

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO TÉCNICO INDUSTRIAL DE SANTA MARIA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM REDES DE
COMPUTADORES**

**COBERTURA DE RÁDIO ENLACE:
ALCANCE PARA PILOTAGEM REMOTA DE
VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Humberto Boeira Poetini

Santa Maria, RS, Brasil

2013

CSTRC/UFSM, RS

POETINI, Humberto Boeira

Tecnólogo

2013

**COBERTURA DE RÁDIO ENLACE:
ALCANCE PARA PILOTAGEM REMOTA DE VEÍCULO
AÉREO NÃO TRIPULADO**

Humberto Boeira Poetini

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Redes de Computadores do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Tecnólogo em Redes de Computadores.

Orientador: Prof. Dr. Eugênio de Oliveira Simonetto

Santa Maria, RS, Brasil
2013

Poetini, Humberto Boeira

Cobertura de rádio enlace: alcance para pilotagem remota
de veículo aéreo não tripulado / por Humberto Boeira Poetini. –
Santa Maria, 2013.

63 f. : il. ; 297 mm.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal
de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria,
Curso Superior de Tecnologia em Redes de Computadores, RS,
2013.

Orientador: Eugênio de Oliveira Simonetto.

Pilotagem remota; Enlace rádio; Propagação em espaço livre.

Ficha catalográfica elaborada por
Humberto Boeira Poetini

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Humberto Boeira Poetini. A reprodução de partes ou do todo
deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
Endereço: Rua Gonçalves Ledo, 204/201, Santa Maria, RS, 97110-320
Fone (0xx) 55 9973 0819; End. Eletr: poetini@redes.ufsm.br.

**Universidade Federal de Santa Maria
Colégio Técnico Industrial de Santa Maria
Curso Superior de Tecnologia em Redes de Computadores**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova o Trabalho de Conclusão de Curso

**COBERTURA DE RÁDIO ENLACE: ALCANCE PARA PILOTAGEM
REMOTA DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO**

elaborado por
Humberto Boeira Poetini

como requisito parcial para obtenção do grau de
Tecnólogo em Redes de Computadores

COMISSÃO EXAMINADORA:

Eugenio de Oliveira Simonetto, Dr.
(Presidente/Orientador)

Claiton Pereira Colvero, Dr. (UFSM)

Guilherme Dhein, Ms. (UFSM)

Santa Maria, 25 de janeiro de 2013.

DEDICATÓRIA



Fonte: Arquivo pessoal Ana Eva Boeira Poetini.

Título: Incentivo ao saber.

Fotógrafo: Não identificado.

Data: 1986.

Local: Escola Municipal Ranulfo Lacroix – Itaqui/RS.

Personagens: Humberto Boeira Poetini.

Aos meus pais, Washington Humberto Padilha Poetini e Ana Eva Boeira Poetini, pelo carinho e incentivo. Do pai o conselho de buscar na educação um futuro melhor e da mãe o exemplo pelo exercício da docência que nunca se encerra com o expediente escolar.

AGRADECIMENTOS

Patrícia Varaschini Poetini – minha esposa, por suportar minha ausente presença. Dividindo com minhas intenções acadêmicas o pouco tempo livre de meus compromissos com a farda. Sempre trazendo um sorriso quando conseguia me buscar da introspecção aos algoritmos e cálculos, preocupada sempre com a manutenção de minha saúde.

Eugênio Simonetto – meu orientador, pela confiança e paciência. Sempre motivando a buscar as respostas mais complexas a partir da simplicidade de cada parcela.

Guilherme Prestes da Silva – fiel amigo, a quem muitas vezes recorro pelo meu vago conhecimento da língua inglesa e pelos enriquecedores diálogos de natureza reflexiva.

Walter Priesnitz Filho – coordenador do Curso Superior de Tecnologia em Redes de Computadores, pela compreensão e pelas oportunidades.

Olinto Araujo Bassi – pela constante motivação sempre regada com os mais diversos e construtivos desafios.

A todos os professores do Curso de Tecnologia em Redes de Computadores - pelos ensinamentos e experiências compartilhados ao longo dessa jornada.

Donald Gramkow – por permitir a realização do estudo tomando por base material de uso militar.

Adenilson Zanini – pela contribuição ao fornecer os dados numéricos do terreno.

Mascavo – meu cachorro, fiel companheiro sempre aos pés da mesa. Nunca abandonou o amigo, quer nas infundáveis horas de pesquisa e análise, quer nas longas madrugadas de trabalho.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui, sinceros agradecimentos!

Sem protocolo não há comunicação. Caso este não seja bem definido, cabem interpretações distintas para uma mesma mensagem, seja ela bit, palavra, gesto... No nosso mundo, em que muitas vezes é preciso ser mais louco e ousado, começamos cedo a implementação do protocolo. E nossa escolha em participar de uma coletividade revela-se dentre os primeiros passos no caminho. O mais difícil, pelo menos assim é para mim, é que primeiro precisamos confiar no pouco que sabemos do protocolo, receber e interpretar a mensagem, e só então saborear ou descartar o que possa vir em seu conteúdo. Venho construindo meu protocolo de entendimento do mundo junto com meus amigos... tenho dúvidas, as quais sacio cada vez que um novo estado implemento nesse protocolo...

(Humberto Boeira Poetini)

RESUMO

Trabalho de Conclusão de Curso
Curso Superior de Tecnologia em Redes de Computadores
Universidade Federal de Santa Maria

COBERTURA DE RÁDIO ENLACE: ALCANCE PARA PILOTAGEM REMOTA DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

AUTOR: HUMBERTO BOEIRA POETINI

ORIENTADOR: EUGÊNIO DE OLIVEIRA SIMONETTO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 25 de janeiro de 2013.

O desenvolvimento de novas tecnologias é interesse comum às inúmeras áreas do conhecimento, assim como suas aplicações caracterizam a almejada modernidade, tão sonhada como meio facilitador frente as inúmeras exigências contemporâneas. Na aviação, essas novidades chegam muito rápido, especialmente para os empregos na área militar cuja natureza das atividades buscam o fator surpresa como um valoroso diferencial na obtenção de sucesso em suas empreitadas. A Força Aérea Brasileira recentemente implementou um vanguarda sistema no desempenho de suas atividades: os veículos aéreos não tripulados. E novos meios também trazem novos desafios, dentre os quais está o objetivo desse trabalho. Adotando uma estratégia matemática buscou-se a elaboração de uma análise computacional do enlace estabelecido entre uma estação de controle no solo e a aeronave em voo. Para isso tratou-se da camada física da rede ponto a ponto entre estes firmada. Procurou-se definir até onde a propagação dos sinais que permitem a troca de dados entre as partes pode ser percebida, sendo considerado o relevo do estado do Rio Grande do Sul a partir da região da Base Aérea de Santa Maria. O que permitiu o desenvolvimento desse trabalho, além da utilização de uma matriz de elevação do meio em questão e a linguagem interpretada Octave para computação matemática, foram os conceitos base das redes sem fio. A análise dos resultados revela a viabilidade da comunicação além do horizonte e por detrás do relevo que inviabiliza a linha de visada entre os elos. Nos resultados verifica-se o modo como a elevação do terreno modifica o limite funcional para um enlace dessa natureza.

Palavras-chave: Pilotagem remota, enlace rádio, propagação em espaço livre.

ABSTRACT

Course Conclusion Work
Networks Computer Technology Graduation Course
Universidade Federal de Santa Maria

RADIO LINK COVERAGE: DISTANCE RANGE FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE REMOTE STEERING

AUTHOR: HUMBERTO BOEIRA POETINI
ADVISER: EUGÊNIO DE OLIVEIRA SIMONETTO
Defense Place and Date: Santa Maria, January 25nd, 2013.

The development of new technologies is a common interest to several areas of knowledge, as well as its applications characterize the desired modernity, so much dreamed as a contribution face to many contemporary demands. In aviation, these news come too fast, especially to the jobs in military area such nature activities look for the surprise factor as a valuable differential obtaining success in its endeavors. The Brazilian Air Force recently implemented a cutting-edge system in its activities performing: the unmanned aerial vehicles. New resources also bring new challenges, among them is the goal of this work. Adopting a mathematical strategy this work looked for the development of established link computational analysis between the control station on ground and the aircraft in flight. So the physical layer of the point to point network established was considered. It was tried to define the limit which the propagation of signal that allow the data exchange between the parts could be perceived, in which was considered the relief map of the state of Rio Grande do Sul since the area of the Base Aérea de Santa Maria. The use of the elevation matrix from the studied scenery and the interpreted programming language Octave for mathematical computation permitted the development of this work, once associated with the basics concepts of wireless networks. The analysis of the results reveal the viability of communication beyond the horizon and behind raised which not permit the line of sight between links. It was shown on the results the way terrain elevation modifies the functional limit to this type of link.

Key words: Remote steering, radio link, free space propagation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Veículo aéreo não tripulado.....	20
Figura 2 - Datalink para VANT.....	20
Figura 3 - Equipamentos de Datalink.....	21
Figura 4 - Grade regular de elevação de terreno.....	22
Figura 5 - Espectro eletromagnético.....	25
Figura 6 - Diagrama de irradiação de um dipolo.....	26
Figura 7 - Diagrama de irradiação de uma parábola.....	26
Figura 8 - Princípio de Huygens.....	27
Figura 9 - Zonas concêntricas de Fresnel.....	28
Figura 10 - Ângulo de difração em gume de faca.....	29
Figura 11 - Ganho de difração tipo gume de faca.....	30
Figura 12 - Método de Bullington.....	30
Figura 13 - Bytes finais do arquivo de relevo.....	31
Figura 14 - Primeiro acesso ao arquivo de relevo.....	32
Figura 15 - Estrutura em Bytes de um arquivo hgt.....	32
Figura 16 - Segundo acesso ao arquivo de relevo.....	33
Figura 17 - Mapa do relevo da região de Santa Maria.....	34
Figura 18 - Mosaico para relevo da região central.....	34
Figura 19 - Gráfico do arquivo relevosul.hgt.....	35
Figura 20 - Método da Bisseção.....	36
Figura 21 - Relevo sobre a curvatura da terra.....	36
Figura 22 - Alcance para voo a 1.000ft.....	39
Figura 23 - Alcance para voo a 2.000ft.....	39
Figura 24 - Alcance para voo a 3.000ft.....	40
Figura 25 - Alcance para voo a 4.000ft.....	40
Figura 26 - Alcance para voo a 5.000ft.....	41
Figura 27 - Alcance para voo a 6.000ft.....	41
Figura 28 - Alcance para voo a 7.000ft.....	42
Figura 29 - Alcance para voo a 8.000ft.....	42
Figura 30 - Alcance para voo a 9.000ft.....	43
Figura 31 - Alcance para voo a 10.000ft.....	43
Figura 32 - Alcance para voo a 11.000ft.....	44
Figura 33 - Alcance para voo a 12.000ft.....	44
Figura 34 - Alcance para voo a 13.000ft.....	45
Figura 35 - Alcance para voo a 14.000ft.....	45
Figura 36 - Alcance para voo a 15.000ft.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADT	Air Data Terminal / Terminal de dados aéreo
dB	Decibel
dBi	Decibel com referencia a antena isotrópica
dBm	Decibel com referencia a potência em miliwatts
ft	Foot / Pé
GAS	Grupo de Análise de Segurança
GDT	Ground Data Terminal / Terminal de dados de solo
MNT	Modelo Numérico de Terreno
MN	Milha Náutica
NASA	National Aeronautics and Space Administration /Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency / Agência Nacional de Informação Geoespacial
SI	Sistema Internacional de unidades de medidas
SRTM	Missão Topográfica Radar Shuttle
TDD	Test Driven Development / Desenvolvimento Dirigido por Testes
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

LISTA DE ANEXOS E APÊNDICES

Apêndice A – script1.m.....	53
Apêndice B – prop_livre.m.....	55
Apêndice C – script2.m.....	56
Apêndice D – limiar.m.....	58
Apêndice E – potencia.m.....	59
Anexo A – Relevo do Rio Grande do Sul.....	62
Anexo B – Espectro Eletromagnético no Brasil	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos.....	16
2 METODOLOGIA.....	17
3 DESENVOLVIMENTO.....	19
3.1 Veículo aéreo não tripulado.....	19
3.2 Análise dos equipamentos.....	20
3.3 A camada física	21
3.4 Modelo numérico de terreno	22
3.5 Unidades fora do SI.....	22
3.6 Decibéis – dB.....	23
3.7 Radio propagação.....	24
3.7.1 Espectro eletromagnético.....	24
3.8 Antenas.....	25
3.9 Atenuação no espaço livre	26
3.10 Difração.....	27
3.10.1 Zonas de Fresnel	28
3.10.2 Modelo de difração gume de faca.....	29
3.10.3 Gumes de faca múltiplos.....	30
3.11 Linguagem de cálculo matemático GNU Octave.....	30
3.12 Manipulação dos dados de terreno.....	31
3.13 Elaboração do algoritmo de verificação do enlace.....	35
3.13.1 Alcance limite em uma dada direção.....	35
3.13.2 Cálculo da potência recebida.....	36
3.13.3 Resultados gráficos.....	37
3.14 Processamento dos dados.....	37
4 RESULTADOS.....	38
5 DISCUSSÃO.....	47
6 CONCLUSÃO	49

1 INTRODUÇÃO

Com o advento do voo do mais pesado que o ar, “em 12 de novembro de 1906 [...] no Bois de Boulogne, em Paris” (BARROS, 2006, p. 12), ficou conhecida uma nova tecnologia que venceu uma das limitações experimentadas pela humanidade até então: impulsionar pelos ares, de forma controlada, objetos mais densos que o mesmo.

Esse marco deu início a uma nova área de estudo: despertou interesse aos militares, potencializou a logística e mostrou-se uma área atrativa à economia. Tais fatores garantiram uma rápida sedimentação de seus conceitos para a humanidade até a sociedade contemporânea.

Numa primeira abordagem parecia que todos os problemas de mobilidade estariam resolvidos até o momento em que os ganhos em velocidade, altitude e tempo de voo esbarram na limitação física do homem - elemento a bordo dessas máquinas e que as controla em sua jornada. Limitações essas que levaram à criação de inúmeras soluções aos problemas enfrentados, cujas tecnologias empregadas abordaram inúmeras áreas do conhecimento. Dentro dessas soluções está a eliminação do elemento sensível a características inóspitas, o que poderia ser feito de duas formas:

- uso de um conjunto de regras pré-programadas que levariam o veículo de forma autônoma a um destino pretendido;
- controle estabelecido remotamente por elemento que não esteja à bordo do veículo.

A primeira solução mostra-se menos sensível aos efeitos de agentes naturais, porém menos versátil às inúmeras ocorrências experimentadas por uma aeronave em voo. Não apresentando a mesma limitação da anterior, a segunda solução permite alterações nos planejamentos mesmo após a decolagem do veículo. Essa característica mostrou-se de grande interesse, especialmente para a dinâmica do uso militar e para a segurança de voo, uma vez que situações indesejáveis, como por exemplo uma rota de colisão, podem ser contornadas.

Diversas considerações sobre segurança no emprego de veículos aéreos não tripulados são tema de estudo do Grupo de Análise de Segurança - GAS¹. Junto ao grupo, a pesquisa de Vitor Furtado contempla, entre outros aspectos, a qualidade da comunicação.

