

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VARIABILIDADE  
DO SINAL RÁDIO MÓVEL NA FAIXA DE FREQUÊNCIA  
DOS SISTEMAS DE VIGILÂNCIA DEPENDENTE AUTOMÁTICA  
POR RADIODIFUSÃO

LEONARDO DA SILVA PAIVA

Niterói  
2012

LEONARDO DA SILVA PAIVA

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VARIABILIDADE  
DO SINAL RÁDIO MÓVEL NA FAIXA DE FREQUÊNCIA  
DOS SISTEMAS DE VIGILÂNCIA DEPENDENTE AUTOMÁTICA  
POR RADIODIFUSÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Comunicações Móveis.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Leni Joaquim de Matos

Niterói  
2012

LEONARDO DA SILVA PAIVA

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VARIABILIDADE  
DO SINAL RÁDIO MÓVEL NA FAIXA DE FREQUÊNCIA  
DOS SISTEMAS DE VIGILÂNCIA DEPENDENTE AUTOMÁTICA  
POR RADIODIFUSÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Comunicações Móveis.

Aprovada em 28 de Novembro de 2012.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof<sup>a</sup> Dra. Leni Joaquim de Matos** – Orientadora  
Universidade Federal Fluminense – UFF

---

**Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Vale**  
Universidade Federal Fluminense – UFF

---

**Prof. Dr. Julio Cesar Rodrigues Dal Bello**  
Universidade Federal Fluminense – UFF

---

**Prof. Dr. Gilson Alves de Alencar**  
CEFET/RJ

Niterói  
2012

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e aos amigos Janusz Brunon Kopczynski e Ana Beatriz Moreira Gomes com quem pude dividir diversas fases e momentos de minha vida, enquanto eu trilhava esse longo e sinuoso caminho que me levará à obtenção do título de mestre.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, a professora Dr<sup>a</sup> Leni Joaquim de Matos, pelas aulas de Eletromagnetismo Avançado e de Canais Rádio Móvel, pelos ensinamentos, apoio e dedicação durante o manuseio dos equipamentos do laboratório e pela sincera e prazerosa disponibilidade oferecida durante todas as tentativas de medições e reuniões feitas na escola de engenharia da UFF. Agradeço, ainda, pelas inúmeras vezes em que se manteve disponível à revisão de documentos, em que se manteve presente enquanto eu palestrava e em que se dedicou a ajudar-me;

Ao Presidente da Comissão de Implantação do Sistema de Controle do Espaço Aéreo (CISCEA), o Brigadeiro do Ar Carlos Vuyk de Aquino, ao Comandante do Parque de Material de Eletrônica da Aeronáutica do Rio de Janeiro (PAME-RJ), o Cel Av Adilson da Silva Lemos Jr., ao Engenheiro Euclides do PAME-RJ, ao Diretor Técnico do PAME-RJ, o Cel Ditz, ao engenheiro Accácio da CISCEA, ao Comandante do Grupo de Inspeção em Voo da Aeronáutica (GEIV), o Ten Cel Av Moraes, ao Sub-comandante do GEIV, o Major Santopietro, ao chefe de Operações do GEIV, o Capitão Mauro, ao piloto do GEIV Major Thomaz, aos colegas do laboratório do GEIV, em especial ao Sargento Braga, aos Sargentos Morais, Razuk e Salvador que são operadores de painel das aeronaves do GEIV, ao Ten Cel Av Carlos Henrique Afonso Silva e ao Sargento Arraes do 1º Grupo de Comunicações e Controle (1º GCC) pelas colaborações prestadas durante as campanhas de medições;

Aos colegas de mestrado Eduardo Leão e Fábio Barroso, pela sincera ajuda e disponibilidade oferecida no laboratório e ao colega de mestrado Pedro Vieira;

Ao colega de Mestrado Fabiano Coelho pela sua disponibilidade e inteligência compartilhada durante as aulas de Eletromagnetismo e de Canais Rádio Móvel;

Aos colegas graduandos da escola de engenharia da UFF, João Marcos, Valmerindo e Bruno Agostinho pela participação no primeiro teste em campo, cujos dados obtidos foram utilizados por eles na elaboração da monografia e obtenção de seus respectivos graus de bacharelado em engenharia;

Ao aluno Alex Cascardo, graduado em Engenharia pela UFF e atual mestrando, pela grande ajuda e disponibilidade durante as manipulações dos equipamentos e dos dados em laboratório;

Ao professor Gláucio Lima Siqueira - PUC-Rio, pela disponibilidade de parte do material empregado nas medições;

Aos alunos Wilyam Torres e Uwe do doutorado – PUC-Rio, com quem dividi experiências durante as suas medições em campo; e

Finalizando, agradeço aos colegas da CISCEA, em especial aos colegas do meu setor, sendo eles os Engenheiros Manoel Luiz Ribeiro e Carlos Eduardo Schaefer, pelas colaborações indiretas e conselhos, ao Tenente Alberto Sakajiri pelo compartilhamento de informações técnicas e aos demais colegas, Roberto Batista, Marcos Conde, Sidney Bondarowski e Marco Antônio. Agradeço a todos que me apoiaram durante as minhas ausências, quando estas se fizeram necessárias ao desenvolvimento deste trabalho e à conclusão do curso de Mestrado.

## RESUMO

Este trabalho está guiado pelo tema base que é o Sistema de Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B), fornecendo aos leitores o conhecimento sobre a referida tecnologia de controle de tráfego aéreo e uma breve introdução sobre os sistemas de navegação por satélite. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados das medições e análises estatísticas feitas em faixa estreita, no canal radio móvel, na faixa do ADS-B, considerando um enlace de dados do tipo *Extended Squitter*, em alta velocidade, realizadas em 19/05/2012, durante a aproximação para pouso pela cabeceira 28 do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, Maestro Antônio Carlos Jobim - Galeão. Desta forma, é abordada a teoria de canal rádio móvel e, de posse dos dados gravados, foi possível realizar a caracterização faixa estreita do sinal rádio móvel em alta velocidade, de modo a explorar as distribuições estatísticas referentes à variabilidade em pequena e grande escala do sinal como, também, a perda no percurso, a taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento. Embora exista muita bibliografia referente à caracterização faixa estreita, não há referências quanto a mesma realizada em tão altas velocidades, sendo este um trabalho necessário, a fim de se compreender, principalmente, a cobertura do sinal ADS-B terra-ar e ar-terra, contribuindo para uma melhoria no sistema.

Palavras Chave: Sistema de Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão; controle de tráfego aéreo; caracterização faixa estreita; canal aeronáutico; variabilidade e cobertura.

## ABSTRACT

This work is guided by the main subject that is the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast System (ADS-B), providing readers with the knowledge of this technology of air traffic control and a brief introduction on the satellite navigation systems. The aim of this work is to present the results of the measurements and statistical analyses made in narrow band, in the mobile radio channel, in the band of the ADS-B, considering a data link of the type Extended Squitter, in high speed, held on 05/19/2012, during approach to landing by the runway 28 of the International Airport of Rio de Janeiro, Maestro Antônio Carlos Jobim - Galeão. Thus, the theory of mobile radio channel is presented and with the recorded data it was possible to carry through the characterization in narrow band of the mobile radio signal in high speed, in order to explore the referring statistical distributions in small and large scale of signal, as well as the path loss, the level crossing rate and the average fade duration. Although there is much literature on the characterization of narrow band, there are no references with the same held in high speeds, being this a necessary work, in order to understand, especially, the covering of air-to-ground and ground-to-air ADS-B signal, contributing for an improvement in the system.

Keywords: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast System; air traffic control; characterization narrow band; aeronautical channel; variability and coverage.

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MÉTODO CARTESIANO .....	1
1.2	HISTÓRICO .....	2
1.3	OBJETIVO .....	14
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2	O SISTEMA CNS/ATM E OS SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITES .....	16
2.1	O SISTEMA CNS/ATM.....	17
2.1.1	COMUNICAÇÃO .....	20
2.1.2	NAVEGAÇÃO.....	20
2.1.3	VIGILÂNCIA .....	21
2.1.4	GERENCIAMENTO DO TRÁFEGO AÉREO (ATM) .....	22
2.1.5	BENEFÍCIOS DO CONCEITO CNS/ATM.....	23
2.2	OS SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITES.....	26
2.2.1	GLOBAL POSITIONING SYSTEM – GPS.....	26
2.2.1.1	Operação e funcionamento .....	30
2.2.1.2	Precisão do Sistema GPS .....	31
2.2.2	GLOBAL NAVIGATIONAL SATELLITE SYSTEM - GLONASS .....	34
2.2.3	GALILEO.....	36
2.2.4	SATELLITE BASED AUGMENTATION SYSTEM - SBAS.....	39
3	SISTEMA DE VIGILÂNCIA DEPENDENTE AUTOMÁTICA .....	41
3.1	AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE-ADDRESSED / CONTRACT: ADS-A / ADS-C.....	42
3.2	AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE-BROADCAST: ADS-B .....	44
3.2.1	Comparação com Radares de Vigilância (Primário) .....	51
3.2.2	Enlace de Dados.....	51
3.2.3	Aplicações ADS-B.....	54
3.2.4	O ADS-B no mundo.....	56
4	CANAL RÁDIO MÓVEL E CARACTERIZAÇÃO FAIXA ESTREITA .....	61
4.1	DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS ASSOCIADAS À VARIAÇÃO RÁPIDA DO SINAL .....	67
4.1.1	Distribuição Rayleigh.....	67
4.1.2	Distribuição Rice .....	70
4.1.3	Distribuição Nakagami-m .....	73
4.1.4	Distribuição Weibull.....	74
4.1.5	Distribuição $\alpha - \mu$ .....	75
4.2	DISTRIBUIÇÃO ASSOCIADA À VARIAÇÃO LENTA DO SINAL.....	83
4.3	PERDA NO PERCURSO ( <i>PATH LOSS</i> ).....	86
4.4	TAXA DE CRUZAMENTO DE NÍVEL ( $N_R$ ) E DURAÇÃO MÉDIA DOS DESVANECIMENTOS ( $T_R$ ).....	88
5	SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO.....	91
5.1	<i>Setup</i> de Transmissão .....	95
5.2	<i>Setup</i> de Recepção.....	102
5.3	Condições climáticas durante as medições.....	113
5.4	Processamento e Análise dos Dados.....	117
6	CONCLUSÕES.....	196
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	198
7	REFERÊNCIAS .....	199

## ANEXOS

A - Programas MATLAB .....	202
B - <i>Data Sheet</i> .....	226

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ícaro e Dédalo por Charles Paul Landon. ....	2
Figura 1.2 – A experiência do jesuíta Bartolomeu Lourenço de Gusmão. ....	2
Figura 1.3 – Marquês de Bacqueville tentando atravessar o rio Sena, em Paris, com um planador de várias asas em 1742. ....	3
Figura 1.4 - O Primeiro voo livre da história tripulado pelo homem (21 de novembro de 1783). ....	4
Figura 1.5 - (a) O primeiro dirigível de 1852. (b) O planador motorizado de Otto Lilienthal. ....	5
Figura 1.6 - Clément Ader. ....	6
Figura 1.7 - (a) Santos Dumont contornando a Torre Eiffel no dirigível Nº 6. (b) O 14 Bis de Santos Dumont. ....	6
Figura 1.8 – Foto ilustrativa de aviões utilizados durante a I Guerra Mundial. ....	7
Figura 1.9 – Avião modelo F13 ou JL-6, como era chamados nos EUA (1919). ....	7
Figura 1.10 - Ataque à Base Aérea Americana de <i>Pearl Harbor</i> . ....	8
Figura 1.11 - Radar SCR-268. ....	9
Figura 1.12 - (a) Protótipo da Cavidade Magnetron de Randall e Boot. (b) O anodo com 6 cavidades dos primeiros protótipos. ....	10
Figura 1.13 - <i>Tupolev Tu-144</i> - O primeiro avião supersônico comercial do mundo. ....	11
Figura 1.14 - <i>Concorde</i> - O segundo avião supersônico comercial do mundo. O único a ser utilizado com sucesso em rotas comerciais. ....	11
Figura 1.15 - (a) O <i>Airbus A380</i> - O maior avião de transporte de passageiros no mundo. (b) O <i>Boeing 747</i> (Jumbo). ....	12
Figura 1.16 – <i>Solar Impulse</i> : O primeiro avião movido à energia solar. ....	12
Figura 2.1 - Conceitos de melhorias na Navegação Aérea com a implementação do CNS/ATM. ....	21
Figura 2.2 - Benefícios do Sistema CNS/ATM. ....	24
Figura 2.3 - Determinação da posição. ....	26
Figura 2.4 - A constelação GPS. ....	27

Figura 2.5 - Satélite GPS NAVSTAR.....	29
Figura 2.6 - Satélite GPS NAVSTAR.....	33
Figura 2.7 - A constelação GLONASS. ....	34
Figura 2.8 - Satélite GLONASS.....	35
Figura 2.9 - A constelação GALILEO. ....	38
Figura 2.10 - Sistemas SBAS.....	40
Figura 3.1 - Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão.....	45
Figura 3.2 – Geração da mensagem ADS-B.....	46
Figura 3.3 - ADS-B <i>OUT</i> . ....	48
Figura 3.4 - ADS-B <i>IN</i> . ....	48
Figura 3.5 - <i>Cockpit Display of Traffic Information</i> – CDTI.....	50
Figura 3.6 - Estação de solo: (a) Receptor Thales - modelo AS 680, (b) Antena THALES (omnidirecional), (c) Antena INDRA, setorial.....	50
Figura 3.7 - Cobertura ADS-B e Radar, nível 300. ....	57
Figura 3.8 - Validação do ADS-B na Europa.....	58
Figura 4.1 - Cenário Típico para um canal Rádio Móvel terrestre. ....	61
Figura 4.2 - Ângulo de chegada $\alpha_n$ da n-ésima onda incidente.....	62
Figura 4.3 - Comportamento típico de um sinal recebido em uma comunicação móvel.....	63
Figura 4.4 – Componentes de um sinal faixa-estreita recebido.....	64
Figura 4.5 - (a) Função Densidade de Probabilidade Rayleigh; (b) Função Distribuição Rayleigh. ....	70
Figura 4.6 - Função densidade de probabilidade do sinal recebido para vários fatores K. ....	72
Figura 4.7 - Função densidade de probabilidade do tipo Nakagami-m, com $\Omega = 1$ ....	74
(a) (b) .....	75
Figura 4.8 – F.D.P Weibull. (a) Função Densidade de Probabilidade. (b) Função Distribuição de Probabilidade.....	75
Figura 4.9 - Função Densidade de Probabilidade $\alpha - \mu$ para $\alpha = \frac{7}{4}$ .....	80

Figura 4.10 - Função Densidade de Probabilidade $\alpha - \mu$ para $\mu = \frac{4}{7}$ .....	81
Figura 4.11 - Função Densidade de Probabilidade $\alpha - \mu$ para o mesmo parâmetro Nakagami $m = 0,5$ . ....	81
Figura 4.12 - Função Distribuição de Probabilidade $\alpha - \mu$ para o mesmo parâmetro Nakagami $m = 0,5$ . ....	82
Figura 4.13: Função Densidade de Probabilidade $\alpha - \mu$ para o mesmo parâmetro Nakagami $m = 1,5$ . ....	82
Figura 4.14 - Função Distribuição de Probabilidade $\alpha - \mu$ para o mesmo parâmetro Nakagami $m = 1,5$ . ....	82
Figura 4.15 – Taxa de Cruzamento de Nível e Duração Média de Desvanecimentos. ....	90
Figura 5.1 - Fonte ICEL PS-5000.....	95
Figura 5.2 - Localização da antena transmissora (Vista aproximada). ....	96
Figura 5.3 - Localização da antena transmissora (Vista afastada). ....	97
Figura 5.4 - Localização da antena transmissora (Perfil).....	97
Figura 5.5 –Diagrama de irradiação da antena de transmissão. ....	100
Figura 5.6 – Estrutura interna da antena de transmissão.....	101
Figura 5.7 – Curva de ganho do LNA ZEL-0812LN da Mini-Circuits obtida em laboratório.....	102
Figura 5.8 - Fonte ICEL PS-1500.....	102
Figura 5.9 – Diagrama de antenas da aeronave. ....	103
Figura 5.10 - Visão frontal do analisador de espectro. ....	104
Figura 5.11 - Analisador de espectro 8594E. ....	104
Figura 5.12 - Visão traseira do analisador de espectro. ....	105
Figura 5.13 – (a) Placa de aquisição da <i>National Instruments</i> (Modelo NI USB-6212), (b) <i>Laptop Sony Vaio</i> . ....	105
Figura 5.14 - Conexão dos equipamentos de recepção na aeronave.....	107
Figura 5.15: Curva de ajuste do analisador de espectro para a frequência de 1140 MHz. ....	111

Figura 5.16: Visão 3D da Rota 1 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 2.737,53 m).....	124
Figura 5.17: Visão 3D da Rota 2 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 3.585,68 m).....	125
Figura 5.18: Visão 3D da Rota 3 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 5.312,53 m).....	126
Figura 5.19: Visão 3D da Rota 4 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 5.476,98 m).....	127
Figura 5.20: Visão 3D da Rota 5 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 3.556,87 m).....	128
Figura 5.21: Visão 2D das Rotas 1, 2 e 3 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 11.635,74 m). ....	129
Figura 5.22: Visão 3D das Rotas 1, 2 e 3 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 11.635,74 m). ....	130
Figura 5.23: Visão 2D das Rotas 4 e 5 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 9.033,85 m). ....	131
Figura 5.24: Visão 3D das Rotas 4 e 5 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 9.033,85 m). ....	132
Figura 5.25: Visão 3D de parte das Rotas 2 e 5.....	133
Figura 5.26: Visão 3D de parte das Rotas 3 e 5.....	134
Figura 5.27: Diagrama de cobertura: 1.000 pés.....	189
Figura 5.28: Diagrama de cobertura: 2.647 pés – Altitude média de voo para a Rota 1. ....	190
Figura 5.29: Diagrama de cobertura: 5.000 pés.....	191
Figura 5.30: Diagrama de cobertura: 10.000 pés.....	192
Figura 5.31: Diagrama de cobertura: 20.000 pés.....	193
Figura 5.32: Diagrama de visibilidade.....	194
Figura 5.33: Diagrama de cobertura escalonado: 2.647 pés Altitude média de voo para a Rota 1. ....	195

## LISTA DE FOTOS

Foto 5.1 – Panorâmica do ambiente de transmissão. ....	98
Foto 5.2 – Antena de transmissão instalada. ....	98
Foto 5.3 – Recepção em solo do sinal transmitido. ....	99
Foto 5.4 – Equipamentos de transmissão. ....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Locais com planos de implementação (Fonte Eurocontrol – 07/10/2008). .....	58
Tabela 3.2 - Locais com planos de execução que estão sob consideração (Fonte Eurocontrol – 07/10/2008).....	59
Tabela 5.1 - Lista de equipamentos do sistema de transmissão utilizados nas medições em campo.....	92
Tabela 5.2 - Lista de equipamentos do sistema proposto para as medições em campo.....	93
Tabela 5.3 - Lista de equipamentos do sistema proposto para as medições em campo.....	95
Tabela 5.4 – Coordenadas da antena de Transmissão.....	96
Tabela 5.5 - Lista de parâmetros utilizados no analisador de espectro durante as medições. ....	104
Tabela 5.6 - Lista de equipamentos utilizados para obter a curva de ajuste do analisador de espectro.....	108
Tabela 5.7: Tabela de calibração do analisador de espectro para a frequência de 1140 MHz. ....	110
Tabela 5.8: Quantidade de setores por rota.....	122
Tabela 5.9: Escala de cores utilizadas no <i>Software Google Earth</i> para a representação do nível de potência média recebida em cada setor.....	123
Tabela 5.10: Informações úteis de cada Rota. ....	135
Tabela 5.11: Tabela dos valores do teste qui-quadrado.....	150
Tabela 5.12: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 1. ....	151
Tabela 5.13: Resultados do Teste qui-quadrado para os setores 01, 87, 173 e 260 da Rota 1.....	151
Tabela 5.14: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 2. ....	152
Tabela 5.15: Resultados do Teste qui-quadrado os setores 01, 113, 226 e 340 da Rota 2.....	152
Tabela 5.16: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 3. ....	153

Tabela 5.17: Resultados do Teste qui-quadrado para os setores 01, 168, 336 e 504 da Rota 3. ....	153
Tabela 5.18: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 4. ....	154
Tabela 5.19: Resultados do Teste qui-quadrado para os setores 01, 173, 346 e 520 da Rota 4. ....	154
Tabela 5.20: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 5. ....	155
Tabela 5.21: Resultados do Teste qui-quadrado para os setores 01, 112, 224 e 337 da Rota 5. ....	155
Tabela 5.22: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 1. ....	166
Tabela 5.23: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 87, 173 e 260 da Rota 1. ....	166
Tabela 5.24: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 2. ....	167
Tabela 5.25: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 113, 226 e 340 da Rota 2. ....	167
Tabela 5.26: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 3. ....	168
Tabela 5.27: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 168, 336 e 504 da Rota 3. ....	168
Tabela 5.28: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 4. ....	169
Tabela 5.29: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 173, 346 e 520 da Rota 4. ....	169
Tabela 5.30: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 5. ....	170
Tabela 5.31: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 112, 224 e 337 da Rota 5. ....	170
Tabela 5.32: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 87, 173 e 260 da Rota 1. ....	171

Tabela 5.33: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 113, 226 e 340 da Rota 2. ....	171
Tabela 5.34: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 168, 336 e 504 da Rota 3. ....	171
Tabela 5.35: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 173, 346 e 520 da Rota 4. ....	172
Tabela 5.36: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 112, 224 e 337 da Rota 5. ....	172
Tabela 5.37: Resultados do ajuste do desvanecimento em grande escala através do teste do qui-quadrado. ....	187
Tabela 6.1: Resumo dos melhores ajustes para os desvanecimentos em pequena e em grande escala. ....	197

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1: Temperatura do ar e ponto de orvalho no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.....	114
Gráfico 5.2: Gráfico da pressão atmosférica no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.....	114
Gráfico 5.3: Gráfico da visibilidade predominante no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.....	115
Gráfico 5.4: Gráfico da direção do vento no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.....	115
Gráfico 5.5: Gráfico da velocidade do vento no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.....	115
Gráfico 5.6: METAR no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ, durante o voo, em 19/05/2012. ....	116
Gráfico 5.7: Sinal coletado no trecho definido como Rota 1. ....	118
Gráfico 5.8: Sinal coletado no trecho definido como Rota 2. ....	118
Gráfico 5.9: Sinal coletado no trecho definido como Rota 3. ....	119
Gráfico 5.10: Sinal coletado no trecho definido como Rota 4. ....	119
Gráfico 5.11: Sinal coletado no trecho definido como Rota 5. ....	120
Gráfico 5.12: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 87 da Rota1. ...	138
Gráfico 5.13: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 173 e 260 da Rota1. ....	139
Gráfico 5.14: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 113 da Rota2. ....	140
Gráfico 5.15: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 226 e 340 da Rota2. ....	141
Gráfico 5.16: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 168 da Rota3. ....	142

Gráfico 5.17: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 336 e 504 da Rota3. .....	143
Gráfico 5.18: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 173 da Rota4. 144	144
Gráfico 5.19: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 346 e 520 da Rota4. .....	145
Gráfico 5.20: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 112 da Rota5. 146	146
Gráfico 5.21: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 224 e 337 da Rota5. .....	147
Gráfico 5.22: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 1: Gráficos “a” e “b”). .....	156
Gráfico 5.23: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 1 – Gráficos “c” e “d”). .....	157
Gráfico 5.24: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 1 - Gráficos “e” e “f”). .....	157
Gráfico 5.25: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 2 - Gráficos “a” e “b”). .....	158
Gráfico 5.26: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 2 - Gráficos “c” e “d”). .....	158
Gráfico 5.27: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 2 - Gráficos “e” e “f”). .....	159
Gráfico 5.28: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 3 - Gráficos “a” e “b”). .....	159
Gráfico 5.29: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 3 - Gráficos “c” e “d”). .....	160
Gráfico 5.30: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 3 - Gráficos “e” e “f”). .....	160

Gráfico 5.31: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 4- Gráficos “a” e “b”). .....	161
Gráfico 5.32: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 4 - Gráficos “c” e “d”). .....	161
Gráfico 5.33: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 4 - Gráficos “e” e “f”). .....	162
Gráfico 5.34: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 5 - Gráficos “a” e “b”). .....	162
Gráfico 5.35: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 5 - Gráficos “c” e “d”). .....	163
Gráfico 5.36: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 5 - Gráficos “e” e “f”). .....	163
Gráfico 5.37: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 1. ....	174
Gráfico 5.38: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 1.	174
Gráfico 5.39: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 1. ....	175
Gráfico 5.40: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 1. ....	175
Gráfico 5.41: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 2. ....	177
Gráfico 5.42: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 2.	177
Gráfico 5.43: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 2. ....	178
Gráfico 5.44: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 2. ....	178
Gráfico 5.45: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 3. ....	179
Gráfico 5.46: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 3.	180
Gráfico 5.47: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 3. ....	180
Gráfico 5.48: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 3. ....	181
Gráfico 5.49: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 4. ....	182

Gráfico 5.50: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 3.	182
Gráfico 5.51: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 4.....	183
Gráfico 5.52: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 4. ....	183
Gráfico 5.53: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 5. ....	184
Gráfico 5.54: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 5.	185
Gráfico 5.55: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 5.....	185
Gráfico 5.56: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 5. ....	186

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACAS	<i>Anti Collision Avoidance System</i>
ACC-AO	Centro de Controle de Área Atlântico
ADS	<i>Automatic Dependent Surveillance</i>
ADS-A	<i>Automatic Dependent Surveillance-Adressed</i>
ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance-Broadcast</i>
ADS-C	<i>Automatic Dependent Surveillance-Contract</i>
AFD	<i>Average Fading Duration</i>
AMSS	<i>Aeronautical Mobile-Satellite Service</i>
ANC	<i>Air Navigation Conference</i>
ASM	<i>Airspace Management</i>
ATFM	<i>Air Traffic Flow Management</i>
ATIS	<i>Automatic Terminal Information Service</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATN	<i>Aeronautical Telecommunication Network</i>
ATS	<i>Air Traffic Services</i>
CASCADE	<i>Cooperative Air traffic services through Surveillance and Communications Applications Deployed in ECAC</i>
CDTI	<i>Cockpit Display of Traffic Information</i>
CGNA	Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea
CISCEA	Comissão de Implantação do Sistema de Controle do Espaço Aéreo
CINDACTA III	Terceiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo
CNS/ATM	<i>Communications, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management</i>
COSPAS-SARSAT	<i>Space System for Search of Distressed Vessel – Search and Rescue Satellite-Aided Tracking</i>
CRISTAL	<i>Co-operative Validation of Surveillance Techniques and Applications of ADS-B</i>
CS	<i>Comercial Service</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
EC	<i>European Commission</i>
ECAC	<i>European Civil Aviation Conference group of countries</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
EMACS	<i>ElectroMagnetic Airport Control &amp; Survey</i>

ESA	<i>European Space Agency</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FANS	<i>Future Air Navigation Systems</i>
FIS-B	<i>Flight Information Services – Broadcast</i>
FL	<i>Flight</i>
FMC	<i>Flight Management Computer</i>
FMS	<i>Flight Management System</i>
GAGAM	<i>GPS Aided Geo Augmented Navigation System</i>
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation System</i>
GCC	<i>Grupo de Comunicações e Controle</i>
GDOP	<i>Geometric Dilution of Precision</i>
GEIV	<i>Grupo de Inspeção em Voo da Aeronáutica</i>
GIOVE	<i>Galileo In-Orbit Validation Element</i>
GLONASS	<i>Global Navigational Satellite System</i>
GMT	<i>Greenwich Mean Time</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HF	<i>High Frequency</i>
ICAO	<i>Internacional Civil Aviation Organization</i>
KNITs	<i>Coordination Scientific Information Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation</i>
LCR	<i>Level Crossing Rate</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
LORAN	<i>Long Range Navigation</i>
LUT	<i>Local User Terminal</i>
MCC	<i>Mission Control Center</i>
METAR	<i>METEorological Aerodrome Report</i>
MN	<i>Milhas Náuticas</i>
MNS	<i>Mobile Network Service</i>
MOPS	<i>Minimum Operational Performance Standards</i>
MSAS	<i>Multifunctional Satellite Augmentation System</i>
NAVSTAR	<i>Navigation Satellite with Time and Ranging</i>
NextGen	<i>Next Generation Air Transportation System</i>
NOTAM	<i>Notice to Airmen / Notice to All Members</i>

NRL	<i>Naval Research Laboratory</i>
OACI	<i>Organização de Aviação Civil Internacional</i>
OS	<i>Open Service</i>
PAME-RJ	<i>Parque de Material de Eletrônica da Aeronáutica do Rio de Janeiro</i>
PBN	<i>Performance Based Navigation</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>
PRN	<i>Pseudorandom Noise</i>
PRS	<i>Public Regulated Service</i>
PUC-Rio	<i>Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro</i>
QZSS	<i>Quase-Zenith Satellite System</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RCC	<i>Rescue Coordination Center</i>
RNAV	<i>Area Navigation</i>
RNP	<i>Required Navigation Performance</i>
RTCA	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i>
RVSM	<i>Reduced Vertical Separation Minimum</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SAR	<i>Search and Rescue</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i>
SOL	<i>Safety-of-life</i>
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
SSR	<i>Secondary surveillance radar</i>
STDMA	<i>Self-Organized Time Division Multiple Access</i>
TAATS	<i>The Australian Advanced Air Traffic System</i>
TCAS	<i>Traffic Collision Avoidance System</i>
TIS-B	<i>Traffic Information Services - Broadcast</i>
TWT	<i>Traveling Wave Tube</i>
USA	<i>United States of America</i>
UAT	<i>Universal Access Transceiver</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>

VDL	<i>Very High Frequency Data Link</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WAGE	<i>Wide Area GPS Enhancement</i>

# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 MÉTODO CARTESIANO

Criado por René Descartes<sup>1</sup>, o método cartesiano consiste no Ceticismo Metodológico - duvida-se de cada idéia que pode ser duvidada. Enquanto os gregos antigos e os escolásticos<sup>2</sup> acreditavam que as coisas existiam simplesmente porque precisavam existir, ou porque assim deveriam ser, etc., Descartes instituía a dúvida: “só se pode dizer que existe aquilo que possa ser provado.” O próprio Descartes consegue provar a existência do próprio eu (que duvida, portanto, é sujeito de algo - cogito ergo sum, **penso logo existo**). O ato de duvidar é indubitável.

O método, também, consiste na realização de quatro tarefas básicas: **verificar** se existem evidências reais e indubitáveis acerca do fenômeno ou coisa estudada; **analisar**, ou seja, dividir ao máximo as coisas, em suas unidades de composição, fundamentais, e estudar essas coisas mais simples que aparecem; **sintetizar**, ou seja, agrupar novamente as unidades estudadas em um todo verdadeiro; e **enumerar** todas as conclusões e princípios utilizados, a fim de manter a ordem do pensamento.

Baseado no método cartesiano de Descartes, este trabalho está estruturado de forma a reunir conhecimentos, os mais variados possíveis, relacionados diretamente com o tema da dissertação e outros indiretamente, mas que no contexto, formato e ordem de apresentação servirão para melhor proporcionar ao leitor uma fácil leitura cronológica, tecnológica e informativa.

