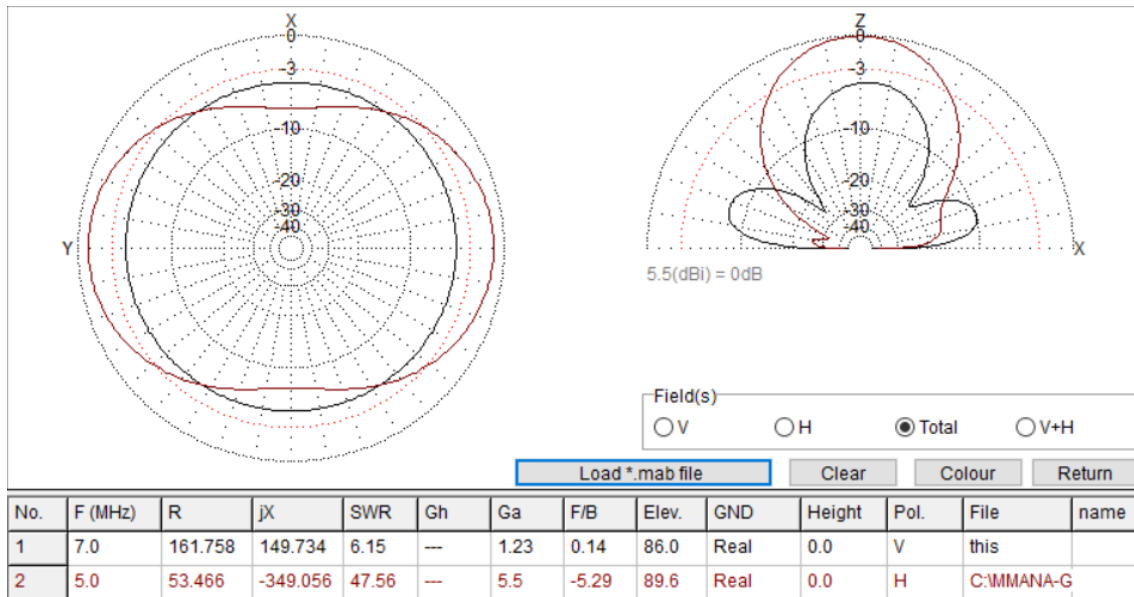


Figura 35 - Comparação dos diagramas de radiação de um L invertido de 24,38 metros

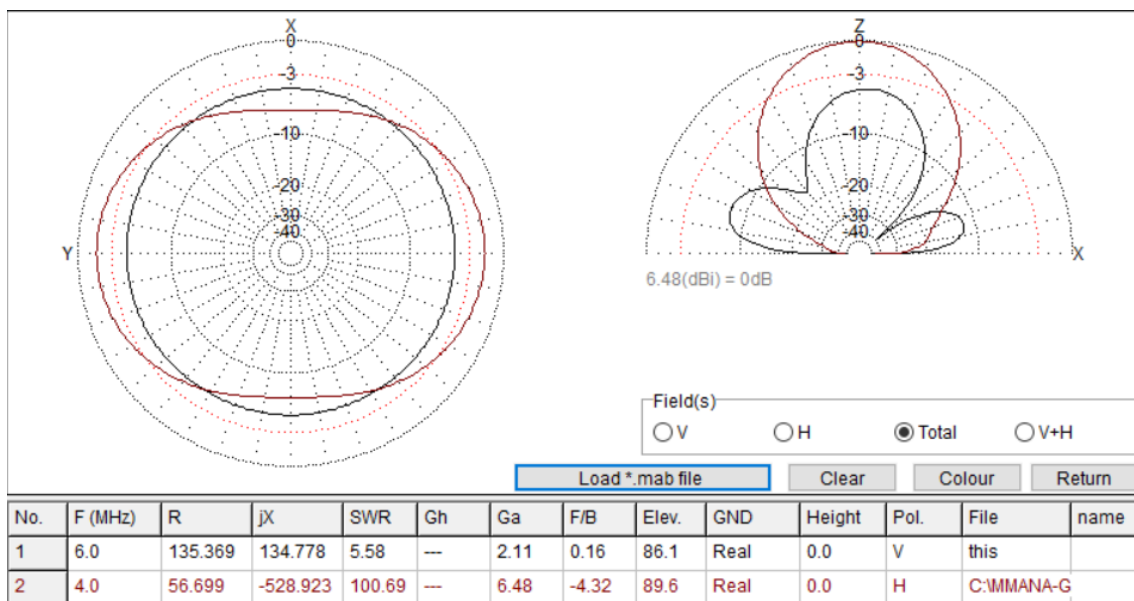


Figura 36 - Comparação dos diagramas de radiação de um L invertido de 30,48 metros

4.4. Escolha e estudo teórico da antena transmissora

Apesar de terem sido apresentados 4 tipos de antenas compatíveis com propagação NVIS, as antenas AS-2259/GR e o dipolo de meia-onda são as únicas antenas que vão ao encontro de todos os requisitos da comunicação NVIS. Enquanto têm um ângulo de fogo bastante alto, as antenas em V e L invertido apresentam também uma

grande radiação *groundwave*, que pode interferir com as comunicações NVIS. Estas antenas serão utilizadas apenas em situações em que a proteção oferecida pelo terreno previna a interferência de radiação *groundwave* até à estação com a qual se pretende comunicar. Como tal, para garantir que a ligação não possa ser afetada por radiação *groundwave*, vai ser estudado um dipolo de meia-onda horizontal para fazer a transmissão do sinal e a antena AS-2259/GR servirá como antena recetora.

A figura 37 representa um dipolo de meia-onda e a distribuição de corrente do mesmo, dada pela expressão

$$I(z) = I_m \cos(\beta z) \quad (5.1)$$

Em que β representa a constante de fase associada à linha de transmissão a partir da qual foi desenhada a distribuição de corrente. Uma vez que se está em espaço livre, $\beta = \omega/c = k$.