Nesse contexto destaca-se a importância de um enlace confiável. A segurança do espaço aéreo depende da garantia de estabelecer-se o devido controle sobre o veículo, o que somente poderá ser assegurado dentro de uma área em questão, devido às características da propagação. Já para a logística ou o uso militar, é importante destacar se será possível atingir

¹www.gas.pcs.poli.usp.br

uma área de interesse dentro de um cenário em questão. Para qualquer um desses casos, conhecer as limitações da comunicação entre o controle de solo e o veículo aéreo mostra-se em destacada importância.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Verificar o alcance de um enlace de dados utilizado no controle de um veículo aéreo remotamente pilotado, procurando quantificar as limitações e interferências a fim de definir se é possível o estabelecimento de uma comunicação ponto a ponto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as características dos equipamentos - de solo e embarcado - que influenciem na comunicação entre as partes.
- Verificar como as características do meio podem vir a influenciar no estabelecimento do enlace.
- Quantificar a qualidade do enlace nos diversos pontos por onde se pretenda lançar o veículo.
- Elaborar um algoritmo que permita definir a área de possível operação para o cenário em questão.

2 METODOLOGIA

No âmbito do invisível, como podemos nos referir às ondas eletromagnéticas, é sempre difícil estimar o comportamento de algum fenômeno. Para isso utilizam-se artifícios que permitam a percepção desses comportamentos.

Equipamentos passam a ser os olhos e ouvidos daqueles que pretendem entender as características que devam ser exploradas na utilização de recursos dessa natureza. Os computadores permitem a manipulação de grandes volumes de dados e o confronto de conhecimentos de natureza distinta que, corretamente manipulados, aproximam-se do que se verifica na prática. Já aos programadores, cabe a organização dos algoritmos e métodos. Resta verificar os resultados obtidos e planejar seu emprego prático.

Todo esse trabalho pode e deve ser dividido em etapas que compreendam desde o conhecimento dos recursos disponíveis até a divulgação da resposta ao problema proposto. No decorrer desse processo ainda são importantes as análises dos resultados, visto que os resultados expressam o que o trabalho aponta, o que não é necessariamente a intenção do implementador.

Na busca de atingir os objetivos propostos nesse trabalho buscou-se conhecer o cenário ao qual ele se aplica. A investigação do alcance limite do link de dados de um veículo aéreo não tripulado remotamente pilotado suscitou primeiramente o conhecimento da natureza desse enlace. Em continuidade, conhecer os equipamentos diretamente envolvidos nesse processo foi fundamental, a fim de verificar as características que interfiriam no mesmo ou que sejam necessárias para uma quantificação do mesmo.

Não só os equipamentos compõe esse cenário, mas também o ambiente no qual pretende-se estabelecer a comunicação em questão. O relevo do terreno e a ocultação no horizonte de tudo o que possa estar mais distante precisam ser considerados. Modelos numéricos de elevação, associados a geometria da esfera, devem ser modelados de forma a proverem as informações necessárias ao avaliar sua participação no contexto estudado.

De posse dessas informações cabe o estudo dos conceitos, teorias e técnicas que se aplicam às implementações dos enlaces de redes sem fio na camada física. Informações de grande importância no estabelecido de um modelo matemático coerente com o problema em questão e na análise dos resultados obtidos.

Resta a escolha do modo de processar os dados. Essa questão envolve a elaboração de um algoritmo adequado e a opção por um software capaz de manipular os valores utilizados por esse trabalho.

Com o auxílio das literaturas, as grandezas que, por questões de sigilo, não puderam ser obtidas junto aos operadores dos equipamentos foram aproximadas. No entanto, o uso de valores não exatos foi adotado de modo a não comprometerem a qualidade dos resultados obtidos.

3 DESENVOLVIMENTO

As redes de computadores vem ganhando seu espaço nas mais variadas áreas de atuação. Em sua maior parte, os sistemas computacionais implementados requerem uma tolerância a falhas que possa assegurar sua funcionalidade para os fins propostos. Situações frente as quais essa confiabilidade fique prejudicada são geralmente tratadas como uma inviabilidade para o uso em questão.

Uma das formas mais crescentes da utilização das redes é em seu uso sem fios. Estabelecidas por meio de ondas de rádio, emitidas e recebidas, por dispositivos que compartilham um meio trocando informações entre eles. A própria infraestrutura mínima necessária à sua implementação viabiliza sua mobilidade e, é um atrativo para os usos esporádicos ou dinâmicos.

Esse trabalho desenvolve-se em torno de uma rede ponto a ponto, constituída para a manipulação e controle de um móvel aéreo, estabelecidos remotamente por meio de ondas de rádio. Visa definir as situações em que seja verificada a comunicação entre as partes, buscando uma segura utilização deses recursos.

Antes de planejar uma solução ao problema buscou-se conhecer um pouco da sistemática dos veículos aéreos não tripulados. Esses conhecimentos permitiram esboçar uma linha de ação, a qual requereu algum entendimento de mais algumas áreas de conhecimento.

3.1 Veículo aéreo não tripulado

São plataformas aéreas capazes de efetuar tarefas, dependendo de sua configuração. Os diversos projetos contemplam receber dados de outras aeronaves, de satélites, cumprir voo autônomo seguindo um programa ou receber comandos de uma estação de solo. Os dados recebidos e enviados por um VANT servem para levar comandos de controle à plataforma em voo e receber informações de monitoramento, de status e outras compatíveis com o objetivo do projeto. (Rudinskas, 2009, p. 117).

Segundo Oliveira, Camargo e Lacerda (2010, p. 133), o Brasil vem avaliando a viabilidade de emprego pelas Forças Armadas do Brasil de um VANT produzido em Israel, pela empresa Elbit Systems². O veículo possui uma autonomia de 16h de voo e um teto de serviço de mais de 5Km. O equipamento tem uma envergadura de 10,5m, um comprimento de 6,07m e pode apresentar um peso máximo de 450Kg na decolagem.

²<http://www.elbitsystems.com/>

O VANT que inspirou esse trabalho é o Hermes 450, utilizado pela FAB. A Figura 1 apresenta esse veículo aéreo na configuração em uso no Brasil.



Figura 1 - Veículo aéreo não tripulado

Fonte: Agência Força Aérea

O conceito de funcionamento de veículos dessa natureza compreende uma estação de controle no solo interligada ao veículo aéreo por meio de sinais de rádio. Uma representação esquemática de como isso é feito pode ser visto na Figura 2.

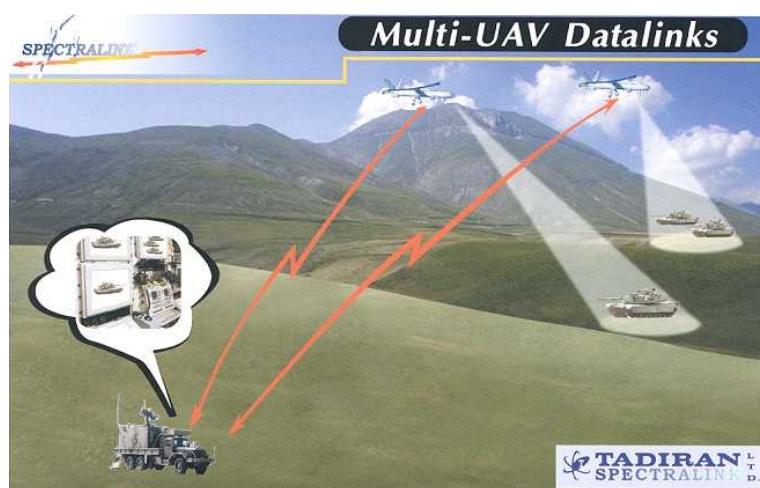


Figura 2 - Datalink para VANT

Fonte: Tadiran Spectralink

3.2 Análise dos equipamentos

Os equipamentos que participam diretamente do estabelecimento da comunicação entre as partes são a GDT (Figura 3-a) e o ADT (Figura 3-b). O primeiro em solo e o outro embarcado, compreendem o conjunto de radiotransmissores, radiorreceptores, amplificadores

de sinais e antenas, além de outras aparelhagens necessárias ao seu funcionamento. Desses, foram coletadas informações de potência transmitida, sensibilidade e ganho das antenas.

A GDT, do inglês Ground Data Terminal, está equipada com uma antena parabólica de 6ft de diâmetro. Como ganho para essa antena foi considerado 30dBi, sendo esse um valor aproximado, respeitando-se o sigilo das informações de uso estratégico militar.

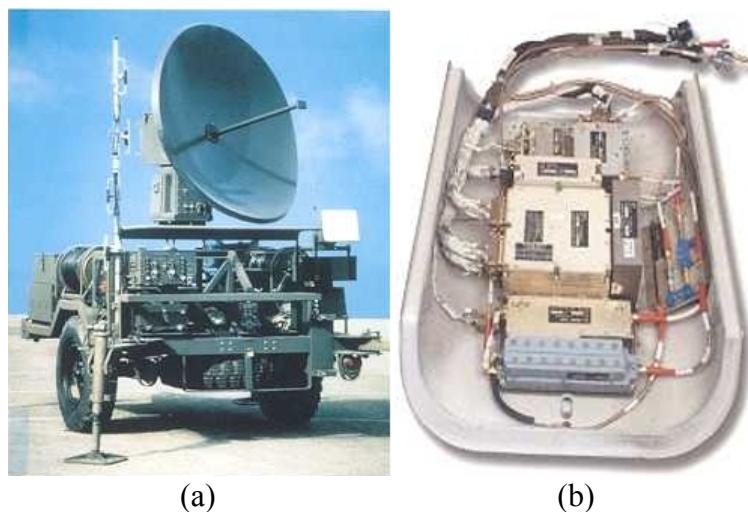


Figura 3 - Equipamentos de Datalink
Fonte: Tadiran Spectralink

O ADT, do inglês Air Data Terminal, está acoplado a uma antena dipolo de $\frac{1}{2}$ onda. O ganho dessa antena também é aproximado e foi considerado 1.5dBi para essa implementação.

Embora essa comunicação estabeleça um enlace full duplex, em frequências ligeiramente diferentes, o comportamento da comunicação em ambos os sentidos é o mesmo. Por esse motivo a comunicação foi considerada em apenas um sentido, utilizando-se um valor de frequência de 3.5GHz, uma potência transmitida de 10dBm e uma sensibilidade de -100dBm.

3.3 A camada física

A camada física é a camada que trata da transmissão de bits brutos através de um meio de comunicação. É aqui que deve ser definido o que distinguirá os bits 0 e 1. Pode ser um nível de tensão, uma transição de valor, uma frequência, entre outras manipulações que possam se feitas com um sinal. (TANENBAUM, p. 45).

Nessa camada busca-se garantir os princípios mais básicos de uma comunicação. Amplitudes de sinais, frequências, sincronismos, etc. Portanto é nessa camada que desenvolve-se o trabalho aqui proposto, verificando as particularidades do estabelecimento de uma comunicação sem fio.

3.4 Modelo numérico de terreno

A representação matemática computacional da distribuição de uma característica dentro de uma região de superfície terrestre é chamada Modelo Numérico de Terreno - MNT. Uma série de informações podem ser representadas dessa forma, como dados de relevo, profundidade do mar, informações meteorológicas, entre outros. Dessa forma, valores de altimetria para mapas topográficos podem ter sua representação em um modelo digital computadorizado. (FELGUEIRAS; CÂMARA, 2006).

Um modelo numérico é formado por coordenadas 3D que representam pontos de amostragem de uma área. Essa amostragem pode ser regular ou não, sendo o primeiro caso quando possui uma distribuição regular em duas direções ortogonais. Segundo Felgueiras e Câmara (2006), uma grade regular e retangular apresenta uma estrutura de dados mais simples e é mais utilizada nas aplicações de análises multiníveis no formato raster, que compreende a definição de imagens por um mapa de pixels.

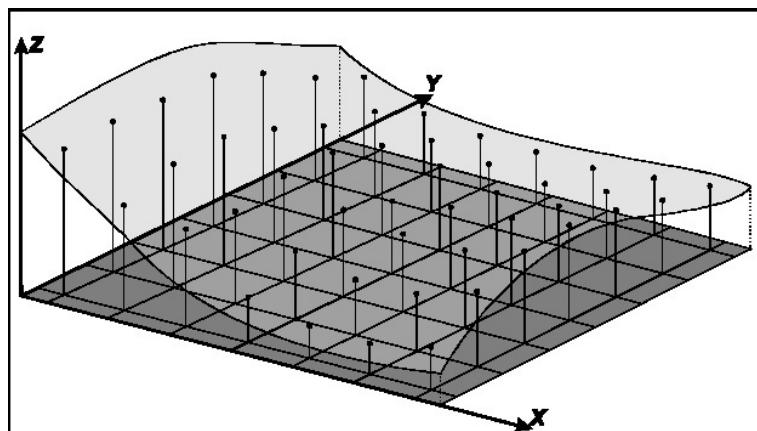


Figura 4 - Grade regular de elevação de terreno

Os arquivos utilizados nesse trabalho tem a extensão hgt e cobrem áreas de 1º por 1º no terreno cada um. Esses arquivos apresentam dados de relevo obtidos com o uso de radar durante a Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM) pela NASA e pela National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). (DRUZINA , pg 44).

3.5 Unidades fora do SI

A aviação utiliza por padrão algumas grandezas que estão fora do sistema internacional de unidades de medida. O uso dessas unidades de medida favorecem uma série de cálculos rápidos utilizados nesse meio. Algumas delas serão utilizadas nesse trabalho:

- Milha náutica [MN] – equivalente a 1.852 metros. Essa medida corresponde a um arco de um segundo longitude ou latitude nas proximidades do equador.
- Pé – Foot [ft] – igual a 0,3048 metro.

No entanto as unidades foram convertidas para valores dentro do SI. Esse procedimento foi necessário para que os cálculos estivessem de acordo com os métodos aqui utilizados.

3.6 Decibéis – dB

Existem diversas grandezas cujo comportamento frente aos fenômenos as quais estão relacionadas apresentam uma variação quadrática ou exponencial. Para se trabalhar com esse tipo de valores é preciso uma grande amplitude numérica, desde escalas muito baixas até as mais elevadas. Buscando uma alternativa para esse inconveniente, Alexandre Graham Bell criou a escala logarítmica que recebeu, em homenagem, o seu nome. (MACHADO, 2010).

Com os valores de potência dos sinais esse fenômeno também ocorre. Dessa forma uma escala logarítmica se aplica convenientemente na expressão desses resultados.

A escala em Bel viabilizou inclusive uma mais rápida operação envolvendo essas grandezas, porém ficou muito reduzida e precisava-se utilizar seus submúltiplos. A partir dessa prática surgiu a escala de decibel, correspondente a um décimo de Bel.

Porém o decibel não expressa uma grandeza em si, mas o valor relativo entre dois números. É o caso, por exemplo, de um amplificador que recebe um sinal de 2 Watts e fornece em sua saída 2.000 Watts. Pode-se dizer que é um amplificador de 1.000 vezes, ou ainda 30 decibéis. A matematização desse conceito é simples, pois o valor em dB é dez vezes a razão entre as potências de saída e entrada, transformado para a escala logarítmica:

$$P[dB] = 10 \log \left(\frac{P_2[W]}{P_1[W]} \right) \quad (1)$$

onde P_2 é a potência de saída, P_1 a de entrada, e P é o valor em dB da razão entre as duas.