---

<sup>1</sup> René Descartes (La Haye en Touraine, 31 de março de 1596 - Estocolmo, 11 de fevereiro de 1650) – Foi um filósofo, físico e matemático francês. Durante a Idade Moderna também era conhecido por seu nome latino Renatus Cartesius.

<sup>2</sup> Escolástica ou Escolasticismo (do latim *scholasticus*, e este por sua vez do grego σχολαστικός [que pertence à escola], instruído) – Foi o método de pensamento crítico dominante no ensino nas universidades medievais européias de cerca de 1100 a 1500. Não tanto uma filosofia ou uma teologia, como um método de aprendizagem, a escolástica nasceu nas escolas monásticas cristãs para tentar conciliar a fé cristã com um sistema de pensamento racional, especialmente o da filosofia grega.

## 1.2 HISTÓRICO

### DA TENTATIVA DO VOO HUMANO À CRIAÇÃO DO AVIÃO

“A história do voo humano é também a de uma das mais fantásticas invenções jamais realizadas. Desde tempos remotos, a idéia de se locomover no ar afligia o imaginário de várias culturas. É bem conhecida a lenda grega de Ícaro e Dédalo, que utilizaram asas feitas de penas ao fugirem da ilha de Creta. O desfecho dramático, com a queda de Ícaro, filho do inventor das asas, Dédalo, é um dos exemplos de como o voo sempre esteve associado à idéia de perigo.” [1]



Figura 1.1 - Ícaro e Dédalo por Charles Paul Landon.

Vários outros relatos sobre invenções ou tentativas de voar podem ser encontrados na literatura, porém, pode-se considerar que somente no início do século XVIII, em 8 de agosto de 1709, é que podemos encontrar registros de aparatos que realmente puderam flutuar no ar, como o pequeno invólucro cheio de ar quente que subiu cerca de quatro metros e foi capaz de se mover, mesmo que através de movimentos bruscos e sem controle, demonstrado por Bartolomeu Lourenço de Gusmão, jesuíta e criativo inventor brasileiro, diante da corte portuguesa de D. João V. Como não havia uma fonte propulsora eficiente, a invenção de Bartolomeu de Gusmão não poderia ter sucesso.



Figura 1.2 – A experiência do jesuíta Bartolomeu Lourenço de Gusmão.

“Em 1742, o marquês de Bacqueville tentou atravessar o rio Sena, em Paris, com um planador de várias asas. Segundo os relatos, realizaram-se alguns voos planados, mas sem despertar grande interesse. Em 1754, o russo Michael Vasilyevitch Lomonosov conseguiu fazer voar um modelo de helicóptero movido por um mecanismo de relojoaria. Outros inventos apareceram, mas não houve resultado satisfatório ou convincente de que seria possível realizar um voo controlado e seguro.”  
[1]



Figura 1.3 – Marquês de Bacqueville tentando atravessar o rio Sena, em Paris, com um planador de várias asas em 1742.

Assim, apenas setenta anos depois da demonstração feita por Bartolomeu de Gusmão, é que os voos de grandes proporções com um balão de ar quente foram realizados. Já o primeiro voo com passageiros (um pato, um galo e uma ovelha) foi realizado em um balão Montgolfier<sup>3</sup>, em 19 de setembro de 1783, às vésperas da Revolução Francesa, na presença do rei Luiz XVI da França.

Após a descoberta do gás hidrogênio, feita pelo químico inglês Henry Cavendish em 1766, o físico francês Jacques Alexander César Charles inventou o balão de hidrogênio, que foi colocado em suspensão, pela primeira vez, em 27 de agosto de 1783 e, em 21 de novembro de 1783, foi possível vislumbrar-se com o primeiro voo tripulado por seres humanos, Pilâtre de Rozier e o Marquês d'Arlandes também voaram, aproximadamente, 25 minutos, em um balão do tipo Montgolfier.

---

<sup>3</sup> Os irmãos franceses Joseph Michel Montgolfier e Jaques Étienne Montgolfier foram os inventores que construíram o primeiro balão tripulado.

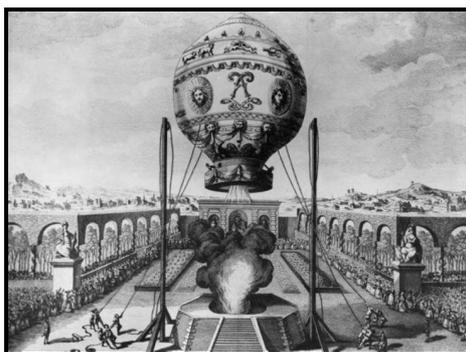


Figura 1.4 - O Primeiro voo livre da história tripulado pelo homem (21 de novembro de 1783).

Com o advento do século XIX, o desejo de voar criou asas ainda maiores através de muitas experiências e demonstrações realizadas por diversos aeronautas, porém, até então, apenas o balão livre era capaz de voar, ao sabor do vento, sem qualquer controle. Em 1852, foi inventado o dirigível, que ao contrário do balão, seu curso podia ser controlado através de lemes e de motores. Assim, com a invenção do balão e do dirigível, os inventores passaram a tentar criar uma máquina mais pesada do que o ar que fosse capaz de voar por meios próprios. “Até a década de 1890 pouco se avançou no sentido de obter um aparelho capaz de voar de forma controlada, apesar dos inúmeros inventos que apresentavam um sucesso bastante questionável.” [1]

Entre 1890 e 1896, o alemão Otto Lilienthal realizou alguns voos planados, baseados no estudo da sustentação das asas e da estabilidade do aparelho, conceito este que surgiu no início do século XIX, através do Lord Cayley<sup>4</sup>. Deslocando o peso do corpo, ou seja, mudando o centro de gravidade do aparelho, Otto conseguiu manter o controle do voo. Após centenas de saltos ele conseguiu voar por cerca de 15 segundos e alcançar distâncias de 300 metros. Em uma de suas tentativas de prolongar o voo, ao deslocar o corpo para trás e aumentar o ângulo de incidência das asas, Otto perdeu velocidade e subitamente as asas deixaram de produzir a força necessária e assim caiu de uma altura de 15 metros, vindo a falecer no dia seguinte após a queda.

---

<sup>4</sup> Lord Cayley analisou as características básicas de um aparelho mais pesado que o ar, através do conceito de asas para dar sustentação e lemes para garantir a estabilidade, no início do século XIX.

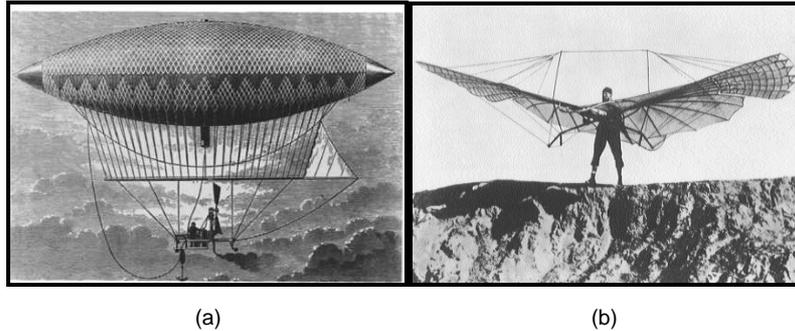


Figura 1.5 - (a) O primeiro dirigível de 1852. (b) O planador motorizado de Otto Lilienthal.

Com a criação do Aeroclub de França, em 1898, um grupo de engenheiros, inventores e mecenas passaram a discutir, periodicamente, o que se poderia considerar um voo de real utilidade, através de critérios que pudessem criar uma fronteira entre o simples salto e aquilo que se espera ser um voo.

Uma curiosidade sob o aspecto teórico é que nenhum dos trabalhos sobre a sustentação de asas baseava-se nos estudos realizados pelo físico e matemático suíço Daniel Bernoulli, que estudara o movimento dos fluidos e fora um dos fundadores da hidrodinâmica, no século XVIII.

“Finalmente, um elemento importante da invenção do voo humano está relacionado ao fato de que as maiores contribuições vieram de técnicos com alguma formação em ciência, enquanto cientistas de grande nome, como os ingleses Lord Kelvin e Rayleigh, já em fins do século XIX, pareciam muito céticos com as notícias.”  
[1]

Finalmente, no período de 1890 a 1910, diversos estudos e experimentos em cima de aparelhos mecânicos inventados para controlar o voo surgiram graças à contribuição de muitos inventores. Assim, no começo do século XX, o primeiro voo em uma máquina mais pesada do que o ar, capaz de gerar a potência e sustentação necessária por si mesmo, foi realizado, porém, isto é um fato polêmico, já que no Brasil esta façanha é creditada a Alberto Santos Dumont, enquanto que para o resto do mundo esta se atribui aos irmãos Wilbur e Orville Wright de origem norte-americana, sendo ignorado o verdadeiro inventor do avião, o francês Clément Ader, que realizou o primeiro voo de uma máquina mais pesada que o ar e propulsionada a motor, em 9 de outubro de 1890, fato este de segredo militar e que só se soube da existência muitos anos depois.



Figura 1.6 - Clément Ader.

“Os dois recordes de Santos Dumont – o de 19 de outubro de 1901, obtido ao contornar a Torre Eiffel saindo de Saint-Cloud no dirigível Nº. 6, e o voo de 220 metros do *14BIS*, de 12 de novembro de 1906 – são marcos essenciais da história da invenção do voo.” [1] Assim, passados poucos mais de dois anos, surge a mais nova invenção, o avião<sup>5</sup>.

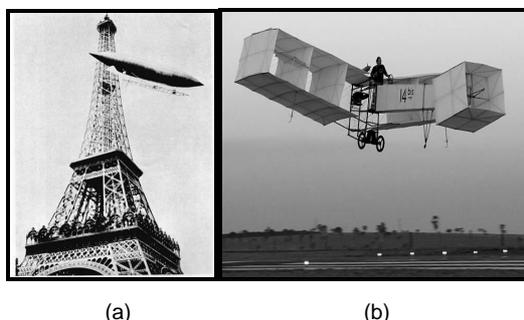


Figura 1.7 - (a) Santos Dumont contornando a Torre Eiffel no dirigível Nº 6. (b) O 14 Bis de Santos Dumont.

Durante a Primeira Guerra Mundial, o avião foi utilizado como arma de ataque ou de apoio em terra. Esse método foi utilizado pelos dois lados, a Tríplice Aliança<sup>6</sup> e a Tríplice Entente<sup>7</sup>, mas o número reduzido de aviões e a pequena capacidade das bombas o tornavam ineficiente. “O uso do avião na Primeira Guerra resumia-se a fotografar as bases inimigas e seus deslocamentos.” [2]. “Também se pensa que essa foi a primeira guerra em que o avião foi utilizado.” [3] Na verdade, a primeira utilização de um avião em guerra foi em 1912, durante a Revolução Mexicana.

---

<sup>5</sup> A palavra *avion* derivada da palavra grega *avis*, que significa ave, foi inventada pelo Sr. Clément Ader, um profícuo inventor de formação técnica e que deu importantes contribuições para o desenvolvimento dos telefones e que também inventou um aeroplano, em 9 de outubro de 1890, o *Éole*, semelhante a um gigantesco morcego de 14 metros de envergadura e movido por um motor a vapor.

<sup>6</sup> Tríplice Aliança: Formada por Alemanha, Império Austro-húngaro e Itália.

<sup>7</sup> Tríplice Entente: Formada por Inglaterra, França e Rússia.

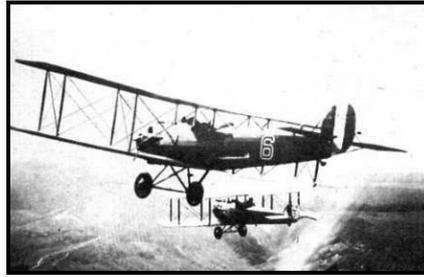


Figura 1.8 – Foto ilustrativa de aviões utilizados durante a I Guerra Mundial.

Após a Primeira Guerra Mundial, os aviões passaram por inúmeros avanços tecnológicos e já em 1919, os primeiros voos comerciais foram realizados entre os Estados Unidos e o Canadá. Após a guerra, os governos americano e canadense ofereceram o excesso de aeronaves da guerra a aviadores, por preços realmente baixos e, assim, vários pilotos remanescentes da guerra compraram estes aviões e passaram a utilizá-los para ganhar dinheiro, através de exposições acrobáticas. Algumas destas aeronaves foram utilizadas pela agência de correios dos Estados Unidos para o transporte entre algumas cidades americanas. Também, em 1919, os britânicos John Alcock e Arthur Whitten Brown realizaram a primeira travessia transatlântica em um avião. Em parceria a Sacadura Cabral, Gago Coutinho realizou, em 1921, a primeira travessia aérea do Atlântico Sul. João Ribeiro de Barros foi o primeiro nas Américas a realizar uma travessia aérea transatlântica, em 28 de abril de 1927. Charles Lindbergh tornou-se a primeira pessoa a cruzar o oceano Atlântico num voo solo sem escalas, em 20 de maio de 1927.



Figura 1.9 – Avião modelo F13 ou JL-6, como era chamados nos EUA (1919).

O período do “entre guerras” (1918 – 1939) ficou conhecido como a “era de ouro da aviação”. Foram anos nos quais a tecnologia de aeronaves, em geral, desenvolveu-se consideravelmente. Os aviões, que antes eram feitos de madeira, passaram a ser construídos em alumínio. Na década de 1930, inicia-se o desenvolvimento da turbina a jato e na década de 1940, começam a operar os primeiros aviões militares a jato. Também nesta época, mais precisamente na década de 1930, muitas linhas aéreas passaram a operar em lagos e rios calmos, utilizando hidroplanos. Estes hidroplanos eram utilizados, principalmente, para voos transoceânicos.

Durante a Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945), a busca por novas tecnologias em aviação, fomentadas pelas grandes potências, acarretou em um considerável aumento na produção de aviões. Foram desenvolvidos os primeiros bombardeiros de longa distância, o primeiro avião a jato de uso prático e o primeiro caça a jato. No começo da Segunda Guerra Mundial, os caças atingiam uma velocidade máxima de até 480 *km/h* e podiam voar até 9 mil metros de altitude. No final da guerra, a velocidade máxima dos caças subsequentes atingia a impressionante marca de 640 *km/h*, em altitudes de até 12 mil metros. Assim, os aviões desempenharam um papel fundamental e estavam presentes em todas as batalhas mais importantes e conhecidas da guerra, especialmente no Ataque a Pearl Harbor, na manhã de 7 de Dezembro de 1941, nas batalhas do Pacífico (1937 – 1945) e no Dia D (6 de junho de 1944).



Figura 1.10 - Ataque à Base Aérea Americana de *Pearl Harbor*.

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, a aviação comercial passou a se desenvolver em um ramo à parte da aviação militar. Assim, as empresas que produziam aviões passaram a criar aviões destinados à aviação civil e as linhas aéreas pararam de utilizar aviões militares modificados para o transporte de passageiros e assim, em poucos anos, várias linhas aéreas estavam estabelecidas no mundo.

## **A CRIAÇÃO DO RADAR**

O radar não tinha uma real utilidade até a Segunda Guerra Mundial. O primeiro relato sobre reflexões de ondas de radiofrequência a partir de corpos metálicos e dielétricos foi feito por Hertz, que em 1886 usou um transmissor de centelha de 450 *MHz* e um receptor para testar as teorias de Maxwell. A primeira detecção daquilo que se poderia chamar de um alvo militar feita por um radar, foi alcançada por Christian Hulsmeyer, um engenheiro alemão que apresentou à Marinha alemã um dispositivo para detecção de navios, em 1903, entretanto o alcance do equipamento era tão limitado que não despertou muito interesse.

O primeiro trabalho em detecção radar nos Estados Unidos foi realizado por Taylor e Young, ambos do laboratório de pesquisas navais (*Naval Research Laboratory* – NRL). Mais tarde, em 1922, eles utilizaram um radar de onda contínua operando em 60 MHz para detectar navios de madeira. A primeira detecção radar de uma aeronave nos Estados Unidos, também utilizando um radar de onda contínua, foi feita em 1930 por Hyland do NRL. Estes radares de onda contínua detectavam a presença do alvo, porém nenhuma informação de alcance poderia ser extraída, o que colocava em dúvida se isto deveria ser incluído nesta classe de objetos cujo nome ‘RADAR’, denota *Radio Detection and Ranging*. Para permitir a medição de alcance, faz-se necessária a modulação da forma de onda do sinal e, então, os sistemas pulsados foram desenvolvidos.

Um radar pulsado operando em 28 MHz e utilizando pulsos de 5  $\mu$ s foi desenvolvido no NRL e testado no início de 1935. Os testes foram falhos, porém permitiram uma subsequente modificação, o que permitiu a detecção do primeiro alvo em 1936. Ainda neste ano, o exército americano testou o seu primeiro radar pulsado. O exército também desenvolveu o primeiro radar de controle de fogo antiaéreo operacional dos Estados Unidos, o SCR-268, que foi colocado em operação em 1938. Foi o modelo SCR-270, de até 130 milhas de alcance, da mesma família do SCR-268, que detectou a aproximação dos aviões japoneses na manhã de 7 de dezembro de 1941, em Oahu, Hawaii, episódio que ficou conhecido como o ataque à *Pearl Harbor*.

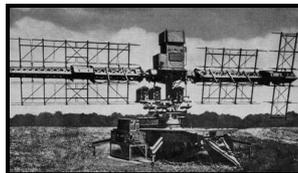


Figura 1.11 - Radar SCR-268.

Em 1935, a Inglaterra demonstrou, com sucesso, o seu primeiro radar pulsado em 12 MHz, que obteve alcances acima de 40 milhas ao vigiar um bombardeiro. Tanto os americanos quanto os ingleses estavam cientes da redução do tamanho físico do equipamento e das vantagens da resolução angular disponível nas frequências mais altas e, assim, grupos em ambos os países passaram a trabalhar na faixa de 200 MHz nos últimos anos da década de 1930.

Um evento marcante que permitiu o desenvolvimento prático do radar em microondas foi a invenção da cavidade magnetron, desenvolvida pelos físicos ingleses John Randall e Harry Boot. A magnetron é um oscilador auto-excitável de campo cruzado (os campos elétricos e magnéticos são perpendiculares), cuja frequência de

operação é determinada pelas dimensões de uma série regular de furos e entalhes em uma estrutura de anodo cilíndrico em torno de um catodo cilíndrico.

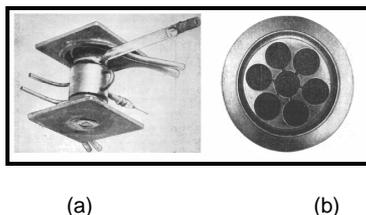


Figura 1.12 - (a) Protótipo da Cavidade Magnetron de Randall e Boot. (b) O anodo com 6 cavidades dos primeiros protótipos.

No final do ano de 1940, a Inglaterra e os Estados Unidos iniciaram esforços em conjunto na área de radar. Após a Segunda Guerra Mundial, observaram-se melhorias contínuas. Na área de transmissão, por exemplo, foram desenvolvidos os TWT<sup>8</sup>, as fontes de microondas em estado sólido e os osciladores estáveis controlados por computador. Na área de recepção, a tecnologia em estado sólido possibilitou uma melhoria nos misturadores e permitiram o desenvolvimento dos amplificadores de baixo ruído. Além disto, em termos de processamento de sinal, assim como em todas as áreas do radar, o advento do computador digital expandiu ainda mais a eficiência e a aplicabilidade dos sistemas radar.

## HISTÓRIA EVOLUTIVA DA AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL

A aviação civil se tornou uma das mais fascinantes, importantes e complexas indústrias, desde o início da década de 1920, entretanto, somente após a Segunda Guerra Mundial é que o transporte internacional passou a ser feito em larga escala, por aviões cada vez maiores e mais velozes. A introdução dos motores a jato, usados pela primeira vez em aviões comerciais (Comet), em 1952, pela BOAC (empresa de aviação comercial inglesa), deu maior impulso à aviação como meio de transporte. No final da década de 1950, começaram a ser usados os Caravelle, a jato, de fabricação francesa (*Marcel Dassaud / Sud Aviation*). Em 1960, nos Estados Unidos, entravam em operação os jatos Boeing 720 e 707 e dois anos depois o Douglas DC-8 e o Convair 880. Em seguida, apareceram os aviões a turbo hélice, mais econômicos e de grande potência. Soviéticos, ingleses, franceses e norte-americanos passaram a estudar a construção de aviões comerciais cada vez maiores, para centenas de passageiros e a dos chamados "supersônicos", a velocidades duas ou três vezes maiores que a do som. Na família dos supersônicos, as estrelas internacionais foram o *Concorde* (franco-britânico) e o *Tupolev Tu-144* (russo).

<sup>8</sup> TWT - *Traveling Wave Tube*: Utilizado para amplificar sinais em rádio frequência.

No final da década de 60 e início da década de 70, surgiram modelos capazes de transportar até 400 passageiros, como o Boeing 747, o *Douglas DC-10*, o *Lockheed Tristar L-1011*, todos americanos, e mais recentemente, o *Airbus* (consórcio europeu), o *Douglas MD-11* e os *Boeing 767* e *777*, norte-americanos. Os supersônicos comerciais, o *Tupolev Tu-144* e o *Concorde* iniciaram linhas regulares, tendo sido a primeira inaugurada em Janeiro de 1976, que cobria o percurso Rio de Janeiro - Paris em menos de sete horas, considerando uma escala em Dacar, para reabastecimento. Este voo era efetuado pela companhia aérea francesa *Air France*. Posteriormente a maioria desses voos, inclusive o da *Air France*, foram suspensos em razão do alto custo com combustíveis e manutenção e pelo volume pequeno de carga e de passageiros (144) transportados por voo. A velocidade exigia uma aerodinâmica compatível e os aviões eram estreitos. A poluição sonora desses aviões supersônicos causou também problemas ecológicos e eles acabaram sendo proibidos de pousar em importantes aeroportos como Nova Iorque e Dacar, que era a escala do voo Rio - Paris.



Figura 1.13 - *Tupolev Tu-144* - O primeiro avião supersônico comercial do mundo.



Figura 1.14 - *Concorde* - O segundo avião supersônico comercial do mundo. O único a ser utilizado com sucesso em rotas comerciais.

No início do século XXI, a *Boeing* (americana) e a *Airbus* (européia) já dominavam o mercado mundial de grandes jatos. A *Boeing* incorporou a *Douglas*, a *Lockheed* se especializou apenas na fabricação de aviões militares e outras novas empresas chegaram ao mercado internacional com força, como a holandesa *Fokker*, a brasileira *Embraer* e a canadense *Bombardier*. O mercado de jatos executivos também está em alta e os maiores mercados são Estados Unidos, Brasil, França, Canadá, Alemanha, Inglaterra, Japão e México, pela ordem.

Em 2005, o *Airbus A380* fez o seu primeiro voo. É atualmente o maior avião comercial de passageiros do mundo, superando o *Boeing 747*, que havia detido o recorde por 35 anos. O *Antonov An-225*, de fabricação soviética, é o maior avião do mundo desde o seu primeiro voo, realizado em 21 de dezembro de 1988.



(a)

(b)

Figura 1.15 - (a) O *Airbus A380* - O maior avião de transporte de passageiros no mundo. (b) O *Boeing 747* (Jumbo).

Já o primeiro avião movido à energia solar, o *Solar Impulse*, foi lançado na Suíça em 17/04/12. Construído com doze mil células fotovoltaicas que alimentam quatro motores elétricos e asas de 64,3 metros de comprimento, a aeronave é um protótipo do avião no qual seus criadores esperam realizar a primeira circunavegação do mundo em 2014". É o primeiro avião concebido para voar dia e noite sem combustível ou emissões de poluentes, graças à energia solar. (Fonte: [www.g1.com.br](http://www.g1.com.br) e [www.band.com.br/noticias](http://www.band.com.br/noticias)).



Figura 1.16 – *Solar Impulse*: O primeiro avião movido à energia solar.

Em 2008, o segmento comercial de aviação civil, consistindo de mais de 900 companhias aéreas e 22 mil aeronaves, transportou mais de dois bilhões de passageiros e 85 milhões de toneladas de cargas em mais de 74 milhões de voos para mais de 1700 aeroportos em mais de 180 países em todo o mundo. A magnitude do impacto da indústria comercial de transportes aéreo na economia mundial é bastante expressiva, contribuindo com mais de \$2.6 trilhões, ou seja, 8% do produto interno bruto mundial e suportando 29 milhões de empregos. A aviação geral exerce um papel igualmente importante na economia global [21], aumentando ainda mais as estatísticas econômicas deste segmento econômico.

## **A NECESSIDADE DE ORDENAMENTO DA NAVEGAÇÃO AÉREA**

Manter a segurança da navegação aérea é uma tarefa delicada, fundamental e contínua. Na década de 1930, as melhorias na tecnologia permitiram o uso de equipamentos de rádio-telecomunicações na aviação, possibilitando aos pilotos o recebimento de instruções de voo, advindas de equipes em solo, como também de outros pilotos. Tudo isto gerou técnicas mais precisas de navegação aérea. O piloto automático também passou a ser usado nesta mesma década.

Os primórdios do ordenamento da navegação aérea remontam ao final da II Guerra Mundial, quando a quantidade de voos comerciais aumentou, consideravelmente, em todas as regiões do mundo.

Devido a esse aumento no transporte aéreo de passageiros e de cargas, problemas relativos ao gerenciamento das diversas atividades no espaço aéreo, como a uniformidade de procedimentos, a definição de unidades de medidas, os parâmetros de separação entre aeronaves, dentre outros, afloraram com incrível velocidade, exigindo uma resposta imediata de âmbito internacional.

Assim, com o objetivo de padronizar os procedimentos da navegação aérea no mundo foi realizada, em novembro de 1944, no final da Segunda Guerra Mundial, na cidade de Chicago, uma conferência internacional com a participação de representantes de cinquenta e quatro nações, cujos resultados se materializaram em um documento que ficou conhecido como a “Convenção de Chicago”. Desta, originaram-se vários documentos denominados Anexos à Convenção de Aviação Civil Internacional, os quais até hoje norteiam as normas e os procedimentos da navegação aérea mundial.

Três anos mais tarde, em 04 de abril de 1947, foi criada a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), que é o órgão responsável pela padronização internacional de procedimentos e práticas no campo da aviação, sediado em Montreal, Canadá.

### 1.3 OBJETIVO

Em função do crescimento do tráfego aéreo mundial, novas tecnologias para controle de tráfego aéreo vem surgindo, de forma a acompanhar o processo evolutivo do gerenciamento do espaço aéreo. O Sistema de Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) é uma tecnologia que, aos poucos, vêm substituindo o papel do radar secundário, ou seja, está relacionada com o tráfego cooperativo, e se baseia no fato de que as próprias aeronaves é que enviam as informações necessárias aos controladores de voo podendo, inclusive, receber das aeronaves ao seu redor, mensagens contendo o posicionamento dessas e compondo, juntamente com as informações recebidas dos centros de controle, o cenário aéreo local. As já comprovadas tecnologias cooperativas de ADS-B proporcionam soluções de vigilância de alto desempenho e alta disponibilidade para aplicações de controle de movimentação no solo, para áreas terminais e para o tráfego aéreo de longo alcance. A eficiência econômica, flexibilidade, precisão e confiabilidade desta tecnologia aplica-se a todos os requisitos de vigilância, da superfície aeroportuária mais complexa à região de tráfego aéreo mais remota.

Motivado pelas peculiaridades e vantagens desta tecnologia aliada aos conceitos de canal rádio móvel, a proposta desta dissertação é analisar o comportamento, em faixa estreita, do canal rádio estabelecido entre a transmissão e a recepção de uma portadora centrada na frequência de 1140 MHz, transmitida a partir de uma antena fixa, localizada no Parque de Material de Eletrônica da Aeronáutica (PAME-RJ), localizado no bairro do Caju, na cidade do Rio de Janeiro, e recebida em uma aeronave, em pleno voo, na reta de aproximação para pouso na cabeceira 28 do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, Maestro Antônio Carlos Jobim – Galeão. Para a análise das medições feitas com o sistema de medição proposto, será utilizada a teoria de canal rádio móvel, de modo a explorar as distribuições estatísticas referentes à variabilidade em pequena e grande escala do sinal como, também, a perda no percurso, a taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento. Como não há referências quanto a medidas de tal gênero realizadas em tão altas velocidades, este trabalho se faz necessário, a fim de se compreender, principalmente, a cobertura do sinal ADS-B terra-ar e ar-terra, o que poderá contribuir para uma melhoria deste sistema, que está em fase de implantação na Bacia de Campos - Estado do Rio de Janeiro.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho de dissertação está estruturado em 6 capítulos, divididos estrategicamente de modo a permitir que o leitor possa compreender de forma sucinta cada um dos tópicos abordados. O Capítulo 7 trata das referências bibliográficas.

O capítulo 2 trata da abordagem do conceito CNS/ATM, que surgiu da necessidade de se reestruturar o transporte aéreo, frente às aparentes limitações dos atuais sistemas de controle e diante de um futuro promissor e crescente para o mercado de aviação. Também é feita uma abordagem sobre os Sistemas de Navegação Global por Satélites, também conhecidos pela sigla GNSS.

O capítulo 3 aborda, teoricamente, o tema desta dissertação. É apresentada a tecnologia ADS e os seus tipos. É feita a descrição das informações contidas na mensagem, os tipos de enlaces de dados para trafegá-las e os diferentes tipos de aplicações desta tecnologia.

O capítulo 4 está dedicado à teoria de canal rádio móvel e a sua caracterização faixa estreita.

O capítulo 5 descreve o sistema de medição proposto, onde é feita uma abordagem teórica sobre o sistema de transmissão e de recepção, assim como de todos os procedimentos que se fizeram necessários à realização do experimento prático, tanto em campo quanto em laboratório. Além das análises estatísticas que se pretende, também são apresentadas as simulações eletromagnéticas de cobertura e visibilidade feitas em um *software* apropriado, de modo a complementar as análises.

O capítulo 6 está reservado às conclusões sobre os resultados das análises feitas e a trabalhos futuros.

## 2 O SISTEMA CNS/ATM E OS SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITES

---

A Comunidade de aviação civil e a Organização de Aviação Civil Internacional compartilharam meios e idéias para alcançarem um sistema global de gerenciamento do tráfego aéreo, capaz de atingir um elevado nível de segurança, proporcionar economia de custos, ser ambientalmente sustentável e, ainda, ser capaz de atender aos diferentes requisitos de segurança para todos os usuários durante todas as fases do voo. Para alcançar este objetivo a OACI lançou um plano de estratégias para a implantação do Sistema de Comunicação, Navegação e Vigilância e do Sistema de Gerenciamento do Tráfego Aéreo, então nomeados como CNS/ATM<sup>9</sup>, em níveis globais e regionais, deixando a estruturação de planos nacionais para os Estados. Esse plano nasceu da necessidade de se reestruturar o transporte aéreo frente às aparentes limitações dos atuais sistemas de controle e diante de um futuro promissor e crescente para o mercado de aviação.

Sob o conceito de Navegação, o sistema CNS/ATM se baseou nas capacidades e flexibilidades dos sistemas de navegação por satélites. Assim, a OACI desenvolveu o conceito de performance de navegação requerida (RNP) que define as capacidades necessárias para que uma aeronave navegue em um espaço aéreo particular, além de permitir ao piloto a escolha de quais equipamentos utilizar para alcançar tal determinada capacidade. Esta capacidade requerida pode ser fornecida pelos sistemas de navegação global por satélites, compreendendo as constelações de satélites, os sistemas de “aumentação” (SBAS<sup>10</sup>) apropriados e os receptores a bordo da aeronave. Tais constelações, sistemas e receptores serão capazes de fornecer serviços de navegação com alta integridade e acuracidade, perfeitamente adequados às situações de navegação em rota e em área terminal, como também em aproximações e aterrissagens de aeronaves.