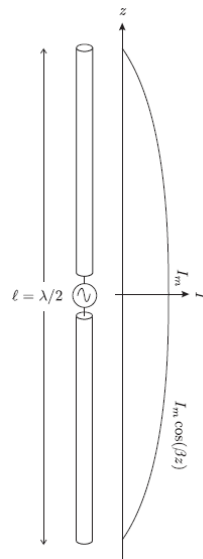


Figura 37 – Distribuição de corrente num dipolo de meia-onda

Sabendo a expressão da distribuição de corrente, o campo elétrico produzido pelo dipolo na zona distante é dado pela expressão

$$E_{\theta} = \frac{I\Delta z j\omega\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \sin \theta \quad (5.2)$$

Se for excitado por um elemento de corrente de amplitude I na sua origem. Usando sobreposição, pode representar-se um dipolo de meia-onda como um conjunto de dipolos Hertzianos e, assim, aumentar a resposta de cada um dos dipolos. Então, cada dipolo vai contribuir para o valor do campo elétrico, como apresenta a seguinte expressão

$$dE_{\theta} = \frac{I(z')dz' j\omega\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} \sin \theta \quad (5.3)$$

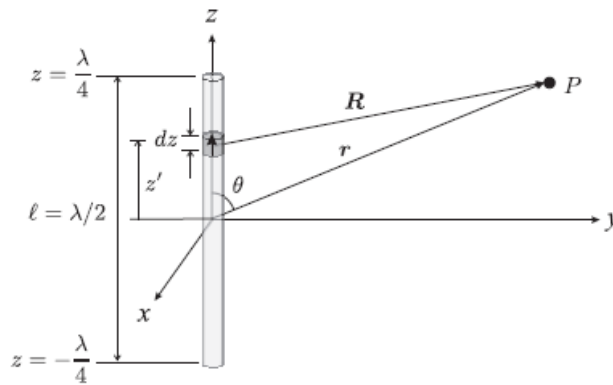


Figura 38 – Diagrama de um dipolo de meia-onda

A figura 38 aplica-se a um caso em que o ponto P está relativamente próximo da origem. Para o caso em que esteja na zona distante, este diagrama não está verdadeiramente correto, uma vez que, se o ponto P estiver muito longe da origem, os vetores \vec{R} e \vec{r} acabam por se tornar paralelos. Esta aproximação é chamada aproximação do raio paralelo. Tendo esta aproximação em conta, $\frac{1}{R} \approx \frac{1}{r}$ para variações de amplitude, e $\exp(-jkR) \approx \exp[-jk(r - z' \cos \theta)]$ para variações de fase, deduções que são verificáveis através da análise da geometria da zona distante, nesta situação. Então,

$$dE_{\theta} = \frac{I(z')dz' j\omega\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} e^{-jkz' \cos \theta} \sin \theta \quad (5.4)$$

Resultando daqui a expressão

$$E_{\theta} = \int_{z'=-\lambda/4}^{z'=\lambda/4} \frac{I(z') dz' j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} e^{-jkz' \cos \theta} \sin \theta dz' \quad (5.5)$$

Que, fazendo o desenvolvimento, se apresenta como

$$E_{\theta} = \frac{j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \int_{z'=-\lambda/4}^{z'=\lambda/4} I_m \cos(\beta z) e^{-jkz' \cos \theta} \sin \theta dz' \quad (5.6)$$

A figura 39 apresenta um diagrama correto para o caso da zona distante. Através do desenvolvimento da expressão (5.4), chega-se à expressão

$$E_{\theta} = \frac{j\omega\mu I_m e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \cdot 2 \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\beta \sin(\theta)^2} \quad (5.7)$$

Uma vez que $\beta = k$, e $\omega\mu/k = \eta$, obtêm-se as expressões (5.6) e (5.7), que expressam o campo elétrico e o campo magnético, respetivamente.

$$E_{\theta} = \frac{j\eta I_m e^{-jkr}}{2\pi r} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \quad (5.8)$$

$$H_{\phi} = \frac{E_{\theta}}{\eta} = \frac{j I_m e^{-jkr}}{2\pi r} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \quad (5.9)$$

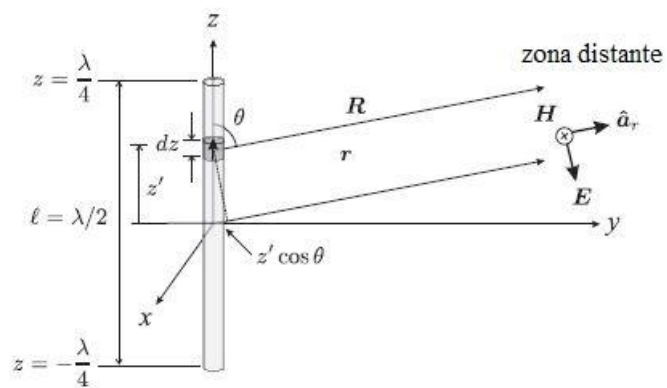


Figura 39 – Diagrama de um dipolo de meia-onda para zona distante

5. Ligação NVIS ANPC-Pedrógão Grande

Como já foi referido anteriormente, a propagação NVIS é simplesmente propagação *skywave* que usa ângulos de fogo bastante elevados e opera a baixas frequências. Tal como a seleção adequada de antenas pode aumentar a fiabilidade de ligações de longas distâncias, também as ligações de curtas distâncias requerem uma seleção de antenas apropriada.

As antenas usadas na propagação NVIS devem ter ângulos de fogo bastante elevados (entre 60° e 90°) para radiar o sinal quase verticalmente. O sinal é depois disso refletido da ionosfera e volta à Terra. Devido ao seu ângulo de radiação quase vertical, não há zona de salto. As comunicações são contínuas em centenas de quilómetros, e o ângulo quase vertical significa também que deverão ser utilizadas gamas de frequências baixas, normalmente, até um máximo de aproximadamente 10 MHz. Para garantir resultados mais fiáveis, o estudo da ligação feito neste capítulo varrerá uma gama de frequências entre 3 e 8 MHz.

As subidas e descidas íngremes na propagação do sinal dão ao operador a habilidade de comunicar através de montanhas ou vegetação densa. Por exemplo, em situações de combate, um vale pode dar ao operador proteção de interceção hostil e proteger a ligação de interferência de ondas *groundwave* e *skywave* de longas distâncias. As antenas NVIS precisam de um ângulo de radiação alto com muito pouca radiação *groundwave*. A figura 38 apresenta um exemplo de comunicações NVIS.