Um valor para ser convertido em dB precisa de uma referência. Portanto um valor expresso em dB não representa uma grandeza, mas sim o quanto é maior ou menor do que sua referência.

Foram definidas algumas unidades utilizando dB que já expressam em sua notação o valor ao qual são relativos:

- dBW – relativo a potência em Watts;
- dBm – relativo a potência em miliwatts;

- dBi – ganho relativo a uma antena isotrópica;
- dBd – ganho relativo a uma antena dipolo.

Para retornar um valor em dB à escala linear é preciso fazer operação inversa. Elevar-se 10 utilizando-se como expoente o valor em dB dividido por dez.

$$P[mW] = 10^{\frac{P[dBm]}{10}} \quad (2)$$

3.7 Radio propagação

Quando um condutor é atravessado por uma corrente elétrica um campo magnético é gerado em torno desse condutor. Esse campo varia de acordo com essa corrente elétrica e enquanto varia também interfere no fluxo das cargas através do condutor. As cargas que se deslocam ao longo do condutor implicam também em um campo elétrico nessa mesma direção. Aplicando-se uma corrente alternada senoidal a esse sistema teremos uma variação uniforme dos campos elétrico e magnético e a composição de ambos forma uma onda eletromagnética que se afasta desse condutor com a velocidade da luz. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003, p. 3).

Do mesmo modo que os campos elétrico e magnético interferem no fluxo das cargas no condutor de origem, interferem em outros condutores submetidos a essas variações. Esse comportamento permite que uma corrente seja gerada em um condutor, apenas por estar imerso em um campo eletromagnético. Utilizando-se desse fenômeno pode-se recriar um sinal à distância, onde uma onda eletromagnética é recebida e posteriormente amplificada.

3.7.1 Espectro eletromagnético

Em meados do século XIX as ondas eletromagnéticas eram somente conhecidas nos comprimentos de onda muito próximos aos da luz visível. Posteriormente, Heinrich Hertz descobriu as ondas de rádio que se comportam praticamente do mesmo modo que a luz, porém estão em frequências um tanto mais baixas. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003, p. 2).

Atualmente já é conhecido um amplo espectro eletromagnético, definido por vários autores como o “arco-íris de Maxwell”, físico que primeiramente modelou teorias a respeito das ondas eletromagnéticas. A Figura 5 mostra um espectro mais abrangente, onde os comprimentos de ondas visíveis compreendem apenas uma pequena parcela do que é conhecido e estudado nos dias de hoje.

O enlace estudado nesse trabalho ocupa a faixa do espectro das ondas de rádio. Uma imagem mais detalhada do espectro pode ser consultada no Anexo B.

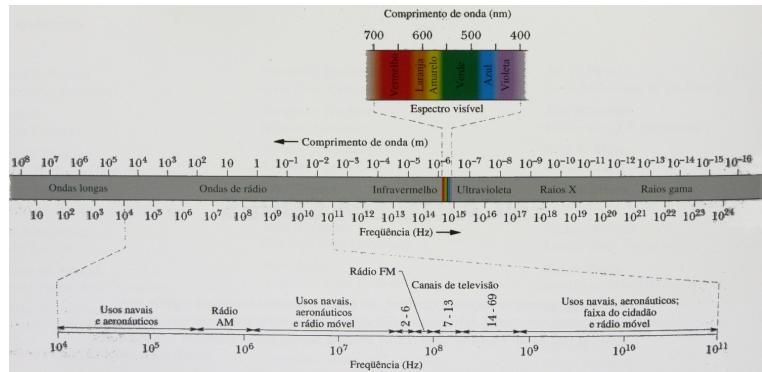


Figura 5 - Espectro eletromagnético
Fonte: Halliday; Resnick; Walker

3.8 Antenas

Algumas informações sobre como as antenas funcionam foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho. Dentre elas, as características que influenciam no alcance para uma transmissão e recepção de dados. No entanto, segundo Hayt e Kemmerly (2011, p. 514), um estudo completo sobre aplicações de antenas requer inúmeros capítulos ou até mesmo livros inteiros.

O fenômeno descrito no item 3.7 é o princípio básico de funcionamento das antenas. Estas comportam-se como linhas de transmissão em aberto onde a energia eletromagnética desprende-se dos condutores e viaja no espaço.

De uma forma idealizada, essa energia propagaria isotropicamente, formando uma esfera em torno da antena, na superfície da qual se distribui. Porém esse é apenas um referencial teórico, visto que uma antena não irradia igualmente em todas as direções.

De acordo com Rappaport (2009, p. 75), para essa antena teórica, denominada isotrópica, a densidade de potência em um ponto distante pode ser calculada considerando-se apenas a distância a que está da antena e a potência transmitida:

$$P_d = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad (3)$$

No entanto um dipolo não irradia igualmente em todas as direções. Especialmente ao longo de seus condutores a potência irradiada é igual a zero. A potência que não se irradia nesse sentido é então distribuída em outras direções, o que implica em um ganho onde essa energia estiver concentrada. (Figura 6).

Diagramas de irradiação de antenas podem ser apresentados em três dimensões, como é o caso da Figura 6, ou em dois diagramas em duas dimensões ortogonais entre si. As formas neles registradas representam a intensidade de um sinal irradiado em torno antena.

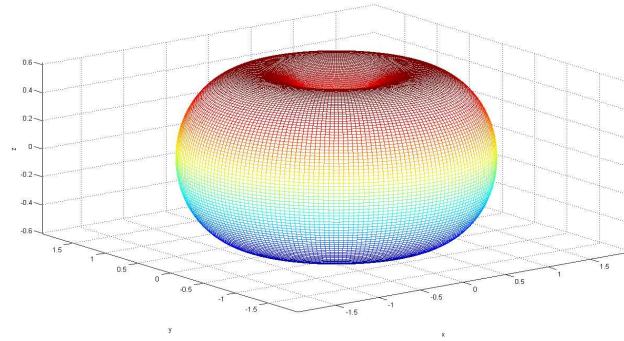


Figura 6 - Diagrama de irradiação de um dipolo

Um outro modo de intensificar o sinal de uma antena, e assim aumentar o seu ganho, é redirecionar com uma superfície refletora a energia irradiada nas direções não úteis. Para que os sinais cheguem em fase até o elemento receptor, a distância percorrida pelo sinal refletido em qualquer parte da superfície refletora dever ser sempre a mesma. Essa característica implica em um geometria que pede uma superfície refletora curva, como mostra a Figura 7.

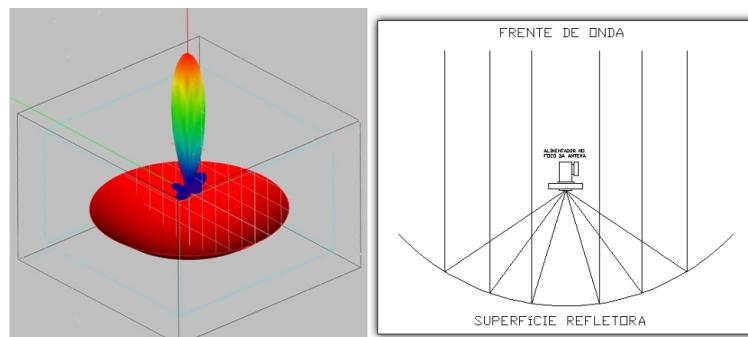


Figura 7 - Diagrama de irradiação de uma parábola

3.9 Atenuação no espaço livre

Uma das principais características observadas na propagação em espaço livre é a atenuação. Um bom modelo didático é imaginar uma esfera que, enquanto se expande, distribui por sua superfície a potência do sinal emitido, diminuindo a densidade de potência por metro quadrado. (MACHADO, 2010).

Segundo Medeiros (2011, p. 115) o modelo de espaço livre pressupõe um só caminho e sem obstáculos no processo de propagação entre emissor e receptor. Dessa forma, os únicos

elementos que afetam a atenuação são: a distância entre os elementos “d” e a frequência transmitida, sendo utilizado seu comprimento de onda “λ” para os cálculos.

A expressão usada para calcular o valor da atenuação no espaço livre é, portanto:

$$L_{fs} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (4)$$

o que pode ser expresso também em dB da seguinte forma:

$$L_{fs} = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (5)$$

3.10 Difração

O princípio da decomposição de uma frente de ondas em inúmeras fontes puntuais foi estabelecido no final do século XVII. Segundo Huygens ([16--] apud HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003, p. 52), “depois de um intervalo de tempo t, a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a estas ondas secundárias.” (Figura 8).

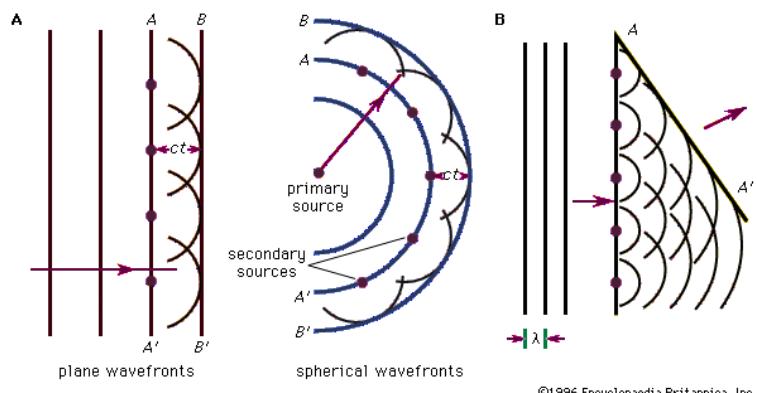


Figura 8 - Princípio de Huygens

Essa forma geométrica de tratar a propagação permite explicar os fenômenos da propagação ondulatória e suas leis. Dentre os quais está a difração, que é o espalhamento de uma onda ao passar por obstáculos compatíveis com seu comprimento de onda, e que oportuniza as comunicações fora de linha de visada:

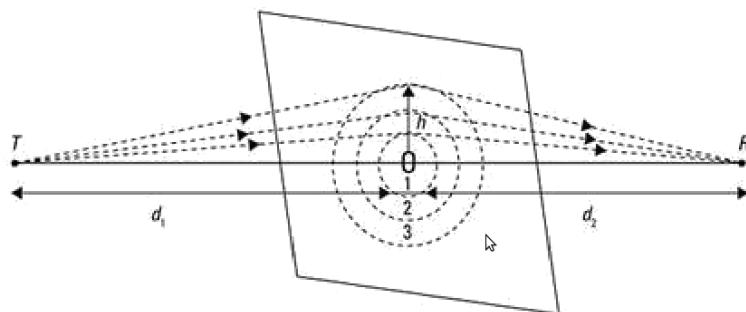
A difração permite que sinais de rádio se propaguem ao redor da superfície curva da terra, além do horizonte, e por trás de obstruções. Embora a força do campo recebido diminua rapidamente enquanto o receptor se move mais profundamente em direção à região obstruída (sombra), o campo de difração ainda existe e normalmente tem força suficiente para produzir um sinal útil. (RAPPAPORT, 2009, p. 83).

Embora esse fenômeno seja uma limitação para a ótica geométrica, é um auxílio para a radio propagação. Sem ele muitas das comunicações que conhecemos não existiriam.

3.10.1 Zonas de Fresnel

O conceito de uma “Zona de Fresnel” define-a como um espaço tridimensional elipsoidal, com uma abrangência que se estende ao longo e em torno da linha de visada direta entre os elementos de um radio enlace e através da qual se propaga a maior parte da potência do sinal recebido pelo destinatário. (VIANA; ALMEIDA; SANTOS, 2010, p. 57).

As zonas de Fresnel originam-se a partir dos diferentes percursos percorridos pela onda da origem até o destino. Devido ao Princípio de Huygens, base teórica do fenômeno da difração, as ondas percorrem diversos caminhos e completam o percurso com um certo atraso em relação à onda que percorre o caminho direto. A região em torno da linha de visada direta, onde percorrem ondas cuja defasagem da chegada seja menor que meio comprimento de onda em comparação com as que percorrem o caminho mais curto, é definida como a primeira zona de Fresnel. Em torno desse elipsoide formam-se outros, apresentando defasagens entre meio e um comprimento de onda (segunda zona de Fresnel cujos sinais chegam defasados), entre um e um e meio comprimentos de onda (terceira zona de Fresnel em que novamente chegam em fase), o que se repete alternando entre reforço ou degradação do sinal recebido. (Figura 9).



Círculos concêntricos que definem os limites das zonas de Fresnel sucessivas.

Figura 9 - Zonas concêntricas de Fresnel

A potência do sinal se concentra na região mais próxima ao centro e decai rapidamente ao se afastar da linha de visada. Normalmente são consideradas até a terceira zona de fresnel, a partir da qual a contribuição do sinais recebidos é considerada irrelevante. (LEHPAMER, 2004, p. 38; MACHADO, 2010).

“A questão fundamental para a operação em linha de visada está em torno da primeira zona de Fresnel [...]” (VIANA; ALMEIDA; SANTOS, 2010, p. 57) que deverá ter um mínimo de obstrução a fim de evitar perdas mais elevadas na propagação. Porém, sinais em menores amplitudes poderão ser recebidos mesmo que essa zona esteja obstruída. Com a difração, parte dos sinais percorrem um caminho mais afastado da linha de visada. São esses os sinais de interesse na transposição de obstáculos e do horizonte.

3.10.2 Modelo de difração gume de faca

As perdas ocasionadas pela obstrução parcial ou total das primeiras zonas de Fresnel podem ser estimadas utilizando-se para isso alguns modelos matemáticos. Essa metodologia visa a previsão da intensidade de um sinal em determinada área, além de montanhas e prédios.

Quando a obstrução é constituída de um só objeto o caso pode ser tratado como uma difração do tipo gume de faca. De acordo com Rapport (2009, p. 86) esse é o método mais simples e a atenuação pode ser estimada utilizando-se a solução clássica de Fresnel para o campo atrás de um gume de faca.

Nessa técnica, além das distâncias entre cada uma das antenas e o obstáculo, utilizam-se o comprimento de onda do sinal e o ângulo de difração α . O valor de α resulta da soma de outros dois ângulos que correspondem à diferença de direção entre a reta que une as duas antenas e, as retas que tangenciam o topo do obstáculo e cada uma das antenas. (Figura 10).

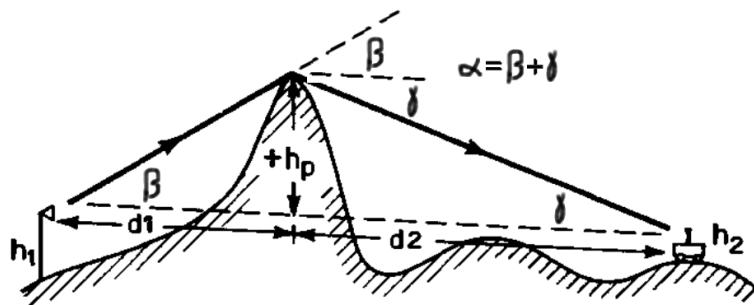


Figura 10 - Ângulo de difração em gume de faca

O ângulo obtido é utilizado na definição do parâmetro de difração de Fresnel - v :

$$v = \alpha \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}} \quad (6)$$

Tendo obtido o parâmetro de difração v a perda por difração pode ser consultada sobre um gráfico da integral complexa de Fresnel, que pode ser visto na Figura 11. (RAPPAPORT, 2009, p. 86).