---

<sup>9</sup> CNS/ATM - *Communications, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management*.

<sup>10</sup> SBAS - Sistema de “Aumentação” Baseado em Satélites: Melhoram a performance do Sistema GPS. Geralmente são formados por um ou mais veículos geoestacionários e são utilizados para distribuir mensagens aos usuários, na banda de frequência L.

## 2.1 O SISTEMA CNS/ATM

No início da década de 80 as limitações do sistema de transporte aéreo foram reconhecidas pela OACI. Assim, em 1983, foi criado o “Comitê sobre o Sistema de Navegação Aérea do Futuro” (FANS<sup>11</sup>), com a finalidade de identificar, estudar e avaliar novos conceitos e tecnologias e fazer recomendações para o desenvolvimento coordenado e evolutivo da navegação aérea, em um horizonte de 25 anos. O Comitê FANS concluiu que a exploração da tecnologia de satélites era a única solução viável para superar as limitações dos sistemas atuais e atender às necessidades futuras com base no custo-benefício global. O Sistema GNSS<sup>12</sup> foi definido pela OACI, no âmbito da aviação, como o sistema mundial para determinação da hora e do posicionamento, que inclui uma ou mais constelações, receptores a bordo da aeronave e um monitoramento integrado dos sistemas, para apoiar o desempenho da navegação.

Em 1991 foi aprovado pela 10ª Conferência de Navegação Aérea da OACI (ANC/10) o Conceito CNS/ATM. Em 1998, após examinar as revisões sobre os aspectos técnicos, econômicos, legais e institucionais propostos ao “Plano de Transição Global para os Sistemas CNS/ATM”, documento elaborado em decorrência das decisões da ANC/10, foi promulgado, então, o “Plano Global de Navegação Aérea para os Sistemas CNS/ATM”. Em 2003, na 11ª Conferência de Navegação Aérea, considerando os progressos e as dificuldades encontradas pelos Estados e Grupos Regionais de Planejamento e Implementação, foi aprovado o Conceito Operacional ATM Global, com o intuito de torná-lo referência básica de planejamento para melhor direcionar o processo de implementação em prol de um sistema ATM Global, perfeitamente integrado.

Em 2006, a nova edição do Plano Global de Navegação Aérea para os Sistemas CNS/ATM foi aprovada, após uma completa atualização em relação aos parâmetros do Conceito Operacional ATM Global, oferecendo os elementos que visam permitir a formulação estratégica para a satisfação dos objetivos nacionais, regionais e mundiais, além de preconizar a metodologia necessária para que seja alcançada uma adequada harmonização global, ao longo do processo de transição. A principal diferença desta nova versão está no fato de que foi desenvolvida em parceria com a indústria e os Estados e, ao invés de estabelecer os objetivos a serem atingidos em todo o mundo, a partir de um planejamento centralizado, oferece 23 iniciativas operacionais para serem consideradas no desenvolvimento dos planejamentos e dos

---

<sup>11</sup> FANS: *Future Air Navigation Systems*.

<sup>12</sup> GNSS: *Global Navigation Satellite Systems*

processos de implementação dos sistemas CNS/ATM, visando atender aos objetivos de performance realmente identificados pelas Regiões e, conseqüentemente, pelos Estados.

A partir do Plano global de Navegação Aérea para os Sistemas CNS/ATM, abriu-se o caminho para a implantação do conceito, agora disciplinado a partir de um direcionamento mais eficaz, ciente das particularidades de cada país, para a melhor alocação de recursos e operação dos sistemas em curto, médio e longo prazo.

Alguns Estados já vinham trabalhando no desenvolvimento dos sistemas de aviação do futuro avalizados pela OACI; outros, a partir de então, passaram a atuar de modo mais efetivo diante da questão. Na Europa, a iniciativa destinada a alcançar a modernização dos sistemas CNS/ATM é capitaneada pela União Européia e pela EUROCONTROL, por meio do *Single European Sky ATM Research*, ou simplesmente, SESAR. Já os americanos cunharam o termo *NextGen (Next Generation Air Transportation System)* para nomear uma iniciativa similar, ainda que, obviamente, imbuída das particularidades inerentes a seus sistemas.

No Brasil, no ano de 2008, onde o próprio termo CNS/ATM terminou por consagrar-se como o nome do projeto de modernização nacional, foi elaborada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) uma concepção operacional específica para o processo brasileiro. Tal concepção deu origem a um documento interno que se tornou a referência para o planejamento e a definição dos objetivos de implantação dos sistemas CNS/ATM no país e norteia todas as definições básicas e orientações concernentes a esta iniciativa. Esta concepção também disciplina um plano modular composto por três fases de acordo com os requisitos técnicos e operacionais identificados no cenário nacional:

- Primeira Fase (curto prazo): até 2010;
- Segunda Fase (médio prazo): de 2011 até 2015; e
- Terceira Fase (longo prazo): de 2016 até 2020.

Entretanto, inúmeras iniciativas já estão sendo executadas, antecedendo ao cronograma, a partir da identificação de necessidades operacionais, disponibilidade de tecnologia adequada e alocação de recursos. Dentre elas, destacam-se:

- A criação do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA);
- A implantação da tecnologia de Vigilância Aérea (ADS-C, vide capítulo 3) no Centro de Controle de Área Atlântico (ACC-AO), incorporando benefícios de segurança e eficácia ao fluxo de tráfego aéreo sobre o oceano;

- Implantação da Navegação Baseada em Performance (PBN) nas áreas terminais de Recife e Brasília;
- A instalação dos dispositivos que propiciam a aproximação de precisão por satélites, o GBAS<sup>13</sup>, no Aeroporto do Galeão, cuja realização dos primeiros testes operacionais aconteceram em 2011;
- O início das pesquisas para a implementação do ADS-B nas operações *offshore* da Bacia de Campos; e
- A implantação de uma ferramenta de sequenciamento de aeronaves em área terminal, ainda em andamento.

Também, a proteção ao meio ambiente constitui um dos objetivos estratégicos da OACI e foi um tema amplamente debatido durante a 36ª Assembléia desta organização, já que poderá causar impacto nas implementações futuras. Portanto, este é um dos principais objetivos da presente concepção, que será atendido por meio do aumento da eficiência da navegação aérea, resultando na racionalização do consumo de combustível e, em consequência, na redução das emissões nocivas ao meio ambiente.

As principais características dos Sistemas CNS/ATM são:

- Integração entre satélites e sistemas em solo;
- Cobertura global;
- Eficiência;
- Sistemas interoperantes;
- Utilização de enlaces ar/terra;
- Emprego de técnicas digitais; e
- Diferentes níveis de automação.

Segundo H.V. Sudarshan [1], o processo para manter uma aeronave em segurança, eficientemente, até o seu destino, depende de três elementos essenciais: **Comunicação, Navegação e Vigilância**. O princípio da comunicação é a troca de informações de voz e dados entre as aeronaves e os Centros de Controle de Tráfego Aéreo. A navegação fornece a orientação a ser seguida pela aeronave, de modo que esta possa navegar de um ponto a outro e a vigilância combina informações de

---

<sup>13</sup> GBAS – *Ground-Based Augmentation System*: Sistema de “Aumentação” baseado em solo. Permite que a aeronave faça os procedimentos de aproximação para pouso baseado nas informações recebidas pelo GPS e corrigidas sob “aumentação” da precisão pelo referido sistema, que envia tais correções à aeronave através de sinais em VHF.

comunicação e navegação para facilitar o mapeamento contínuo do posicionamento relativo das aeronaves, para uso dos controladores de tráfego aéreo.

Em seguida, será detalhado cada um dos elementos citados por H.V. Sudarshan.

### **2.1.1 COMUNICAÇÃO**

No futuro, espera-se um aumento substancial nas comunicações via enlaces de dados. Isto permitirá enlaces mais diretos e eficientes entre sistemas em solo e a bordo das aeronaves. A OACI vem desenvolvendo uma arquitetura de sistemas de comunicações que forneça uma gama de capacidades para atender às necessidades dos Centros de Controle de Tráfego Aéreo e seus usuários. De acordo com o conceito CNS/ATM, em espaços continentais remotos e oceânicos, a troca de voz e dados referentes às comunicações com as aeronaves deverá ser realizada diretamente através de enlaces satélite, operando na banda de frequência, exclusivamente, alocada para o serviço de satélite aeronáutico (1545 a 1555 MHz e 1646,5 a 1656,5 MHz) e através de enlaces de dados em alta frequência (HF). Em áreas terminais e lugares em linha de visada direta, será mantida as comunicações de voz em VHF e de dados sob o enlace de dados do radar secundário em modo S (*SSR Mode S*). Diversos meios de comunicações, como por exemplo, o serviço aeronáutico móvel por satélite (AMSS), o enlace de dados em HF, o enlace de dados em VHF e o enlace de dados Modo S, serão integrados através da Rede de Telecomunicações Aeronáuticas (ATN). Embora a comunicação de voz por meio de rádios VHF continue sendo empregada, a tecnologia será evoluída para sistemas digitais em vez da atual, analógica.

### **2.1.2 NAVEGAÇÃO**

A OACI desenvolveu o conceito de performance de navegação requerido (RNP). Este conceito define a capacidade necessária para que uma aeronave navegue em um espaço aéreo especial e permite ao piloto a escolha de um equipamento específico para atingir essa capacidade. A capacidade necessária poderá ser concedida pelo GNSS, composto por constelações de satélites, sistemas de melhoramento e receptores a bordo da aeronave, que serão capazes de fornecer alta integridade e serviços de navegação de alta confiabilidade, apropriados para a navegação em rota, em área terminal, e em aproximações.

Assim, as melhorias com a implementação do conceito CNS/ATM incluem:

- A introdução progressiva do conceito de Navegação de Área (RNAV) junto ao Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS). Esta combinação proverá cobertura de navegação global, incluindo áreas remotas e oceânicas;
- A introdução do conceito de Performance de Navegação Requerida (RNP), que consiste em um requisito de precisão de navegação necessário para operar em determinadas porções do espaço aéreo ou rota; e
- A implementação da Redução dos Mínimos de Separação Vertical (RVSM) de 1000 pés entre os níveis de voo FL 290 (29.000 pés) e FL 410 (41.000 pés). Embora a RVSM não seja propriamente uma função CNS/ATM, é considerada como elemento complementar do conceito.

A figura 2.1 mostra o conceito de melhorias na navegação aérea com a implementação do CNS/ATM.

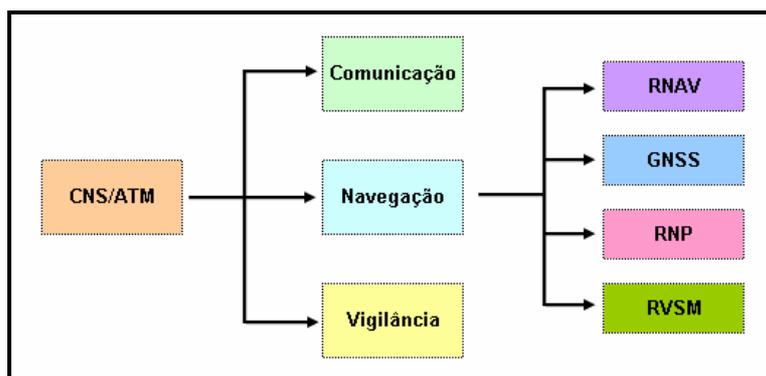


Figura 2.1 - Conceitos de melhorias na Navegação Aérea com a implementação do CNS/ATM.

### 2.1.3 VIGILÂNCIA

Foi desenvolvido o conceito de Vigilância Automática Dependente (ADS). Neste, uma aeronave transmite, automaticamente, para o Centro de Controle de Tráfego Aéreo, a sua posição e outros dados de relevância, como por exemplo, a sua intenção de curso, a sua velocidade e as condições de tempo local, através de enlaces de dados. O posicionamento de cada aeronave é então apresentado para o controlador de uma maneira similar à atual tela do radar. O curso natural é implementar esse serviço, inicialmente, em operações oceânicas (neste caso utiliza-se o ADS-C, também chamado de ADS-A), em regiões continentais remotas e em áreas onde a implantação de uma estação radar não pode ser economicamente justificada

(neste caso utiliza-se o ADS-B). As diferenças e aplicações entre ADS-C e ADS-B serão apresentadas no capítulo 3.

#### 2.1.4 GERENCIAMENTO DO TRÁFEGO AÉREO (ATM)

O principal objetivo do ATM é agilizar e manter, de forma ordenada e segura, o fluxo de tráfego aéreo, durante todas as fases de operação, combinando componentes em solo e a bordo da aeronave, ambos perfeitamente integrados através de procedimentos bem definidos. O sistema deve ser projetado para acomodar as demandas atuais de pico de tráfego normal, além de levar em consideração um crescimento futuro. Assim, podemos dizer que o sistema ATM consiste em três sub-elementos, sendo eles:

- O **Gerenciamento do espaço aéreo** (ASM – *Airspace Management*), que está relacionado com a infraestrutura e a flexibilidade no uso do espaço aéreo;
- Os **Serviços de tráfego aéreo** (ATS – *Air Traffic Services*), que inclui o serviço de informações de voo (FIS – *Flight Information Services*), serviços de alerta e de controle de tráfego; e
- O **Gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo** (ATFM – *Air Traffic Flow Management*), que está relacionado com a otimização do uso do espaço aéreo.

Em vez de enxergar o solo e o ar como funções separadas, o conceito ATM relaciona as operações de voo de forma perfeitamente integrada. Esta interoperabilidade irá produzir uma sinergia que ainda não existe. Esta integração funcional poderá ser alcançada através da utilização de enlaces de dados para a troca de informações entre os elementos do sistema ATM. O objetivo dos novos sistemas CNS dentro do conceito ATM é fornecer uma maior interação entre os sistemas em solo e os sistemas a bordo da aeronave, antes e durante todas as fases de voo. Assim, os novos sistemas CNS permitirão a utilização do espaço aéreo de uma maneira mais flexível e eficiente, tanto em rota como em áreas terminais, suportando desta forma o crescente aumento do tráfego aéreo.

### 2.1.5 BENEFÍCIOS DO CONCEITO CNS/ATM

Sistemas CNS / ATM são capazes de melhorar o tratamento e a transferência de informações, de ampliar a vigilância utilizando o ADS e de melhorar a precisão de navegação. Isso levará, entre outras coisas, à redução da separação entre aeronaves, permitindo um aumento da capacidade do espaço aéreo. Os sistemas em solo se comunicarão diretamente com os sistemas de gerenciamento de voo (FMS<sup>14</sup>), a bordo das aeronaves, através de enlaces de dados. Desta forma, será experimentado um aprimoramento nas ações tanto dos controladores quanto dos pilotos devido à eficiência aplicada em toda a logística e operações de resolução e detecção de conflitos.

Como resultado da implementação do sistema ATM, haverá um aumento da segurança do espaço aéreo, por meio da implantação de procedimentos com descida contínua e estabilizada, possibilitando uma redução significativa dos eventos de colisão com o solo, além da redução do tempo de voo das aeronaves, a partir da implantação de trajetórias ótimas de voo, gerando economia de combustível. Esta economia de combustível proporcionará uma redução das emissões nocivas ao meio ambiente, como também a redução dos atrasos nos espaços aéreos e aeroportos com alta densidade de tráfego aéreo, a partir de um aumento na capacidade de controle de tráfego aéreo e dos aeroportos e uma potencial redução na separação entre rotas paralelas para acomodar maior quantidade de tráfego aéreo no mesmo fluxo. A figura 2.2, a seguir, sumariza os benefícios do Sistema CNS/ATM.

---

<sup>14</sup> FMS - O Flight Management System (Sistema de Gerenciamento de Voo) é uma parte de extrema importância no sistema de orientação e navegação das aeronaves modernas. O FMS é o equipamento a bordo da aeronave que segue o plano de voo, depois deste ter sido configurado e programado pelo piloto no Flight Management Computer (FMC), o que permite ao piloto a ação de corrigi-lo conforme a proa, altitude e velocidade do voo. O FMS usa diversos mecanismos para saber a localização da aeronave. Depois das informações inseridas no FMC, o computador leva a aeronave até o local, proa, altitude e velocidade programados – Fonte: Wikipedia.

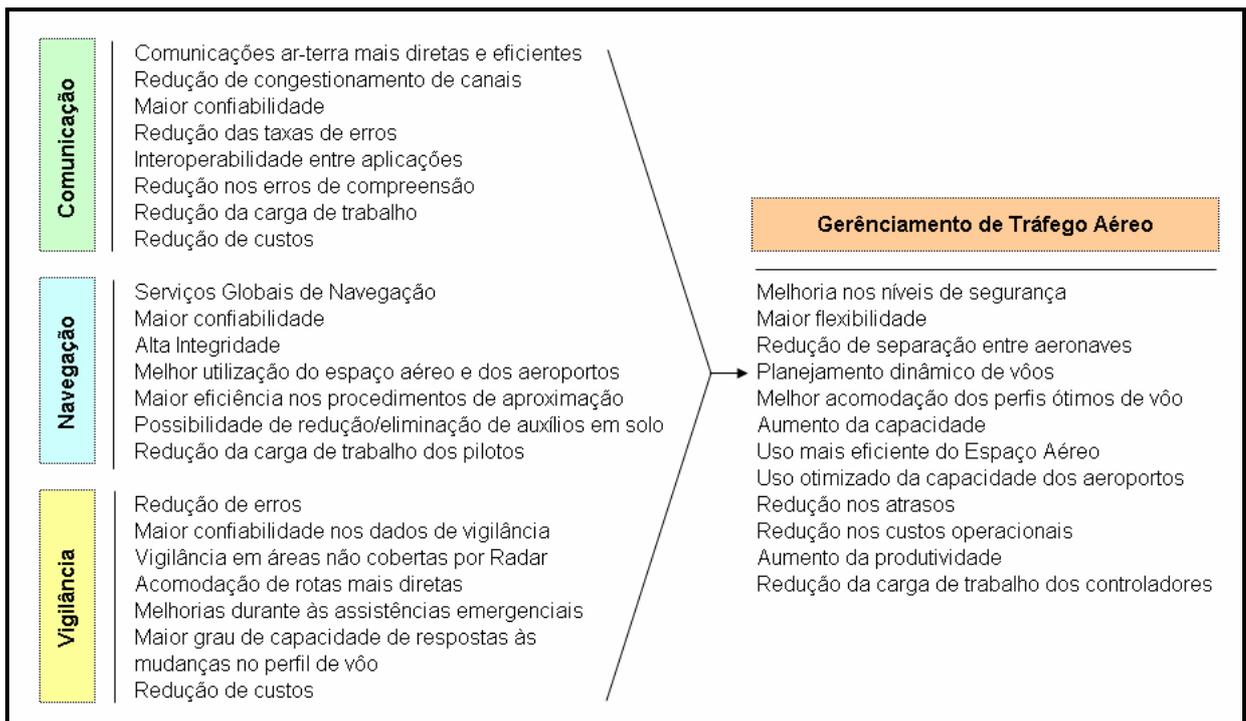


Figura 2.2 - Benefícios do Sistema CNS/ATM.

#### a) Benefícios para as Companhias Aéreas

Os benefícios vão garantir um relacionamento mais estreito, permitindo transmissões mais rápidas e confiáveis entre sistemas em solo e a bordo das aeronaves. Sistemas de navegação mais precisos e confiáveis também serão capazes de permitir que as aeronaves possam navegar em todos os tipos de espaços aéreos e mais próximas umas às outras, aumentando a capacidade de tráfego. Espera-se uma redução nos padrões de separação entre aeronaves sobre o espaço aéreo oceânico, expansão do domínio de navegação nas áreas remotas, introdução gradual de uma separação vertical de 1000 pés abaixo do nível 300 (30.000 pés), inclusão de rotas mais dinâmicas e diretas, além de uma melhoria geral na segurança.

#### b) Benefícios para os Estados

Para aqueles Estados que fornecem e mantêm uma extensiva infraestrutura em solo, haverá uma redução em todos os custos de operação e manutenção, na medida em que os tradicionais sistemas em solo se tornarem obsoletos e o número de Sistemas CNS/ATM instalados for gradativamente aumentando, principalmente, em substituição aos antigos sistemas.

Adicionalmente, os Sistemas CNS/ATM fornecem uma excelente oportunidade para aqueles Estados em desenvolvimento, de modo que estes possam reforçar sua infraestrutura e venha a suportar um tráfego aéreo adicional, com um investimento mínimo. Muitos destes Estados possuem um grande espaço aéreo disponível, porém inutilizado, principalmente, devido ao custo envolvido na aquisição, operação e manutenção.

### **c) Benefícios para o meio-ambiente**

Como a indústria de aviação vem crescendo rapidamente, o impacto das operações do tráfego aéreo na atmosfera do planeta, além dos impactos locais no que se refere ao ruído e à qualidade do ar, tornam-se cada vez mais preocupantes. Os esforços para controlar ou reduzir tais impactos têm identificado uma série de opções que possam minimizar tais efeitos. Em particular, espera-se que a melhoria no gerenciamento do tráfego aéreo possa ajudar a reduzir a queima de combustível, reduzindo assim os níveis de emissões de gases. Melhorias no gerenciamento do tráfego aéreo e outros procedimentos operacionais podem reduzir de 8 a 18% a queima de combustíveis de aviação [8].

### **d) Benefícios para a Aviação Geral**

A aviação geral encontrará acesso a equipamentos (aviônica) que possibilitará a sua operação dentro e fora de aeroportos que, normalmente, este tipo de aviação não está permitido a operar, devido ao custo operacional e aos requisitos associados. Além disso, como resultado da implementação de Sistemas CNS/ATM, muitas áreas remotas que estão atualmente inacessíveis para a aviação geral, devido à incapacidade de comunicação ou de navegação em segurança, se tornarão acessíveis.

### **e) Benefícios Indiretos**

Em adição aos benéficos diretos acima listados, existem vários outros benefícios indiretos como, por exemplo:

- Redução de Tarifas,
- Economia de tempo dos passageiros,
- Transferência de competências de alta tecnologia,
- Melhoria da produtividade e reestruturação da indústria,

- Estimulação das indústrias conexas, e
- Oportunidades comerciais de desenvolvimento.

#### f) Custo / Benefício

Para garantir o sucesso da implementação dos Sistemas CNS/ATM, os órgãos de tráfego aéreo, os usuários destes serviços e os organismos envolvidos precisam ser informados sobre as implicações financeiras e convencidos sobre a viabilidade econômica. Isto pode ser conseguido através de uma análise exaustiva sobre os custos/benefícios, que inclui as conseqüências financeiras que afetam todos os parceiros envolvidos no processo de implementação.

## 2.2 OS SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITES

Os sistemas de navegação global por satélites, também conhecidos pela sigla GNSS, compreendem as constelações de satélites, os sistemas de “aumentação” apropriados e os receptores a bordo das aeronaves, conforme dito anteriormente. Nos próximos itens serão descritos, em linhas gerais, alguns desses sistemas.

### 2.2.1 GLOBAL POSITIONING SYSTEM – GPS

O Sistema Global de Posicionamento, ou simplesmente GPS, é um sistema de navegação mundial por satélite que permite a qualquer usuário saber a sua localização, velocidade e tempo, 24 horas por dia, sob quaisquer condições atmosféricas e em qualquer ponto do globo terrestre, desde que em visada de, no mínimo, três satélites, para visualizações 2D (latitude, longitude) e movimento de rastro, ou quatro satélites, para visualizações 3D (latitude, longitude, altitude). Uma vez que a posição do usuário foi determinada, a unidade de GPS pode calcular outras informações, como: velocidade, proa, rastro, distância de viagem, distância ao destino, tempo de viagem, nascer e pôr-do-sol e muito mais.

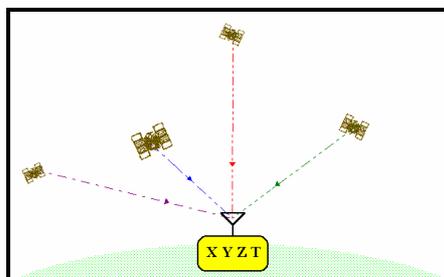


Figura 2.3 - Determinação da posição.

Logo após a Segunda Guerra Mundial, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos empenhou-se em encontrar uma solução para o problema do posicionamento preciso e absoluto. Vários projetos e experiências surgiram durante os seguintes 25 anos, incluindo LORAN<sup>15</sup>, TRANSIT<sup>16</sup> etc. Todos permitiam determinar a posição, mas eram limitados em precisão ou funcionalidade. No começo da década de 70, um novo projeto foi proposto, o GPS. O Primeiro satélite GPS foi lançado em 1978 e o sistema foi considerado completamente operacional, em 27 de abril de 1995, com 24 satélites em órbita.

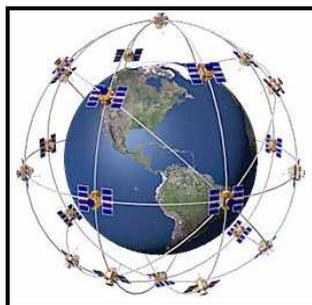


Figura 2.4 - A constelação GPS.

A técnica fundamental do GPS é medir as distâncias entre o receptor e os satélites GPS que estão, simultaneamente, em linha de visada. A posição de cada satélite GPS é transmitida para o usuário. Então, através do conhecimento da posição de diversos satélites e das distâncias medidas entre estes e o receptor, a posição do receptor pode ser determinada. A mudança de posição, que também pode ser determinada, é então a velocidade do receptor.

---

<sup>15</sup> LORAN – *Long Range Navigation*: É um sistema terrestre hiperbólico de radionavegação que opera na banda de 90 a 110 KHz e se tornou operacional em 1958. Os sinais emitidos por este sistema são de alta potência e não dependem de uma linha de visada direta. Evoluções: LORAN-A (ondas médias – MF), desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial e LORAN-C (ondas curtas – LF), que começou a ser desenvolvido no final da década de 1950 para substituir o LORAN-A. Navios e aviões de diversos países utilizam esta forma de navegação, principalmente os dos Estados Unidos da América, os do Japão e os de vários Estados europeus.

<sup>16</sup> TRANSIT: Foi o primeiro sistema de navegação por satélites. O sistema foi desenvolvido pelo Laboratório de Física Aplicada da *Johns Hopkins University* (JHUAPL) para a marinha dos Estados Unidos. Baseado no efeito Doppler, se tornou operacional em 1964. As órbitas foram definidas de modo a cobrirem todo o globo terrestre e embora não possuísse a capacidade de fornecer medidas de posição em alta velocidade e em tempo real, funcionava satisfatoriamente, quando analisado quanto à sua finalidade, que era a orientação de submarinos. Ficou obsoleto com a entrada em operação do Sistema de Posicionamento Global americano (GPS), saindo de operação em 1996.

Originalmente, o Sistema GPS foi projetado para aplicações militares, no entanto extensas aplicações comerciais foram criadas e continuam a surgir. As aplicações mais comuns são em aeronaves, navios e veículos automotivos. Outra utilidade é para o levantamento topográfico, mapeamento e diversos outros propósitos geográficos. No que diz respeito ao lazer, esta área continua a crescer com a utilização do sinal GPS em diversas atividades como, por exemplo, caça, pesca e trilhas, além de outras atividades ao ar livre, onde a determinação de rotas e posicionamentos é desejável. Quando o sinal GPS é combinado com sistemas de visualização de mapas digitais, torna-se uma poderosa ferramenta de navegação.

Cada satélite transmite dados em três frequências:  $L1$  (1575,42 MHz),  $L2$  (1227,60 MHz) e  $L5$  (1176,45 MHz). As frequências das portadoras  $L1$ ,  $L2$  e  $L5$  são geradas através da multiplicação da frequência fundamental por 154, 120 e 115, respectivamente. Códigos PRN (*Pseudorandom Noise*), juntamente com as efemérides do satélite, os modelos ionosféricos e as correções dos relógios, são sobrepostos nas frequências  $L1$ ,  $L2$  e  $L5$ . Os tempos medidos entre a transmissão e a recepção são utilizados nos cálculos das pseudodistâncias. O código C/A (*Course-Acquisition*), também chamado de Serviço de Posicionamento padrão (SPS - *Standard Positioning Service*) é um código PRN que é modulado na portadora  $L1$ . O código P (*Precision Code*), também chamado de Serviço de Posicionamento Preciso (PPS – *Precise Positioning Service*), é modulado nas portadoras  $L1$ ,  $L2$  e  $L5$ , permitindo a remoção dos efeitos da ionosfera.

O Sistema GPS foi concebido como um sistema de medição de distâncias a partir das posições conhecidas dos satélites até a posição desconhecida do receptor, estando este em solo, no mar ou no espaço aéreo. O receptor GPS armazena em sua memória um almanaque que informa onde cada satélite está localizado a qualquer instante de tempo. O almanaque é um arquivo de dados contendo informações de órbitas e correções de relógios de todos os satélites. Estas informações são transmitidas pelos satélites GPS, detectadas, decodificadas e processadas pelos receptores.

O sistema GPS é composto por três segmentos descritos nos parágrafos seguintes:

#### **a) Segmento Espacial**

O Segmento Espacial é chamado de NAVSTAR e é operado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos. O NAVSTAR consiste de uma constelação de 28 satélites, sendo 4 sobressalentes, distribuídos em 6 planos

orbitais. Os satélites, ou veículos espaciais, percorrem a sua órbita em volta do globo terrestre em 11 horas e 58 minutos. Assim, cada um circunda a Terra duas vezes por dia a uma altitude de 20.200 *km* e a uma velocidade de 11.265 *km/h*, com um peso típico de 1000 *kg*. Cada satélite é construído para durar, aproximadamente, 10 anos. Constantemente estão sendo construídas substituições e lançadas em órbita. A potência do transmissor é de apenas 50 *Watts*, ou menor.

Os subitens seguintes tratam dos planos orbitais e do relógio atômico.

- **Planos Orbitais**

Existem 6 planos orbitais, igualmente espaçados de 60° entre si e inclinados cerca de 55° em relação ao plano equatorial. Esta constelação permite visibilidade de 5 a 8 satélites a partir de qualquer ponto na Terra. Visível significa que há uma linha visada direta, desobstruída, entre o receptor e o satélite. Os satélites se auto orientam de maneira a permanecerem com os seus painéis solares apontados na direção do sol e suas antenas apontadas em direção a Terra. Eles possuem baterias reserva para mantê-los em funcionamento no caso de um eclipse solar, ou quando não houver sol. Pequenos propulsores de foguete em cada satélite os mantêm em suas órbitas.

- **Relógio Atômico**

Cada satélite possui quatro relógios Atômicos (Césio) de alta precisão que fornecem a hora GPS e produzem uma frequência fundamental de 10,23 *MHz*. A hora fornecida pelo GPS é referenciada pelo tempo universal coordenado, conhecido pelo seu termo em inglês UTC, *Universal Time Coordinated*.



Figura 2.5 - Satélite GPS NAVSTAR.

## **b) Segmento de controle**

Os satélites GPS são monitorados por cinco estações em solo. A estação de controle principal está localizada no Colorado (USA) e recebe os dados de acompanhamento das outras quatro estações: *Ascension Island* (oceano Atlântico), Diego Garcia (oceano Índico), Kwajalein e Hawaii (ambas no oceano Pacífico). Esta estação de controle é responsável por computar as correções de órbita e de relógio dos satélites GPS, juntamente com outros dados. Os dados de correções são enviados aos satélites a partir de três das cinco estações de monitoramento, três vezes ao dia.