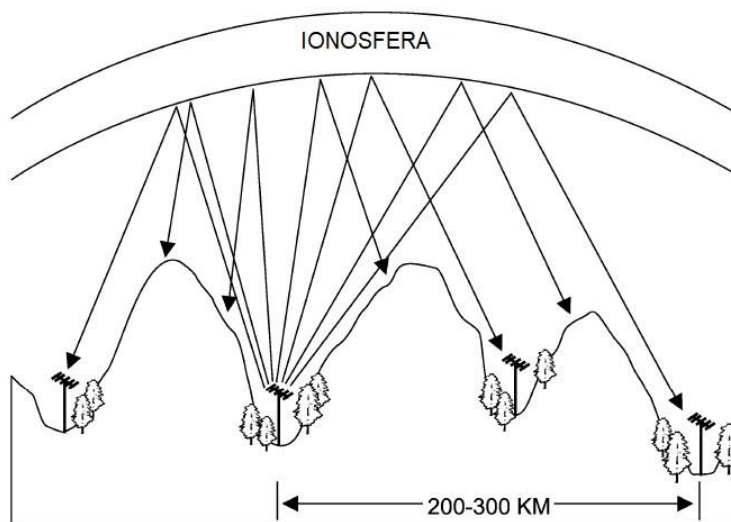


Figura 40 – Demonstração de uma comunicação NVIS (adaptado de [4])

5.1. Cálculo da Sensibilidade na Ligação

Na figura 39 é apresentada a ligação entre a Autoridade Nacional de Proteção Civil, na Amadora, e o quartel dos Bombeiros Voluntários de Pedrógão Grande, e na figura 40 é apresentado o perfil dessa mesma ligação, obtido através do *software Google Earth*. A altura, em relação ao nível do mar, do ponto escolhido na ANPC, é de 99 metros, e do ponto escolhido nos Bombeiros Voluntários de Pedrógão Grande, é de 376 metros de altura. A distância entre os dois pontos da ligação é de 163 quilómetros, e a altura máxima de um obstáculo em todo o trajeto é de 451 metros, altura que não apresentará dificuldades a uma comunicação NVIS.

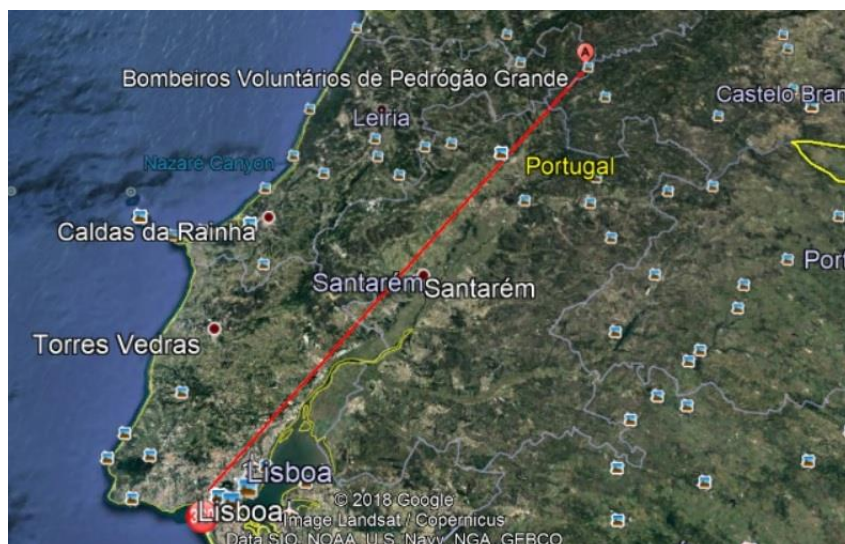


Figura 41 – Ligação APNC – BV Pedrógão Grande obtida através do Google Earth



Figura 42 – Perfil da ligação APNC – BV Pedrógão Grande obtido através do Google Earth

Na tabela 14 são apresentados os dados detalhados da ligação.

ANPC (Amadora)		BV Pedrógão Grande	
Latitude	38°43'13.49"N	Latitude	39°12'46,85"N
Longitude	9°14'07.24"O	Longitude	8°46'09,77"O
Altura da antena [m]	-	Altura da antena [m]	4
Altura em relação ao nível do mar [m]	99	Altura em relação ao nível do mar [m]	369
Distância entre pontos [m]		163000	

Tabela 14 – Caraterísticas da ligação ANPC – BV Pedrógão Grande

Para estabelecer a ligação entre estes dois pontos através de propagação NVIS, será utilizada a antena mais comumente utilizada, o dipolo de meia-onda, para a gama de frequências definida anteriormente ([3; 8] MHz).

Primeiramente, terá de ser calculado o ângulo de fogo com que será enviado o sinal. A figura 41 ilustra o gráfico que permite fazer o cálculo do mesmo.

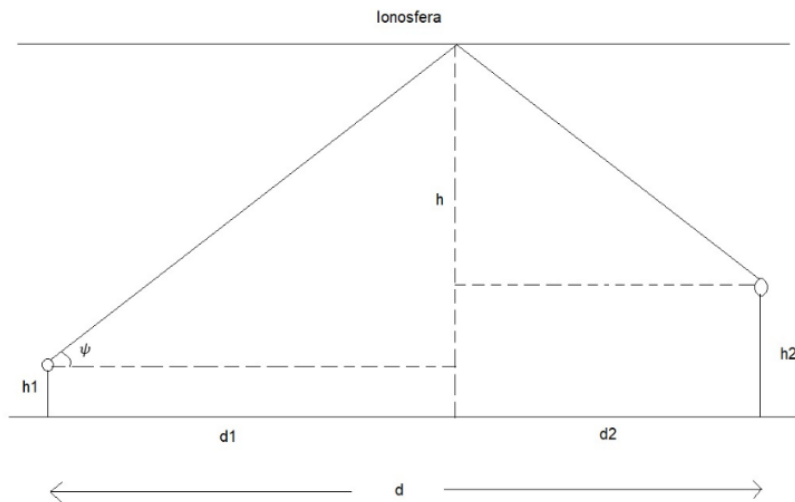


Figura 43 – Ângulo de fogo da ligação ANPC–Pedrógão Grande

Em que $d = d_1 + d_2 = 163000 \text{ m}$, $h_1 = 99 \text{ m}$, $h_2 = 373 \text{ m}$ e $h = 350000 \text{ m}$, que é a altura virtual da camada F2, altura a que o sinal emitido deverá ser refletido pela ionosfera. A partir daqui serão calculados os valores de d_1 , d_2 e ψ . Para tal, através da análise da figura, chega-se à expressão

$$\frac{h - h_2}{d_2} = \frac{h - h_1}{d_1} = \tan \psi \quad (5.1)$$

Da qual resulta

$$\frac{h - h_2}{d - d_1} = \frac{h - h_1}{d_1} \quad (5.2)$$

Chegando-se ao valor $d_1 = 81531,46 \text{ m}$ e $d_2 = 81468,54 \text{ m}$. Daqui, retira-se que o valor do ângulo de fogo é $\psi = 76,2232$ graus, ângulo com um valor bastante aceitável para uma comunicação NVIS. A distância percorrida pelo sinal nesta ligação é de $d = 718,727 \text{ km}$.