Outra possibilidade é uma solução aproximada fornecida por Lee (1997 , p. 142):

$$G_{dif} = \begin{cases} 0 \text{ dB} & v \leq -1 \\ 20 \log(0,5 - 0,62v) & -1 \leq v \leq 0 \\ 20 \log(0,5 \exp(0,95v)) & 0 \leq v \leq 1 \\ 20 \log\left(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,38 - 0,1v)^2}\right) & 1 \leq v \leq 2,4 \\ 20 \log\left(\frac{0,225}{v}\right) & v < 2,4 \end{cases} \quad (7)$$

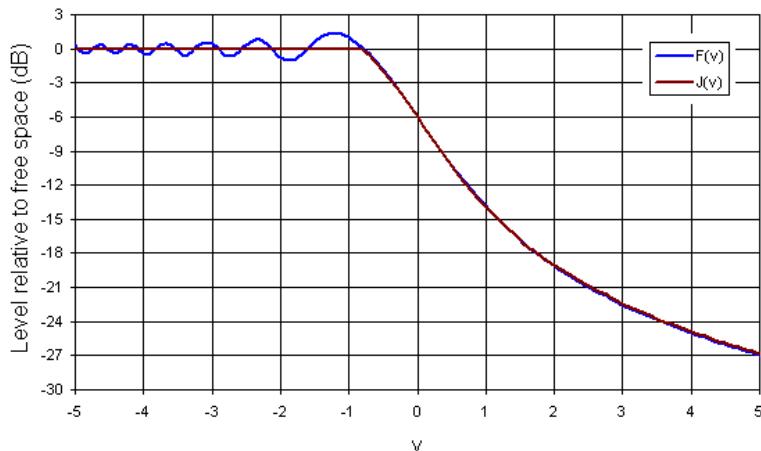


Figura 11 - Ganho de difração tipo gume de faca

3.10.3 Gumes de faca múltiplos

O método proposto por Bullington para esses casos compreende uma simplificação do relevo em um único obstáculo equivalente. Esse obstáculo tem seu ponto máximo no encontro das semirretas com origem nas antenas receptora e transmissora e o ponto de relevo entre elas que cuja inclinação seja a maior possível. Utilizando-se a formação resultante calcula-se a atenuação por difração pelo método gume de faca. (RAPPAPORT, 2009, p. 88).

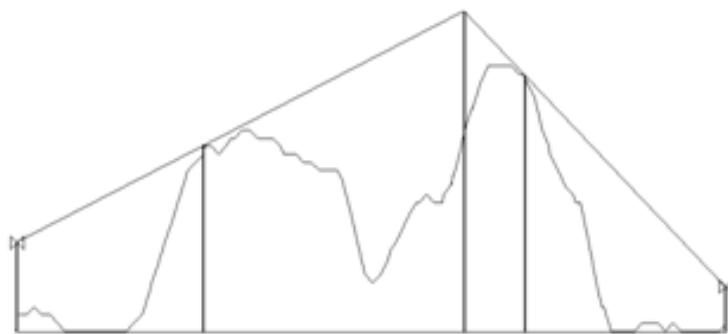


Figura 12 - Método de Bullington

3.11 Linguagem de cálculo matemático GNU Octave

GNU Octave é uma linguagem interpretada de alto nível empregada especialmente em cálculo numérico. Dentre suas funcionalidades destacam-se os recursos de representação gráfica de dados. Pode ser utilizado de forma interativa ou em scripts programados,. Essa adaptabilidade o torna uma alternativa bastante robusta para a resolução de problemas matemáticos e experimentos numéricos. É bastante versátil e sua linguagem é compatível com o Matlab, um dos mais conhecidos softwares para essa finalidade. (EATON, 1997, p. 5).

O GNU Octave é um software de distribuição livre e possui uma considerável quantidade de documentações e é atualizado constantemente. A versão utilizada nesse trabalho é a 3.2.3.

3.12 Manipulação dos dados de terreno

Manipular informações em arquivos binários requer um conhecimento do modo como os dados ali contidos estão estruturados. Sem isso, resultados inconsistentes podem ser obtidos utilizando-se uma metodologia adequada mas que trate erroneamente os dados fornecidos. Essa experiência foi vivida nas tentativas em acessar os arquivos utilizados contendo o modelo numérico do terreno.

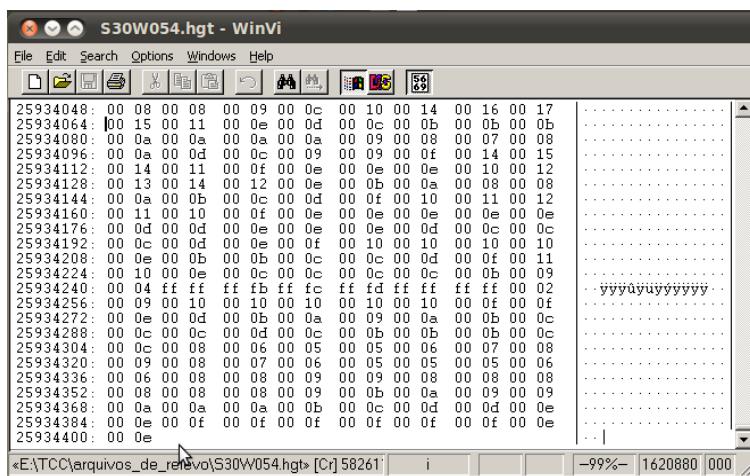


Figura 13 - Bytes finais do arquivo de relevo

Buscou-se conhecer melhor como estava organizada a informação com a qual pretendia-se trabalhar. Um arquivo desse tipo foi então aberto utilizando-se um editor de arquivos em sua estrutura binária (winvi32.exe) de onde foram colhidas algumas informações.

Na Figura 13 pode ser observado que o byte final do arquivo ocupa a posição 25934402. Essa informação permitiu estimar a dimensão da matriz por ele representada, o que foi feito utilizando-se o seguinte cálculo:

$$n = \sqrt{\frac{25934402}{2}} \quad (8)$$

$$n = 3601 \quad (9)$$

O valor 3601 revela então que pode tratar-se de uma matriz quadrada contendo 3601 linhas e colunas. Provavelmente os 3600 segundos em um grau, seja de latitude ou de longitude, mais uma linha e uma coluna de recobrimento nas bordas.

Tendo importado os dados, utilizando um primeiro script a ser interpretado pelo software de processamento matemático Octave, e plotado um gráfico 3D com essas informações esperava-se uma figura que pudesse ser interpretada como uma superfície de relevo de alguma região nas proximidades. No entanto foi gerada a Figura 14, contendo uma imagem inconsistente com a informação pretendida.

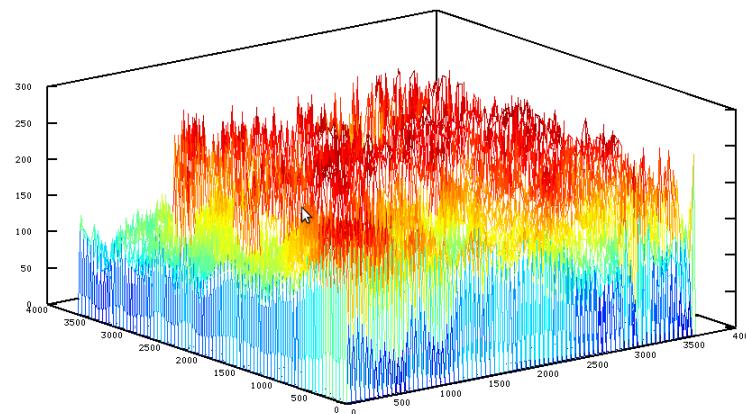


Figura 14 - Primeiro acesso ao arquivo de relevo

Novamente foi necessário recorrer à estrutura dos arquivos de relevo. Procurava-se uma explicação para uma mudança tão drástica entre pontos consecutivos

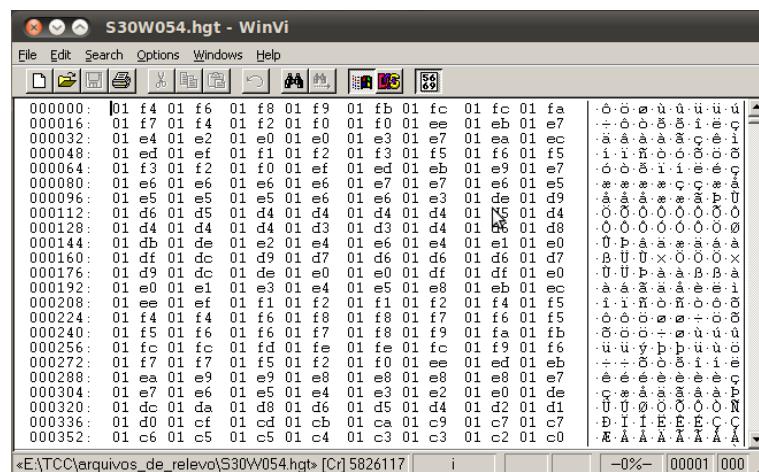


Figura 15 - Estrutura em Bytes de um arquivo hgt

A informação relevante retirada dessa vez do arquivo de relevo como visto na Figura 15 já fora percebida pela interpretação da Figura 13. A sequência alternada de bytes com valor muito próximo a zero e outro valor mais significativo. Essa constatação está de acordo com a imagem da Figura 14 que mostra uma variação muito grande de valores entre 0 e acima de 200. Esses valores são compatíveis com dados constituídos por dois bytes, o que justifica a

alternância entre as grandezas de valores, o que embora fosse verificado no cálculo da dimensão da matriz não foi empregado no tratamento dos dados.

Mais uma característica importante na tomada dos dados é a sequência dos bytes na composição da grandeza. Visto que para cada par de bytes correspondente a um valor o que menos varia é o primeiro, os dados foram caracterizados como armazenados em ordem big-endian, onde o byte mais significativo ocupa a posição inferior de memória.

Mais uma vez foi plotado o gráfico destes arquivos, considerando agora a composição de dois bytes para cada valor indicado. O resultado pode ser visto na Figura 16 e, embora mais linear, ainda apresenta mudanças de relevo muito bruscas entre pontos consecutivos.

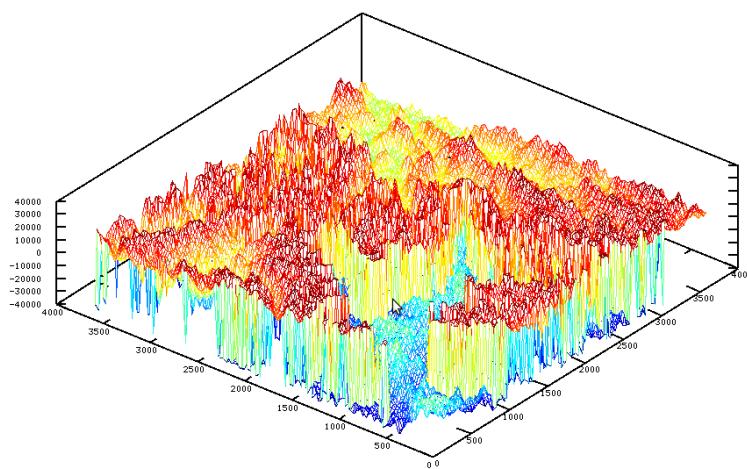


Figura 16 - Segundo acesso ao arquivo de relevo

A imagem ainda não satisfaz as expectativas, e uma nova análise é requerida. Ainda utilizando a leitura binária dos arquivos outro ponto foi considerado. Em alguns pontos do arquivo existe uma mudança de valores da ordem de 00 04 e 00 09 para outros de ordem ff ff e ff fb, o que pode ser visto especialmente na Figura 13. Essa notação hexadecimal admite que valores negativos sejam representados da mesma forma que grandes números. A diferença pode estar na base numérica utilizada, ou seja, se sua composição adota apenas valores positivos ou também negativos.

Uma nova tentativa foi feita considerando valores de ambos os sinais. A Figura 17 mostra agora uma imagem compatível com os objetivos desse trabalho. Dessa maneira serão tratados os dados armazenados nos arquivos de relevo.

Durante a geração dos gráficos observou-se uma grande demora em processar esses arquivos. Considerando que o alcance da propagação em espaço livre dos sinais do enlace seria o raio da área de interesse, dados de mais de um arquivo seriam necessários para compor o relevo do cenário em questão.

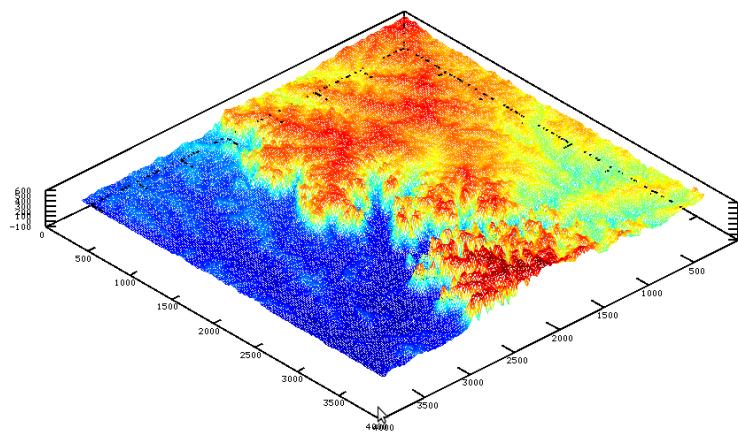


Figura 17 - Mapa do relevo da região de Santa Maria

Em resposta a isso, optou-se pela elaboração de um script (Apêndice A) que inicialmente concatenou os dados de 9 arquivos. Como arquivo central o de Santa Maria e região e mais um arquivo extra no contorno desse - Figura 18.



Figura 18 - Mosaico para relevo da região central

O processamento do script1.m deu origem ao arquivo relevosul.hgt que contém o mosaico dos nove arquivos com o relevo da região. A utilização de um só arquivo, previamente processado permitiu ganhar bastante tempo de processamento, evitando o acesso ao disco rígido cada vez que se adotasse o relevo de um azimute diferente. O resultado pode ser visto na Figura 19.

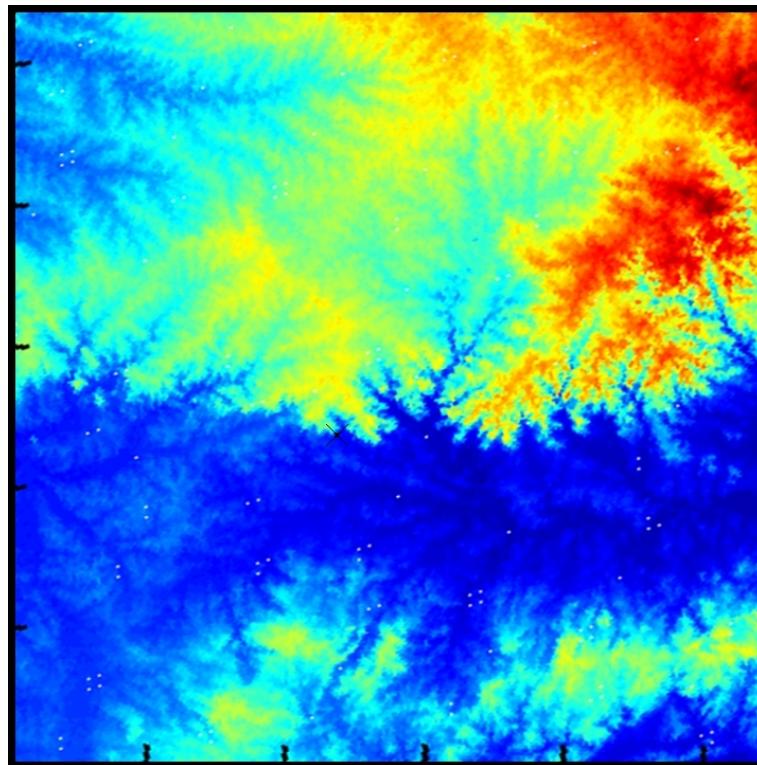


Figura 19 - Gráfico do arquivo relevosul.hgt

3.13 Elaboração do algoritmo de verificação do enlace

O algoritmo foi desenvolvido utilizando a metodologia de desenvolvimento dirigido por testes – TDD. TDD compreende programar rotinas que verifiquem a consistência de cada novo passo implementado no algoritmo. Essa técnica proposta por Azevedo (2011) foi utilizada desde a manipulação dos arquivos de relevo até a obtenção dos resultados finais.