## **c) Segmento do Usuário**

O segmento do usuário consiste em várias aplicações que incluem transporte, levantamento topográfico e uso recreativo. Para receber os sinais dos satélites, o usuário deverá portar um receptor GPS.

Como o GPS é um sistema provedor da hora universal, esta poderá ser utilizada em aplicações que requerem uma sincronização.

### **2.2.1.1 Operação e funcionamento**

Um receptor GPS calcula a distância de sua antena até o satélite através da medição do tempo de atraso da transmissão do sinal e multiplica este atraso pela velocidade da luz. A medição do tempo de atraso é descrita a seguir:

- Cada satélite transmite um código único modulado em uma portadora a 1.5 GHz em um tempo exato conhecido.
- Quando o receptor GPS localiza um satélite, ele gera o mesmo código único e se alinha com o código recebido do satélite.
- O tempo necessário para que o receptor GPS gere tal código e se alinhe com ele é o tempo de transmissão do sinal.
- A medida da distância entre o receptor GPS e o satélite é referenciada como pseudodistância. A distância medida é diferente da distância real devido a uma variedade de fontes de erro. As fontes primárias de erro são os erros do relógio atômico do satélite, erros do relógio do receptor GPS, atrasos causados pela atmosfera e ruídos do receptor. O próprio receptor GPS resolve a maioria destes erros durante o processo de cálculo da posição de navegação. Os erros dos relógios do receptor e do satélite GPS são removidos quando um quarto satélite é localizado, quando então o

tempo passa ser uma quarta incógnita. Assim, o erro de relógio é removido quando o receptor GPS utiliza, pelo menos, 4 medidas de distâncias para resolver quatro incógnitas: latitude, longitude, altitude e tempo (hora).

### **2.2.1.2 Precisão do Sistema GPS**

A precisão do Sistema GPS é dependente de vários fatores. Os parágrafos seguintes descrevem alguns dos principais fatores que contribuem para a precisão do GPS.

#### **a) Serviços de Posicionamento**

Existem dois níveis de precisão para o sinal GPS:

- O Serviço de Posicionamento Preciso (PPS – *Precise Positioning Service*): Fornece uma precisão da ordem de, pelo menos, 22 *m* horizontalmente, 27,7 *m* verticalmente e transferência de dados de tempo dentro de 200 *ns* (95%). Os sinais PPS são criptografados, logo este serviço está disponível, somente, para os militares americanos e outros usuários autorizados, e
- O Serviço de Posicionamento Padrão (SPS – *Standard Positioning Service*): Fornece uma precisão da ordem de, pelo menos, 100 *m* horizontalmente, 156 *m* verticalmente e transferência de dados de tempo dentro de 340 *ns* (95%), estando disponível para qualquer usuário.

#### **b) Sinal de Degradação Intencional**

Para reduzir a precisão do Serviço SPS, o Departamento de Defesa Aérea dos Estados Unidos pode, intencionalmente, degradar a qualidade do sinal GPS. Esta degradação do sinal é conhecida como Disponibilidade Seletiva, em inglês *Selective Availability (SA)*. O SA reduz a precisão em até 100 *m* horizontalmente. Tipicamente, a Disponibilidade Seletiva é implementada através da degradação dos dados orbitais e da frequência do relógio dos satélites GPS. Essa funcionalidade foi desligada em maio do ano 2000 por decisão do Governo dos Estados Unidos, entretanto o Departamento de Defesa daquele país possui a aptidão de reativar o SA se necessário, em caso de uma emergência nacional.

### **c) Outras condições de Erro**

- **Multipercursos**

Sinais que não se propagam diretamente do satélite até o receptor GPS, sob observação, podem resultar em imprecisões. Além disso, se o sinal sofre difração antes de alcançar a antena do receptor, um atraso extra no tempo de chegada do sinal GPS será introduzido, acarretando em um erro adicional.

- **Atrasos Devido às Condições Atmosféricas**

As condições atmosféricas também são responsáveis por causar atrasos nos sinais GPS recebidos pelos receptores, resultando em um grande erro no cálculo da pseudodistância. Esses atrasos são causados pela ionosfera e pela troposfera. Erros introduzidos pelas condições atmosféricas são minimizados através da estimação do atraso do sinal baseado em um modelo para o receptor GPS.

- **Disponibilidade do Satélite**

Satélites que falham ou que apresentam sinais quanto à sua integridade técnica e física afetam diretamente as soluções de navegação.

- **Precisão da Solução de Navegação**

Está relacionada à confiança que a solução de navegação impõe sob a utilização do sinal GPS. Por exemplo, satélites que flutuam dentro de sua órbita e resultam em imprecisões quanto à sua posição em relação ao receptor, causarão perda na integridade da navegação.

- **Geometria da Constelação de Satélites**

A diluição geométrica de precisão (GDOP – *Geometric Dilution of Precision*) é uma medida do erro causado pelo posicionamento geométrico dos satélites, segundo a visão do receptor GPS. Como um exemplo, se duas linhas são necessárias para estabelecer a posição de um usuário, uma quantidade menor de erro é obtida quando as linhas se cruzam em ângulos retos, enquanto que uma quantidade maior de erro é obtida quando as linhas tendem a ficar paralelas. Este efeito é mostrado na figura 2.6.

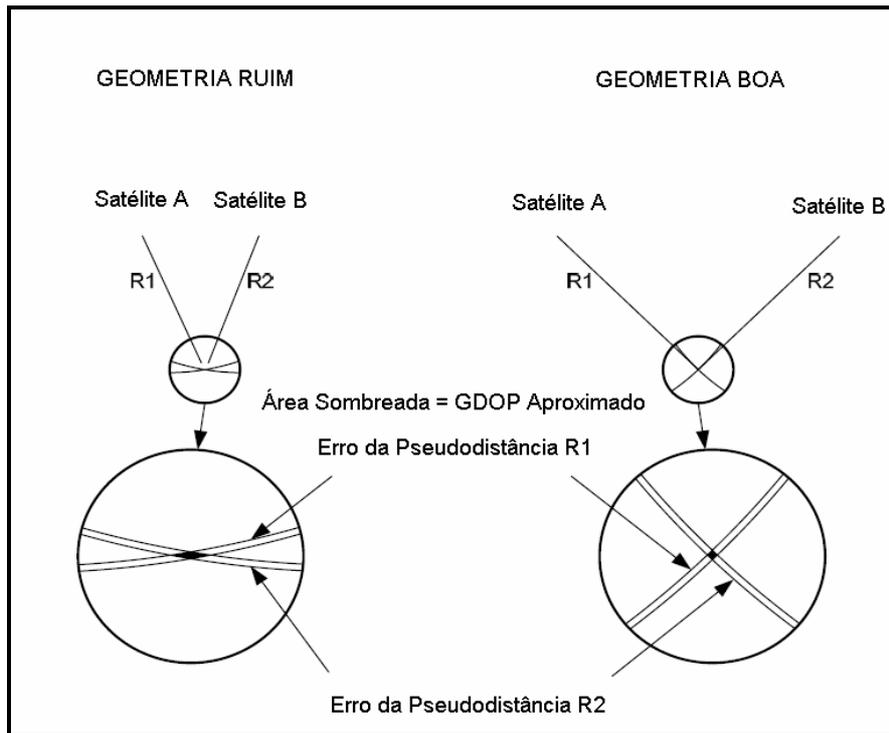


Figura 2.6 - Satélite GPS NAVSTAR.

A maioria dos satélites GPS está em órbita há muito tempo. A mais nova versão de satélites GPS a ser lançada é chamada de GPS IIF e com esse novo modelo espera-se aumentar consideravelmente a precisão de rastreamento. Hoje, a precisão dos satélites, quando em um local de excelentes condições de recepção, pode chegar a 6 metros. Espera-se com a substituição pela nova versão, uma precisão de aproximadamente 90 centímetros. Atualmente, existe apenas um satélite GPS IIF em órbita, o SV-1, que está em pleno funcionamento desde agosto de 2010. O segundo GPS IIF, o SV-2, deverá entrar em órbita em breve e outras dez unidades estão previstas para serem lançadas.

Além do sistema americano, existem outros dois sistemas de posicionamento, o GLONASS (russo) e o GALILEO<sup>17</sup> (europeu). O princípio de posicionamento e navegação é similar ao sistema americano, assim, os algoritmos e teorias podem ser diretamente utilizados com algumas exceções.

<sup>17</sup> GALILEO – É o sistema de navegação global por satélite proposto pela Europa. O nome foi dado em homenagem ao famoso astrônomo italiano, Galileu Galilei.

## 2.2.2 GLOBAL NAVIGATIONAL SATELLITE SYSTEM - GLONASS

O GLONASS é um sistema de navegação global por satélite gerenciado pelas Forças Espaciais Russas e operado pelo Centro de Coordenações e Informações Científicas (KNITs) do Ministério da Defesa da Federação Russa. O referido sistema utiliza métodos de posicionamento e transmissão de dados baseados no mesmo princípio utilizado pelo Sistema de Posicionamento Global americano (GPS). O primeiro satélite foi lançado em órbita em 1982 e foi declarado operacional em 1996 com a constelação de satélites completa. Entretanto, o sistema decaiu e somente passou a ser declarado reconstituído operacionalmente, após o funcionamento do último satélite lançado em 03 de outubro de 2011. Da mesma forma que o GPS, o sistema é composto de três segmentos: o espacial, o de controle e monitoramento e o dos usuários.

O segmento espacial é composto de 24 satélites, posicionados em 3 planos orbitais separados em  $120^\circ$ , cada um com 8 satélites e com inclinação de  $64,8^\circ$ . As órbitas são praticamente circulares e localizadas a uma altitude da ordem de 19.100 *km* e período orbital de, aproximadamente, 11 horas e 16 minutos. Devido à maior inclinação em relação ao GPS, a constelação GLONASS pode proporcionar uma melhor cobertura para altas latitudes. Relógios de césio são utilizados.

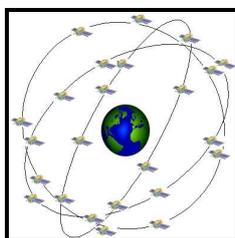


Figura 2.7 - A constelação GLONASS.

O segmento de controle e monitoramento é composto de 3 subsistemas:

- Sistema de controle central: Responsável por todas as funções do sistema;
- Sistema de sincronização central: Responsável pelo relógio de tempo; e
- Sistema de controle de frequência: Responsável por monitorar o tempo e o desvio padrão das frequências de operação.

Adicionalmente, também fazem parte deste segmento três estações de comando e de rastreamento que medem a trajetória dos satélites e enviam suas efemérides, dois satélites a base de laser que rastreiam e calibram, periodicamente, os dispositivos de medidas de distância, e uma unidade de campo para controle da navegação dos satélites, responsável pelo monitoramento do sistema.

O sistema GLONASS utiliza duas bandas, denominadas L1 e L2. Cada satélite tem a sua própria frequência. O plano original para as frequências é definido a partir de uma frequência central dos canais, isto é:

$$L1 = 1602 + 0,562n \text{ (MHz)}$$

$$L2 = 1246 + 0,4375n \text{ (MHz)}$$

Para  $L1$  e  $L2$ , respectivamente, onde  $n = 0,1,2, \dots, 24$  são os números dos canais. Os canais de 15 a 20 não estão sendo utilizados, atualmente, com o propósito de minimizar interferências em radioastronomia, que atua na banda de 1610,6 a 1613,8 MHz. Como medida compensativa para esta situação, cada uma das frequências dos canais 15 a 24 está sendo dividida pelo par de satélites localizados em posições antípodas<sup>18</sup>.



Figura 2.8 - Satélite GLONASS.

Similarmente ao GPS, existem dois códigos PRN no GLONASS:

- O código C/A: Disponível para usuários civis, e
- O código P: Disponível para usuários autorizados.

A frequência do código C/A é 0,511 MHz e a do código P é 5,11 MHz, aproximadamente, metade daquela do sistema GPS. Assim, ao menos teoricamente, as pseudodistâncias GLONASS são de menor precisão porém, diferentemente do GPS, o sistema GLONASS nunca foi degradado intencionalmente. Os códigos PRN são os mesmos para todos os satélites, assim a identificação dos satélites é feita pela frequência do sinal.

A precisão do GLONASS em um serviço similar ao SPS do GPS, é da ordem de 60 e 75m, com 99,7% de probabilidade. Em outubro de 2011, a constelação foi considerada completa para funcionamento global e sua vantagem em comparação aos

---

<sup>18</sup> Em geografia, o antípoda ou as antípodas (do grego anti- "oposto" e pous "pé") é o lugar da superfície terrestre diametralmente oposto a outro dado, isto é, o lugar da superfície terrestre mais afastado. Segundo a RAE (Real Academia Espanhola), um antípoda ou perieco é aquele habitante do globo terrestre que, com respeito a outro, mora em um lugar diametralmente oposto.

outros sistemas, é que está previsto ser gratuito e com resolução máxima em decímetros, o que é muito importante para programas de estacionamento de carros. Atualmente a precisão é de 5 metros, tal resultado foi alcançado após o lançamento do 28º satélite a fazer parte do sistema, em 03 de outubro de 2011. Até o ano de 2015 a Rússia pretende aumentar o número de satélites dos atuais 24 para 30 aparelhos.

O sistema GPS estadunidense, no momento é o único sistema de navegação já desdobrado a 100 por cento, entretanto possui uma série de deficiências. Diante de algumas particularidades estruturais, ele não funciona muito bem nas latitudes setentrionais e fica totalmente inoperante no Pólo Norte. Vale lembrar que 45 por cento do território da Rússia está situado ao norte do Círculo Polar Ártico. Diante das deficiências do sistema americano, especialistas sustentam que o GPS e o GLONASS não são concorrentes, pelo contrário, são sistemas complementares.

### **2.2.3 GALILEO**

Informações de navegação por satélite, além de data e hora universal, vêm sendo amplamente utilizadas em diversas áreas. Através do reconhecimento da estratégica importância destas aplicações, a comunidade europeia passou a buscar soluções que melhorasse a precisão e a confiabilidade dos Sistemas GPS e GLONASS. Assim, já no início da década de 1990, foi desenvolvido o programa EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), um projeto de “aumentação” (melhoramento) da precisão dos Sistemas GPS e GLONASS. Tal programa foi desenvolvido em conjunto com a Agência Espacial Europeia (ESA), a Comissão europeia (EC) e a Eurocontrol<sup>19</sup>.

Mais tarde, em 1998, a União Europeia decidiu desenvolver um sistema de navegação global por satélite independente do GPS e do GLONASS e com fins, especificamente, civis, o GALILEO. Este projeto está sendo desenvolvido em conjunto com Alemanha, França, Itália e Reino Unido.

Cinco serviços estão sendo definidos:

- Um serviço aberto (*Open Service – OS*) que será livre de taxas, para utilização direta (carros, celulares, etc.);
- Um serviço comercial (*Comercial Service – CS*) que combinará dados de valor agregado a um serviço de posicionamento de alta precisão;

---

<sup>19</sup> Eurocontrol: Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea. É uma organização internacional cujo principal objetivo é o desenvolvimento de um sistema pan-europeu de ATM (*Air Traffic Management - Gestão de Tráfego Aéreo*).

- Um serviço de segurança (*Safety-of-life* - SOL), não criptografado, mas que exigirá do usuário uma autenticação. Isto permitirá que o usuário verifique, periodicamente, de maneira criptografada, se a informação recebida é genuína. Adicionalmente, tal serviço incluirá um sistema de notificação e monitoramento da integridade do sinal. Tal serviço está direcionado àqueles usuários envolvidos em aplicações que exigem um elevado nível de segurança e desempenho, como por exemplo, em transportes marítimo, aéreo e ferroviário;
- Um serviço público regulamentado (*Public Regulated Service* – PRS) direcionado a usuários autorizados pelo governo e que requerem um alto nível de precisão. O sinal será entregue de maneira criptografada; e
- Um serviço de busca e salvamento (*Search and Rescue* – SAR) que permitirá a retransmissão de alarmes de balizas de socorro para as organizações SAR. Este sistema será integrado aos órgãos internacionais COSPAS/SARSAT<sup>20</sup>.

Está sendo planejada uma constelação de 30 satélites e um segmento de controle global total em solo. Um dos objetivos principais deste sistema é ser completamente compatível com o Sistema GPS. Medições vêm sendo tomadas para garantir a interoperabilidade entre os dois sistemas. O primeiro satélite experimental do projeto GALILEO, o Giove-A, foi lançado em 28 de dezembro de 2005; o segundo satélite, o Giove-B, lançado em 27 de abril de 2008, integra o relógio atômico mais preciso, jamais lançado no espaço. Os dois primeiros satélites IOV (*in-orbit validation*) foram lançados em 21 de outubro de 2011, a partir da Guiana Francesa e já estão operacionais. De acordo com a ESA outros dois satélites deverão ser lançados em 2012 (Fonte: [http://www.esa.int/SPECIALS/Galileo\\_IOV/](http://www.esa.int/SPECIALS/Galileo_IOV/)). Está previsto para o ano de 2015 um total de 18 satélites já em órbita, seguidos pelos restantes em 2020 até

---

<sup>20</sup> O Sistema COSPAS-SARSAT (*Space System for Search of Distressed Vessel – Search and Rescue Satellite-Aided Tracking*) é uma organização que nasceu em 1979, resultando de um acordo entre França, EUA, Rússia e Canadá, com o objetivo de detectar sinais de emergência emitidos por radiobalizas existentes em navios, aeronaves e pessoas, auxiliando assim na busca e salvamento. Em 1982 iniciaram-se testes no sistema que foi considerado como operacional em 1985. Este sistema é composto por uma constelação de satélites de órbita baixa e por satélites Geoestacionários. Para o seu funcionamento requer no mínimo 4 satélites, 2 de órbita baixa e 2 Geoestacionários. Quando uma radiobaliza é ativada o sinal de emergência é detectado pelos satélites do sistema COSPAS-SARSAT que retransmitem o sinal para uma das estações LUT (*Local User Terminal*) em terra, que processam e calculam a posição do sinal de emergência. Esta posição é transmitida para um MCC (*Mission Control Center*), que vai encaminhá-lo para o RCC (*Rescue Coordination Center*) respectivo.

completarem a constelação de 30 satélites conforme arquitetura projetada. O centro de controle em terra já está operacional para os quatro primeiros satélites, sendo formado pelo Centro de Controle do Galileo, em Oberpfaffenhofen, na Alemanha, e por duas estações de telemetria, seguimento e comando, sediadas em Kourou, na Guiana Francesa, e em Kiruna, na Suécia. O centro de controle supervisionará a atividade dos satélites, enviando comandos automáticos de manutenção e permitindo a intervenção dos controladores da missão em eventos críticos.

A sua completa operacionalidade está prevista para 2014, porém após a assinatura do contrato de fornecimento de serviços em terra necessários para tornar o sistema Galileo operacional, firmado entre a Agência Espacial Européia e a empresa Spaceopal, em 25/10/2010, surgiram rumores de que a entrada em funcionamento do sistema europeu poderá ser adiada até 2017 ou 2018 (fonte: [www.telesatelite.net](http://www.telesatelite.net)).

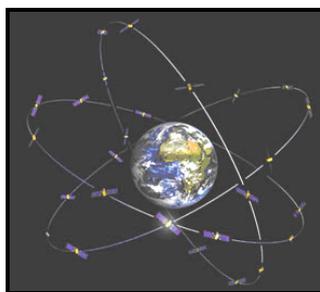


Figura 2.9 - A constelação GALILEO.

O sistema GALILEO, assim como o GPS e o GLONASS está dividido em seguimentos.

- O segmento espacial que consistirá de 30 satélites distribuídos em três planos orbitais igualmente separados e com inclinação nominal de  $56^\circ$ , localizados a uma altitude de 23.222 *km* acima da terra, resultando em um ciclo de 10 orbitas em 17 dias. Está previsto nove satélites ativos e um reserva por plano, cada um pesando, aproximadamente, 680 *kg*;
- O segmento de solo que consistirá em uma rede de estações sensores, centros de controle e estações transmissoras. Uma rede de comunicações global fará a intercomunicação entre os Centros e as estações; e
- O segmento de usuário que, assim como nas demais tecnologias, consiste nos receptores de sinais de navegação global por satélite nas mais variadas aplicações.

“Ao contrário do sistema GPS, quando finalizado, o Projeto GALILEO de navegação por satélite, será operado integralmente por órgãos não militares. Além dos satélites da própria constelação, o sistema também fará uso dos sinais do sistema GPS norte-americano e do GLONASS, russo. Isso permitirá que o sistema europeu atinja um nível de precisão estimado em 1 metro contra os atuais 15 a 20 metros conseguidos atualmente com o sistema GPS, com qualidade e integridade dos sinais de posicionamento muito superiores.” [16]

#### **2.2.4 SATELLITE BASED AUGMENTATION SYSTEM - SBAS**

O SBAS é um sistema de satélites que fornece “aumentação” (isto é, melhorias na precisão, na confiabilidade e na disponibilidade) nos sinais de navegação por satélite de um GNSS, em determinadas regiões ou em uma grande área, através da introdução de informações adicionais. Este sistema, também, é composto por múltiplas estações em solo que realizam medições de um ou mais satélites GNSS (seus sinais ou outros fatores naturais que possam influenciar no sinal recebido pelos usuários). As mensagens contendo informações SBAS são criadas a partir dessas medições e enviadas para um ou mais satélites SBAS de forma a serem transmitidas aos usuários. As informações adicionais incluem complementos referentes às fontes de erros (como por exemplo, flutuações no relógio, efemérides, ou atrasos ionosféricos), registros históricos relacionadas com o tempo de indisponibilidade do sinal GNSS ou informações adicionais advindas dos satélites GNSS que deverão ser integradas no processo de cálculo.

A seguir, estão listados alguns exemplos de SBAS já existentes. Os dois últimos sistemas são comerciais.

- O *Wide Área Augmentation System* (WAAS), operado pela Administração de Aviação Federal dos Estados Unidos (FAA), está operacional desde 2003.
- O *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS), operado pela Agência Espacial Européia, criado em 2002.
- O *Wide Área GPS Enhancement* (WAGE), operado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos para uso militar e de outros grupos autorizados.
- O *Multifunctional Satellite Augmentation System* (MSAS), operado e lançado pelo Japão em 2007.

- O *Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)*, proposto pelo Japão, teve o seu primeiro satélite lançado em 11/09/2010 e previsão de operação para 2013.
- O *GPS Aided Geo Augmented Navigation System (GAGAN)*, proposto pela Índia.
- O *Star Fire Navigation System*, operado pela empresa John Deere.
- O *Starfix DGPS System*, operado pela empresa Fugro.

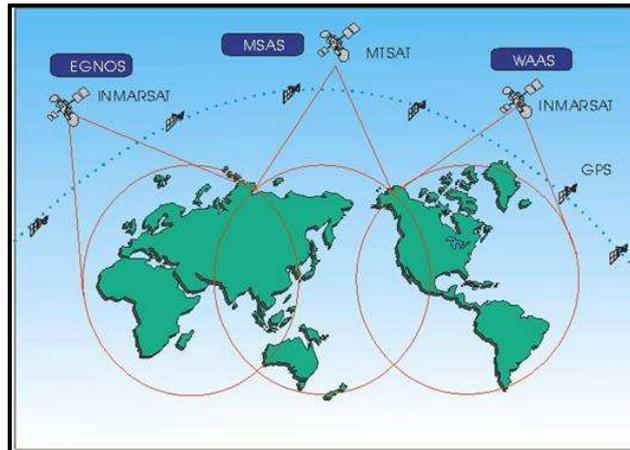


Figura 2.10 - Sistemas SBAS.

### 3 SISTEMA DE VIGILÂNCIA DEPENDENTE AUTOMÁTICA

---

Os sistemas de vigilância utilizam tanto técnicas cooperativas como não cooperativas para a localização de aeronaves. Enquanto as técnicas não cooperativas recaem na reflexão da energia emitida por um sistema de vigilância (caso do radar primário), as técnicas cooperativas necessitam de um *transponder*<sup>21</sup> a bordo da aeronave. O *transponder* recebe um sinal de interrogação emitido por um sistema de vigilância cooperativo (caso do radar secundário e do sistema de multilateração) e responde emitindo um outro sinal. Alguns *transponders* também emitem mensagens espontâneas (caso da tecnologia Modo S *Extended Squitter*) em intervalos definidos. Um dos métodos de localização de aeronaves utilizando sinais emitidos espontaneamente pelo transponder é o Sistema de Vigilância Dependente Automática (ADS-A e ADS-B).

O Sistema de Vigilância Dependente Automática, em inglês *Automatic Dependent Surveillance* (ADS), é definido como uma tecnologia de controle de tráfego aéreo em que a aeronave fornece, automaticamente, através de um enlace de dados, informações provenientes dos sistemas de navegação e de posicionamento que estão a bordo da aeronave, incluindo a sua identificação e outros dados adicionais de relevância.

A posição da aeronave é determinada permanentemente pela aviônica, através da vetoração dos movimentos em curso, fornecida pelos sinais satélites recebidos dos Sistemas de Navegação Global. A maior parte das aeronaves já está equipada com um sistema de gerenciamento de voo capaz de guiá-las ao longo dos pontos de referência da rota pré-programada pelo piloto. Assim, o princípio do ADS é tornar estas informações automaticamente disponíveis para os controladores de tráfego e pilotos, porém de uma maneira mais precisa, com o objetivo de reduzir as separações mínimas entre aeronaves em voo e em solo, além de permitir a utilização de espaços aéreos remotos, anteriormente não utilizados.

---

<sup>21</sup> Transponder - É um transceptor que fica a bordo da aeronave e automaticamente recebe o sinal radar (secundário) e responde (seletivamente ou não) com um grupo de pulsos específicos, somente quando a interrogação é recebida no modo em que este estiver configurado. No caso do ADS, este passa a difundir automaticamente por radiodifusão, as mensagens ADS.

ADS é o acrônimo de *Automatic Dependent Surveillance*, onde:

- *Automatic* (Automático): Nenhuma intervenção humana é requisitada.
- *Dependent* (Dependente): A vigilância não é determinada pelo controlador, e sim fornecida pela aeronave.
- *Surveillance* (Vigilância): Os dados fornecidos incluem posição, vetor velocidade, tempo, etc.

Existem dois tipos de Vigilância Dependente Automática:

- *ADS-Addressed* (ADS-A), também chamado de *ADS-Contract* (ADS-C), e
- *ADS-Broadcast* (ADS-B).

### **3.1 AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE-ADDRESSED / CONTRACT: ADS-A / ADS-C**

*Automatic Dependent Surveillance-Addressed / Contract*, ou simplesmente ADS-A ou ADS-C, é um sistema que reporta o posicionamento da aeronave através de um enlace de dados via satélite, controlado por uma estação em solo, que estabelece um contrato com a avionica a bordo da aeronave, de maneira automática, sempre que um evento ocorre, ou quando um intervalo de tempo específico é alcançado. Uma aeronave é capaz de manter contratos, com pelo menos, 4 estações, simultaneamente. A aeronave será capaz de estabelecer, também, uma demanda, um evento e um contrato periódico com cada uma das estações em solo com as quais mantêm contato. Ou seja, a qualquer instante, uma aeronave poderá manter 12 contratos ativos.

As aplicações ADS permitem a implementação de respostas e acordos que, exceto em situações de emergência, são estabelecidas exclusivamente pelas estações em solo. Tipicamente, proporciona um informe de posição periódico a cada 14 minutos, embora seja possível estabelecer contratos por eventos específicos, bem como, diminuir o intervalo entre informes periódicos para algo da ordem de 5 minutos. As condições de contrato determinarão o tipo de troca de informações que será estabelecido entre a estação em solo e a aeronave. Um contrato ADS especifica sob quais condições uma mensagem ADS será enviada e que tipos de grupos de dados serão inclusos nas mensagens.

Existem 3 tipos de contratos:

- Periódico: Onde o sistema em solo requisita, regularmente, a mesma informação. Por exemplo, uma informação de posição a cada 15 minutos;
- Eventual: Onde o sistema em solo requisita o conhecimento de uma informação se, e somente se, um evento específico ocorrer durante o voo. Por exemplo, quando a aeronave cruza um ponto de referência ou muda de altitude; e
- Por demanda: Onde o sistema em solo requisita informações, imediatamente, mas não requer uma repetição regular.

Cada mensagem ADS inclui, no mínimo, as seguintes informações: A posição tridimensional da aeronave (latitude, longitude e altitude), hora e a figura de mérito, que determina o quão precisa é a informação fornecida. Maiores detalhes sobre o conteúdo de uma mensagem ADS, serão vistos no item 3.2.

Uma vez que a transmissão é via satélite, a cobertura ADS-C estende a área de vigilância para regiões não abrangidas anteriormente, como é o caso dos oceanos, onde, até então, as posições da aeronave tinham de ser reportadas por rádio HF (que embora de longo alcance, estabelece uma comunicação demasiadamente precária devido à presença de ruídos, já que em HF o canal fica susceptível as alterações atmosféricas) e estimados nos cálculos dos controladores.

No Brasil, o DECEA já está operando com o ADS-C desde julho de 2009. O sistema está instalado em uma de suas unidades subordinadas, o CINDACTA III, em Recife, onde se encontra o ACC-AO, Centro de Controle de Área Atlântico, setor responsável pelo controle das aeronaves que estão no espaço aéreo de jurisdição brasileira sobrejacente ao Oceano Atlântico. Com esta tecnologia, as aeronaves que cruzam o Atlântico diariamente, indo e vindo da Europa e da África e, em alguns casos, da América do Norte, passaram a ser visualizadas nas telas das consoles de controle de tráfego aéreo com grande precisão a milhares de quilômetros de distância do continente, algo impensável com o radar.

### 3.2 AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE-BROADCAST: ADS-B

O termo “ADS-B” será utilizado para representar a vigilância dependente automática por radiodifusão, tecnologia em que as aeronaves e veículos de aeródromos, automaticamente, transmitem e recebem por radiodifusão dados de identificação, posição e velocidade, além de outras informações adicionais de interesse, através de um enlace de dados.

A vigilância ATS usando ADS-B é proporcionada por meio de um segmento de bordo e um segmento de terra. O segmento de bordo, integrado ao GNSS, transmitirá informações periódicas. O segmento de terra é composto basicamente por estações receptoras e infraestrutura de telecomunicações necessárias para disponibilizar os dados no centro de controle de tráfego aéreo.

Para um melhor entendimento, o termo “Sistema” abordado nesta tese será utilizado para representar o conjunto de equipamentos, programas e dispositivos auxiliares utilizados para desempenhar uma função específica, no caso, a Vigilância Dependente Automática, portanto o termo “Sistema ADS-B” será utilizado para representar o conjunto de equipamentos e sistemas instalados em uma determinada região, composto por estações receptoras ADS-B, estação central de processamento, elementos de monitoração e controle, e uma rede de comunicação de dados, incluindo o conjunto completo de hardware, software e dispositivos auxiliares, necessários para suportar o serviço de vigilância ATS.

Desta forma, *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*, ou simplesmente ADS-B, que em português pode ser traduzido para Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão, é uma tecnologia que utiliza a radiodifusão do posicionamento da aeronave como base para a vigilância, em vez de uma varredura radar para a detecção de alvos.