Seguidamente, serão calculadas as atenuações em espaço livre e pela ionosfera sofridas pelo sinal. A atenuação em espaço livre sofrida pelo sinal nesta ligação é dada na tabela 15.

Frequência [MHz]	3	4	5	6	7	8
A_0 [dB]	99,11	101,61	103,55	105,13	106,47	107,63

Tabela 15 – Atenuação em espaço livre na ligação ANPC – BV Pedrogão Grande

Já a atenuação sofrida pelo sinal na ionosfera é apresentada na tabela 16.

Frequência	3	4	5	6	7	8
A_{itotal} [dB]	0,093	0,008	0,002	0,0009	0,017	0,013

Tabela 16 – Atenuação exercida pela ionosfera na ligação ANPC – BV Pedrogão Grande

A soma destas duas tabelas dá-nos a atenuação total sofrida pelo sinal na ligação entre a ANPC e os BV de Pedrogão Grande, que está apresentada na tabela 17.

Frequência	3	4	5	6	7	8
$A_{total \text{ ligação}}$ [dB]	99,21	101,62	103,55	105,14	106,49	107,65

Tabela 17 – Atenuação total da ligação ANPC – BV Pedrogão Grande

O passo seguinte passa por verificar se a potência de emissão a ser alimentada na antena transmissora, permite fazer uma comunicação viável e de boa qualidade. Esse valor pode ser calculado, através da fórmula de Friis, dada pela expressão

$$P_{r[dBm]} = P_{t[dBm]} - A_{t[dB]} + G_{t[dBi]} + G_{r[dBi]} \quad (5.3)$$

Como tal, terão de ser calculados os valores dos ganhos das antenas, bem como da sensibilidade do recetor. Como antena de receção, admite-se a utilização de uma antena AS-2259/GR (*Harris RF1936*). Para esta antena, os ganhos da mesma estão apresentados no diagrama de radiação apresentado na figura 23.

Na tabela 18 estão apresentados os valores do ganho da antena de receção, calculados com recurso ao seu diagrama de radiação.

Frequência [MHz]	3	4	5	6	7	8
Ganho da Antena [dBi]	-12	-9	-8	-7	-6	-4

Tabela 18 – Ganho da antena de receção

Ao ser utilizado um dipolo de meia-onda como antena de transmissão, o comprimento do mesmo dependerá do valor da frequência do sinal emitido. A montagem do dipolo será feita a uma altura de $\lambda/4$ metros de altitude, para que ofereça uma cobertura basicamente omnidirecional. A tabela 19 apresenta o comprimento dos dipolos para cada uma das frequências a serem utilizadas, bem como os ganhos da antena, para o ângulo de fogo pretendido ($\psi = 76,2232$ graus), e a altitude a que deverá ser montada a antena.

Frequência [MHz]	3	4	5	6	7	8
Comprimento do dipolo [metros]	50	37,5	30	25	21,42857	18,75
Altura da montagem [metros]	25	18,75	15	12,5	10,71429	9,375
Ganho da antena [dBi]	6,1	6	6	5,9	5,7	5,6

Tabela 19 – Dados da antena de emissão

Os ganhos da antena, para cada uma das frequências, foi calculado com recurso ao *software* MMANA-GAL. No Anexo 3 estão apresentados os diagramas de radiação vertical e horizontal, para o dipolo de meia-onda, através da análise dos quais foi

calculado o ganho da antena para um ângulo de 76 graus, que é aproximadamente o valor do ângulo de fogo.

Para o valor da potência que deverá alimentar a antena de emissão, assumiu-se um valor típico de 20 W. A partir deste valor, será determinado o valor da sensibilidade do recetor (P_r), e verificar-se-á se é obtido um valor aceitável para que seja feita uma comunicação viável e de boa qualidade. Para que se obtenha uma comunicação com estas características, a sensibilidade deverá ter um valor superior a -90 dBm.

Recorrendo aos valores calculados anteriormente, determina-se o valor da sensibilidade do recetor para a ligação entre a ANPC e Pedrógão Grande, para a gama de frequências entre 3 e 8 MHz. Esses valores estão apresentados na tabela 20.

Frequência [MHz]	3	4	5	6	7	8
Sensibilidade do recetor [dBm]	-62,09	-61,61	-62,54	-63,22	-63,78	-63,04

Tabela 20 – Valores da sensibilidade do recetor para uma potência de transmissão de 20 W

Pela análise da tabela é possível verificar que os valores da sensibilidade são bastante aceitáveis, uma vez que são todos superiores a -65 dBm, valor bastante acima do limite mínimo definido para que seja feita uma comunicação de qualidade, que ronda os -90 dBm, pelo que a ligação entre a Amadora e Pedrógão Grande será viável.

6. Conclusão

6.1. Principais Conclusões

O trabalho aqui apresentado tinha como objetivo principal encontrar um sistema de comunicação de emergência alternativo ao existente em Portugal, o SIRESP, em caso de falha do mesmo. Como tal, achou-se que um tipo de comunicação de fácil montagem e utilizando frequências HF seria uma possível solução para o problema encontrado, e visto que se pretendem fazer ligações a distâncias relativamente curtas, a comunicação NVIS era o sistema ideal para fazer a ligação entre locais chave do país. É também um tipo de comunicação bastante utilizado, com sucesso, em cenários de guerra, razões que levaram a considerá-la para aplicar neste caso específico.

Como tal, primeiramente foi feito um estudo teórico da camada da atmosfera a utilizar para fazer a ligação, bem como da sua estratificação em camadas, e de todos os fatores que influenciam a densidade de eletrões presentes na ionosfera, que acabam por ter efeito na comunicação feita através da mesma, acrescentando a isso o efeito que as perturbações solares têm na mesma. Foi também referido o modelo teórico de Chapman para a densidade de eletrões que constituem o plasma, bem como os modelos que se seguiram a esse, por forma a tentar ultrapassar as limitações do mesmo. Foi obtida ainda a expressão da constante de atenuação, e apresentada também a noção de frequência de plasma, altura virtual e MUF.

De seguida, passou-se ao cálculo da atenuação numa ligação de curta distância via ionosfera, tendo em conta o estudo teórico feito no capítulo anterior. Começou-se por encontrar o ângulo de fogo apropriado a uma ligação de 200 km, e calculou-se a atenuação para uma gama de frequências apropriada a uma comunicação NVIS, entre 3 e 10 MHz. De seguida, para o caso de ser necessária uma ligação maior que o esperado, calculou-se uma atenuação para uma ligação com dois saltos, que levou à conclusão que, ao refletir no chão, a atenuação nesta ligação acaba por ter um valor de aproximadamente mais 100 dB's que numa ligação com apenas um salto.