Para que se possa definir a área de possível operação no cenário em questão precisou-se considerar o entorno da estação de controle. Para isso, no script2.m (Apêndice C) foi implementado um laço de repetição 1 a 360, correspondente aos azimutes pretendidos. Com esses valores de direção foram coletados dados da elevação ao longo de uma linha reta, como se fosse um corte no terreno.

3.13.1 Alcance limite em uma dada direção

Cada uma das direções foi tratada separadamente utilizando a função limiar, implementada no arquivo limiar.m (Apêndice D). Nesse algoritmo utilizou-se a técnica de cálculo computacional denominada Método da Bisseção. Esse método busca a raiz de uma expressão considerando para isso um intervalo dentro do qual a resposta deve ser encontrada. Calcula-se

o valor para o ponto médio do intervalo e, avaliando se esse resultado implica em um ponto acima ou abaixo do pretendido para a expressão, define-se um novo intervalo dentro do qual pretende-se encontrar a resposta. Isso é repetido até que valores satisfatórios sejam encontrados. (MARINS, 1982, p. 148).

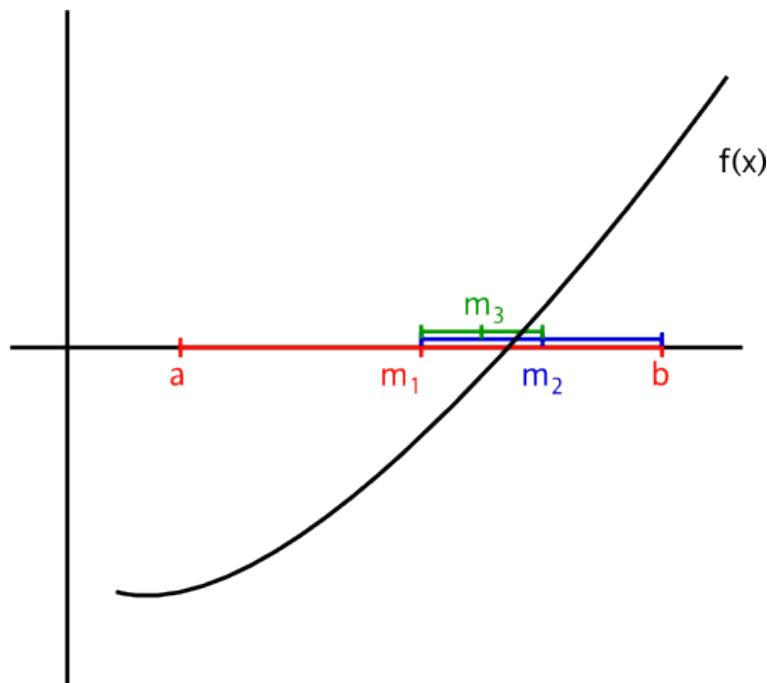


Figura 20 - Método da Bisseção

3.13.2 Cálculo da potência recebida

A busca de cada resultado também foi implementada separadamente. No arquivo potencia.m (Apêndice E) está definida a função que calcula a potência recebida pelo veículo aéreo observando os fatores que influenciam nesse resultado.

Ao relevo foi acrescido um arco de elevação simulando a curvatura da terra. O acréscimo desses valores permitiu que a influência do horizonte esteja considerada nos cálculos.

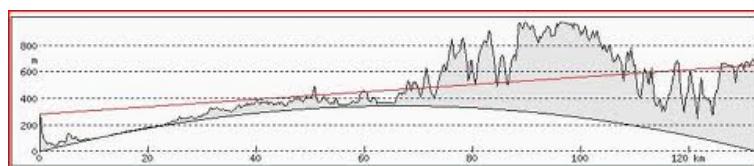


Figura 21 - Relevo sobre a curvatura da terra

Os cálculos foram processados considerando os valores em dB. Dessa forma, à potência calculada desprezando-se o relevo (atenuação no espaço livre) bastou acrescentar-se a

atenuação em função do relevo. Nos casos em que o relevo apresentou múltiplos gumes de faca foi implementado o método de Bullington.

3.13.3 Resultados gráficos

O algoritmo de verificação do enlace, chamando as funções anteriormente citadas, elabora um vetor de 360 posições contendo o alcance do enlace no entorno da estação de solo. Para armazenar os resultados alcançados para cada elevação escolheu-se gerar uma imagem que é salva pelo algoritmo. O nome de cada imagem é dado pela altura em pés do voo à qual corresponde seguido da extensão jpg.

3.14 Processamento dos dados

Para a interpretação dos arquivos foi utilizado o Octave versão 3.2.3 executado em Linux Ubuntu 10.04.4, kernel 2.6.32-45. O processamento foi feito em duas partes. A primeira compreendeu a geração de um arquivo de dados de relevo que contemplasse todo o cenário de interesse. Como visto na Figura 18 - página 34, foram utilizados 9 arquivos para abordar toda a área. Esse processamento durou mais de 6 horas e resultou no arquivo relevo-sul.htg.

A segunda parte utilizou o arquivo gerado na etapa anterior como fonte de dados. Utilizou-se os mesmos modos de processamento, porém o interpretador exigiu que o modo gráfico do sistema operacional estivesse em funcionamento. Esse processamento durou pouco mais de 2 horas. Em resposta apresentou as quinze imagens associadas às alturas de voo.

4 RESULTADOS

Após desvendar a estrutura dos arquivos contendo o relevo e colher as informações dos sistemas do VANT a serem utilizadas nesse trabalho deu-se início a busca de resultados numéricos e gráficos. Tomou-se o cuidado na manipulação de valores em unidades diferentes do SI, buscando a consistência dos resultados encontrados.

Tendo em mãos as características dos equipamentos utilizados nesse enlace, a primeira busca foi pelo alcance máximo que poderia ser estabelecido. Desconsiderando-se a curvatura da terra e o relevo obteve-se a distância na qual o valor da potencia , sujeita a propagação no espaço livre, é igual a sensibilidade do receptor.

$$d_{max} = \frac{\lambda \times \sqrt{10^{\frac{P_t + G_i + G_r - Sens}{10}}}}{4\pi} \quad (10)$$

$$d_{max} = 81.067 m \quad (11)$$

A partir desse valor deduz-se que o cenário para essa transmissão ocupará um diâmetro maior que 162Km. Como essa distância foi considerada a partir do aeródromo de Santa Maria, verifica-se a necessidade de buscar dados em 9 arquivos contendo as elevações da região.

A partir da montagem de um mosaico contendo as informações desses 9 arquivos os algoritmos puderam ser aplicados ao problema aqui proposto. Os resultados são uma série de imagens representados desde a Figura 22 até a Figura 36. A possibilidade de obtenção e interpretação dessas imagens é a parcela maior dos objetivos desse trabalho.

Uma análise mais detalhada revela, já na primeira figura, a influência do relevo. A ate-nuação é tão mais intensa quanto a proximidade de uma formação. Observando a parte superior das imagens, que corresponde ao norte, e o Anexo A percebe-se o efeito da presença da cadeia de montanhas próximas ao aeródromo de Santa Maria.

Adotar um nível de voo mais alto também melhora os a qualidade de um enlace entre os elementos de terra e aéreo. A sequência de apresentação das figuras está de acordo com um nível de voo crescente e percebe-se, juntamente com esse nível, o crescimento da área onde a comunicação é possível.

Mesmo sendo adotado o nível mais elevado de voo, 15.000 pés, o alcance do link não atingiu o limite previsto para o equipamento quando em espaço livre. Um pouco à esquerda do norte, como pode ser visto na Figura 36, não mostra-se possível uma troca de informação além de aproximadamente metade do limite citado.

Seguem as imagens geradas na execução do algoritmo proposto:

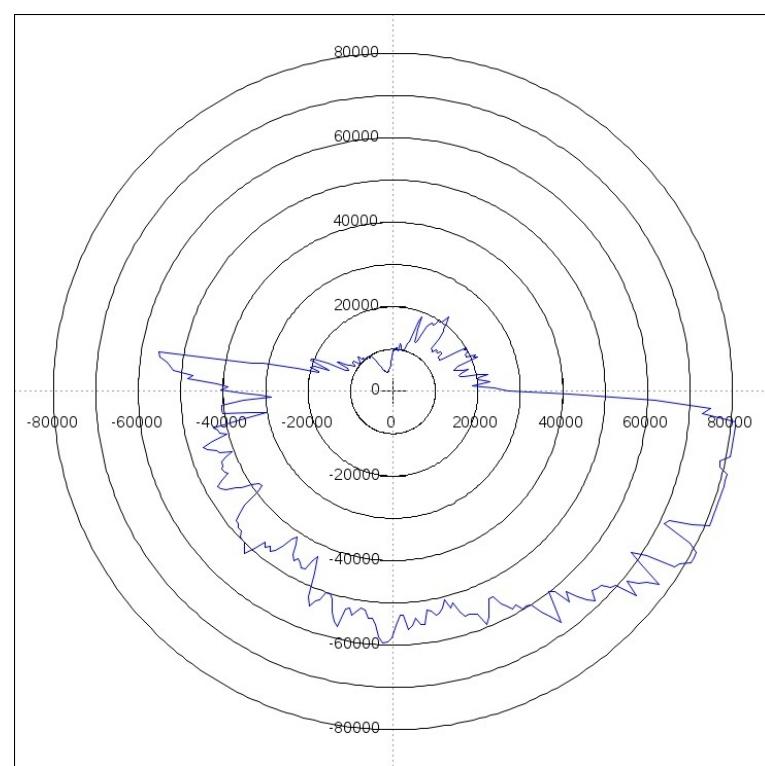


Figura 22 - Alcance para voo a 1.000ft

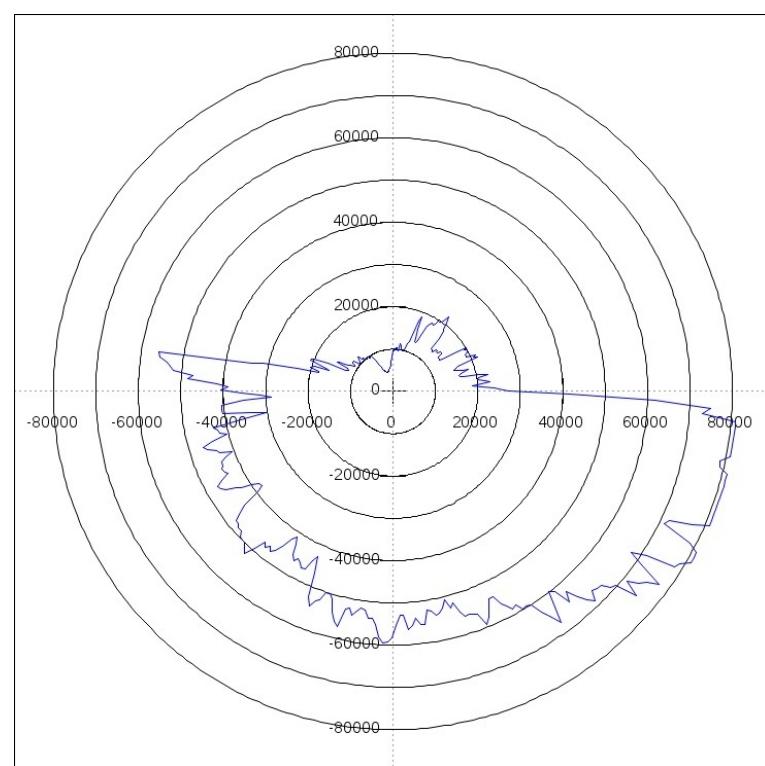


Figura 23 - Alcance para voo a 2.000ft

Figura 24 - Alcance para voo a 3.000ft

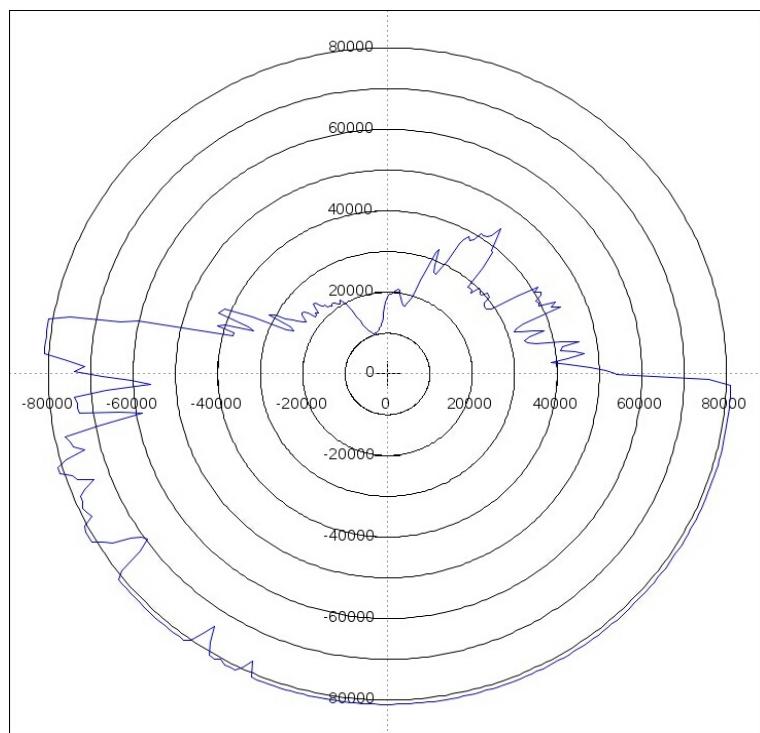


Figura 25 - Alcance para voo a 4.000ft

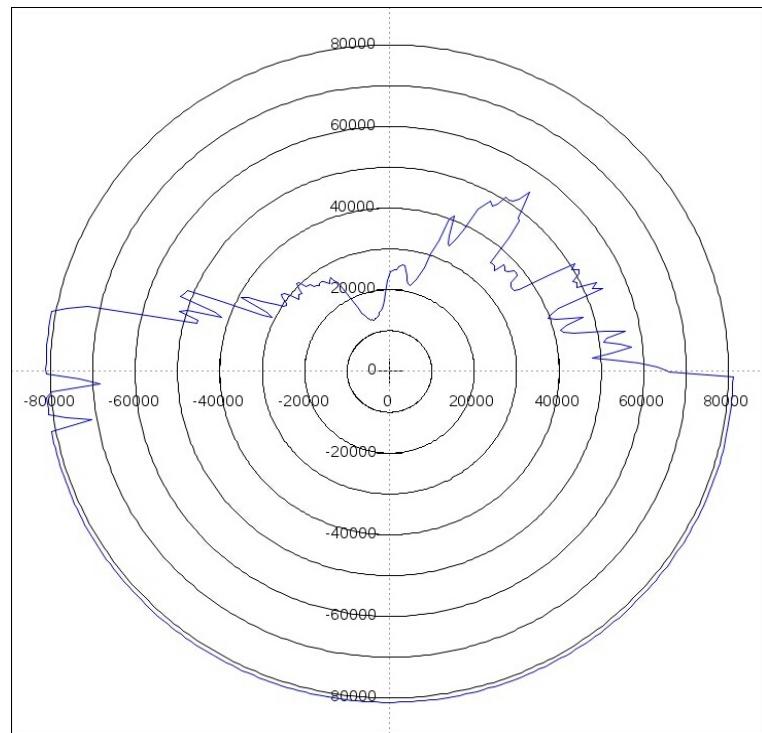


Figura 26 - Alcance para voo a 5.000ft

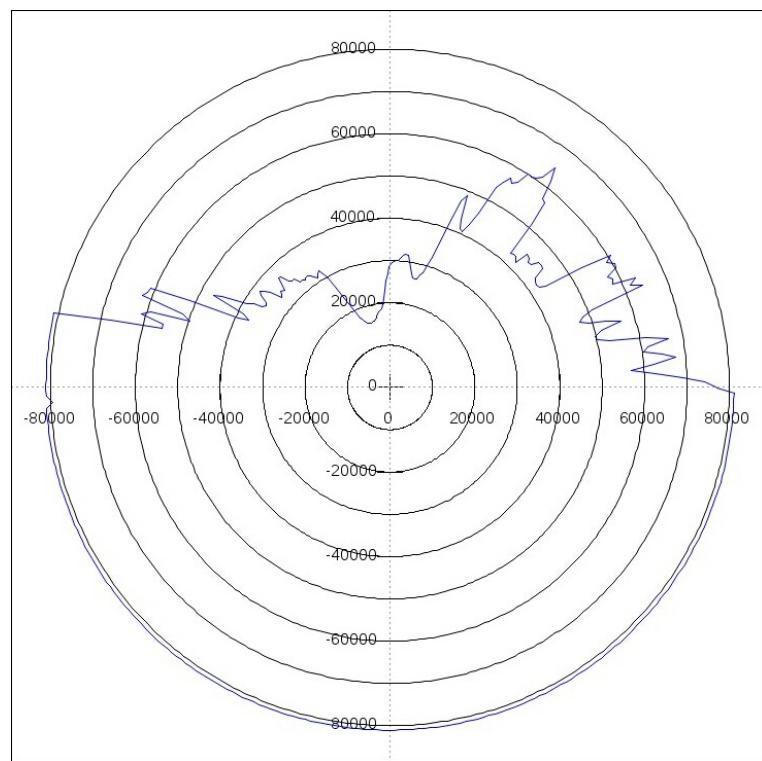


Figura 27 - Alcance para voo a 6.000ft

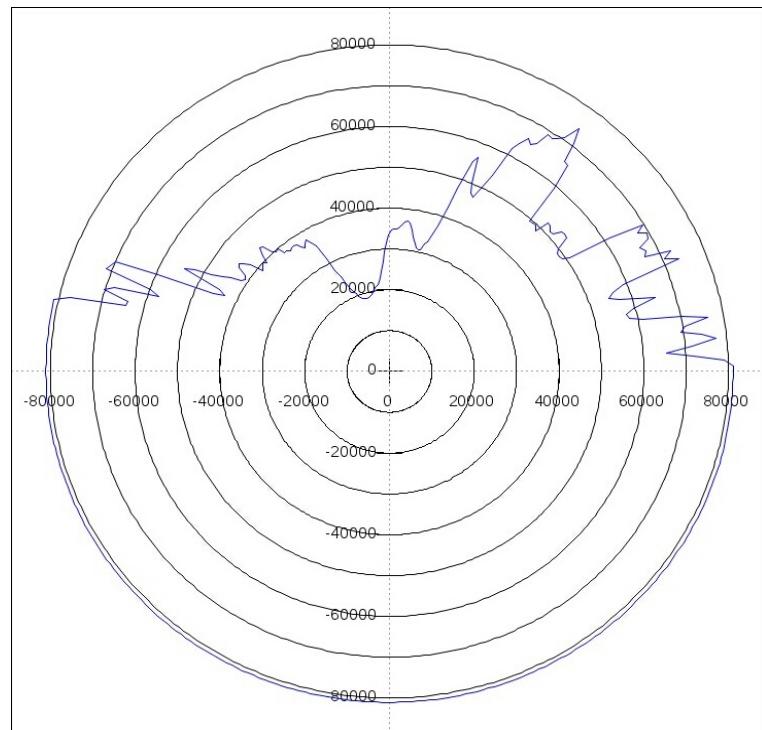


Figura 28 - Alcance para voo a 7.000ft

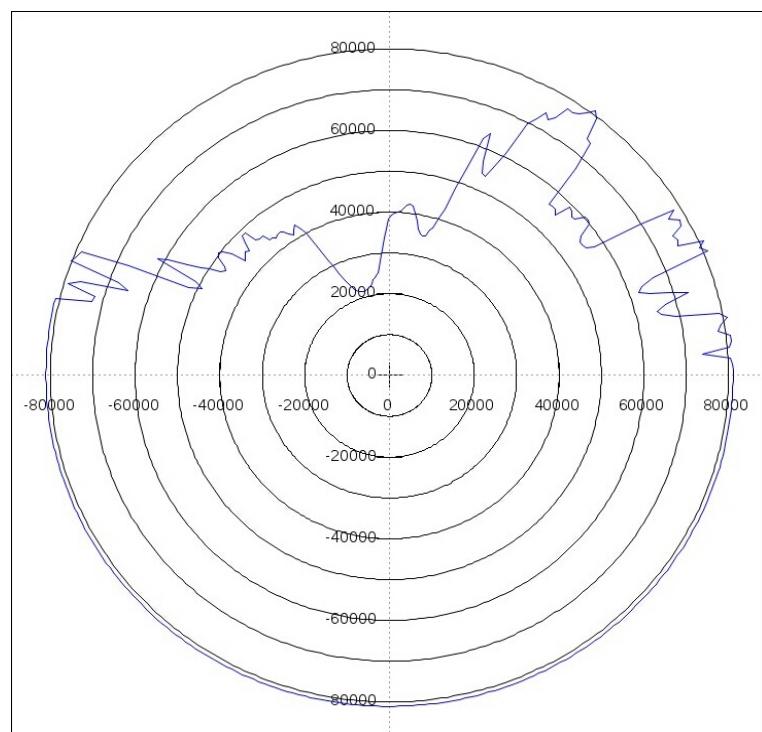


Figura 29 - Alcance para voo a 8.000ft

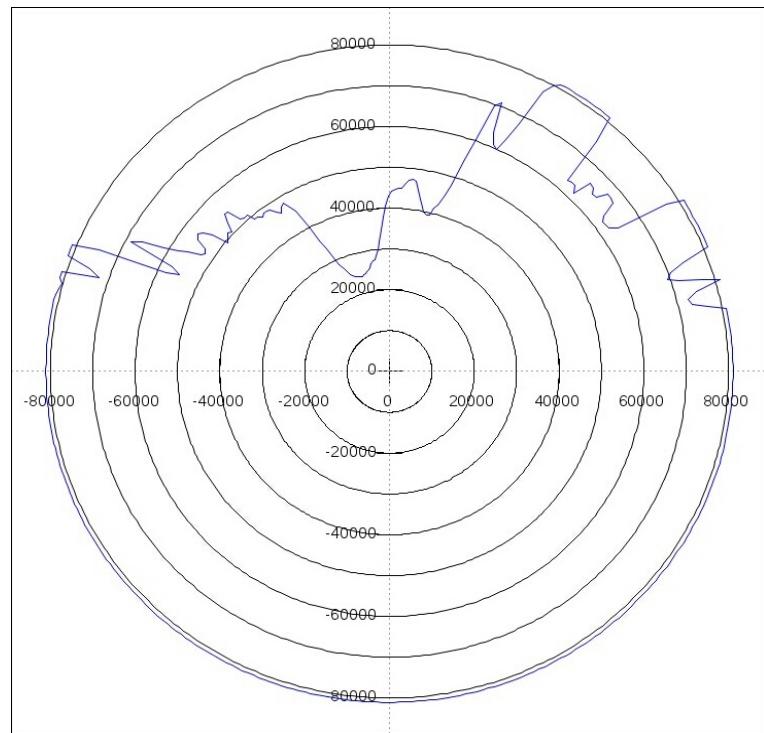


Figura 30 - Alcance para voo a 9.000ft

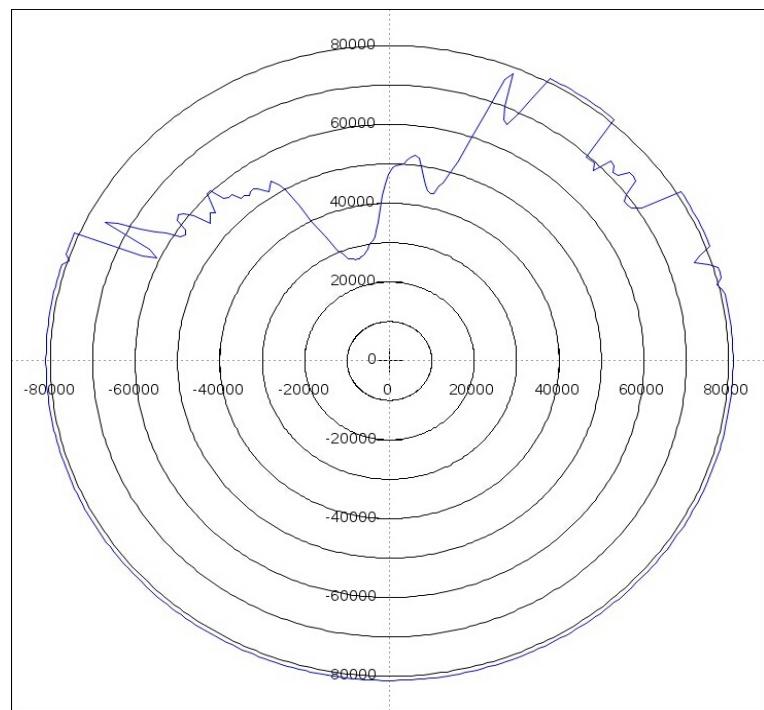


Figura 31 - Alcance para voo a 10.000ft

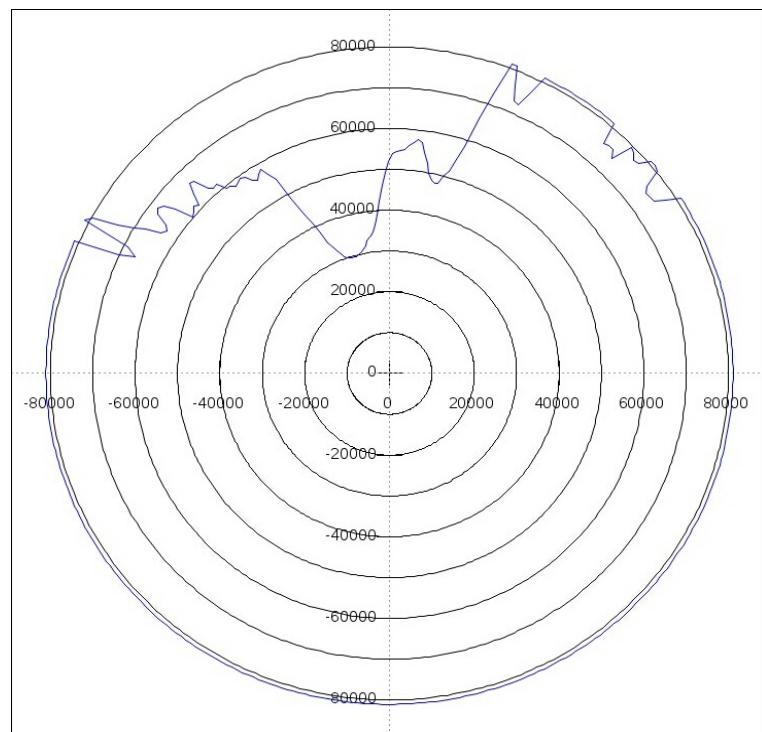


Figura 32 - Alcance para voo a 11.000ft

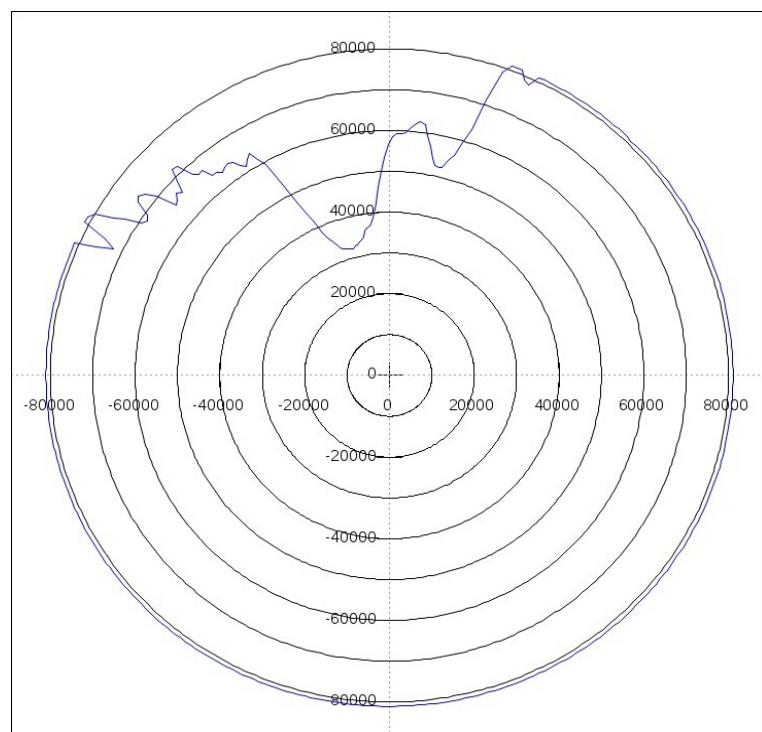


Figura 33 - Alcance para voo a 12.000ft

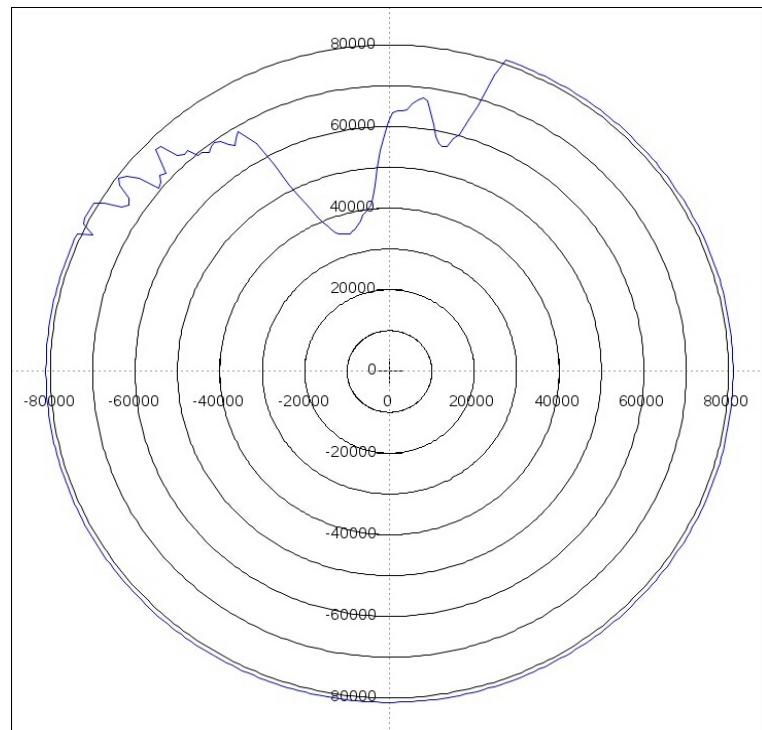


Figura 34 - Alcance para voo a 13.000ft

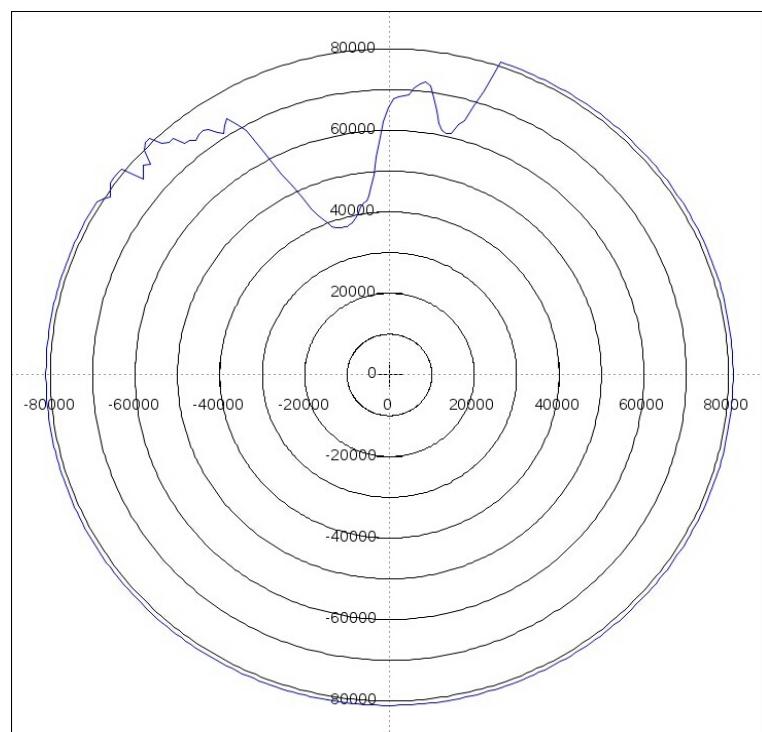


Figura 35 - Alcance para voo a 14.000ft

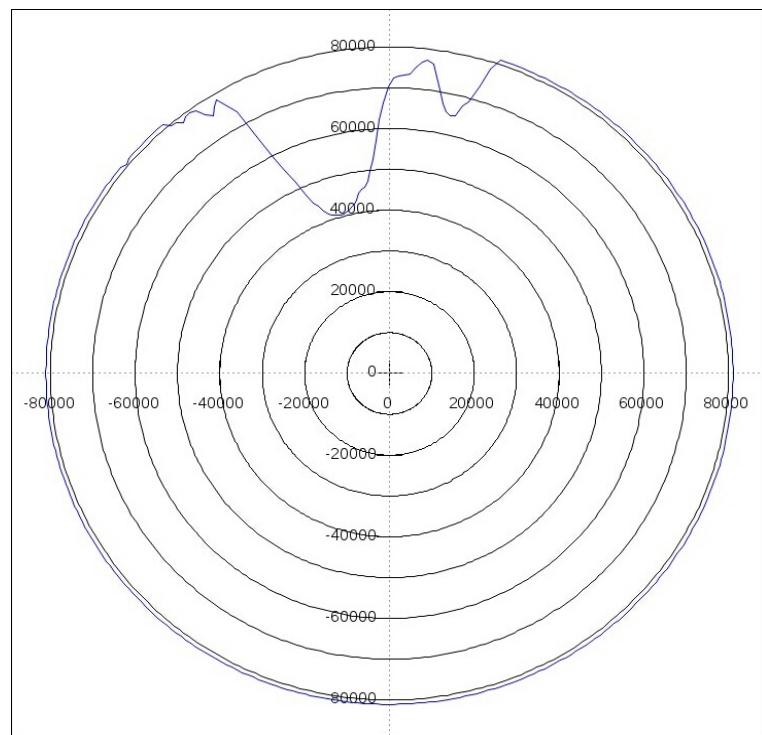


Figura 36 - Alcance para voo a 15.000ft

5 DISCUSSÃO

De acordo com Rudinskas (2009, p. 2), as aeronaves não tripuladas estão sujeitas a dois tipos de interferências. O primeiro é independente de manipulação humana, o que pode ser entendido como condições atmosféricas, obstáculos naturais e a atenuação no espaço livre. O segundo é provocado pelo homem, seja de forma direta ou indireta, incluindo bloqueio de canal, interferência na mesma faixa de frequência ou até mesmo a tomada do controle do enlace utilizando um sinal com as mesmas características e maior potência. Os trabalhos de Rudinskas justificam as preocupações com voos telecomandados, o que pode ser mais crítico no emprego militar onde a neutralização de recursos inimigos são uma considerada vantagem.

O trabalho de análise do enlace para um VANT estuda interferências classificadas no primeiro tipo proposto por Rudinskas. Os resultados obtidos com esse trabalho vem somar em qualidade e em segurança na utilização dessa tecnologia, pois revelam características fundamentais do emprego desses recursos para um cenário específico.

Os resultados foram colhidos para azimutes com separação de 1º o que compreende um arco de separação entre os pontos que cresce com a distância. Embora sejam tomados pontos a uma separação consideravelmente maior quando o enlace é mais longo, isso não prejudica significativamente os resultados. Pode-se observar, avaliando o relevo juntamente com os resultados que maior atenuação é propiciada pelo relevo mais próximo, situação onde o arco de separação dos pontos é também menor.

Felgueiras e Câmara (2006) citam que uma representação matemática computacional pode representar a distribuição de qualquer fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície da terra, à qual pode ser georreferenciado. Do mesmo modo que o modelo numérico do terreno, outras matrizes contendo informações como a cobertura de nuvens, precipitação e névoa podem ser utilizados na elaboração de algoritmos semelhantes. Esses são dados que também contribuem para uma menor área de cobertura, no entanto são valores muito dinâmicos e requerem uma capacidade computacional muito grande para se obter resultados em tempo hábil à sua utilização.

O público alvo desse trabalho é composto pelos operadores de sistemas aéreos remotamente comandados, que no Brasil são originários do campo da aviação. Na formação dos profissionais dessa área constam trabalhos com mapas, dados de relevo, atmosfera e navegação. Toda essa informação é normalmente apresentada dentro de uma padronização para ser de fácil interpretação e amigável ao manuseio. Já os gráficos resultantes dos algoritmos aqui propostos não seguem qualquer padronização, embora sua semelhança com diagramas de irra-

diação de antenas. São apenas gráficos polares com os quais podem ser verificados os resultados da metodologia proposta.

6 CONCLUSÃO

A utilização de sistemas complexos comandados à distância requer uma qualidade no enlace estabelecido sob pena de ocorrerem acidentes ou incidentes, podendo implicar em perdas materiais e humanas. Dessa forma, destaca-se a importância de conhecer o meio no qual se utilizam recursos com essa concepção.

A tomada de uma série de imagens, cada uma considerando uma altura diferente de voo mostrou-se condizente com o esperado no desenvolvimento deste trabalho. Os diagramas tão mais abrangentes quanto maior a elevação da antena receptora embarcada revelam a influência das alturas dos elementos irradiadores e receptores na potência recebida dos sinais. Ficou evidente também a influência do relevo, especialmente as formações mais próximas aos equipamentos de controle de solo.

Os resultados são apresentados em gráficos polares, o que normalmente não é muito intuitivo aos operadores dos meios da aviação. Uma apresentação utilizando um mapa local surtiria melhor efeito na utilização para confecção de planos de voo, o que geralmente é marcado em cartas aéreas.

Trabalhos futuros pedem o enriquecimento desta pesquisa, incluindo na verificação proposta análises atmosféricas e estudos da reflexão em superfícies planas. Isso contemplaria o emprego aéreo não tripulado em situação de instabilidade climática e sobre grandes camadas refletoras, a exemplo do oceano. Outra verificação proposta é a qualidade da conexão considerando-se o volume de dados que por ela devam trafegar.