As aeronaves (ou veículos) equipadas com *transponders* modo S com capacidade ADS-B ou, alternativamente, um transmissor capaz de enviar mensagens ADS-B, tal como o UAT (*Universal Access Transceiver – 978 MHz*), difundem mensagens continuamente a partir do sistema de gerenciamento de voo (ou de transporte) a bordo, utilizando-se de um canal de comunicação. A partir destas mensagens é possível extrair, com precisão, diversas informações, como por exemplo, a posição, a altitude, a velocidade e a identificação da aeronave, de maneira semelhante ao radar secundário, porém de forma mais detalhada e a um custo muito menor.

Tal tecnologia oferece, ainda, outras vantagens como maiores taxas de renovação das mensagens e o potencial de transmitir outros dados a partir dos sistemas a bordo da aeronave, como a atualização das condições de tempo local (condições climáticas), através do radar meteorológico presente na aeronave, e a intenção de curso desta, além de dados referentes à aviação a bordo.

A estação ADS-B em solo, por sua vez, recebe as mensagens ADS transmitidas pelas aeronaves, por radiodifusão, e as encaminha ao Centro de Controle de tráfego Aéreo. Tais estações, também possuem a capacidade de difundir, no sentido inverso, mensagens ADS que serão recebidas pelas aeronaves, devidamente equipadas, e que poderão visualizar não somente as aeronaves com aviação ADS-B, como também, as demais aeronaves desprovidas de tal tecnologia e que foram detectadas pelo radar. Informações meteorológicas e situacionais sobre o espaço aéreo sobrevoado também poderão ser difundidas, completando assim o cenário de informações a serem visualizadas pelo piloto no CDTI. A figura 3.1, a seguir, exemplifica o Sistema ADS-B.

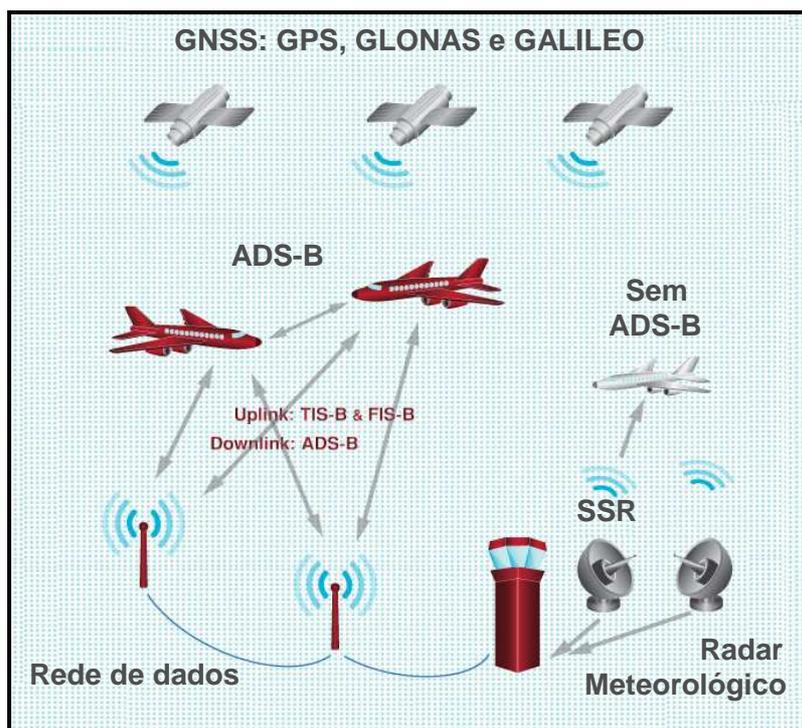


Figura 3.1 - Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão.

Segundo H.V. SUDARSHAN, existem seis grandes elementos que estão intimamente interligados para formar um sistema ADS, sendo eles: A interface com o piloto, a aviação, os enlaces de dados, as Interfaces de comunicação, a automação do Controle de Tráfego Aéreo e a Interface com o controlador [6].

As mensagens ADS podem ser definidas como blocos de dados, modulados através da técnica PPM (*Pulse Position Modulation*<sup>22</sup>), contendo as seguintes informações, entre outras:

- Mensagem ADS básica: latitude, longitude, altitude, horário e figura de mérito,
- Vetor em solo: velocidade em solo e taxa de subida e descida,
- Vetor aéreo: velocidade e taxa de subida e descida,
- Perfil projetado: próximo ponto de referência, altitude e hora estimadas até o próximo ponto de referência, etc., e
- Informações meteorológicas: velocidade e direção do vento, temperatura e turbulência.

A posição e a velocidade serão fornecidas pelo sistema GNSS da aeronave, a altitude será obtida pelo sistema de altitude barométrica e a Identificação será fornecida pelo *AircraftID* (identificação do voo ou código de registro da aeronave) e endereço Modo S (24 bits). Estas informações serão transmitidas continuamente pela aeronave por meio de mensagens Modo S *Extended Squitter*.

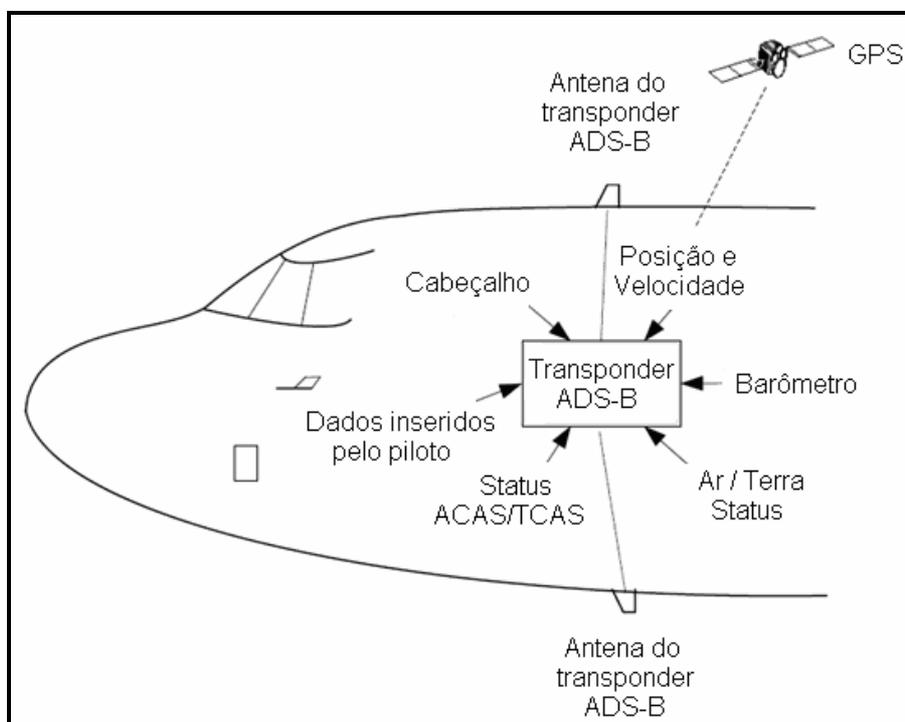


Figura 3.2 – Geração da mensagem ADS-B.

<sup>22</sup> PPM – Nesta técnica, é transmitido um pulso na primeira ou na segunda metade do período do bit.

As mensagens ADS-B são transmitidas segundo o padrão ASTERIX<sup>23</sup> categoria 021. O bloco de dados desta categoria tem a seguinte estrutura:

CAT = 021	LEN	FSPEC	Itens da primeira gravação		FSPEC	Itens da última gravação
-----------	-----	-------	----------------------------	--	-------	--------------------------

Onde:

- Categoria dos dados (CAT) = 021 é um campo de um octeto indicando que o bloco de dados contém mensagens ADS-B,
- Indicador de comprimento (LEN) é um campo de dois octetos indicando o comprimento total do bloco de dados, incluindo os campos CAT e LEN, e
- FSPEC é a especificação do campo.

**Nota:** Para maiores informações a respeito do padrão ASTERIX CAT 021, consultar o documento EUROCONTROL SUR.ET1.ST05.2000-STD-12-01 e SUR.ET1.ST05.2000-STD-12-02.

As mensagens ADS-C (ADS-A / C) são transmitidas Segundo o padrão ASTERIX categoria 024. As mensagens de serviço trocadas entre as estações de solo seguem o formato da categoria 023 (para maiores informações vide documento EUROCONTROL SUR.ET1.ST05.2000-STD-16-01) e as mensagens TIS-B são trocadas através da categoria 022 do padrão ASTERIX.

Sob o ponto de vista do meio, as aplicações ADS-B podem ser feitas de três maneiras: ar-ar, ar-terra e terra-terra.

Sob o ponto de vista do sentido do tráfego das informações, as aplicações ADS-B podem ser definidas em dois tipos:

- ADS-B *Out*<sup>24</sup>: Uma aeronave transmite, periodicamente, mensagens ADS, sem o conhecimento de quais Centros ou outras aeronaves poderão recebê-las, conforme é mostrado na figura 3.3.

<sup>23</sup> ASTERIX – All Purpose STructured Eurocontrol suRveillance Information Exchange.

<sup>24</sup> ADS-B *Out* – Definido como “Classe A” pela ICAO. De acordo com o Anexo 10 da ICAO, os transponders habilitados para transmitirem em Modo S *Extended Squitter* devem ser classificados de acordo com a sua capacidade de transmissão e/ou recepção. Os equipamentos Calesse A incorporam a capacidade de transmissão e recepção.

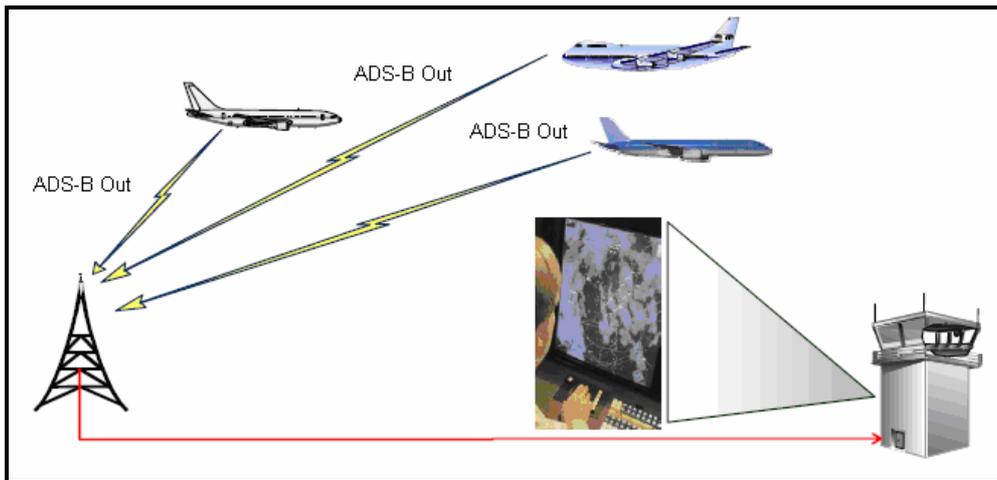


Figura 3.3 - ADS-B OUT.

- ADS-B *In*<sup>25</sup>: As mensagens ADS são recebidas pela aeronave, provenientes de outras fontes, que podem ser aeronaves ou Centros de Controle de Tráfego, e apresentadas no *cockpit*. É importante ressaltar que, as aeronaves podem ser equipadas com o ADS-B *Out* sem a obrigatoriedade de serem equipadas com o ADS-B *In*.

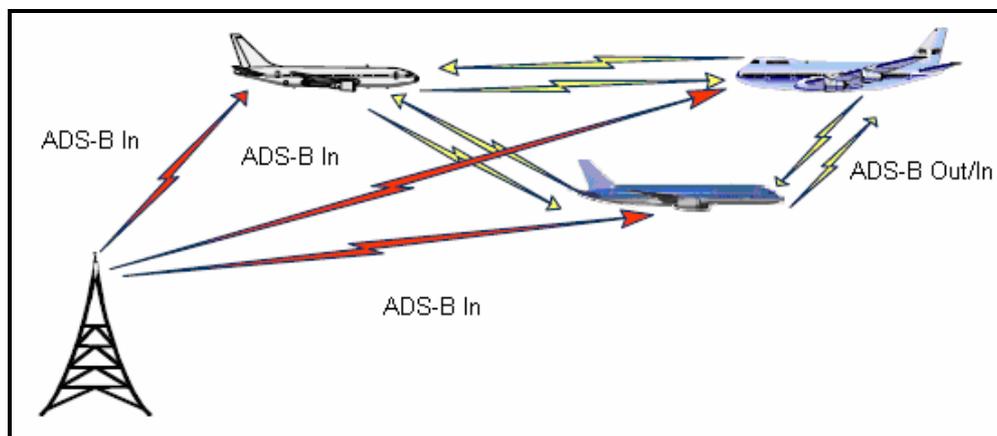


Figura 3.4 - ADS-B IN.

O ADS-B possui aplicações no gerenciamento do controle de tráfego aéreo em rota, com alcance típico de 250 MN, em área terminal e em superfícies de aeroportos, não só para aeronaves, como também para veículos automotivos de apoio em solo.

<sup>25</sup> ADS-B IN - Definido como "Classe B" pela ICAO. Os equipamentos Classe B incorporam somente a capacidade de transmissão. Os equipamentos Classe C incorporam apenas a habilidade de recepção.

A Unidade Receptora ADS-B é elaborada para fornecer alta sensibilidade no limite teórico. Entretanto, a faixa operacional utilizável para a estação terrestre é limitada por diversos fatores incluindo:

- Linha de Visada
  - a) Terreno e obstáculos, e
  - b) Curvatura da Terra.
- Condições do Link
  - a) Potência de saída do transponder da aeronave,
  - b) Atenuação com a distância,
  - c) Ganho da Antena, e
  - d) Sensibilidade do receptor.
- Ambiente RF
  - a) Ruído e codificação, e
  - b) Criado por outras radiações, difusões.

Os principais benefícios do ADS-B estão relacionados com as aplicações de vigilância. Assim, no *cockpit* da aeronave, os pilotos poderão visualizar a situação aérea ao seu redor, através do CDTI<sup>26</sup>, como mostra a figura 3.5. Esta facilidade de visualização permite ao piloto a capacidade de realizar, com maior segurança, procedimentos, tais como:

- Manobras em fila, por exemplo, os procedimentos de decolagem em fila,
- A manutenção da posição relativa à outra aeronave, e
- Utilização aprimorada da tecnologia anti-colisão (ACAS ou TCAS) em aeronaves, devidamente equipadas.

---

<sup>26</sup> CDTI – *Cockpit Display of Traffic Information*: É um visor genérico que fornece informações de vigilância ao piloto, incluindo a própria posição da aeronave. Adicionalmente, é possível visualizar as condições climáticas, o terreno, a estrutura do espaço aéreo, obstruções, mapas detalhados dos aeroportos e outras informações relevantes a quaisquer fases do voo.



Figura 3.5 - Cockpit Display of Traffic Information – CDTI.

Além disso, as estações em solo permitirão:

- Vigilância em áreas sem cobertura radar,
- Melhoramento das operações na superfície aeroportuária (inclusive sob condições de baixa visibilidade),
- Redução e maior flexibilidade nos requisitos de separação entre aeronaves, e
- Detecção e resolução de conflitos de maneira aprimorada.

Adicionalmente, podemos citar outros benefícios, tais como:

- Redução no custo da infraestrutura para a implantação, como também para a manutenção de um sistema ADS-B, quando em comparação a uma estação radar,
- Maior precisão, aproximadamente de 3m,
- Maior taxa de renovação das informações, no caso do posicionamento do alvo, tipicamente, são enviadas 2 mensagens por segundo. Estações radar possuem taxas de renovação que variam de 4 a 12 segundos,
- Cobertura de todo o espaço aéreo, e
- Redução do tempo de voo, proporcionando economia de combustível e conseqüente diminuição no impacto ambiental.



(a)

(b)

(c)

Figura 3.6 - Estação de solo: (a) Receptor Thales - modelo AS 680, (b) Antena THALES (omnidirecional), (c) Antena INDRA, setorial.

### 3.2.1 Comparação com Radares de Vigilância (Primário)

Um radar mede a distância e o azimute de uma aeronave em relação a sua antena, localizada em um ponto fixo, no solo. A distância é obtida através do tempo medido entre a transmissão e a recepção da interrogação radar e o azimute é determinado pela posição de rotação da antena radar quando esta resposta é, então, recebida.

O feixe da antena torna-se mais amplo quando a aeronave tende a se afastar do radar, o que torna a informação de posição menos precisa. Além disso, para detectar as mudanças de velocidades da aeronave faz-se necessária algumas voltas de antena, portanto alguns segundos serão necessários, uma vez que, dependendo do tipo de aplicação, em áreas de aproximação ou em rota, uma volta completa da antena radar pode demorar até 12 segundos. Em contrapartida, um sistema ADS-B envia duas mensagens, tipicamente, a cada segundo, incluindo a intenção de curso da aeronave, conseqüentemente, a sua posição e a velocidade, entre outras informações, e a integridade dos dados não fica suscetível à posição da aeronave ou ao tempo que se deve esperar para que sejam completadas as voltas necessárias de uma antena radar.

### 3.2.2 Enlace de Dados

As três tecnologias de enlaces de dados que servirão como meio de comunicação para trafegar as mensagens ADS-B são:

- a) *Universal Access Transceiver* (UAT);
- b) *Very High Frequency Data Link* (VDL) *mode 4*; e
- c) *1090 MHz Extended Squitter*<sup>27</sup> (*Mode S Data Link*) ou 1090ES.

A OACI recomenda o uso do *1090 MHz Extended Squitter (Mode S Data Link)* como a tecnologia de enlace de dados a ser adotada internacionalmente. As outras duas tecnologias poderão ter aplicações apenas regionais.

---

<sup>27</sup> Extended Squitter - É a técnica prevista nos documentos da OACI, que combina as capacidades do transponder Modo S com aquelas da Vigilância Dependente Automática – ADS-B. Isso ocorre pelo uso de um “pulso estendido”, emitido automaticamente pelo canal do transponder, no qual são inseridos vários dados de bordo da aeronave.

**a) *Universal Access Transceiver – UAT (960 - 1215 MHz)***

O Transceptor de Acesso Universal (UAT) é especificamente designado para atender ao ADS-B. Possui menor custo e maior capacidade de uplink do que o 1090ES. Para evitar o congestionamento de frequência que está presente na banda VHF, o UAT opera na faixa de 960 – 1215 MHz, com largura de banda igual a 1 MHz. É o único enlace de dados ADS-B considerado, verdadeiramente, como bi-direcional. Usuários UAT possuem acesso à base de dados aeronáuticos (FIS-B) e podem receber mensagens do tráfego aéreo próximo (TIS-B), através de um serviço de múltiplos enlaces que fornecem mensagens ADS-B que foram geradas a partir das mensagens recebidas pelas estações ADS-B de solo, provenientes das aeronaves equipadas com o transponder de tecnologia 1090ES ou UAT, como também, a partir das mensagens contendo alvos (aeronaves) detectados pelo radar. Adicionalmente, aeronaves equipadas com a tecnologia UAT podem observar umas às outras diretamente, de maneira altamente confiável e com um mínimo de latência.

Esta tecnologia de enlace de dados foi desenvolvida com o propósito de ser utilizada pela aviação geral e foi aprovada pela FAA (Estados Unidos) para uso em todo o espaço aéreo, exceto acima de 18.000 pés, na frequência de 978 MHz. Está preparada para dar suporte não somente ao tráfego de mensagens ADS-B, mas também ao tráfego de mensagens FIS-B e TIS-B, que são serviços de informações de voo e de tráfego aéreo, explicados mais adiante. Devido ao conjunto de normas exigidas para esta regra, é vista como a aplicação mais eficaz para os usuários da aviação geral, permitindo que aeronaves equipadas com ADS-B *Out* sejam vistas por qualquer outra aeronave que esteja equipada com ADS-B *In*, bem como pelas estações em solo. Por ter sido projetada, especificamente, para o ADS-B, é também o primeiro enlace de dados a ser certificado como um serviço de controle de tráfego aéreo “radar-like” nos Estados Unidos. No Alaska, desde 2011, está sendo utilizado para prover separações de 5 MN entre aeronaves em rota.

#### **b) Very High Frequency Data Link – VDL Mode 4**

É uma tecnologia de enlace em VHF, padronizada pela ICAO, e objetivada a dar suporte aos serviços de comunicações digitais CNS/ATM, possibilitando transmissões em radiodifusão como também ponto-a-ponto.

Em 2003 era considerado como um possível futuro elemento dos serviços de rede móvel (MNS), ou seja, a infraestrutura de comunicações entre móveis (aeronaves ou veículos) e entre móveis e elementos fixos em solo. Entretanto, atividades desenvolvidas pela EUROCONTROL relacionadas com a referida tecnologia tiveram como meta a contribuição para o desenvolvimento de um sistema dedicado à vigilância e à comunicação. Assim o VDL modo 4 foi tratado pela EUROCONTROL sob a ótica de dois domínios:

- Domínio das comunicações, como um candidato para dar suporte aos enlaces de dados ponto-a-ponto de apoio às aplicações avançadas que requerem um rigoroso serviço de qualidade (de prioridade ou críticos no tempo, por exemplo), e
- Domínio da vigilância, como um candidato para o enlace de dados ADS-B, em complementação ao 1090ES.

Sumarizando, trata-se de um enlace de dados que utiliza uma ou mais frequências VHF para a transmissão. Faz uso do protocolo STDMA<sup>28</sup>, que permite ser auto-organizável, ou seja, não há a necessidade de uma estação principal e é melhor utilizável para transmissões de mensagens curtas entre um grande número de usuários, por exemplo, no fornecimento de informações sobre a situação do tráfego aéreo local. É um sistema de banda estreita que opera em múltiplos canais de 25 KHz, dentro da faixa de 117.975 – 137 MHz, atribuída pela União Internacional de Telecomunicações para os serviços aeronáuticos Móveis e possui uma cobertura operacional de 200 MN.

Embora o VDL modo 4 seja menos restritivo em relação à visibilidade (linha de visada) entre a aeronave e a estação de solo, quando em comparação com o enlace 1090 MHz ES, devido à menor frequência, outros efeitos de propagação, efeitos relacionados à curvatura da terra e às condições climáticas, podem impactar na qualidade do sinal.

---

<sup>28</sup> STDMA: *Self-Organized Time Division Multiple Access*.

### **c) 1090 MHz Extended Squitter (Mode S Data Link) – 1090ES**

Com a tecnologia 1090ES, o transponder Modo S atualmente existente suportará um tipo de mensagem conhecido como *Extended Squitter* (ES), que é uma mensagem periódica que fornece posição, velocidade, hora, a intenção de curso e outros dados de relevância, conforme definido no documento ICAO 9688 (*Manual on Mode S Specific Services*). Para que uma aeronave esteja habilitada a enviar mensagens ES, o transponder é modificado e assim, a posição da aeronave e outras informações são direcionadas ao transponder. As frequências de operação são 1030 MHz para o link terra-ar e 1090 MHz para ar-terra, e a largura de banda é equivalente a 6 MHz. As aeronaves equipadas com o sistema anticollisão (ACAS - Anti Collision Avoidance System) já possuem receptores 1090 MHz (Modo S), necessários para receber tais sinais, entretanto necessitarão de algumas implementações para aceitarem e processarem a informação ES adicional.

Assim, o *Extended Squitter* é uma aplicação adicional ao sistema Modo S, designado a suportar o ADS-B, que também permitirá um melhoramento do sistema contra colisões ACAS e que, todavia, não dá suporte ao FIS-B. O período das mensagens é definido segundo o documento RTCA DO-181C. Já os padrões mínimos de desempenho operacional (MOPS) para o 1090 MHz *Extended Squitter* estão reunidos no documento RTCA DO-260 e suas revisões.

### **3.2.3 Aplicações ADS-B**

Existem 3 tipos de aplicações ADS-B, definidas a seguir:

#### **a) Aplicações Ar-Ar**

Ao receber a mensagem ADS-B, o piloto da aeronave de fato visualiza outras aeronaves em sua vizinhança. Através do CDTI esta facilidade é, eletronicamente, apresentada, permitindo operações mais seguras e mais eficientes.

#### **b) Aplicações Ar-Terra**

O ADS-B fornece dados de vigilância aos Centros de Controle de Tráfego Aéreo em solo. Essas informações são utilizadas para o estabelecimento do gerenciamento do tráfego aéreo. No sentido inverso, terra-ar, as estações em solo fornecem por radiodifusão às aeronaves, devidamente equipadas, informações a respeito da situação aérea local e sobre as

condições meteorológicas próximas (exceto quando o enlace de dados é o 1090 MHz ES, pois não possui suporte a este serviço). Estas informações são classificadas em dois tipos de serviços, sendo eles:

- **Traffic Information Services – TIS-B**

Os serviços de informação de tráfego por radiodifusão fornecem às aeronaves, devidamente equipadas, o cenário situacional de todo o tráfego aéreo conhecido pelo Centro de Controle. Este serviço é de suma importância para um enlace ADS-B em um espaço aéreo, em que nem todas as aeronaves estão transmitindo informações ADS. Através deste serviço é possível visualizar de dentro do *cockpit* da aeronave, através do CDTI, tanto as aeronaves que não transmitem informações ADS-B e que foram detectadas pelo radar, como, também, as aeronaves que transmitem tais informações, porém utilizam outro enlace de dados.

As informações de tráfego aéreo dos enlaces de subida TIS-B são resultantes de diversas fontes de vigilância, tais como:

- ✓ Estações radar, primárias ou secundárias,
- ✓ Sistemas de multilateração, e
- ✓ Diferentes enlaces ADS-B (UAT, VDL *Mode 4* ou *Extended Squitter Mode S*).

As mensagens *Extended Squitter* utilizadas nas comunicações TIS-B, assim como as mensagens de gerenciamento do processamento estão especificadas no documento ICAO intitulado “*Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter*” (Doc. 9871).

- **Flight Information Services – FIS-B**

Os serviços de informações de voo fornecem dados climáticos em texto e gráficos, como por exemplo, NOTAMs<sup>29</sup>, ATIS<sup>30</sup>, e informações semelhantes. O FIS-B é inerentemente diferente do ADS-B, uma vez que a fonte de dados é externa, ou seja, as informações fornecidas não são provenientes das aeronaves e, além disso, possui requisitos de desempenho diferenciados,

---

<sup>29</sup> NOTAM - *Notice to Airmen / Notice to All Members*: O NOTAM serve para alertar os pilotos de aeronaves sobre qualquer perigo de rota ou local específico.

<sup>30</sup> ATIS - *Automatic Terminal Information Service*: É um serviço de informações automático, que é transmitido por cada terminal, a partir de uma gravação reproduzida continuamente, cujo conteúdo é de interesse dos pilotos que ali desejam pousar.

como a periodicidade da radiodifusão. Os enlaces *Extended Squitter Mode S* não possuem suporte a este serviço.

### **c) Aplicações Terra-Terra**

A vigilância ADS-B pode ser empregada tanto em aeronaves em solo como, também, em veículos automotivos, devidamente equipados. Assim, aeronaves e veículos, por radiodifusão, enviam mensagens contendo posição, velocidade e sua identificação, entre outras informações, às estações em solo, localizadas no entorno do aeroporto. Estas informações são transmitidas aos Centros de Controle e ao Centro de Facilidades do aeroporto. Assim, a vigilância da superfície aeroportuária é aprimorada com a implantação dos enlaces ADS-B e, conseqüentemente, é possível experimentar uma maior segurança e eficiência nas operações de superfície, sejam quais forem as condições climáticas.

## **3.2.4 O ADS-B no mundo**

### **a) Austrália**

O continente australiano foi o primeiro a implementar a tecnologia ADS-B, em 100 % de seu território, para coberturas acima do nível 300 (30.000 pés). Contando com 57 estações de solo em 28 localizações e um sistema de monitoramento e controle remoto, além de 10 centros de manutenção, o sistema ADS-B australiano está totalmente integrado ao Centro de Controle de Tráfego Aéreo (TAATS - *The Australian Advanced Air Traffic System*).

O pioneirismo australiano está aliado às companhias aéreas que motivadas pelos benefícios proporcionados por tal tecnologia, investiram na modernização de suas aeronaves.

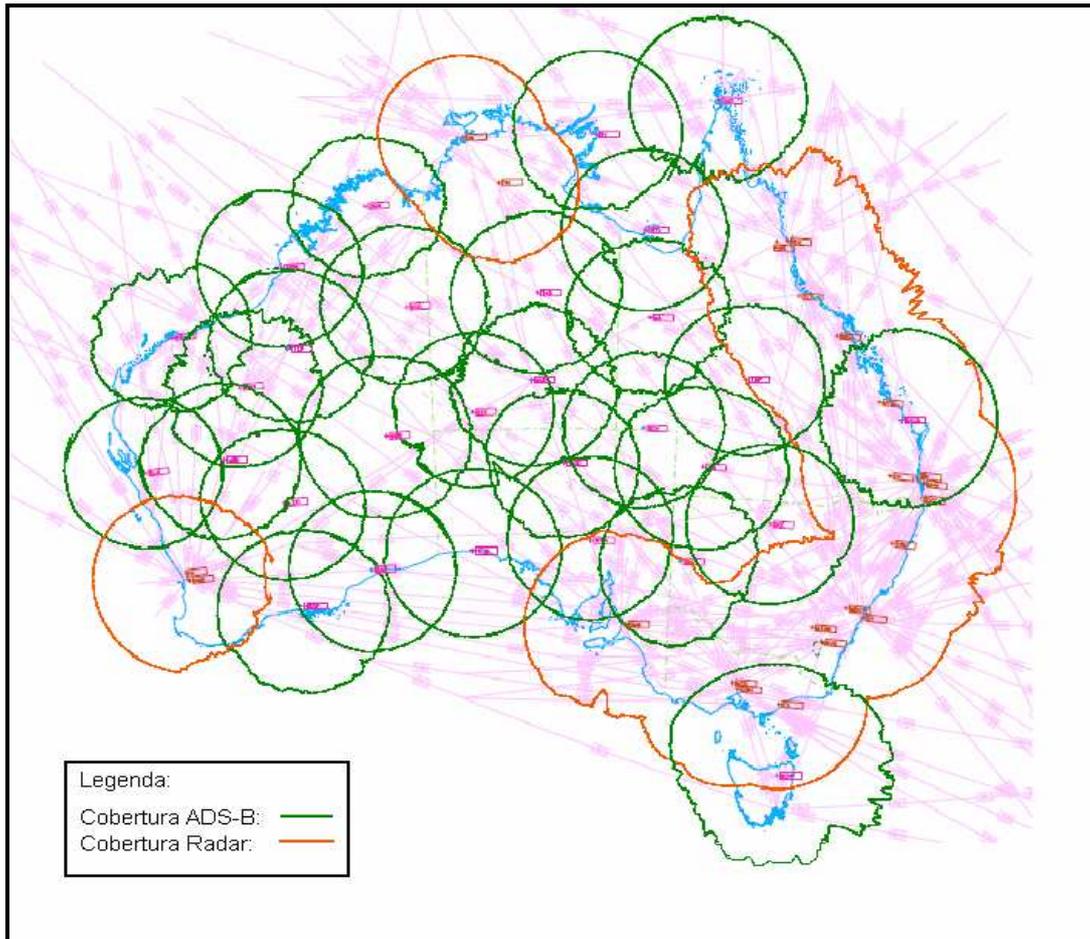


Figura 3.7 - Cobertura ADS-B e Radar, nível 300.