O capítulo seguinte serviu para fazer um estudo sobre as antenas existentes que permitem uma comunicação NVIS, em que foram apresentados todos os fatores que possam influenciar a escolha do local da montagem e da antena em sim, e apresentaram-

se também os diagramas de radiação, obtidos com recurso ao *software* MMANA-GAL, para diferentes gamas de frequências, por forma a estudar a diretividade, bem como a polarização de cada antena, e permitiram fazer o cálculo dos ganhos das mesmas.

Chegada à conclusão que só apenas dois dos quatro tipos de antenas poderiam garantir a comunicação viável pretendida para a ligação, uma vez que as restantes poderão sofrer interferência de radiação *groundwave*, resolveu usar-se o dipolo de meia-onda para fazer a transmissão, e a antena AS-2259/GR para receber o sinal. Foram então calculados os dados referentes à ligação pretendida, tal como o perfil da ligação, através da recorrência ao *software* *Google Earth*. Após o cálculo do ângulo de elevação e da atenuação referente a cada uma das frequências em estudo, chegou-se à conclusão que, com uma potência de alimentação de 20 W, seria possível fazer a ligação entre a ANPC e os BV de Pedrógão Grande com grande viabilidade, uma vez que a sensibilidade calculada na receção, de aproximadamente -65 dBm, é relativamente superior ao valor de sensibilidade que permite fazer uma ligação viável e de boa qualidade (-90 dBm).

6.2. Perspetivas Futuras

Para trabalho futuro, seria interessante que fosse feita a fabricação e montagem das antenas, por forma a poderem ser realizadas medidas de campo na ligação proposta nesta dissertação. O objetivo deste estudo seria comprovar experimentalmente os valores teóricos obtidos por simulação. Com a realização de uma campanha de medidas em cenário real de catástrofe (incêndio florestal), seria possível avaliar o grau de interferência na ligação das condições atmosféricas e das colunas de fumo e projeções. Se se verificar a viabilidade da comunicação nesta ligação, poderia ser do interesse público do país criar uma rede de comunicação NVIS, como alternativa ou até como complemento ao sistema de comunicações existente em caso de emergência, o SIRESP.

Referências Bibliográficas

- [1] Prof. J. Figanier e Prof. Carlos A. Fernandes, "Aspectos de Propagação na Atmosfera", 2012.
- [2] John White, "An Analytical Study of HF Communications between Provincial PREOC's and the North Shore Emergency Management Office at VE7NSR", 2010.
- [3] Jim Brown, "Planning Antenna Systems For the Little Gun Station", 2015.
- [4] US Marine Corps, "Antenna Handbook", Department of the Navy, Headquarters United States Marine Corps, Washington, D. C., 2016.
- [5] Stephen C. Finch, "NVIS - Near Vertical Incident Skywave Antenna: The Emergency Communications Antenna".
- [6] N3AE and N3IDX, "Improving the AS-2259 NVIS Antenna".
- [7] DX Engineering, "A Practical NVIS Antenna for Emergency or Temporary Communications", 2012.
- [8] Ben A. Witvliet and Rosa Ma Alsina-Pagès, "Radio communication via Near Vertical Incidence Skywave propagation: an overview", Spectrum Management Department, Radiocommunications Agency Netherlands, 2017.
- [9] Iulian Bouleanu, Marius Gheorgheviçi and Robert Helbet, "The Quality of the Prediction for the NVIS Propagation with ITS-HF Propagation", Department of Technical Sciences, Academy of land Forces "Nicolae Balcescu", Sibiu, Romania, 2015.
- [10] H. K. Yagnik, B. L. Acharya & R. K. Rai, "Ionospheric Absorption at Vertical & Oblique Incidence at Low Latitudes", Department of Physcis, Sukhadia University, Udaipur, 1982.
- [11] Australian Government, "Introduction to HF Radio Propagation", IPS Radio and Space Services.
- [12] Professor David Jenn, "Ionospheric Wave Propagation", Department of Electrical & Computer Engineering, Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [13] Kenneth Davies, "Ionospheric Radio Propagation", National Bureau of Standards, 1965.
- [14] Agus Subetki, Koredianto Usman, Futoshi Ohyama, Hiroshi Juzoji and Isao Nakajima, "A Study of NVIS for Communication in Emergency and Disaster Medicine" Tokai University Institute of Medical Sciences.
- [15] Henrique José Almeida da Silva, "Onda Ionosférica", 2001.
- [16] "Tracking Solar Flares - The ionosphere" [Online]. Available: <http://solar-center.stanford.edu/SID/activities/ionosphere.html>. [Accessed: 22-Dez-2017]
- [17] Michael B. McElroy, "Ionosphere and magnetosphere" [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/ionosphere-and-magnetosphere>. [Accessed: 18-Jan-2018].
- [18] "Variations in the ionosphere" [Online]. Available: <http://www.tpub.com/neets/book10/40h.htm>. [Accessed: 10-01-2018].
- [19] "NVIS: Near Vertical Incidence Skywave" [Online]. Available: <http://www.qsl.net/wb5ude/nvis/>. [Accessed: 12-01-2018].
- [20] Australian Space Academy, "The Ionosphere and Radio Astronomy" [Online]. Available: <https://www.spaceacademy.net.au/env/spwx/raiono.htm>. [Accessed: 27-Dez-2017].

- [21] Australian Space Academy, "The Real and Virtual Ionosphere" [Online]. Available: <https://www.spaceacademy.net.au/library/notes/rviono.htm>. [Accessed: 27-Dez-2017].
- [22] Luxorion, "Ionospheric Perturbations" [Online]. Available: <http://www.astrosurf.com/luxorion/qs1-perturbation6.htm>. [Accessed: 15-Jan-2018].
- [23] "Near Vertical Incident Skywave (NVIS) Antenna" [Online]. Available: <http://www.w0ipl.net/ECom/NVIS/nvis.htm>. [Accessed: 03-Mar-2018].
- [24] "NVIS communications in the HF band" [Online]. Available: <http://www.ipellejero.es/hf/NVIS/english.php>. [Accessed: 14-Mar-2018].
- [25] A. N. D'Alva de Ceita, "Estudo Comparativo de duas Antenas para Comunicação por Efeitos NVIS", Instituto Superior Técnico, 2014.
- [26] R. G. Rocha, "Comunicações Táticas e de Emergência por propagação por efeito NVIS", Instituto Superior Técnico, 2014.
- [27] I. M. Manique, "Cálculo da Atenuação numa Ligação Rádio Via-Ionosfera", Instituto Superior Técnico, 2015.