Sobretudo é muito gratificante verificar no resultado de um trabalho uma apresentação em imagens daquilo que é invisível aos olhos, especialmente quando vislumbra-se um emprego prático às soluções propostas. Sem dúvida, o andamento dessa atividade complementa a formação, materializando seu esforço na aplicação dos conhecimentos adquiridos em um longo período preparatório.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, TARSIS. Testes de Software com python. In: ENCONTRO ANUAL DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO, 2., 2011, Frederico Westphalen. **Anais...** Frederico Westphalen: Colégio Agrícola de Frederico Westphalen, 2011.
- BARROS, H. L. de. **Santos Dumont e a invenção do Avião**. 1. ed. Rio de Janeiro: CBPF, 2006.
- DRUZINA, ALINE G. S. **Integração de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas para geração de um novo Modelo Digital de Elevação**. 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- EATON, JOHN W. **GNU Octave**: A high-level interactive language for numerical computations. 3. ed. 1997.
- FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. **Modelagem numérica de terreno**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em 07 mar. 2012.
- FURTADO, V. H. et al. Aspectos de Segurança na Integração de Veículos Aéreos não Tripulados no Espaço Aéreo Brasileiro. **VII Simpósio de Transporte Aéreo**, Rio de Janeiro, nov. 2008.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 6. ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, Vol.4., 2003.
- HAYT, JR. W.; KEMMERLY, J. E. **Engineering Electromagnetics**. 6. ed. Boston. McGraw-Hill, 2001.
- LEE, WILLIAM C . Y. **Mobile Communications Engineering**. 2. ed. New York. McGraw-Hill, 1997.
- LEHPAMER, H. **Microwave Transmission Networks**: Planning, Design and Deployment. 1. ed. New York, McGraw-Hill, 2004.
- MACHADO, R. **Teoria de Ondas e Magnetismo**. Santa Maria: UFSM, 2010. Notas de Aula.
- MARINS, JUSSARA M. **Métodos computacionais para o cálculo de raízes reais de equações polinomiais**. 1982. 367 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 18 mar. 2012.
- OLIVEIRA MEDEIROS, J. C. de. **Princípios de Telecomunicações**: teoria e prática. São Paulo. Érica, 2011.
- OLIVEIRA, W. S. de; CAMARGO, I. A. A.; LACERDA, M. G. Sistema de Reconhecimento de Padrões. **Revista CFOE**, Belo Horizonte, nov. 2010.

RAPPAPORT, THEODORE S. **Comunicação sem fio:** princípios e prática. 2. ed. São Paulo. Pearson Pratice Hall, 2009.

RUDINSKAS, D. Security Analysis of UAV Radio Communication System. **Aviation**, Oxford, UK, n.13, Nov. 2009.

TADIRAN SPECTRALINK LTD. **Data Link System:** Performance Specification. 2007.

_____. **UAV Data Links.** [S. l.] Dec. 2004.

TANENBAUM, ANDREW S. **Redes de Computadores.** 4. ed. Campus. 2010.

VIANA, M. R. B.; ALMENIDA, P. C. T. de; SANTOS, W. C. B. dos. A Rede Sem Fio Metropolitana WiMAX. **Revista CFOE**, Belo Horizonte, nov. 2010.

WILLIS, MIKE. **Propagation Tutorial.** 2007. Disponível em: <<http://www.mike-willis.com/Tutorial/PF7.htm>>. Acesso em: 18 dez. 2012.

APÊNDICES

Apêndice A – script1.m

```

clc
clf
clear

% POSICAO DO EQUIPAMENTO DE SOLO
lat = -29.7086; %{-29, -42, -31};
long = -53.7014;%{-53, -42, -05};

% CARACTERISTICAS
freq=3.5e9;      % FREQUENCIA [Hz]
ht=4;             % ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA [m]
hr_ft=6000;       % ALTURA DA ANTENA RECEPTORA [ft]
Pt=10;            % POTENCIA DO TRANSMISSOR [dBm]
Gt=30;            % GANHO NA TRANSMISSAO [dB]
Gr=1.5;           % GANHO NA RECEPCAO [dB]
Sens=-100;         % SENSIBILIDADE [dBm]

% VALORES INICIAIS
lambda=3e8/freq;    % COMPRIMENTO DE ONDA
hr=hr_ft*.3048;% ALTURA DO RECEPTOR NO SI

% AREA DE INTERESSE
esp_livre = prop_livre(Pt, Sens, Gt, Gr, lambda); % alcance sem obstáculos

arco = esp_livre/(1852*60);
vertice_00_lat = lat - arco;
vertice_00_lat = floor(vertice_00_lat);
vertice_00_long = long - arco;
vertice_00_long = floor(vertice_00_long);
vertice_11_lat = lat + arco;
vertice_11_lat = floor(vertice_11_lat);
vertice_11_long = long + arco;
vertice_11_long = floor(vertice_11_long);

relevosul = ones((3600*(vertice_11_lat - vertice_00_lat + 1)+1), (3600*(vertice_11_lat - vertice_00_lat + 1)+1));

% PREENCHIMENTO

for i = vertice_00_lat:1:vertice_11_lat
    for j = vertice_00_long:1:vertice_11_long
        endereço = ['/home/poetini/TCC/arquivos_de_relevo/S' int2str(-i) 'W0' int2str(-j)
        '.hgt'];
        arquivo = fopen(endereço);
        parcial = fread(arquivo, [3601, 3601], 'int16', 'ieee-be');
        for k = 1+(i-vertice_00_lat)*3600:1:1+(1+i-vertice_00_lat)*3600
            for l = 1+(j-vertice_00_long)*3600:1:1+(1+j-vertice_00_long)*3600
                relevosul(k,l) = parcial(1+mod(l,3600),3601-mod(k,3600));
            endfor
        endfor
        a = [i j]
        fclose(arquivo);
    endfor
endfor

```

```
endfor

x=1:100:10801;
y=x;
mesh(x,y,relevosul(3602-x,y))

fresult = fopen('/home/poetini/TCC/relevosul.hgt', 'w');
fwrite(fresult, relevosul, 'int16', 'ieee-be');
fclose(fresult);

% Script1.m – geração do relevo para toda a região de estudo em um único arquivo
```

Apêndice B – prop_livre.m

```
function distancia = prop_livre(Pt, Sens, Gt, Gr, lambda)
% uso: distancia = prop_livre(Pt, Sens, Gt, Gr, lambda)
% Pt = potência transmitida
% Sens = sensibilidade do receptor
% Gt = ganho na transmissão
% Gr = ganho na recepção
% lambda = comprimento de onda
distancia = sqrt(10^((Pt + Gt + Gr - Sens)/10))*lambda/(4*pi);
% distância máxima em que um sinal pode ser percebido.
```