## b) Europa

O desenvolvimento do ADS-B na Europa está sendo feito através de uma validação cooperativa de técnicas de vigilância e aplicações ADS-B, conhecido como projeto CRISTAL<sup>31</sup>, uma iniciativa do programa CASCADE<sup>32</sup>. Esta iniciativa consiste em testes de validação, como forma de testar a tecnologia em situações reais, concentrando-se em pequenas áreas onde as necessidades operacionais para aplicações ADS-B existem e continuam crescendo para cobrir regiões mais amplas. A figura 3.8 mostra os locais onde as validações estão em curso.

<sup>31</sup> CRISTAL - *Co-operative Validation of Surveillance Techniques and Applications of ADS-B*.

<sup>32</sup> CASCADE - O Programa CASCADE coordena a implementação do ADS-B na Europa.

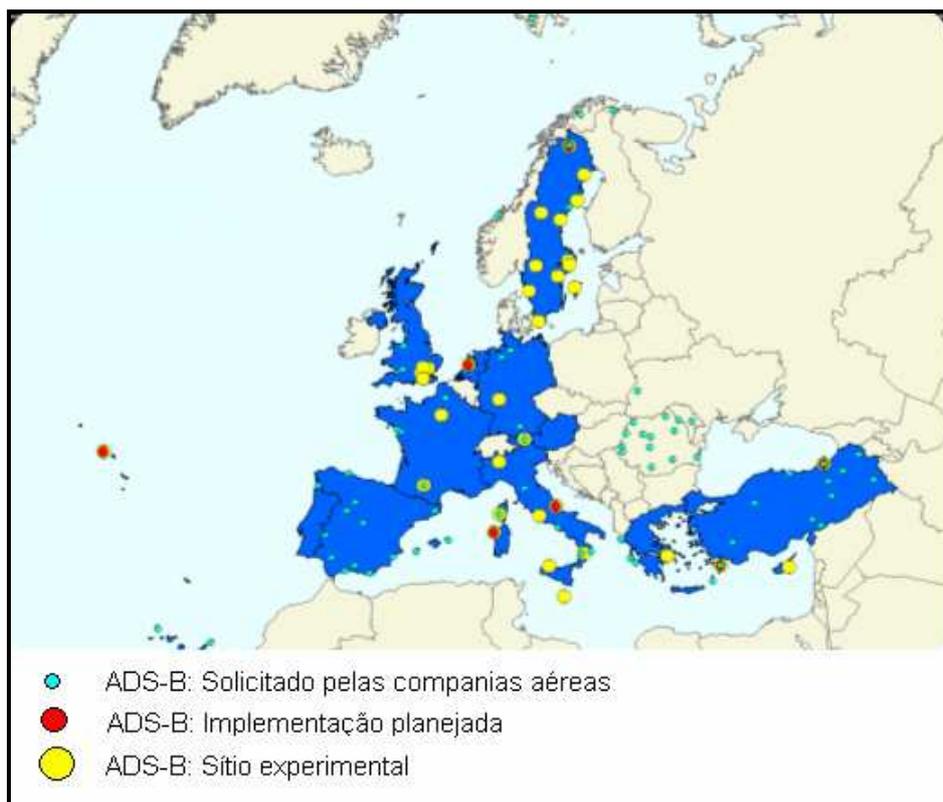


Figura 3.8 - Validação do ADS-B na Europa.

Os países de cor azul, constantes da figura 30, foram ou estão envolvidos no projeto de validação ADS-B, chamado de CRISTAL. Os círculos em verde indicam locais onde a implementação da tecnologia ADS-B foi requisitada pelas companhias aéreas, os círculos vermelhos representam locais onde existe um planejamento para a implementação do ADS-B e os círculos amarelos representam locais que estão em fase experimental. O objetivo dessas validações é implementar um sistema de vigilância similar ao sistema radar, como definido pelo documento padronizado ED-126 e EASA NPA 2007-05.

Os locais listados na tabela 3.1 já possuem planos de implementação. Estes locais estão indicados na figura 3.8 com um círculo verde.

Local	País	Órgão Implementador
Açores	Portugal	NAV Portugal
Costa do Mar do Norte	Países baixos	LVNL
Kiruna	Suécia	LFV

Tabela 3.1 - Locais com planos de implementação (Fonte Eurocontrol – 07/10/2008).

Os locais listados na tabela 3.2 possuem planos de execução que estão sob consideração. Estes locais estão indicados na figura 3.8 com um círculo amarelo.

Local	País	Órgão Implementador
Ajaccio	França	DSNA
Alghero	Itália	ENAV
Karphatos	Grécia	HCAA
Larnaka/Paphos	Chipre	DCA
Pescara	Itália	ENAV
Trabzon	Turquia	DHMI

Tabela 3.2 - Locais com planos de execução que estão sob consideração (Fonte Eurocontrol – 07/10/2008).

### c) Estados Unidos

A implementação da tecnologia ADS-B nos Estados Unidos está em curso e dois enlaces de dados foram aprovados pela FAA, o modo S *Extended Squitter* (1090 MHz), que é utilizado para voos internacionais ou de longa distância e o *Universal Access Transceiver* (UAT – 978 MHz), que é utilizado em voos regionais e por veículos automotivos. Em função da escolha de dois enlaces distintos, o sistema americano está sendo desenvolvido com a capacidade de retransmissão de modo a permitir que os usuários de cada enlace possam tomar conhecimento uns dos outros.

A implementação do ADS-B no território dos Estados Unidos está sendo feita pela empresa americana ITT, que em agosto de 2007 fechou um contrato de US\$ 1,8 bilhão para fornecer a "vigilância ADS-B como um serviço" para a Administração Federal de Aviação dos EUA (FAA). Neste contrato, a ITT está desenvolvendo, implementando, operando e estará mantendo o referido sistema de vigilância até setembro de 2025. Já foram instaladas mais de 350 estações em solo e para apoio às operações petrolíferas do Golfo do México, foi instalado, naquela região, um sistema composto de 21 estações em parceria com a FAA, inúmeras empresas de petróleo, proprietários de plataformas e empresas de serviços de transportes por helicóptero. O sistema foi especificado para atender aos requisitos de taxa de atualização da FAA de cada 6, 3 e 1 segundo(s) para

tráfegos em rota, terminal e em superfície, respectivamente e a sua monitoração está centralizada no Centro de Operações de Rede, localizado em Virgínia - EUA, projetado para ser gerenciado por dois técnicos de rede e operado 24 horas por dia, 7 dias por semana, 365 dias por ano.

**d) Brasil**

O primeiro sistema ADS-B a ser implantado no Brasil está previsto para 2013. Será instalado na Bacia de Campos, na cidade de Macaé-RJ, com o objetivo de prover vigilância aérea para os helicópteros que fazem o transporte entre os aeródromos de Macaé e São Tomé e as plataformas de petróleo daquela Bacia. Os demais projetos encontram-se em fase de discussões.

#### 4 CANAL RÁDIO MÓVEL E CARACTERIZAÇÃO FAIXA ESTREITA

Em comunicação rádio móvel, as ondas eletromagnéticas emitidas, frequentemente, não alcançam a antena receptora diretamente, devido à existência de obstruções que bloqueiam a linha de visada direta. Na verdade, as ondas eletromagnéticas recebidas são advindas de ondas que chegam de todas as direções como consequência das reflexões, difrações e espalhamentos causados pelos prédios, árvores, montanhas e diversos outros obstáculos. Este efeito é conhecido como propagação em multipercurso e se apresenta de uma maneira mais intensa em um raio de, aproximadamente, 100 metros próximo ao receptor. Um cenário típico para um canal rádio móvel terrestre é mostrado na figura 4.1, retirada do livro *Mobile Fading Channel*.

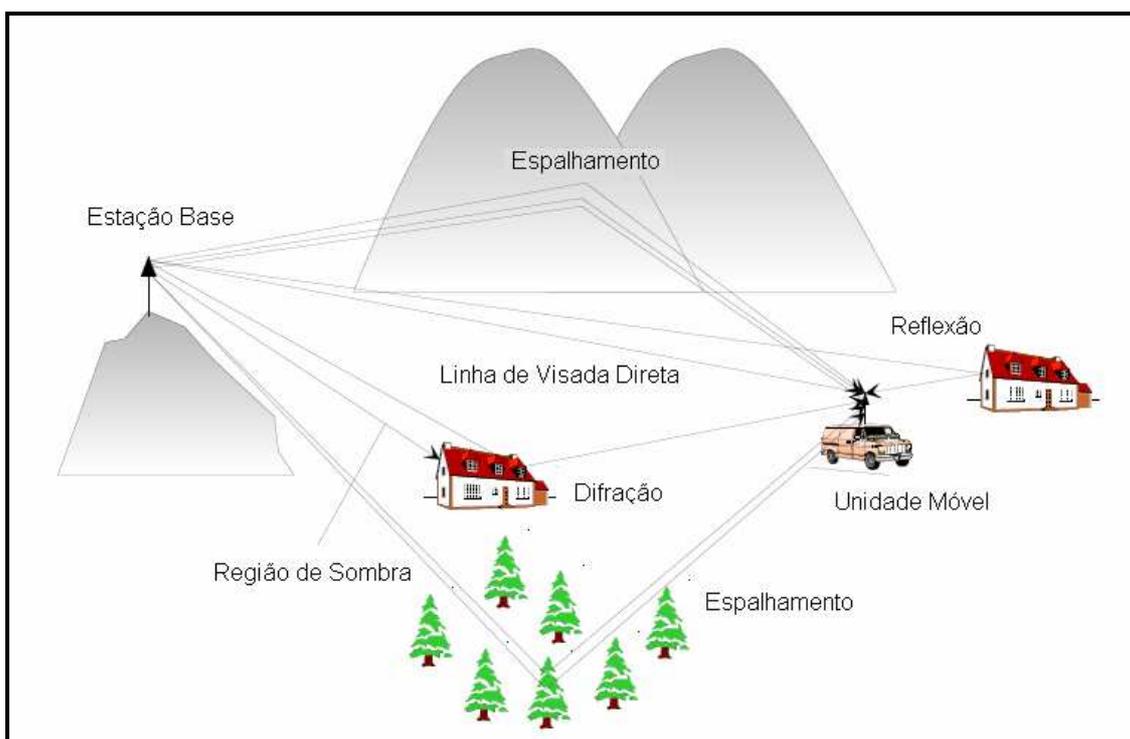


Figura 4.1 - Cenário Típico para um canal Rádio Móvel terrestre.

Assim, o sinal recebido consiste de uma soma infinita de sinais atenuados, atrasados e com diferentes fases em relação ao sinal transmitido e, dependendo da fase de cada componente, a superposição destas ondas, isto é, o somatório de todas as ondas, poderá apresentar um efeito construtivo ou destrutivo.

Da mesma forma que os efeitos resultantes da propagação em multipercurso, o efeito *Doppler*<sup>33</sup> também representa uma influência negativa no comportamento do sinal rádio móvel. Devido ao deslocamento da unidade móvel, o efeito Doppler causa um deslocamento de frequência em cada uma das componentes da onda. O ângulo de chegada  $\alpha_n$ , que é definido pela direção de chegada na *n*-ésima onda incidente e a direção de locomoção da unidade móvel, conforme mostra a figura 4.2, determinam a frequência *Doppler* da *n*-ésima onda incidente de acordo com a relação:  $f_n = f_{\max} \cos\alpha_n$ . Neste caso, se  $f_{\max}$  é o máximo deslocamento *Doppler* relacionado à velocidade  $v$  da unidade móvel,  $c_0$  é a velocidade da luz e  $f_0$  é a frequência da portadora,  $f_{\max}$  é expressa pela relação:

$$f_{\max} = v \div \left( \frac{c_0}{f_0} \right) \quad (4.1)$$

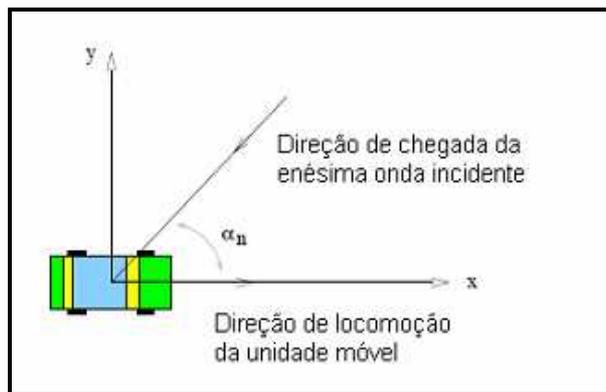


Figura 4.2 - Ângulo de chegada  $\alpha_n$  da *n*-ésima onda incidente.

A frequência *Doppler* máxima,  $f_n = f_{\max}$  ou  $f_n = -f_{\max}$ , é obtida quando  $\alpha_n = 0$  ou ( $\alpha_n = \pi$ ). Em contrapartida,  $f_n = 0$  para  $\alpha_n = \pi/2$  e  $\alpha_n = 3\pi/2$ . Como consequência do efeito *Doppler*, o espectro de frequência do sinal transmitido sofre uma expansão. Este efeito é chamado de dispersão em frequência. O valor da dispersão em frequência depende, principalmente, da frequência *Doppler* máxima e das amplitudes das componentes de multipercurso recebidas. No domínio do tempo, em função do efeito *Doppler*, a resposta ao impulso do canal se torna variante com o tempo. Devido ao comportamento variante no tempo da resposta ao impulso, o canal rádio móvel geralmente pertence à classe de sistemas variantes com o tempo.

<sup>33</sup> Efeito Doppler: homenagem ao físico e matemático austríaco Christian Johann Doppler (1803-1853), que ficou célebre por esse princípio.

A propagação em multipercursos, aliada ao movimento do receptor e ou do transmissor, apontam flutuações drásticas e aleatórias no sinal recebido. *Fades* (desvanecimentos) de 30 a 40 dB, ou abaixo do valor médio do nível de sinal recebido, podem ocorrer diversas vezes por segundo, dependendo da velocidade da unidade móvel e da frequência da portadora, conforme exemplo gráfico mostrado na figura 4.3. Segundo Lee, o sinal flutua em uma faixa aproximada de 40 dB (10 dB acima e 30 dB abaixo do nível médio do sinal) [39].

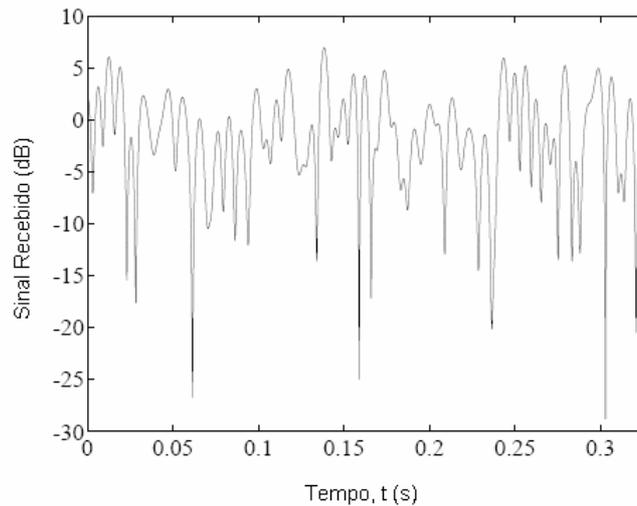


Figura 4.3 - Comportamento típico de um sinal recebido em uma comunicação móvel.

Deslocar o receptor por uma distância pequena pode alterar a intensidade do sinal em várias dezenas de decibéis, conforme dito anteriormente, pois pequenos movimentos alteram a relação de fase entre as diversas componentes de ondas que chegam ao receptor, podendo causar variações drásticas na amplitude do sinal recebido. Essas flutuações do sinal são conhecidas como desvanecimentos ou perdas (*fadings*). As variações causadas em função da existência de multipercursos são chamadas de desvanecimentos em pequena escala, enquanto que as variações observadas no nível médio do sinal, causadas pelas obstruções, são chamadas de desvanecimentos em grande escala. Sabe-se que não existe um modelo físico completo para o desvanecimento em grande escala, porém, medidas indicam que a queda média do sinal (perda no percurso) se ajusta a uma Distribuição Log-normal com um desvio padrão que depende da frequência e do ambiente. Por este motivo, o termo desvanecimento log-normal é também utilizado. A figura 4.4 ilustra as variações rápidas e lentas (desvanecimentos em pequena e grande escala) sentidas por uma portadora recebida, em função da distância entre o transmissor e o receptor.

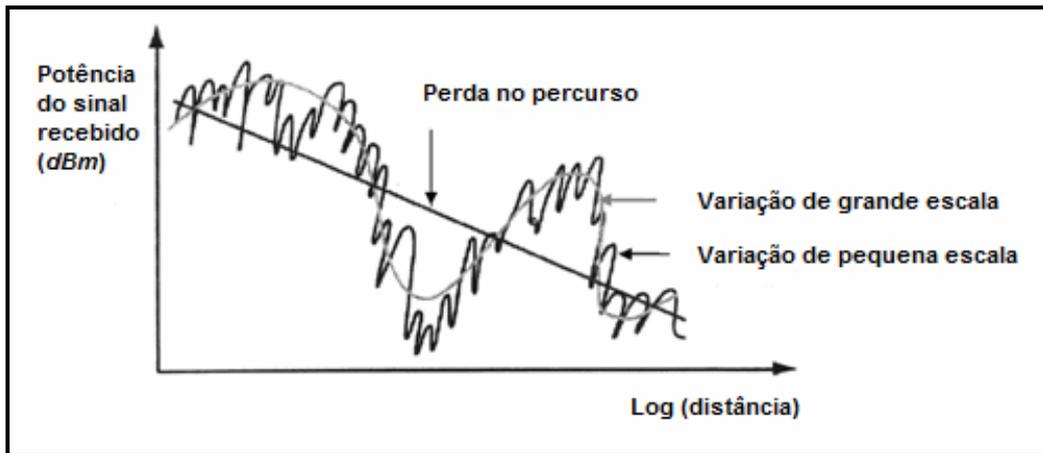


Figura 4.4 – Componentes de um sinal faixa-estreita recebido.

A caracterização do Canal Rádio Móvel (CRM) pode ser realizada tanto em faixa estreita quanto em faixa larga. Os parâmetros que se deseja obter é que definem o tipo de caracterização a ser realizada.

A Caracterização faixa estreita é realizada ao se transmitir um sinal  $s(t)$ , uma onda contínua, que nada mais é do que um tom, cuja transformada de *Fourier* é um impulso na frequência deste tom ( $\omega_c$ ):

$$s(t) = \cos \omega_c t \xrightarrow{F} \pi [\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)] \quad (4.2)$$

Assim, a sondagem será realizada, praticamente, em apenas uma frequência, porém, devido ao efeito *Doppler* sofrido em função do movimento do receptor, a frequência sofrerá uma variação no entorno da portadora. As medidas realizadas em faixa estreita não fornecem a magnitude e nem o retardo de fase dos multipercursos. Com estas medidas é possível obter o nível de sinal recebido a cada instante ou a cada distância, o que permite analisar os seguintes parâmetros:

- A variação espacial rápida (ou desvanecimento em pequena escala) do sinal recebido, causada pelos multipercursos do sinal gerado;
- A variação espacial lenta (ou desvanecimento em grande escala) do sinal recebido, que é resultante das variações espaciais do sinal, causadas por obstruções (efeito de sombreamento), resultante de prédios e/ou elevações, e variações do ambiente, como a variação do índice de refração atmosférico, por exemplo;

- A perda no percurso, ou queda do sinal (*path loss*), que na figura 4.4 está representada por uma reta decrescente. A perda no percurso está relacionada à atenuação média do sinal em função da distância entre o transmissor e o receptor, variando com a distância segundo a relação:

$$P_{rm}(d) = P_{rm}(d_0) - 10 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (4.3)$$

onde  $P_{rm}(d)$  é a potência média recebida a uma distância  $d$  qualquer, da antena transmissora, e  $P_{rm}(d_0)$  é a potência média recebida a uma distância de referência  $d_0$ , distância esta igual ou superior à distância de *Fraunhofer*<sup>34</sup>, ou seja, fora da região de campo próximo da antena de transmissão. Quando o expoente  $n$  é igual a 2, tem-se a lei quadrática de atenuação no espaço livre.

- A variação temporal  $d\phi/dt$ , que é a frequência instantânea do sinal ( $\omega$ ), fornecendo o deslocamento *Doppler*, mas não a sua fase, apenas a sua taxa de variação com o tempo; e
- A despolarização sofrida pela onda, devido ao fenômeno de difração e ao espalhamento, produzindo campos cruzados.

Neste contexto, quando se fala em caracterização faixa estreita, tem-se que considerar que o espectro do sinal transmitido é estreito o suficiente para garantir que todas as componentes de frequências sejam afetadas de modo similar. O desvanecimento é dito ser plano, implicando em um comportamento não seletivo em frequência.

A taxa de cruzamento de nível (LCR), a duração média de fading (AFD) e o FM aleatório podem ser obtidos através do processamento dos dados adquiridos nas medições faixa estreita, assim como as distribuições estatísticas que se ajustam ao comportamento da variabilidade do sinal.

**Nota:** Neste trabalho as medidas realizadas em campo foram feitas em faixa estreita.

---

<sup>34</sup> Distância de *Fraunhofer* em homenagem a *Joseph von Fraunhofer*, é representada pela seguinte equação:  $d = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$ , onde  $D$  é a maior dimensão do radiador (ou o diâmetro da antena) e  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal. Esta distância fornece o limite entre o campo próximo e distante da antena transmissora.

Modernos métodos de modelagem de canal rádio móvel são, de fato, úteis, pois eles não só podem modelar as propriedades estatísticas dos canais reais com os quais podemos nos deparar, em relação à função de densidade de probabilidade (estatística de primeira ordem), como também, a taxa de cruzamento de nível (estatística de segunda ordem) e a duração média dos *fades* (estatística de segunda ordem).

Diversas são as distribuições de probabilidade existentes e é possível determinar a que melhor caracteriza o comportamento do sinal medido. Quando a variação do sinal é observada por um período longo (desvanecimento em grande escala), o sinal é caracterizado, em geral, por uma Distribuição Log-normal, entretanto, se a variação do sinal é observada em um curto período de tempo (desvanecimento em pequena escala), cuja origem está associada aos efeitos dos multipercursos, caracteriza-se o sinal rádio móvel através de diversas distribuições estatísticas. Dentre elas, citam-se as Distribuições Rayleigh, Rice, Nakagami-m e Weibull<sup>35</sup>. Destas, destaca-se a Distribuição Nakagami-m, devido à sua facilidade de manipulação, ao grande leque de aplicações e por, normalmente, caracterizar de uma forma bastante adequada a estatística do sinal rádio móvel. Há casos onde as distribuições Rice e Weibull apresentam um melhor ajuste que a Distribuição Nakagami-m.

As distribuições que caracterizam o desvanecimento são aproximações, uma vez que todas supõem que os espalhadores são distribuídos homoganeamente. Recentemente, foram propostas novas distribuições e, dentre as novidades, destaca-se a Distribuição  $\alpha - \mu$ , que nada mais é que uma distribuição geral para o desvanecimento. As distribuições Rayleigh, Nakagami-m, Weibull, Gaussiana unilateral e Exponencial negativa são casos particulares da Distribuição  $\alpha - \mu$ . Esta tem mostrado [44 e 45] um bom ajuste ao sinal de variabilidade.

---

<sup>35</sup> A Distribuição de Weibull foi nomeada pelo seu criador, Waloddi Weibull.

## 4.1 DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS ASSOCIADAS À VARIAÇÃO RÁPIDA DO SINAL

A variabilidade de curto prazo ou de pequena escala apresenta um comportamento estatístico que, em geral, pode ser representado por uma f.d.p. do tipo Rayleigh, Rice, Nakagami-m, Weibull ou  $\alpha - \mu$ . As distribuições Rayleigh e Rice correspondem ao modelo físico que assume a existência de um número suficientemente grande de componentes de multipercursos, com diferentes fases. Caso essas componentes apresentem potências próximas, o sinal é caracterizado por uma f.d.p. Rayleigh, enquanto que, se uma das componentes tiver potência muito maior que as demais, caracterizando visada (LOS), tem-se a Distribuição Rice. A Distribuição Nakagami-m e  $\alpha - \mu$  também podem caracterizar tal variabilidade do sinal em canais de comunicação móvel, além de outras mais complexas. Tais distribuições estatísticas são apresentadas a seguir [22]:

### 4.1.1 Distribuição Rayleigh

O sinal recebido por um móvel raramente terá uma linha de visada direta com o transmissor, sendo um somatório de todas as componentes espalhadas do sinal originalmente transmitido e que, devido às obstruções aleatoriamente posicionadas, impõem diferentes atenuações e fases no sinal resultante. É plausível supor que as fases das ondas espalhadas sejam uniformemente distribuídas de  $0$  a  $2\pi$  rad e que as amplitudes e fases sejam estatisticamente independentes umas das outras. Conseqüentemente, pode-se esperar que, em um dado instante, as componentes de multipercurso estejam em fase, resultando em uma grande amplitude (interferência construtiva), enquanto que em outro instante, estas estejam em discordância de fase, resultando em uma pequena amplitude (interferência destrutiva).

O modelo de desvanecimento Rayleigh é aplicável apenas nos casos onde existe um grande número de multipercursos, com amplitudes equivalentes, exercendo estes, uma ampla predominância sobre o raio direto, que muitas das vezes se quer existe.

Considerando um sinal portador  $s$ , de frequência  $\omega_0$  e amplitude  $a$ , sendo transmitido por um canal, escrito na forma exponencial:

$$s = a \exp(j\omega_0 t) \quad (4.5)$$

Ao se considerar  $a_i$  e  $\theta_i$  como a amplitude e a fase da  $i$ -ésima onda espalhada, respectivamente, o sinal resultante  $s_r$  no receptor móvel é a soma de  $n$  ondas espalhadas:

$$s_r = \sum_{i=1}^n a_i \exp\left[j(\omega_b t + \theta_i)\right] \quad (4.6)$$

Equivalentemente,

$$s_r = r \exp\left[j(\omega_b t + \theta)\right] \quad (4.7)$$

onde:

$$r \exp(j\theta) = \sum_{i=1}^n a_i \exp(j\theta_i) \quad (4.8)$$

entretanto,

$$r \exp(j\theta) = \sum_{i=1}^n a_i \cos\theta_i + j \sum_{i=1}^n a_i \operatorname{sen}\theta_i \cong x + jy \quad (4.9)$$

então:

$$x \cong \sum_{i=1}^n a_i \cos\theta_i \quad \text{e} \quad y \cong \sum_{i=1}^n a_i \operatorname{sen}\theta_i \quad (4.10)$$

$x$  e  $y$  são ditas componentes em quadratura e fornecem a envoltória  $r$  do sinal,

onde:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (\text{envoltória do sinal}) \quad (4.11)$$

$$x = r \cos\theta \quad (4.12)$$

$$y = r \operatorname{sen}\theta \quad (4.13)$$

Em virtude de  $n$  ser usualmente muito grande, as amplitudes individuais  $a_i$  serem aleatórias, e as fases  $\theta_i$  possuírem uma distribuição uniforme, podemos assumir, usando o Teorema do Limite Central<sup>36</sup>, que  $x$  e  $y$  são ambas variáveis gaussianas com média igual a zero e variâncias  $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 \cong \sigma_r^2$ , conseqüentemente, suas distribuições são:

---

<sup>36</sup> Teorema do Limite Central – Na teoria de Probabilidade, o Teorema do Limite Central expressa o fato de a soma de um número suficientemente grande de variáveis aleatórias independentes e com a mesma distribuição de probabilidade tender à Distribuição Normal, também conhecida como Distribuição *Gaussiana*.

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (4.14)$$

onde  $z = x$  ou  $z = y$  como exigido.

Sendo  $x$  e  $y$  variáveis aleatórias independentes, gaussianas e com o mesmo desvio padrão, a distribuição de probabilidade conjunta  $p(x,y)$  é:

$$p(x,y) = p(x)p(y) = \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (4.15)$$

A distribuição  $p(r,\theta)$  pode ser escrita como função de  $p(x,y)$  como segue:

$$p(r,\theta) = |J| p(x,y) \quad (4.16)$$

onde,

$$J \cong \begin{bmatrix} \partial x / \partial r & \partial x / \partial \theta \\ \partial y / \partial r & \partial y / \partial \theta \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

é o jacobiano da transformação das variáveis aleatórias  $x, y$  em  $r, \theta$ . Usando as equações (4.12) e (4.13) na equação (4.17), obtém-se  $J = r$ . Substituindo a equação (4.15) e (4.17) na equação (4.16), tem-se:

$$p(r,\theta) = \frac{r}{2\pi\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (4.18)$$

A densidade  $p(r)$  é obtida pela média de  $p(r,\theta)$ , na faixa de variação de  $\theta$ , portanto:

$$p(r) = \int_0^{2\pi} p(r,\theta) d\theta = \begin{cases} \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right), & \forall r \geq 0 \\ 0, & \forall r < 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

em que  $r$  é a envoltória do sinal e  $\sigma_r^2$  é a variância das componentes em fase e em quadratura, que compõem o sinal  $r$ .

Quando Aulin [27] equaciona o sinal que chega a um receptor móvel, como um somatório de multipercursos, chega a uma equação com componentes em quadratura semelhante à equação (4.9), portanto, a equação (4.19) descreve o comportamento do canal de multipercursos. A equação (4.19) é a função densidade de probabilidade Rayleigh. A sua distribuição  $p(r_o)$  é:

$$P(r_o) = \text{prob}(r \leq r_o) = \int_0^{r_o} p(r) dr = 1 - \exp\left(-\frac{r_o^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (4.20)$$

Ambas as funções das equações (4.19) e (4.20) são mostradas na figura 4.5.

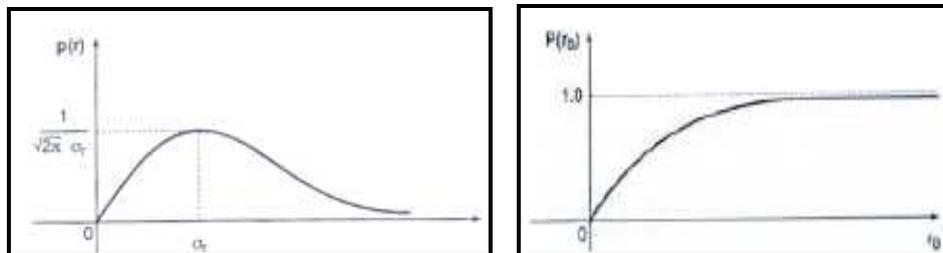


Figura 4.5 - (a) Função Densidade de Probabilidade Rayleigh; (b) Função Distribuição Rayleigh.

#### 4.1.2 Distribuição Rice

Como foi visto no item anterior, em um ambiente de propagação Rayleigh o sinal recebido é composto, praticamente, de ondas refletidas com amplitudes equivalentes, entretanto, em algumas circunstâncias, quando existe uma propagação em linha de visada, o raio direto predomina em detrimento aos indiretos. Isto ocorre, por exemplo, nos corredores de um prédio. Assim, é plausível supor que, ao se colocar uma antena transmissora no início de um corredor, o sinal recebido por uma antena receptora posicionada ao final deste corredor será um somatório das ondas diretas e espalhadas. O que se deseja investigar é como a estatística do sinal recebido variará, de acordo com a proporção de ondas diretas em relação às ondas espalhadas.