Anexos

Anexo 1 – Cálculo dos campos elétrico e magnético do dipolo de meia-onda

Sabendo que a distribuição de corrente é dada pela expressão

$$I(z) = I_m \cos(\beta z) \quad (1.1)$$

E que o campo elétrico produzido pelo dipolo na zona distante é dado pela expressão

$$E_\theta = \frac{I \Delta z j \omega \mu e^{-jk r}}{4\pi r} \sin \theta \quad (1.2)$$

Cada dipolo vai contribuir para o valor do campo elétrico, como apresenta a seguinte expressão

$$dE_\theta = \frac{I(z') dz' j \omega \mu e^{-jk R}}{4\pi R} \sin \theta \quad (1.3)$$

Tendo em conta, $\frac{1}{R} \approx \frac{1}{r}$ para variações de amplitude, e $\exp(-jkR) \approx \exp[-jk(r - z' \cos \theta)]$ para variações de fase, então,

$$dE_\theta = \frac{I(z') dz' j \omega \mu e^{-jk r}}{4\pi r} e^{-jkz' \cos \theta} \sin \theta \quad (1.4)$$

Resultando daqui a expressão

$$E_{\theta} = \int_{z'=-\lambda/4}^{z'=\lambda/4} \frac{I(z') dz' j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} e^{-jkz' \cos \theta} \sin \theta dz' \quad (1.5)$$

$$E_{\theta} = \frac{j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \int_{z'=-\lambda/4}^{z'=\lambda/4} I_m \cos(\beta z) e^{-jkz' \cos \theta} \sin \theta dz' \quad (1.6)$$

E sabendo que

$$\int \sin(a + bx) e^{cx} = \frac{e^{cx}}{b^2 c^2} [c \sin(a + bx) - b \cos(a + bx)] + C \quad (1.7)$$

Então

$$\begin{aligned} & \int_{z'=-\frac{\lambda}{4}}^{z'=\frac{\lambda}{4}} \sin\left(\frac{\pi}{2} + kz'\right) e^{jkz' \cos \theta} = \\ &= \frac{e^{jk\frac{\lambda}{4} \cos \theta}}{k^2 + k^2 \cos^2(\theta)^2} \left[jk \cos \theta \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{k\lambda}{4}\right) - \beta \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\beta\lambda}{4}\right) \right] - \\ & \frac{e^{jk\frac{\lambda}{4} \cos \theta}}{k^2 + k^2 \cos^2(\theta)^2} \left[jk \cos \theta \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{k\lambda}{4}\right) - \beta \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\beta\lambda}{4}\right) \right] = \\ &= \frac{e^{j\frac{\pi}{2} \cos \theta}}{\beta^2 \sin^2(\theta)^2} \beta + \frac{e^{-j\frac{\pi}{2} \cos \theta}}{\beta^2 \sin^2(\theta)^2} \beta = \\ &= 2 \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\beta \sin^2(\theta)^2} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Então, chega-se à expressão

$$E_{\theta} = \frac{j\omega\mu I_m e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \cdot 2 \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\beta \sin^2(\theta)^2} \quad (1.9)$$

Uma vez que $\beta = k$, e $\omega\mu/k = \eta$, obtêm-se as expressões (1.10) e (1.11), que expressam o campo elétrico e o campo magnético, respetivamente.

$$E_{\theta} = \frac{j\eta I_m e^{-jkr} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{2\pi r \sin \theta} \quad (1.10)$$

$$H_{\phi} = \frac{E_{\theta}}{\eta} = \frac{jI_m e^{-jkr} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{2\pi r \sin \theta} \quad (1.11)$$

Anexo 2 – Cálculo do ângulo de fogo

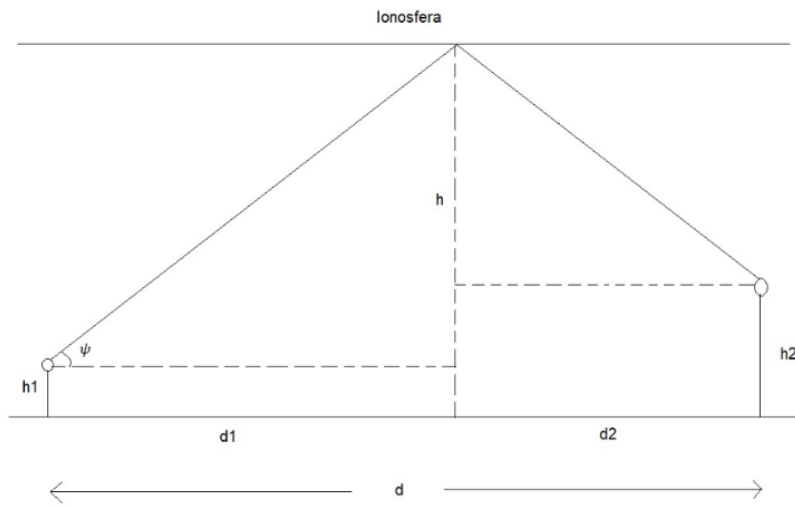


Diagrama do ângulo de fogo para a ligação ANPC-Pedrógão Grande

Através da análise do diagrama, é possível chegar à expressão

$$\frac{h - h_2}{d_2} = \frac{h - h_1}{d_1} = \tan \psi \quad (2.1)$$

E, se $d = d_1 + d_2$, então

$$d_2 = d - d_1 \quad (2.2)$$

Substituindo (2.2) na expressão (2.1), obtém-se

$$\frac{h - h_2}{d - d_1} = \frac{h - h_1}{d_1} \quad (2.3)$$

$$\frac{h - h_2}{h - h_1} = \frac{d - d_1}{d_1} \quad (2.4)$$

$$\frac{h - h_2}{h - h_1} = \frac{d}{d_1} - 1 \quad (2.5)$$

$$\frac{h - h_2}{h - h_1} + 1 = \frac{d}{d_1} \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{h - h_2/h - h_1 + 1} = d_1 \quad (2.7)$$

Através da expressão (2.7), obtém-se $d_1 = 81531,46 \text{ m}$ e $d_2 = 81468,54 \text{ m}$. Substituindo os valores de d_1 e de d_2 em (2.1), retira-se que o valor do ângulo de fogo é $\psi = 76,2232$ graus.