Apêndice C – script2.m

```

clc
%clf
clear

% POSICAO DO EQUIPAMENTO DE SOLO
lat = -29.7086; %{-29, -42, -31};
long = -53.7014;%{-53, -42, -05};

% CARACTERISTICAS
freq=3.5e9;      % FREQUENCIA [Hz]
ht=4;             % ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA [m]
hr_ft=15000;      % ALTURA DA ANTENA RECEPTORA [ft]
Pt=10;            % POTENCIA DO TRANSMISSOR [dBm]
Gt=30;            % GANHO NA TRANSMISSAO [dB]
Gr=1.5;           % GANHO NA RECEPCAO [dB]
Sens=-100;         % SENSIBILIDADE [dBm]

% VALORES INICIAIS
lambda=3e8/freq;    % COMPRIMENTO DE ONDA
hr=hr_ft*.3048;% ALTURA DO RECEPTOR NO SI

% AREA DE INTERESSE
esp_livre = prop_livre(Pt, Sens, Gt, Gr, lambda); % alcance sem obstáculos [m]

arco = esp_livre/(1852*60); % ângulo na superfície terrestre [graus °]
vertice_00_lat = lat - arco;
vertice_00_lat = floor(vertice_00_lat);
vertice_00_long = long - arco;
vertice_00_long = floor(vertice_00_long);
vertice_11_lat = lat + arco;
vertice_11_lat = floor(vertice_11_lat);
vertice_11_long = long + arco;
vertice_11_long = floor(vertice_11_long);

arquivo = fopen('/home/poetini/TCC/relevosul.hgt');
relevosul = fread(arquivo, [(3600*(vertice_11_lat - vertice_00_lat + 1)+1), (3600*(vertice_11_lat - vertice_00_lat + 1)+1)], 'int16', 'ieee-be');
fclose(arquivo);

intervalo_relevo = 1852/60;
qtd = ceil(esp_livre/intervalo_relevo);
relevo = ones(1, qtd, 'int16');
x_centro = 3600*(long - vertice_00_long);
y_centro = 3600*(lat - vertice_00_lat);
proa = ones(1, 360, 'int16');

for h_voo = 1000:1000:15000
    hr = h_voo *.3048;

    for i=1:1:360
        ang_x=cos(i*pi/180);
        ang_y=sin(i*pi/180);
        for j=1:1:qtd

```

```

relevo(j) = single(relevosul(int16(x_centro+j*ang_x), int16(y_centro+j*ang_y)));
end
proa(i)=limiar(qtd, ht+relevosul(int16(x_centro), int16(y_centro)), hr, Pt+Gt, Sens-Gr,
lambda, relevo);
end

limites = 1.1 * esp_livre;
clf
azim = linspace(2*pi, 0, 360);
for k=10000:10000:80000;
    x = k*cos(azim)+center(1);
    y = k*sin(azim)+center(2);
    plot(x, y, 'k:');
    hold on;
end

for i=1:length(proa)
    proa2(i) = single(proa(1+mod(i+90,360)))*1852/60; % giro 90° (Norte para cima)
end

polar(linspace(2*pi, 0, 360), proa2)
axis([-limites, limites, -limites, limites])
salva_grafico = ['/home/poetini/TCC/resultados/' int2str(h_voo) '.jpg'];
print(salva_grafico)

end

% Script2.m – calculo e geração dos diagramas de alcance por elevação

```

Apêndice D – limiar.m

```

function distancia = limiar(d, ht, hr, Pt, Sens, lambda, relevo)
% uso: distancia = limiar(d, ht, hr, Pt, Sens, lambda, relevo)
% d = alcance no espaço livre em unidades da amostragem do relevo
% ht = altura da antena
% hr = altura do veículo
% Pt = potencia transmitida (considerar o ganho da antena transmissora)
% Sens = sensibilidade receptor (considerar o ganho da antena receptora)
% lambda = comprimento de onda do sinal
% relevo = vetor da elevação entre antena e móvel
dmin = 1;
dmax = d;
dmed = round((d+1)/2);
flag = -1;
while (dmax >= dmin)
    Pdmed = potencia(dmed, ht, hr, Pt, lambda, relevo);
    if (Pdmed == Sens)
        dmax = 0;
    elseif (Pdmed > Sens)
        dmin = dmed;
        dmed = floor((dmin + dmax)/2);
        %Pdmin = Pdmed;
    else
        dmax = dmed;
        dmed = ceil((dmin + dmax)/2);
        %Pdmax = Pdmed;
    end
    if (dmed == flag)
        dmax = 0;
    end
    flag = dmed;
end
distancia = dmed;

% limiar.m – calculo da distância máxima em um determinado azimute

```

Apêndice E – potencia.m

```

function Pdistanca = potencia(d, ht, hr, Pt, lambda, relevo)
% uso: Pdistanca = potencia(d, ht, hr, Pt, lambda, relevo)
% d = alcance no espaço livre em unidades da amostragem do relevo
% ht = altura da antena
% hr = altura do veículo
% Pt = potencia transmitida (considerar o ganho da antena transmissora)
% lambda = comprimento de onda do sinal
% relevo = vetor da elevação entre antena e móvel

Pot=Pt + 20*log10(lambda/(4*pi*d*(1852/60)));
cos_phi = cos(d/432000);
R_terra = 6.37e6; % Halliday, Resnick, Walker
for i = 1:1:d-1
    cos_gama = cos(abs((i-(d/2))/216000));
    relevo(i) = relevo(i) + R_terra * (cos_gama - cos_phi);
    inclin1(i) = (single(relevo(i)) - ht)/single(i);
    inclin2(i) = (hr - single(relevo(i)))/(single(d-i));
endfor
[inclin_max1, max1] = max(inclin1);
[inclin_max2, max2] = min(inclin2);

if (inclin_max1 < inclin_max2)
    G_dif = 0;
else
    if (inclin_max1 == inclin_max2)
        d_relevo_resultante = (max1 + max2)/2;
        relevo_resultante = (ht + hr) / 2;
    else
        d_relevo_resultante = int16((relevo(max2) - inclin_max2 * max2 - relevo(max1) +
        inclin_max1 * max1) / (inclin_max1 - inclin_max2));
        relevo_resultante = ((inclin_max1 * (d_relevo_resultante - max1)) + relevo(max1));
    endif
    if (d_relevo_resultante == 0)
        alpha = atan(single(relevo_resultante - ht)) + atan(single(relevo_resultante - hr)/single((d -
        d_relevo_resultante)*(1852/60)));
    elseif (d == d_relevo_resultante)
        alpha = atan(single(relevo_resultante - ht)/single(d_relevo_resultante*1852/60)) +
        atan(single(relevo_resultante - hr));
    else
        alpha = atan2(single(relevo_resultante - ht), single(d_relevo_resultante*1852/60)) +
        atan2(single(relevo_resultante - hr), single((d - d_relevo_resultante)*(1852/60)));
    endif
    niu = alpha * sqrt(single((d_relevo_resultante*(1852/60))*(d - d_relevo_resultante)*(1852/60)*2)/
    (lambda * d * (1852/60)));
    switch 1
        case (niu <= (-.806))
            G_dif = 0;%2(niu)*sin(-600*niu*power(-niu,.3)/166);
        case ((niu > (-.806)) & (niu < (-0.65)))
            G_dif = 20 * log10(0.5 - 0.62 * niu);
        case ((niu >= (-0.65)) & (niu <= 2.4))
            G_dif = -6.9 - 20 * log10(sqrt(((niu - 0.1)^2) + 1) + niu - 0.1);
    end
end

```

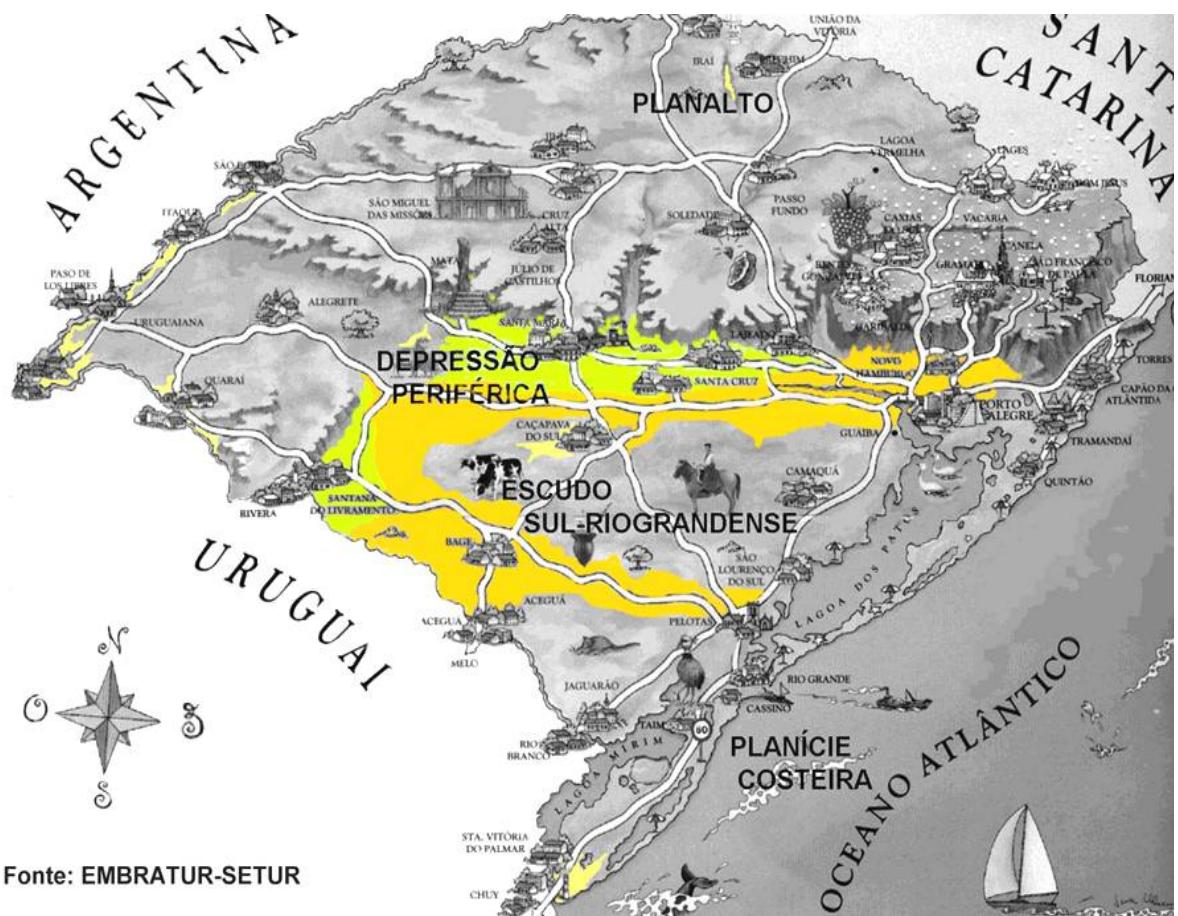
```
otherwise
    G_dif = 20 * log10(0.225/niu);
end
end

Pdistancia = Pot+G_dif;
```

% potencia.m – calculo da potência para um dado relevo e distância

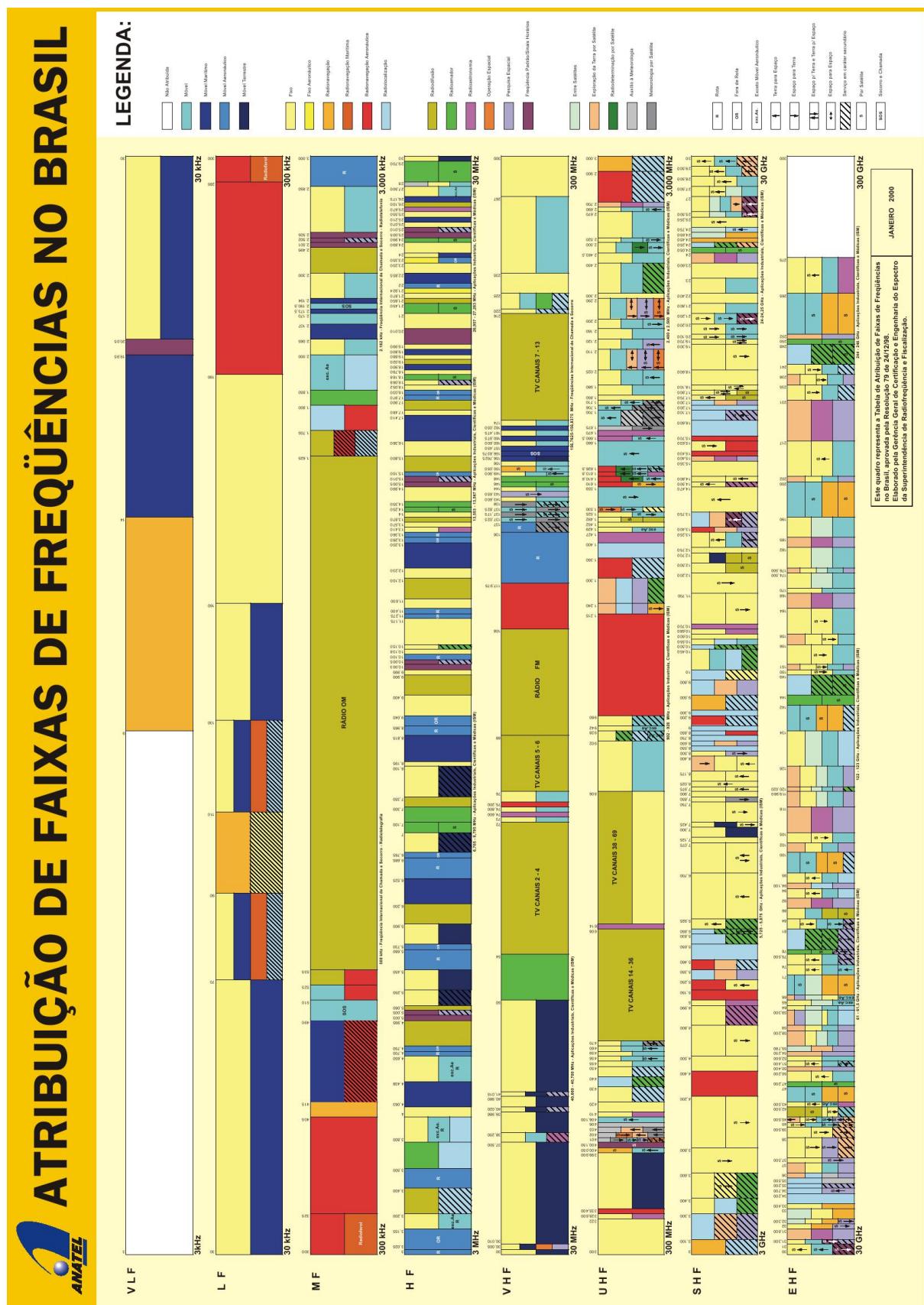
ANEXOS

Anexo A – Relevo do Rio Grande do Sul



Fonte: EMBRATUR-SETUR

Anexo B – Espectro Eletromagnético no Brasil



Fonte: Anatel