Usando as equações (4.5) e (4.7), o sinal recebido  $s_r$  é:

$$s_r = \overbrace{r \exp(j\omega_0 t + \theta)}^{\text{sinal espalhado}} + \overbrace{a \exp(j\omega_0 t)}^{\text{sinal direto}} \quad (4.21)$$

ou, equivalentemente,

$$s_r = [(x + a) + jy] \exp(j\omega_0 t) \quad (4.22)$$

Notar que, neste caso,

$$r^2 = (x + a)^2 + y^2 \quad (4.23)$$

$$x + a = r \cos \theta \quad (4.24)$$

$$y = r \sin \theta \quad (4.25)$$

Seguindo os mesmos passos descritos na seção 4.1.1, obtém-se a função densidade de probabilidade Rice:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma_r^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma_r^2}\right) \quad (4.26)$$

onde  $r$  é a envoltória do sinal,  $a^2/2$  é a potência da onda recebida na linha de visada,  $\sigma_r^2$  é a potência da correspondente difusa e

$$I_0\left(\frac{ar}{\sigma_r^2}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{ar \cos \theta}{\sigma_r^2}\right) d\theta \quad (4.27)$$

é a função de Bessel modificada, de ordem zero. Observa-se que, se não há visada,  $a=0$  em (4.26) e a Distribuição Rice se torna uma Distribuição Rayleigh.

O fator  $K$  é definido como a razão entre a potência da onda recebida na linha de visada e a potência da correspondente difusa e, quanto menor, mais a distribuição se aproxima de Rayleigh:

$$K = \frac{a^2}{2\sigma_r^2} \quad (4.28)$$

A potência total média é o somatório da potência da onda recebida na linha de visada e da potencia média da correspondente difusa.

$$\bar{p} = \frac{a^2}{2} + \sigma_r^2 \quad (4.29)$$

A potência média da correspondente difusa, através das equações (4.28) e (4.29), é igual a:

$$\sigma_r^2 = \frac{\bar{p}}{K + 1} \quad (4.30)$$

A amplitude da componente recebida na linha de visada é:

$$a = \sqrt{\left(\frac{2K\bar{p}}{K+1}\right)} \quad (4.31)$$

Assim, a função densidade de probabilidade da potência recebida, expressa em termos da potência total média e do fator  $K$  será igual a:

$$p(r) = (1+K) e^{-\kappa} \frac{r}{\bar{p}} \exp\left(-\frac{1+K}{2\bar{p}} r^2\right) I_0\left(\sqrt{\frac{2K(1+K)}{\bar{p}}} r\right) \quad (4.32)$$

e o gráfico da função densidade de probabilidade Rice do sinal recebido, para vários fatores  $K$ , pode ser visto na figura 4.6.

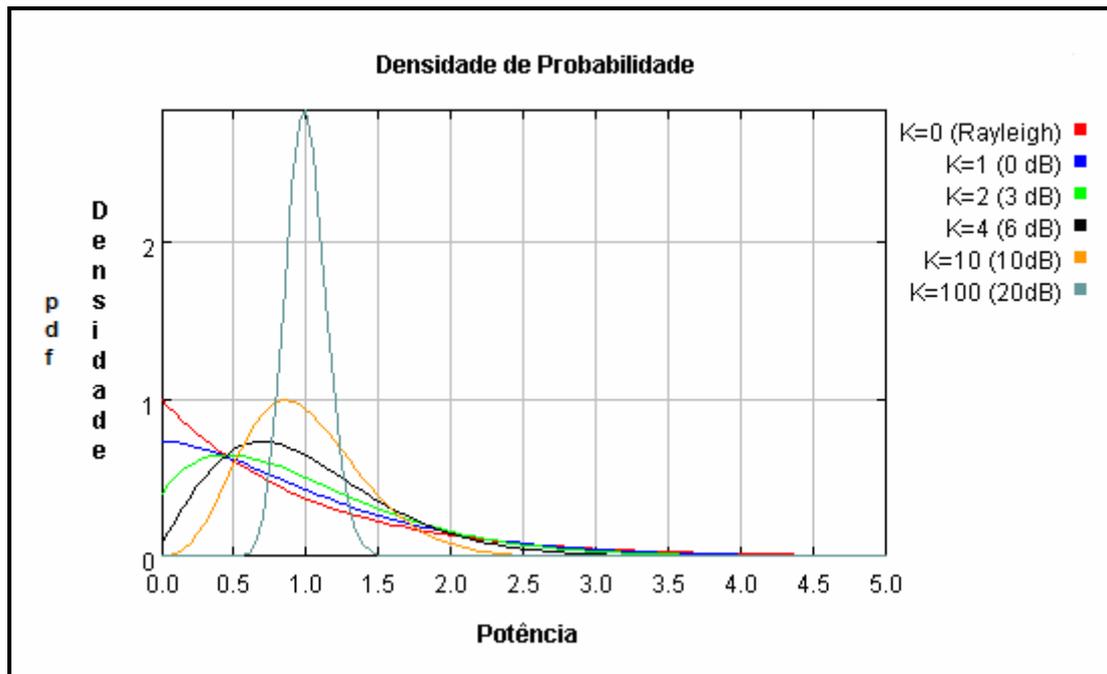


Figura 4.6 - Função densidade de probabilidade do sinal recebido para vários fatores  $K$ .

### 4.1.3 Distribuição Nakagami-m

Assim como a Distribuição Rayleigh, a Distribuição Nakagami-m também é utilizada para descrever as flutuações dos sinais provenientes de canais com desvanecimento. Entretanto, a sua representação é mais ampla e pode modelar desvanecimentos mais severos, como os observados por Nakagami, em medidas realizadas em HF (3 a 30 MHz), em geral um canal ionosférico. A função densidade de probabilidade para essa distribuição é dada por:

$$p(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} e^{-mr^2/\Omega} \quad (4.33)$$

onde  $r$  é a envoltória do sinal e  $\Omega$  é definido como:

$$\Omega = E(r^2), \quad (4.34)$$

$\Gamma(\cdot)$  é a função Gama:

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} x^{m-1} e^{-x} dx \quad (4.35)$$

O parâmetro  $m$ , chamado fator de desvanecimento (*fading*), é definido como a razão dos momentos, expresso por:

$$m = \frac{\Omega^2}{E[(r^2 - \Omega)^2]}, \quad m \geq \frac{1}{2} \quad (4.36)$$

ou seja, o inverso da variância normalizada de  $r^2$ . Em contraste com a Distribuição Rayleigh, que possui um único parâmetro, que pode ser usado para ajustar a estatística ao desvanecimento do canal, a Distribuição de Nakagami-m possui dois parâmetros:  $m$  e  $\Omega$ . Como consequência, essa distribuição permite maior flexibilidade e precisão na modelagem do canal, mas que nem sempre compensa ser usada, já que quanto mais parâmetros empregados, mais trabalho e tempo serão necessários. A figura 4.7 mostra diversas curvas para diferentes valores de  $m$ .

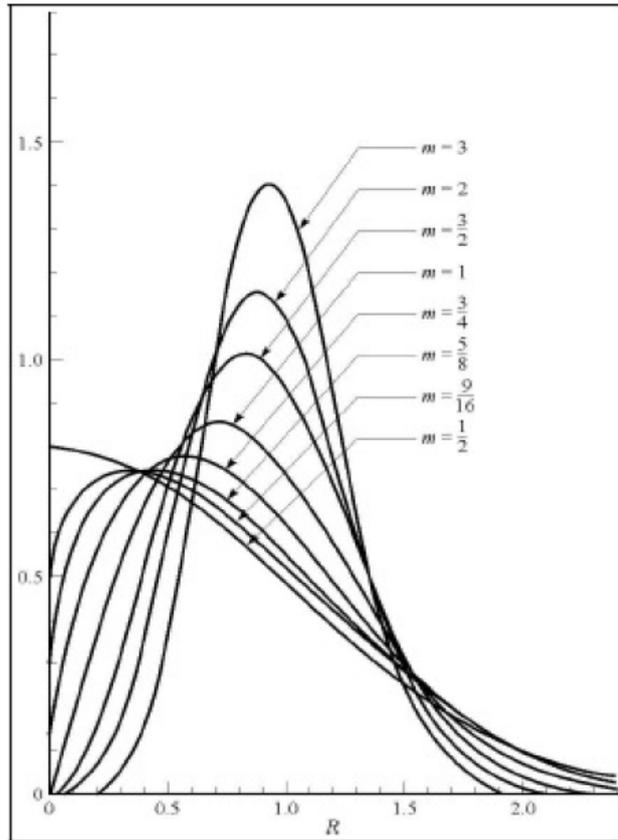


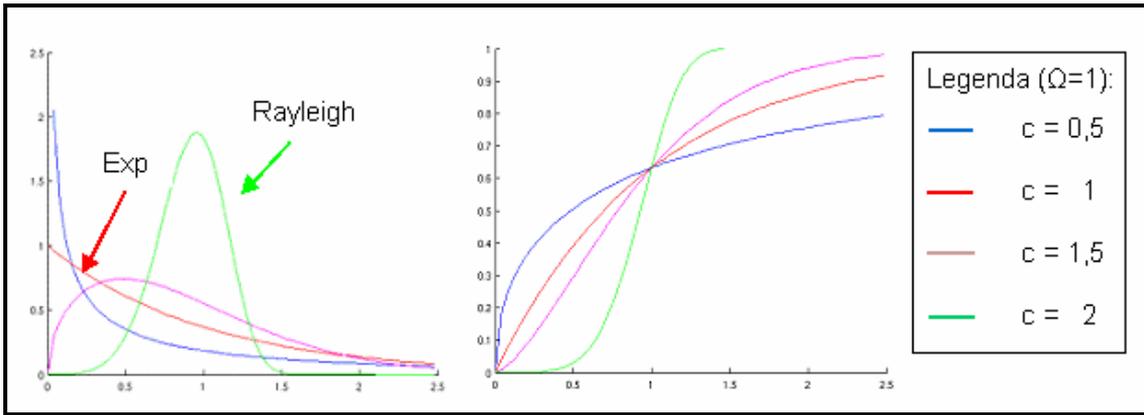
Figura 4.7 - Função densidade de probabilidade do tipo Nakagami-m, com  $\Omega = 1$ .

#### 4.1.4 Distribuição Weibull

A Distribuição Weibull é mais uma que pode ser empregada para caracterizar o desvanecimento num ambiente de multipercurso. Apresenta-se da forma a seguir:

$$p_a(\alpha) = c \left[ \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)}{\Omega} \right]^{\frac{c}{2}} \alpha^{c-1} \exp \left\{ - \left[ \frac{\alpha^2}{\Omega} \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) \right]^{\frac{c}{2}} \right\}, \alpha \geq 0 \quad (4.37)$$

Para o caso especial onde  $c=2$ , a equação (4.37) descreve uma Distribuição Rayleigh e, quando  $c=1$ , descreve uma Distribuição Exponencial. A figura 4.8 mostra a Função Densidade de Probabilidade e a Função Distribuição de Probabilidade Weibull.



(a) (b)

Figura 4.8 – F.D.P Weibull. (a) Função Densidade de Probabilidade. (b) Função Distribuição de Probabilidade.

#### 4.1.5 Distribuição $\alpha - \mu$

A Distribuição  $\alpha - \mu$  é uma distribuição geral para o desvanecimento que pode ser usada para representar a variação de pequena escala do sinal desvanecido e inclui as distribuições Nakagami-m e Weibull como casos especiais, conseqüentemente, as distribuições Exponencial negativa e Rayleigh, como também, a Gaussiana Unilateral.

Supõe-se que em um certo ponto o sinal recebido seja formado por um número arbitrário  $n$  de componentes de multipercurso e que o ambiente de propagação seja de tal forma que o sinal resultante é observado como uma função não linear do módulo da soma dessas componentes. Supondo que tal não linearidade esteja na forma de uma potência de modo que o montante resultante seja observado como o módulo da soma das componentes desses multipercursos, a envoltória  $r$  pode ser escrita como uma função de elementos em fase e em quadratura das componentes de multipercurso, ou seja:

$$r = \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2 \right]^{1/\alpha} \quad (4.38)$$

onde  $x_i$  e  $y_i$  são processos gaussianos mutuamente independentes, com  $E(x_i) = E(y_i) = 0$  e  $E(x_i^2) = E(y_i^2) = \sigma^2$ . Definindo  $y = r^\alpha$ , segue-se o procedimento padrão para se chegar a:

$$p(y) = \frac{y^{n-1}}{(2\sigma^2)^n \Gamma(n)} \exp\left(-\frac{r^\alpha}{2\sigma^2}\right) \quad (4.39)$$

através de uma transformação de variáveis:

$$p(r) = \frac{\alpha r^{\alpha n - 1}}{(2\sigma^2)^n \Gamma(n)} \exp\left(-\frac{r^\alpha}{2\sigma^2}\right) \quad (4.40)$$

que pode ser rerepresentada como:

$$E(r^k) = \frac{\Gamma(n + k/\alpha)}{\Gamma(n)} (2\sigma^2)^{k/\alpha} \quad (4.41)$$

portanto:

$$E(r^\alpha) = 2\sigma^2 n \quad (4.42)$$

e

$$E(r^{2\alpha}) = (2\sigma^2)^2 (n+1) n \quad (4.43)$$

Assim, o inverso da variância normalizada de  $r^\alpha$ , definido como  $\mu$ , é obtido da seguinte maneira:

$$\mu \triangleq \frac{E^2(r^\alpha)}{E(r^{2\alpha}) - E^2(r^\alpha)} = n \quad (4.44)$$

Note-se que a variável  $n$  é totalmente expressa em termos de um parâmetro físico, chamado de variância normalizada de  $r^\alpha$ . Note-se, também, que embora o parâmetro físico seja de natureza contínua,  $n$  é de natureza discreta. É plausível supor que se tal parâmetro é obtido através de medidas em campo, os valores de  $n$  sejam exatos.

Valores não inteiros de  $\mu$  justificam a correlação diferente de zero entre os conjuntos de componentes de multipercursos, a correlação diferente de zero entre as componentes em fase e quadratura e a não gaussianidade das componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido.

A partir da definição do sinal desvanecido, foi considerado  $\mu \geq 1/2$ , onde a condição  $\mu = 1/2$  corresponde ao caso que há apenas um elemento gaussiano. Agora, substituindo  $n$  por  $\mu$ , e usando  $\hat{r} = \sqrt[2]{E(r^\alpha)}$ , a função Densidade de Probabilidade do sinal  $\alpha - \mu$  é obtida por:

$$p(r) = \frac{\alpha \mu^\mu r^{\alpha\mu-1}}{\hat{r}^{\alpha\mu} \Gamma(\mu)} \exp\left(-\mu \frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right) \quad (4.45)$$

Assim, para um sinal desvanecido de envoltória  $r$ , um parâmetro arbitrário  $\alpha > 0$  e uma raiz  $\alpha$  do valor médio  $\hat{r} = \alpha \sqrt{E(r^\alpha)}$ , a Função Densidade de Probabilidade  $\alpha - \mu$ ,  $p(r)$ , é escrita como:

$$p(r) = \frac{\alpha \mu^\mu r^{\alpha\mu-1}}{\hat{r}^{\alpha\mu} \Gamma(\mu)} \exp\left(-\mu \frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right) \quad (4.46)$$

onde  $\mu \geq 1/2$  é o inverso da variância normalizada de  $r^\alpha$ , isto é:

$$\mu = \frac{E^2(r^\alpha)}{E(r^{2\alpha}) - E^2(r^\alpha)} \quad (4.47)$$

A função Gama é dada por

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} \exp(-t) dt \quad (4.48)$$

O  $K$ -ésimo momento  $E(r^k)$  é obtido através da equação a seguir:

$$E(r^k) = \frac{\hat{r}^k \Gamma(\mu + k/\alpha)}{\mu^{k/\alpha} \Gamma(\mu)} \quad (4.49)$$

Para uma envoltória normalizada  $\rho = r/\hat{r}$ , a Função Densidade de Probabilidade é obtida através da seguinte fórmula:

$$p(\rho) = \frac{\alpha \mu^\mu \rho^{\alpha\mu-1}}{\Gamma(\mu)} \exp(-\mu \rho^\alpha) \quad (4.50)$$

onde  $\mu \geq 1/2$  é dado por

$$\mu = \frac{1}{\text{Var}(\rho^\alpha)} \quad (4.51)$$

O  $K$ -ésimo momento  $E(\rho^k)$  é obtido a seguir:

$$E(\rho^k) = \frac{\Gamma(\mu + k/\alpha)}{\mu^{k/\alpha} \Gamma(\mu)} \quad (4.52)$$

O modelo de desvanecimento da Distribuição  $\alpha - \mu$  considera o sinal composto por grupos de multipercursos que se propagam em um ambiente não homogêneo. Em um mesmo grupo de multipercursos as fases das ondas espalhadas são aleatórias e os tempos de retardo são similares, com espalhamento de retardo, dos diferentes grupos, relativamente grande. Cada grupo de multipercursos possui ondas espalhadas de mesma potência. A envoltória resultante é obtida como uma função não linear do módulo da soma das componentes de multipercursos. A não linearidade é manifestada em termos um parâmetro de potência  $\alpha > 0$ , tal que a intensidade do sinal resultante é obtida não simplesmente como o módulo da soma das componentes de multipercursos, mas como o módulo desta certa potência dada.

### Relação entre a Distribuição $\alpha - \mu$ e as outras Distribuições

A Distribuição  $\alpha - \mu$  é uma distribuição geral que inclui as Distribuições de Weibull e de Nakagami-m como casos especiais. A Distribuição Weibull inclui a Distribuição Rayleigh e a Exponencial Negativa, enquanto que a Nakagami-m inclui a Rayleigh e a Gaussiana Unilateral.

a) Relação com a Distribuição Weibull:

A Distribuição Weibull pode ser obtida da Distribuição  $\alpha - \mu$ .

$$p(r) = \frac{\alpha \mu^\mu r^{\alpha\mu - 1}}{\hat{r}^{\alpha\mu} \Gamma(\mu)} e^{\left(-\mu \frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right)} \rightarrow p(r) = \alpha \beta r^{\alpha - 1} e^{-\beta r^\alpha} \quad (4.53)$$

Desde que:

$$\mu = 1$$

$$\beta = \hat{r}^{-\alpha}$$

A função Gama é dada por:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (4.54)$$

b) Relação com a Distribuição Rayleigh:

A Distribuição Rayleigh pode ser obtida da Distribuição  $\alpha - \mu$ .

$$p(r) = \frac{\alpha \mu^\mu r^{\alpha\mu - 1}}{\hat{r}^{\alpha\mu} \Gamma(\mu)} e^{\left(-\mu \frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right)} \rightarrow p(r) = \frac{r}{r^2} e^{-\frac{r^2}{2r^2}} \quad (4.55)$$

Desde que:

$$\mu = 1$$

$$\alpha = 2$$

$$\gamma = \frac{\hat{r}^2}{2}$$

c) Relação com a Distribuição Exponencial Negativa:

A Distribuição Exponencial Negativa pode ser obtida da Distribuição  $\alpha - \mu$ .

$$p(r) = \frac{\alpha \mu^\mu r^{\alpha\mu-1}}{\hat{r}^{\alpha\mu} \Gamma(\mu)} e^{\left(-\mu \frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right)} \rightarrow p(r) = \delta e^{\delta r} \quad (4.56)$$

Desde que:

$$\mu = 1$$

$$\alpha = 1$$

$$\delta = \hat{r}^{-1}$$

d) Relação com a Distribuição Nakagami-m:

A Distribuição Nakagami-m pode ser obtida da Distribuição  $\alpha - \mu$ .

$$p(r) = \frac{\alpha \mu^\mu r^{\alpha\mu-1}}{\hat{r}^{\alpha\mu} \Gamma(\mu)} e^{\left(-\mu \frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right)} \rightarrow p(r) = \frac{2\mu^\mu r^{2\mu-1}}{\Omega^\mu \Gamma(\mu)} e^{\left(-\mu \frac{r^2}{\Omega}\right)} \quad (4.57)$$

Desde que:

$$\alpha = 2$$

$$\Omega = \hat{r}^2$$

e) Relação com a Distribuição Gaussiana Unilateral:

A Distribuição Gaussiana Unilateral pode ser obtida da Distribuição  $\alpha - \mu$ .

$$p(r) = \frac{\alpha \mu^\mu r^{\alpha\mu-1}}{\hat{r}^{\alpha\mu} \Gamma(\mu)} e^{\left(-\mu \frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right)} \rightarrow \frac{1/2}{\hat{r} \Gamma(\mu)} e^{-\frac{r^2}{2\hat{r}^2}} \rightarrow \sqrt{\left(\frac{2}{\pi \hat{r}^2}\right)} e^{-\frac{\hat{r}^2}{2r^2}} \quad (4.58)$$

Desde que:

$$\mu = 1/2$$

$$\alpha = 2$$

$$\Gamma(1/2) = \int_0^{\infty} t^{1/2} e^{-t} dt \rightarrow \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\sqrt{t}) \Big|_0^{\infty}$$

$$\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$$

#### 4.1.5.1 Formato das amostras da Distribuição $\alpha - \mu$

Observa-se que para valor de  $\alpha\mu < 1$ , a função Densidade de Probabilidade  $p(\rho)$  tenderá ao infinito com  $\rho$  indo a zero. Para valores de  $\alpha\mu = 1$ ,  $p(\rho)$  tem valores diferentes de zero e de infinito na origem, decrescendo monoliticamente até zero com o aumento de  $\rho$ . Quando  $\alpha\mu > 1$ ,  $p(\rho)$  tem valor zero na sua origem, cresce até um máximo e em seguida decresce com o aumento de  $\rho$ .

A figura 4.9 apresenta o gráfico de  $p(\rho) \times \rho$  para diversos valores de  $\mu$  quando  $\alpha = 7/4$ . A figura 4.10 apresenta o gráfico de  $p(\rho) \times \rho$  para diversos valores de  $\alpha$  quando  $\mu = 4/7$ . Aparentemente, os efeitos causados por  $\alpha$  e  $\mu$  em  $p(\rho)$  demonstram-se semelhantes, mas, de fato, o formato das curvas variam substancialmente se eles são observados detalhadamente.

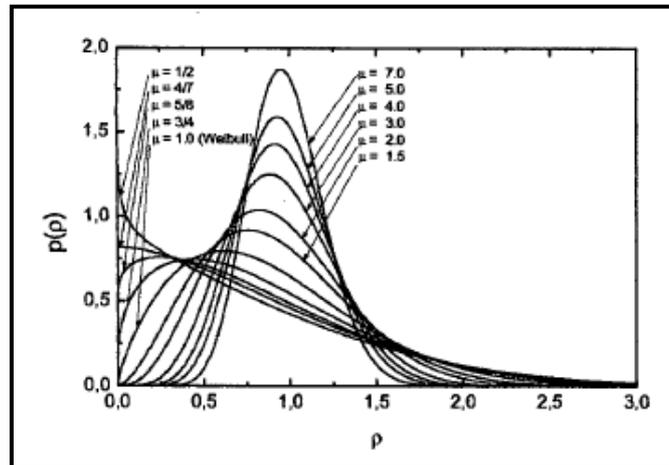


Figura 4.9 - Função Densidade de Probabilidade  $\alpha - \mu$  para  $\alpha = \frac{7}{4}$ .

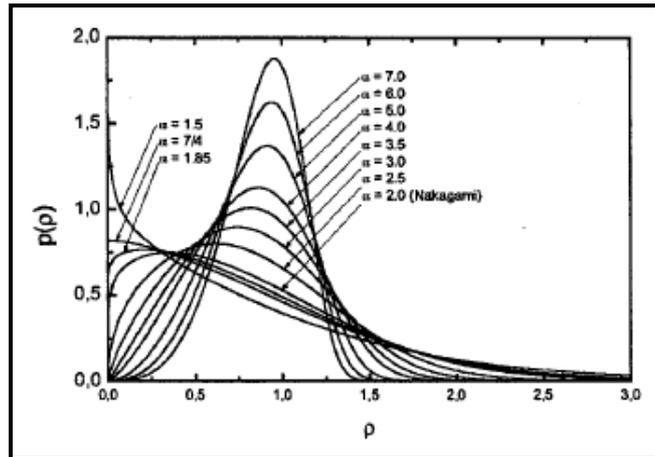


Figura 4.10 - Função Densidade de Probabilidade  $\alpha - \mu$  para  $\mu = \frac{4}{7}$ .

As figuras 4.11 e 4.12 mostram os formatos variados das funções de Densidade e de Distribuição  $\alpha - \mu$ , respectivamente, para o mesmo parâmetro Nakagami  $m = 0,5$ . Já as figuras 4.13 e 4.14, para  $m = 1,5$ , respectivamente. Em todas as curvas, escolheram-se para o parâmetro  $\mu$  os seguintes valores: 0,5 / 0,75 / 1 / 1,5 / 2 / 5 / 10 / 50 / 100.  $\alpha$  foi calculado da relação  $\mu_2 = m$  para o respectivo valor de  $\mu$ . O parâmetro  $\mu$  tem o efeito de fazer com que as curvas ocupem posições mais baixas (no gráfico) quando há um aumento da distribuição de probabilidade. Pode-se observar que uma enorme quantidade de formatos pode ser obtida para um mesmo parâmetro  $m$  da Distribuição Nakagami, portanto a Distribuição  $\alpha - \mu$  pode ser utilizada para um melhor ajuste.

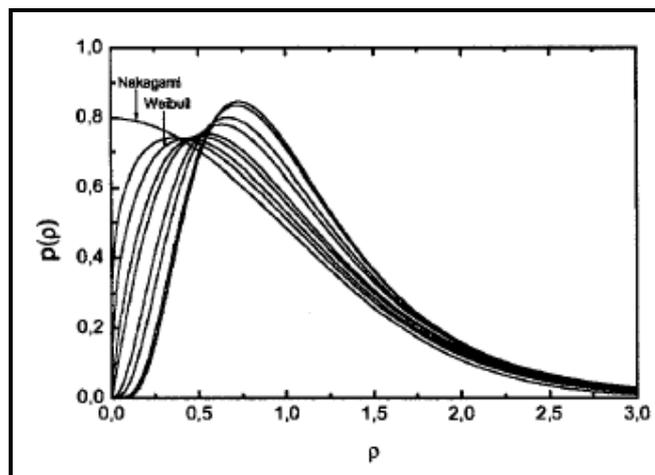


Figura 4.11 - Função Densidade de Probabilidade  $\alpha - \mu$  para o mesmo parâmetro Nakagami  $m = 0,5$ .

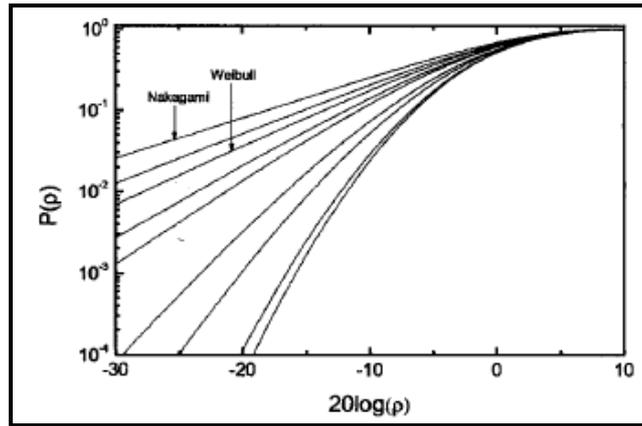


Figura 4.12 - Função Distribuição de Probabilidade  $\alpha - \mu$  para o mesmo parâmetro Nakagami  $m = 0,5$ .

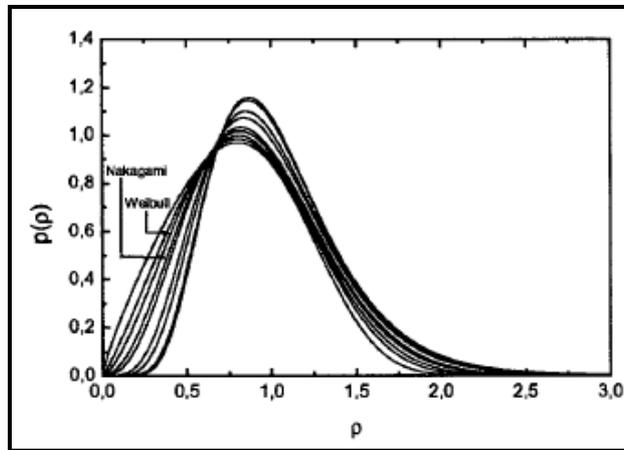


Figura 4.13: Função Densidade de Probabilidade  $\alpha - \mu$  para o mesmo parâmetro Nakagami  $m = 1,5$ .

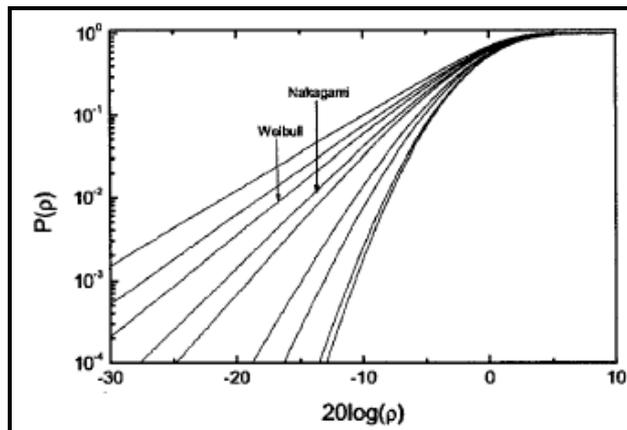


Figura 4.14 - Função Distribuição de Probabilidade  $\alpha - \mu$  para o mesmo parâmetro Nakagami  $m = 1,5$ .

## 4.2 DISTRIBUIÇÃO ASSOCIADA À VARIAÇÃO LENTA DO SINAL

É sabido que a potência média do sinal recebido diminui com o movimento do receptor, quando este se afasta do transmissor. Também é sabido que, ao longo do deslocamento, o receptor móvel pode atravessar obstáculos que, parcialmente, bloqueiam o percurso do sinal (tais como árvores, construções e veículos), acarretando em uma queda aleatória na potência recebida. Esta queda de potência ocorre em cima de muitos comprimentos de onda da portadora e, assim, é chamado de desvanecimento a longo prazo. Tal desvanecimento é, usualmente, modelado por uma Distribuição Log-normal com desvio padrão típico, em um ambiente celular, no entorno de 8 *dB*. A razão pela qual a variabilidade em grande escala do sinal segue uma Distribuição Log-normal está relacionada ao fato de que o sinal recebido é a resultante de um sinal transmitido que atravessou diferentes obstáculos até chegar ao receptor. Cada um desses obstáculos atenua o sinal até certo ponto, e a potência final recebida é a soma dos fatores de transmissão de todos os obstáculos. Como uma consequência, o logaritmo do sinal recebido compara a soma de um número grande de fatores de transmissão, cada qual sendo expresso em decibéis. Com o número de fatores elevado, o Teorema do Limite Central diz que a distribuição da soma se aproxima de uma Distribuição Gaussiana.

Tal sombreamento ou desvanecimento em grande escala está relacionado com as características de propagação, que manifestam seus efeitos no sinal ao longo de médias em grandes distâncias, quando comparadas com o comprimento de onda. É importante notar que o desvanecimento em grande escala pode ocorrer, inclusive, se o receptor permanecer parado.

Tal desvanecimento é também chamado de sombreamento. Este sombreamento é causado tanto pelas obstruções naturais, como o relevo e a vegetação local, como também pelas construções feitas pelo homem, como prédios, casas e hangares, fazendo com que o móvel fique em uma região de sombra eletromagnética, ou de nível de sinal bastante reduzido. Quando é obstruído, o sinal chega ao receptor, basicamente, através de difração e espalhamento, e a amplitude do sinal recebido segue uma função Densidade de Probabilidade Normal, também conhecida como Log-normal, ou Gaussiana.