Anexo 3 – Diagramas de radiação do dipolo de meia-onda

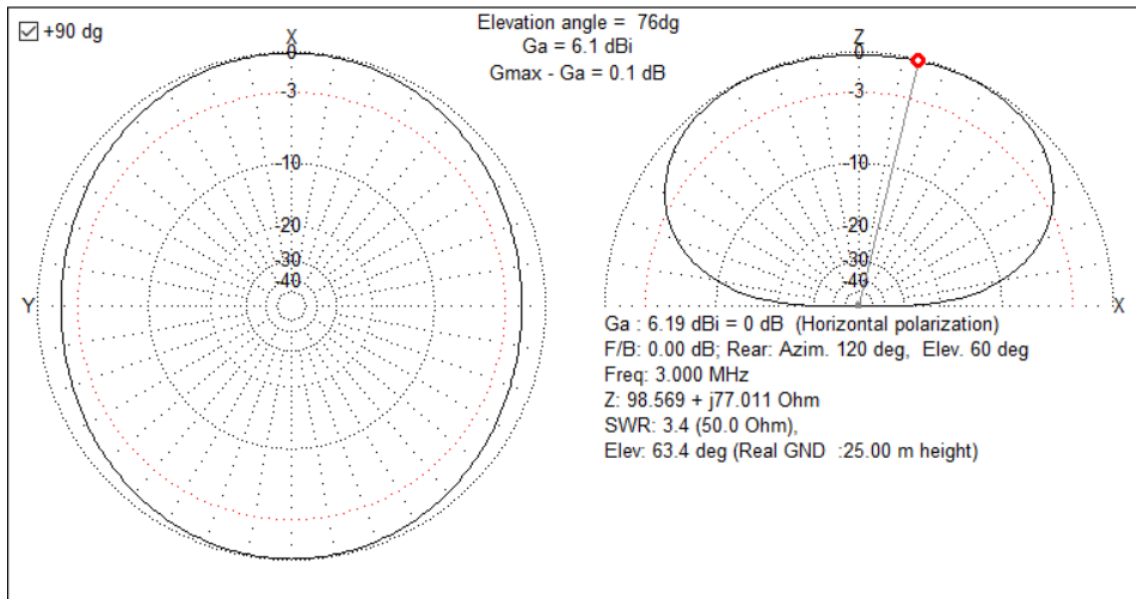


Diagrama de radiação vertical e horizontal para $f=3$ MHz e $h=25$ m

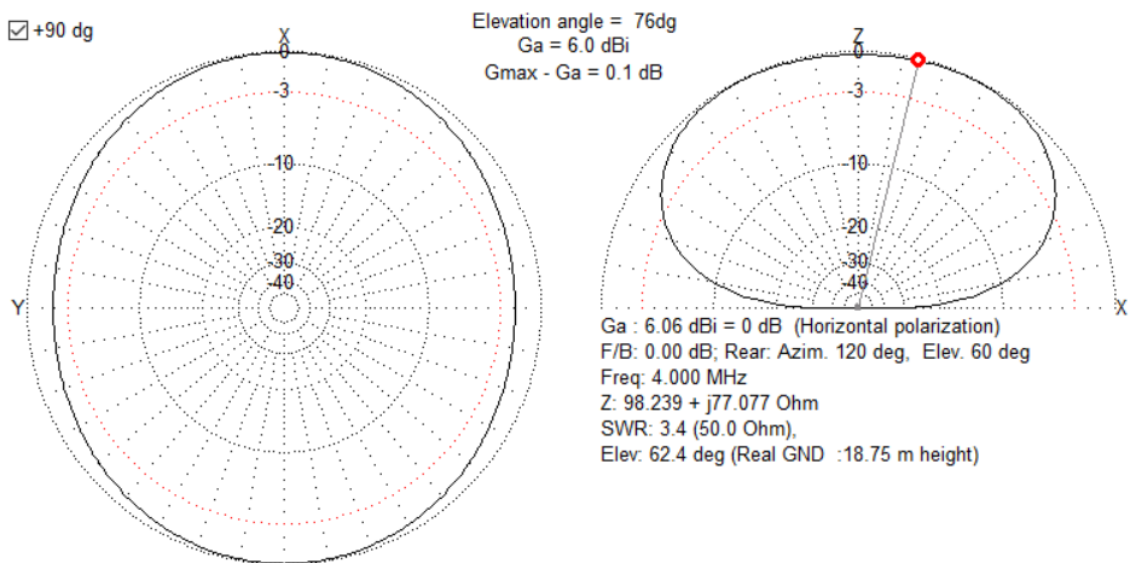


Diagrama de radiação vertical e horizontal para $f=4$ MHz e $h=18.75$ m

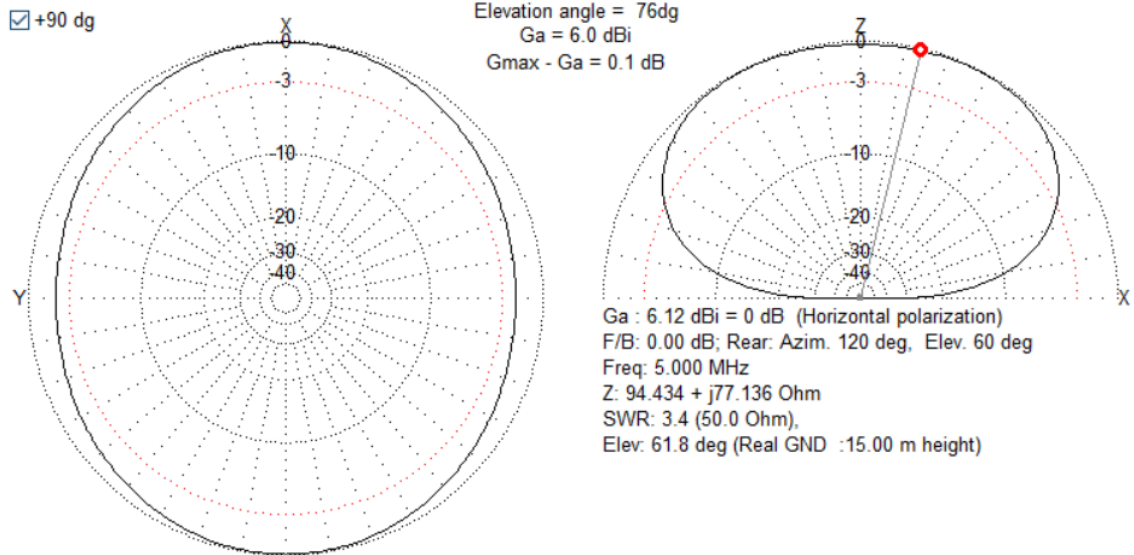


Diagrama de radiação vertical e horizontal para f=5 MHz e h=15 m

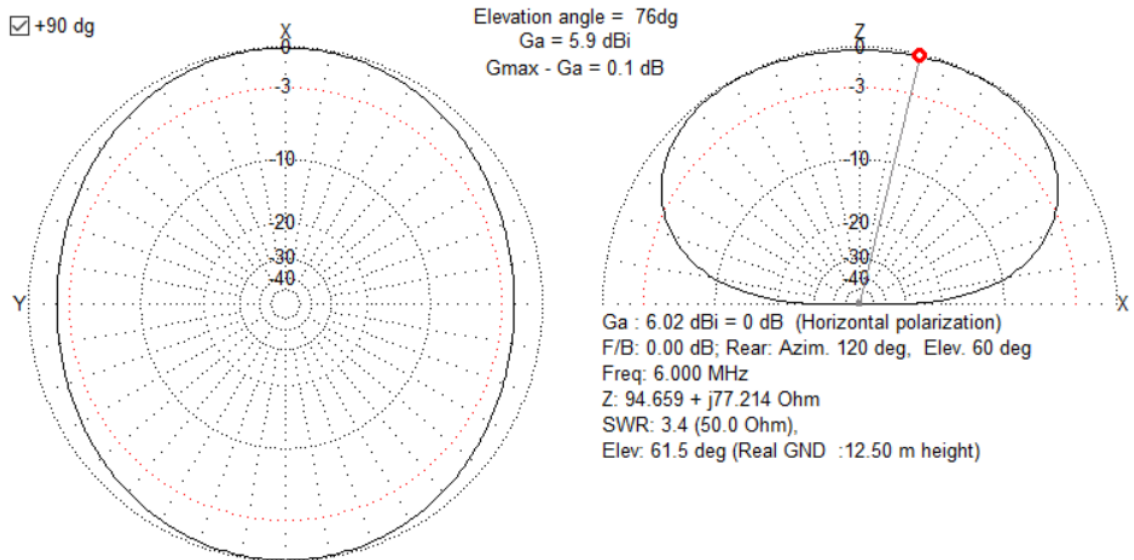


Diagrama de radiação vertical e horizontal para f=6 MHz e h=12.5 m

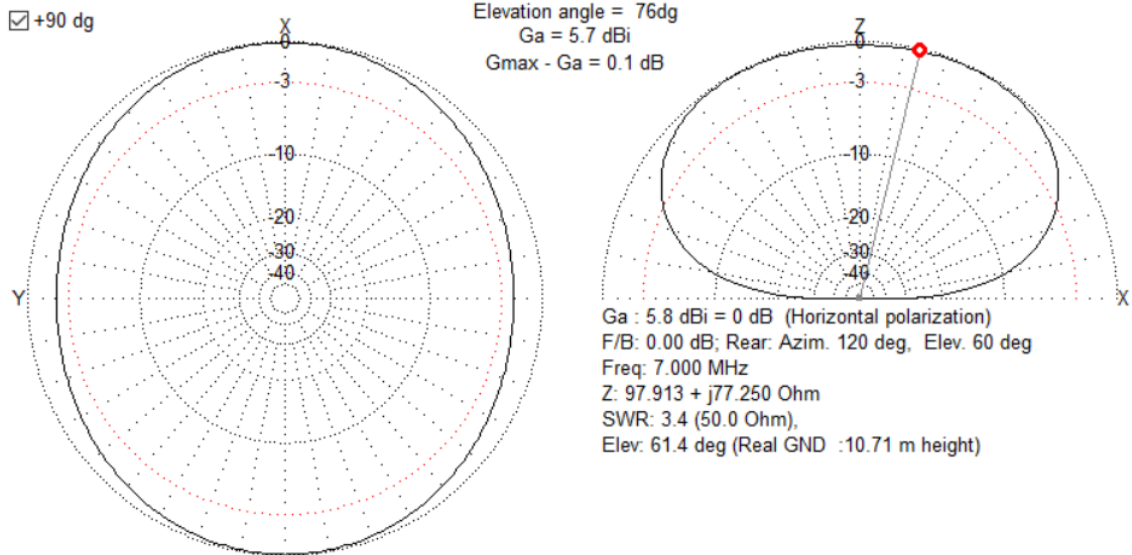


Diagrama de radiação vertical e horizontal para f=7 MHz e h=10.7143 m

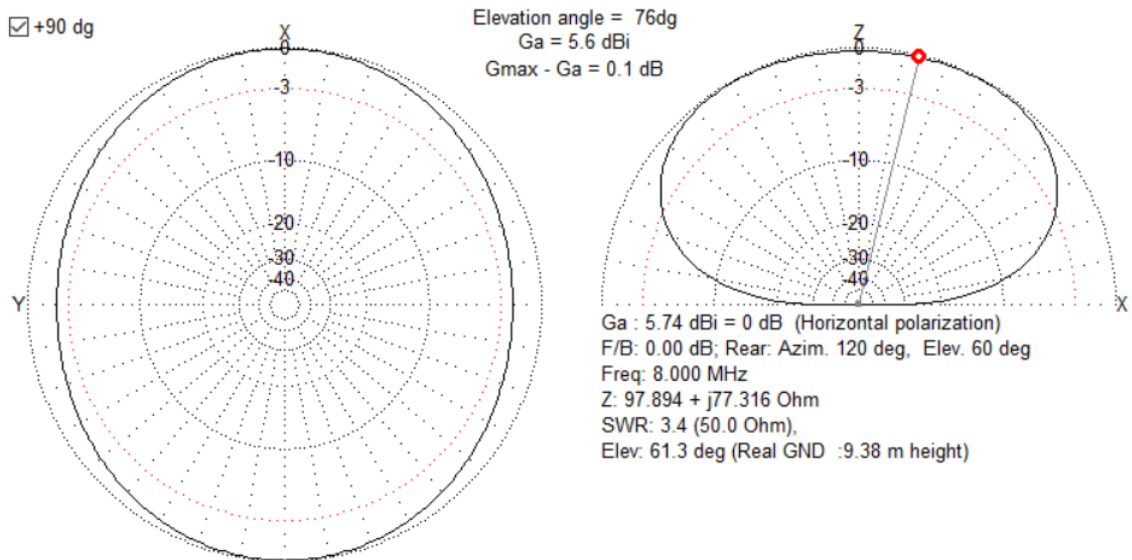


Diagrama de radiação vertical e horizontal para f=8 MHz e h=9.375 m