Assim, pode-se modelar o sombreamento como uma incerteza em torno do valor nominal, obtido a partir da perda de percurso, como sendo uma variável aleatória gaussiana, medida em *dB*, e que tem média nula e desvio padrão entre 5 e 12 *dB*

( $5 \leq \sigma_{dB} \leq 12 \text{ dB}$ ). Desta forma, pode-se escrever para a função Densidade de Probabilidade como:

$$p(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dB}} e^{-\frac{(g - m_{dB})^2}{2\sigma_{dB}^2}} \quad (4.59)$$

onde  $g$  represente esta flutuação de potência em  $dB$  e  $m_{dB}$  e  $\sigma_{dB}^2$  são, respectivamente, a média e a variância de  $g$ .

A obtenção da Distribuição Log-normal para o sombreamento é discutida a seguir. Supõe-se que a  $i$ -ésima obstrução apresenta uma atenuação constante  $\alpha_i$  e uma espessura  $\Delta r_i$ . Se a amplitude da onda entrando na obstrução é  $E_i$ , então:

$$E_i = E_{i-1} e^{(-\alpha_i \Delta r_i)} \quad (4.60)$$

Usando recursividade, temos que o sinal que está saindo da  $n$ -ésima obstrução é dado por:

$$E_n = E_0 e^{-\sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta r_i} \quad (4.61)$$

É razoável admitir que  $\alpha_i$  e  $\Delta r_i$  variam aleatoriamente de obstrução a obstrução, sendo  $\alpha_i$  a constante de atenuação de cada meio de obstrução. Definindo:

$$x \cong -\sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta r_i \quad (4.62)$$

Então:

$$E_n = E_0 e(x) \quad (4.63)$$

Se o número de obstruções é bastante grande ( $n \rightarrow \infty$  na equação 4.61), podemos usar o teorema do limite central para afirmar que a variável aleatória  $x$  tem uma Distribuição Normal  $p(x)$  da seguinte forma:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - m_x}{\sigma_x} \right)^2} \quad (4.64)$$

onde  $m_x$  é o valor médio de  $x$  e  $\sigma_x^2$  é a sua variância.

Definindo  $y$  como a razão entre os campos  $E_n/E_o$ , expressa na equação (4.63).

$$y = \frac{E_n}{E_o} = e(x) \quad (4.65)$$

Se  $Y$  é definido como:

$$Y \equiv \log y = x \cdot \log(e) \Rightarrow dY = dx \cdot \log(e) \quad (4.66)$$

A média e a variância de  $Y$  são  $M_y$  e  $\sigma_y^2$ , respectivamente, e são definidas como:

$$M_y \cong \log m_x = m_x \log e \quad (4.67)$$

$$\sigma_y \cong \log \sigma_x = \sigma_x \log e \quad (4.68)$$

Para encontrar a densidade de probabilidade  $p(Y)$ , como:

$$p(Y) \cdot |dY| = p(x) \cdot |dx| \quad (4.69)$$

Da equação (4.66):

$$|dY| = \log e \cdot |dx| \quad (4.70)$$

Usando a equação (4.69) na equação (4.68) e tomando  $p(x)$  da equação (4.64), obtém-se:

$$p(Y) = \frac{1}{\log e} p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x \log e} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - m_x}{\sigma_x}\right)^2\right]} \quad (4.71)$$

portanto:

$$p(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Y - M_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} \quad (4.72)$$

Observa-se que  $Y$  tem, também, uma Distribuição Normal, já que  $Y$ ,  $M_y$  e  $\sigma_y$  estão em forma logarítmica. Esta função é conhecida como Função Densidade de Probabilidade Log-normal. Pode-se, então, concluir que a perda excessiva no percurso, por exemplo, a diferença em decibéis entre o sinal recebido e o sinal em espaço livre  $R$ , quando é medido em decibéis, tem também uma função densidade Log-normal dada por:

$$p(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_R} e^{\left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R - M_R}{\sigma_R} \right)^2 \right]} \quad (4.73)$$

onde  $M_R$  e  $\sigma_R^2$  são, respectivamente, a média e a variância de  $R$ , dadas em decibéis. Medidas experimentais têm mostrado que o desvio padrão  $\sigma_R$  está, tipicamente, entre 4 e 10 dB.

Para a distribuição acumulada, tem-se:

$$P(Y_0) = \text{prob}(Y \leq Y_0) = \int_{-\infty}^{Y_0} p(Y) dY \quad (4.74)$$

Em um ambiente rádio móvel, assim como em qualquer ambiente de comunicação via rádio, o nível do sinal recebido diminui conforme o receptor se afasta do transmissor. Assim, a partir do sinal de variabilidade em grande escala é possível determinar a perda no percurso (*Path Loss*). Esta serve de base para os diversos modelos de predição de cobertura propostos na literatura.

### 4.3 PERDA NO PERCURSO (*PATH LOSS*)

É a atenuação média do sinal em função da distância entre o transmissor e o receptor. Quando em propagação em espaço livre, a potência de recepção segue a conhecida lei quadrática de variação da potência recebida com a distância, ou seja:

$$P_{rm}(d) = p_{rm}(d_0) - 10 \cdot \log \left( \frac{d}{d_0} \right)^n \quad (4.75)$$

onde  $n=2$ ,  $P_{rm}(d)$  é a potência média recebida a uma distância  $d$  qualquer da antena transmissora, e  $P_{rm}(0)$  é a potência média recebida a uma distância de referência  $d_0$ , distância essa igual ou superior à distância de *Fraunhofer*, ou seja, fora da região de

campo próximo da antena transmissora. Devido à grande variabilidade das estruturas, tipicamente encontradas em um canal rádio móvel terrestre, a uma mesma distância de um transmissor, a potência recebida é variável. Quando grandes obstáculos, como edifícios, morros e similares se situam entre o transmissor e o receptor de um sistema de comunicação móvel, aparece o efeito denominado sombreamento, efeito este que pode provocar consideráveis “vales” na potência recebida e interromper a comunicação. Medidas comprovam que a variabilidade do sombreamento segue uma Distribuição Gaussiana em escala logarítmica, ou seja, segue uma Distribuição Log-normal, conforme já visto. Assim pode-se reescrever a equação de perdas no percurso de forma a considerar esse novo efeito:

$$P_r(d) = P_{rm}(d_0) - 10 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)^n + X_\sigma \quad (4.76)$$

onde  $P_r(d)$  é a potência média recebida em um ponto qualquer, a uma distância  $d$  da antena transmissora, e  $X_\sigma$  é uma variável aleatória com Distribuição Log-normal em decibéis. O desvio padrão dessa variável se situa, normalmente, na faixa entre 7 a 15 dB. Vale observar que o valor da potência  $P_r(d)$  não considera as variações causadas pelos multipercursos.

A equação (4.75) representa a variação do sinal com a distância. Variáveis como a frequência e a altura das antenas de transmissão e recepção devem aparecer em fatores adicionais de forma a se prever a cobertura em um ambiente genérico, para quaisquer valores destas variáveis. Para isto existem vários métodos de predição de perdas no percurso para canais rádio móvel terrestres, métodos esses comumente utilizados durante o planejamento de sistemas celulares, onde alguns são a base dos softwares de planejamento utilizados e encontrados no mercado. Entre tais modelos pode-se citar o de Hata-Okumura e Walfisch-Ikagami.

#### 4.4 TAXA DE CRUZAMENTO DE NÍVEL ( $N_R$ ) E DURAÇÃO MÉDIA DOS DESVANECIMENTOS ( $T_R$ )

A taxa de cruzamento de nível, teoricamente, é o número médio de vezes em que o sinal (normalizado em relação ao seu valor eficaz) cruza um nível de referência estabelecido (considerando um único sentido), durante certo período de tempo.

Em um ambiente, caracterizado como Rayleigh, a expressão que define a taxa de cruzamento de nível (número médio de cruzamentos por segundo) é dada por [28]:

$$N_R = \int_0^{\infty} \dot{r} \rho(R, \dot{r}) d\dot{r} = \sqrt{2\pi} f_m \rho e^{-\rho^2} \quad (4.77)$$

$$\rho = \frac{R}{R_{rms}} = \frac{R}{\sqrt{2} \sigma} \quad (4.78)$$

Sendo:

$$f_m = \frac{v}{\lambda} \rightarrow \text{Máximo desvio Doppler de frequência.} \quad (4.79)$$

$v \rightarrow$  Velocidade do móvel.

$\rho \rightarrow$  Valor do nível  $R$  estabelecido, normalizado em relação ao valor eficaz da envoltória do sinal.

A duração média de desvanecimentos é o período médio de tempo em que o sinal recebido está abaixo de um nível  $R$ . Para um sinal com desvanecimento Rayleigh, esse parâmetro é dado por:

$$T_R = \frac{1}{N_R} P_r [r \leq R] \quad (4.80)$$

onde a probabilidade do sinal recebido  $r$  ser menor que o patamar  $R$  pode ser calculada pela seguinte expressão.

$$P_r [r \leq R] = \int_0^R p(r) dr = 1 - e^{-\rho^2} \quad (4.81)$$

A duração média dos desvanecimentos em função de  $\rho$  e  $f_m$  é expressa como:

$$T_R = \frac{e^{\rho^2} - 1}{\rho f_m \sqrt{2\pi}} \quad (4.82)$$

Se o ambiente é caracterizado como Rice, a taxa de cruzamento de nível e a duração média dos desvanecimentos também podem ser calculadas a partir da definição, utilizando a equação da função densidade de probabilidade Rice, no item 4.1.2. Assim, a taxa de cruzamento de nível, em número médio de cruzamentos por segundo, é obtida através da equação (4.83):

$$N_R = \sqrt{2\pi(K+1)} \cdot f_m \cdot \rho \cdot \exp[-K - (K+1)\rho^2] \cdot I_0 \left[ 2\rho \sqrt{k(K+1)} \right] \quad (4.83)$$

onde

$$\rho = \frac{R}{r_{rms}} = \frac{R}{\sqrt{\Omega_p}} \quad (4.84)$$

sendo  $\Omega_p$  a média quadrática do sinal com desvanecimento Rice, logo:

$$r_{rms} = \sqrt{\Omega_p} \quad (4.85)$$

O tempo médio, em que o nível do sinal permanece abaixo de um nível R estabelecido, é dado pelo parâmetro AFD, através da equação (4.86).

$$T_R = \frac{P(r \leq R)}{I_R} \quad (4.86)$$

$$T_R = \frac{1 - Q \left[ \sqrt{2K} \cdot \sqrt{2(K+1)\rho^2} \right]}{\sqrt{2\pi(K+1)} \cdot f_m \cdot \rho \cdot \exp[-K - (K+1)\rho^2] \cdot I_0 \left[ 2\rho \sqrt{k(K+1)} \right]} \quad (4.87)$$

Se o ambiente é caracterizado como Nakagami-m, a taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento são dadas pelas equações (4.89) e (4.90), respectivamente:

$$N_R(\rho) = \sqrt{2\pi} f_m \frac{m^{m-1/2}}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} e^{-m\rho^2} \quad (4.89)$$

$$T_R(\rho) = \frac{\Gamma(m, m\rho^2)}{\sqrt{2\pi} f_m m^{m-1/2}} \rho^{2m-1} e^{-m\rho^2} \quad (4.90)$$

Enquanto que, se o ambiente é caracterizado através de uma Distribuição  $\alpha - \mu$ , a taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento são dadas pelas equações (4.91) e (4.92), respectivamente:

$$N_R = \frac{\sqrt{2\pi} f_m r^{\alpha(\mu-0,5)} \mu^{\mu-0,5}}{\Gamma(\mu) \Omega^{\mu-0,5}} e^{-\frac{\mu r \alpha}{\Omega}} \quad (4.91)$$

onde  $\Omega = \hat{r}^\alpha = \left(\frac{r}{\rho}\right)^\alpha$ .

$$T_R = \frac{\Gamma(\mu, \mu r^\alpha / \Omega) \Omega^{\mu - 0,5}}{\sqrt{2\pi} f_m r^{\alpha(\mu - 0,5)} \mu^{\mu - 0,5}} e^{\frac{\mu r^\alpha}{\Omega}} \quad (4.92)$$

A figura 4.15 ilustra a maneira através da qual é determinada a taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimentos de um sinal, para um dado nível ( $R$ ) estipulado, onde  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  e  $\tau_3$  representam o tempo de duração dos três desvanecimentos presentes na amostra representada na figura.

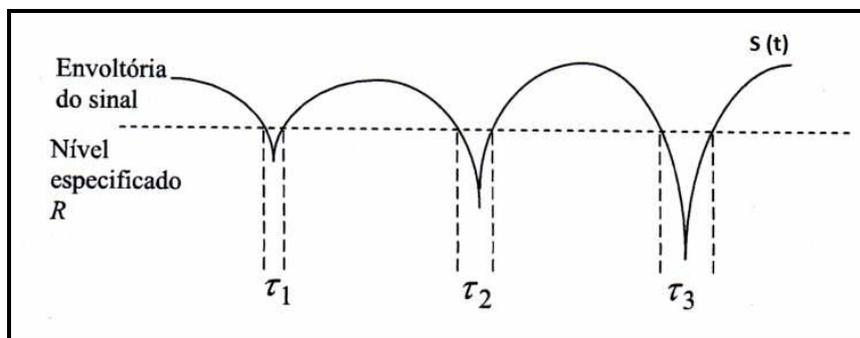


Figura 4.15 – Taxa de Cruzamento de Nível e Duração Média de Desvanecimentos.

Esta estatística tem como uma de suas aplicações a estimativa do tamanho do tamanho dos quadros e dos blocos de entrelaçamento em um sistema de comunicação móvel.

## 5 SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO

A proposta desta dissertação é caracterizar o canal rádio móvel estabelecido entre um transmissor, emitindo uma portadora na frequência de 1140 MHz, sem modulação, e um receptor embarcado em uma aeronave em pleno voo, na reta de aproximação para pouso na cabeceira 28 do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, Maestro Antônio Carlos Jobim - Galeão, a fim de determinar as estatísticas que melhor se ajustam ao sinal medido no canal aeronáutico. Para tal caracterização, foi proposto o sistema, assim composto:

	Equipamento	Marca	Modelo	Foto
Transmissão	Gerador de RF	Rhode & Schwarz	SM 300	
	Amplificador de Potência Ganho <sub>(f=1140 MHz)</sub> = 29,6 dB*	Minicircuits	ZHL-16W-43+	
	Fonte de Alimentação	ICEL	PS-5000	
	Antena (1,8 m de altura)	Wilcox	DME	
	Torre metálica de 15 metros	-		

	Equipamento	Marca	Modelo	Foto
Transmissão	Cabo coaxial 1 (do amplificador de potência à antena)	Anritsu	RG213**	
	Cabo coaxial 2 (do Gerador de RF ao amplificador de potência)	Anritsu	RG213**	

\* Na entrada do Amplificador utilizado, o máximo de potência permitido é 9 dBm.

\*\* Este cabo apresenta uma atenuação típica de 25,8 dB/100m à 20°C (Fonte: Anatel).

Tabela 5.1 - Lista de equipamentos do sistema de transmissão utilizados nas medições em campo.

	Equipamento	Marca	Modelo	Foto
Recepção	Aeronave	Embraer	EMB-110 Bandeirante	
	Receptor GPS*	-	-	-
	Analisador de Espectro	Hewlett Packard	8594E	
	Laptop	Sony	Vaio VPCCW 21FX	
	Placa de Aquisição de Sinais	National Instruments	USB-6212	
	Amplificador de baixo ruído (LNA) Ganho <sub>f=1140 MHz</sub> = 12 dB**	Mini-Circuits	ZEL-0812LN	

	Equipamento	Marca	Modelo	Foto
Recepção	Fonte de alimentação	ICEL	PS-1500	
	Cabo coaxial conector N 2 metros de comprimento (da antena ao amplificador de baixo ruído)	Anritsu	RG213**	
	Cabo coaxial conector BNC 2 metros de comprimento (do analisador de espectro à placa de aquisição de sinais)	-	RG-59/U	
	Cabo USB 2 metros de comprimento (da placa de aquisição de sinais até à porta USB do laptop)	National Instruments	-	

\*Foi utilizado o receptor do painel de inspeção da aeronave.

\*\* A tensão de polarização utilizada foi igual a 15 Volts e a corrente, 70 mA, conforme especificações elétricas informadas pelo fabricante.

Tabela 5.2 - Lista de equipamentos do sistema proposto para as medições em campo.

Para a localização da aeronave, durante todo o trajeto de medição, foi utilizado o receptor GPS da própria aeronave, embutido no painel de inspeção, que possui a facilidade de gravar em arquivo texto diversas informações obtidas a partir dos dados fornecidos pela constelação GPS, dentre elas: latitude, longitude, altitude, velocidade, hora, minuto e segundo.

É sabido que o enlace de dados 1090 MHz *Extended Squitter* Modo S, assim como o enlace dados do radar secundário, funciona nas frequências 1030 MHz (enlace terra-ar – da estação de solo para a aeronave) e 1090 MHz (enlace ar-terra – da aeronave para a estação de solo). Sabe-se ainda, que o espectro de frequência entre 960 a 1215 MHz é utilizado pelos equipamentos medidores de distância (DME - *Distance Measuring Equipment*), que fornece à aeronave uma indicação precisa e contínua de distância oblíqua, em milhas náuticas, em todas as direções, relativa ao ponto no solo onde se encontra a estação DME e que tal sistema é um auxílio-rádio com dois componentes, um terrestre (a estação DME) e um aéreo (o *transponder* DME a bordo da aeronave), logo para toda interrogação feita pela aeronave à estação de solo é gerada uma “resposta”, portanto, quando a aeronave se utiliza deste equipamento, o espectro radioelétrico presencia a existência de dois sinais, que estão

padronizadamente defasados em 63 MHz. Todo esse conhecimento aliado ao levantamento de frequências DME (aeronave/estação) atuantes na região sobrevoada, durante as medições, serviu como base para a escolha da frequência a ser transmitida. Assim, com o objetivo de não causar quaisquer possíveis interferências nos sistemas radar (secundário) atuantes naquela localidade, como também, de minimizar interferências quanto ao nível de sinal recebido no sistema de recepção montado a bordo da aeronave, escolheu-se a frequência de 1140 MHz para o sistema de medição proposto. Desta forma, foi possível fazer um estudo sobre a variabilidade do canal rádio móvel (sentido terra-ar) estabelecido entre a transmissão e a recepção de uma portadora próxima à frequência de operação de um Sistema ADS-B 1090 MHz *Extended Squitter*, com um mínimo de impacto sofrido no nível de sinal recebido, proveniente do espectro local. Antes de realizar as medições, constatou-se com o auxílio do analisador de espectro, que a frequência utilizada estava livre de interferências.

O ambiente escolhido para o sistema de transmissão foi o Parque de Material de Eletrônica da Aeronáutica (PAME-RJ), localizado no bairro do Caju, às margens da baía de Guanabara, zona metropolitana da cidade do Rio de Janeiro e o espaço aéreo sobrevoado durante as medições, portanto o espaço aéreo percorrido pelo receptor, é a reta de aproximação para a cabeceira 28 do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, Maestro Antônio Carlos Jobim - Galeão, conforme coordenadas adquiridas pelo receptor GPS da aeronave. A rota não foi definida a priori das medições por se tratar de um voo de oportunidade.

Em consequência ao efeito Doppler, o deslocamento de  $\pm f_m$  sofrido na portadora transmitida, pode ser calculado através da fórmula (5.1):

$$f_m = V_{\text{avião}} \cdot \left( \frac{3 \times 10^8}{f_t} \right) \quad (5.1)$$

$f_m \rightarrow$  Frequência Doppler,

$V_{\text{avião}} \rightarrow$  Velocidade do avião, e

$f_t \rightarrow$  Frequência de transmissão em Hz.

Durante as medições, a velocidade máxima alcançada pela aeronave foi, aproximadamente, 73 m/s (262,8 km/h). Assim, a máxima frequência Doppler experimentada pelo sistema, de acordo com fórmula (5.1), foi igual a 277 Hz.

## 5.1 Setup de Transmissão

Antes do início da transmissão, foi realizada a calibração da fonte de alimentação que serviu para polarizar o amplificador de potência (PA - *Power Amplifier*). Este opera com limite máximo de alimentação em 30 volts e 4,3 ampères. A fonte PS-500 é composta de duas fontes ajustáveis e independentes (figura 5.1) e, para poder alimentar cargas acima de 3 ampères, ajustou-se cada fonte, independentemente, para 2,15 ampères e 28 volts e, em seguida foram utilizadas em modo paralelo de forma a fornecer 28 volts e 4,3 ampères ao PA.



Figura 5.1 - Fonte ICEL PS-5000.

Após estes ajustes iniciais, foi feita a conexão entre a antena e a saída do amplificador de potência. O máximo de potência permitida à entrada do amplificador é de 9 dBm e à entrada da antena é de 27 dBW ou 57 dBm. O amplificador de potência utilizado fornece um ganho aproximado de 29,6 dB na frequência de 1140 MHz e os cabos e conexões causaram uma atenuação aproximada de 12 dB. Desta forma, ajustou-se no gerador de RF a potência de 9 dBm que, somando-se às perdas nas conexões e nos cabos mais o ganho do amplificador, totalizou em 26,6 dBm entregue à antena de transmissão. Como a antena possui um ganho de 9 dBi, a potência total irradiada foi de 35,6 dBm ( $P_{Watts} = 10^{dBm-30/10} \cong 3,63 Watts$ ), desprezando as perdas na antena. A tabela 5.3 sumariza os valores acima descritos.

<b>Potência Máxima Permitida na Entrada do PA</b>	9 dBm
<b>Potência Máxima na Entrada da Antena</b>	27 dBW ou 57 dBm
<b>Ganho do PA p/ 1140 MHz</b>	29,6 dB
<b>Atenuação: Cabos e Conectores</b>	Aproximadamente 15 dB
<b>Potência Gerada</b>	9 dBm
<b>Potência Máxima Entregue à Antena de TX</b>	26,6 dBm
<b>Ganho da Antena de TX</b>	9 dBi
<b>Potência Total Irradiada</b>	35,6 dBm = 3,63 Watts
<b>Ganho da Antena de RX</b>	Sem acesso à informação

Tabela 5.3 - Lista de equipamentos do sistema proposto para as medições em campo.

Com o sistema de transmissão todo conectado, ajustou-se no gerador a frequência e o nível da portadora que foi gerada, amplificada e, então, irradiada pela antena DME, fixada em um mastro de 15 metros de altura, localizado no PAME-RJ, conforme coordenadas a seguir (vide figuras 5.2, 5.3 e 5.4 e fotos 5.1 e 5.2):

<b>Latitude</b>	22° 52' 25,30" S
<b>Longitude</b>	43° 12' 48,23" O
<b>Elevação do terreno em Relação ao Nível do Mar</b>	Aprox. 7 metros

Tabela 5.4 – Coordenadas da antena de Transmissão.

As figuras 5.2 a 5.4 mostram a localização da antena transmissora e as fotos 5.1 e 5.2, a sua instalação.



Figura 5.2 - Localização da antena transmissora (Vista aproximada).

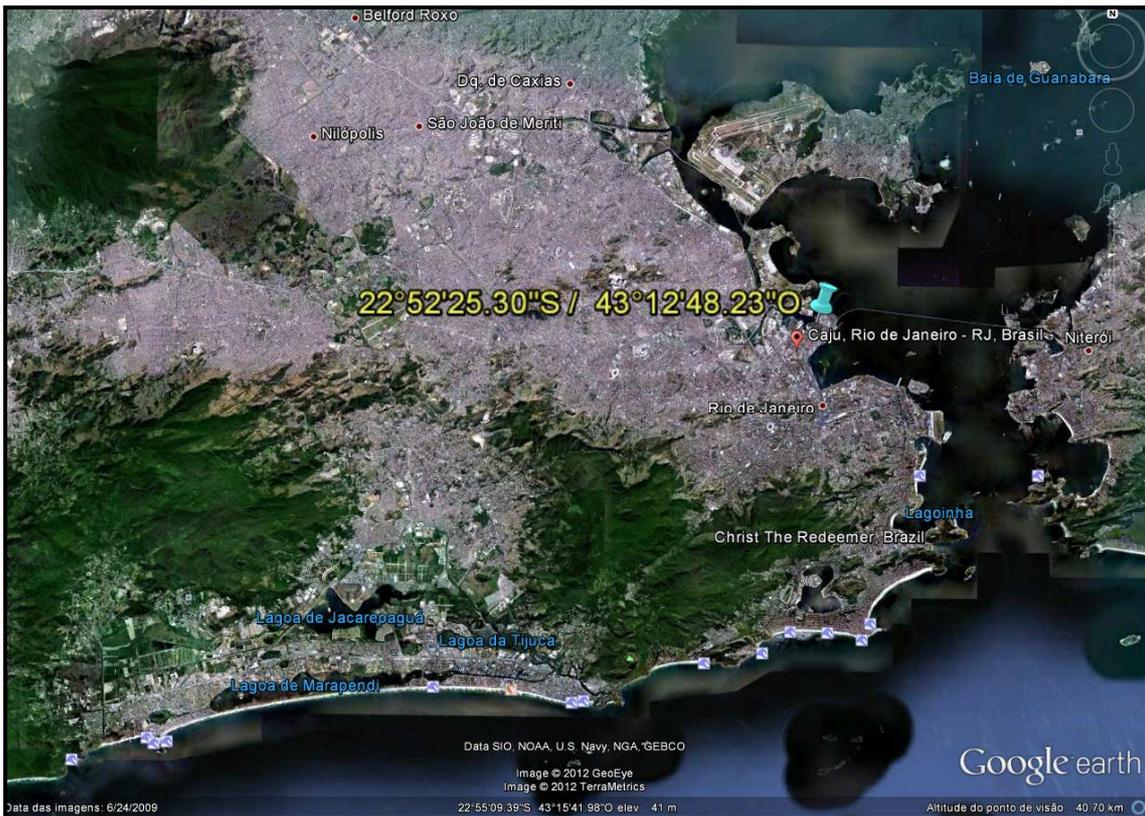


Figura 5.3 - Localização da antena transmissora (Vista afastada).



Figura 5.4 - Localização da antena transmissora (Perfil).



Foto 5.1 – Panorâmica do ambiente de transmissão.



Foto 5.2 – Antena de transmissão instalada.

Após a instalação da antena, foi feito um teste de transmissão e recepção. Assim, com o auxílio de um analisador de espectro portátil (Anritsu modelo MS2034A) a bordo de um carro elétrico em movimento, fez-se a recepção em terra do sinal transmitido, conforme foto 5.3. Os equipamentos de transmissão podem ser visualizados na foto 5.4, já conectados e em operação.



Foto 5.3 – Recepção em solo do sinal transmitido.

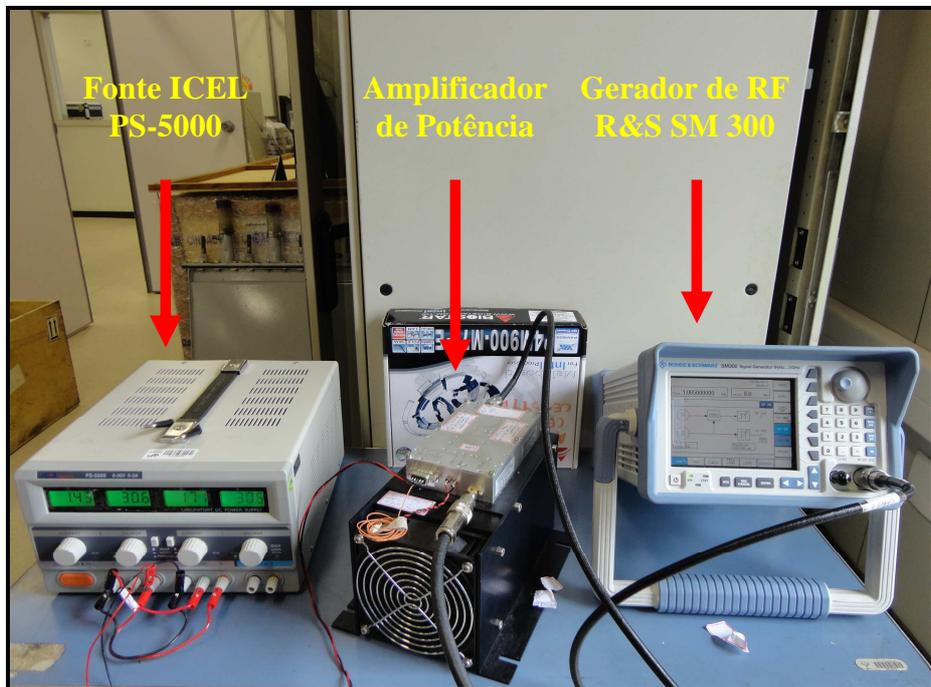


Foto 5.4 – Equipamentos de transmissão.

### 5.1.1 Antena de Transmissão

A antena utilizada na transmissão do sinal possui nove elementos irradiadores, sendo que a mesma não requer ajustes. Estes nove elementos bicônicos são alimentados com igual potência, que são convenientemente defasados para formar um padrão próprio de irradiação utilizado em sistemas DME. Este modelo de antena não foi escolhido propositalmente para este trabalho. Por estar dentro de uma faixa de frequências reservadas à aeronáutica, não havia na Universidade, como também não foi encontrada no comércio acessível, uma antena que operasse na frequência de transmissão escolhida para este trabalho. Assim, após consulta ao PAME-RJ, foi disponibilizado por aquele Parque de Material de Eletrônica uma antena utilizada em sistemas DME e, portanto, apta a operar na frequência adotada.

A faixa de frequências de operação da antena utilizada está compreendida entre 960 e 1215 MHz. O diagrama de irradiação desta antena é omnidirecional no plano horizontal (fornecendo a 0 graus um ganho típico de 6,2 dBi), e o diagrama vertical está representado na figura 5.5, com ganho típico de 9 dBi a 4 graus. Neste é possível notar a existência de um cone de silêncio na vertical do diagrama, como também se percebe que o máximo da irradiação é alcançado a  $4 \pm 1$  graus. A impedância de entrada é igual a  $50 \Omega$ .

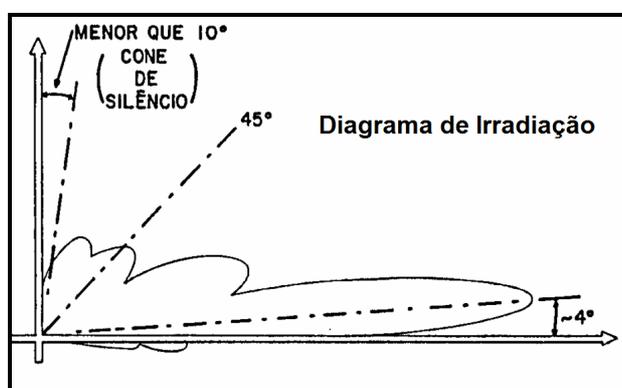


Figura 5.5 –Diagrama de irradiação da antena de transmissão.

A figura 5.6 mostra a estrutura interna da antena com os seus nove elementos bicônicos. Nesta figura, também se observa que o máximo de potência na entrada da antena é de  $22 \pm 5$  dBW e que existem 4 divisores de potência para alimentar os elementos irradiantes. O primeiro divisor (localizado na parte central da figura, no lado direito), na razão de 1/3, alimenta os outros 3 divisores (cada saída fornece 1/3 da potência de entrada). A saída dos demais divisores, na razão de 1/3, alimenta cada um, um elemento da antena com 1/9 da potência de entrada.

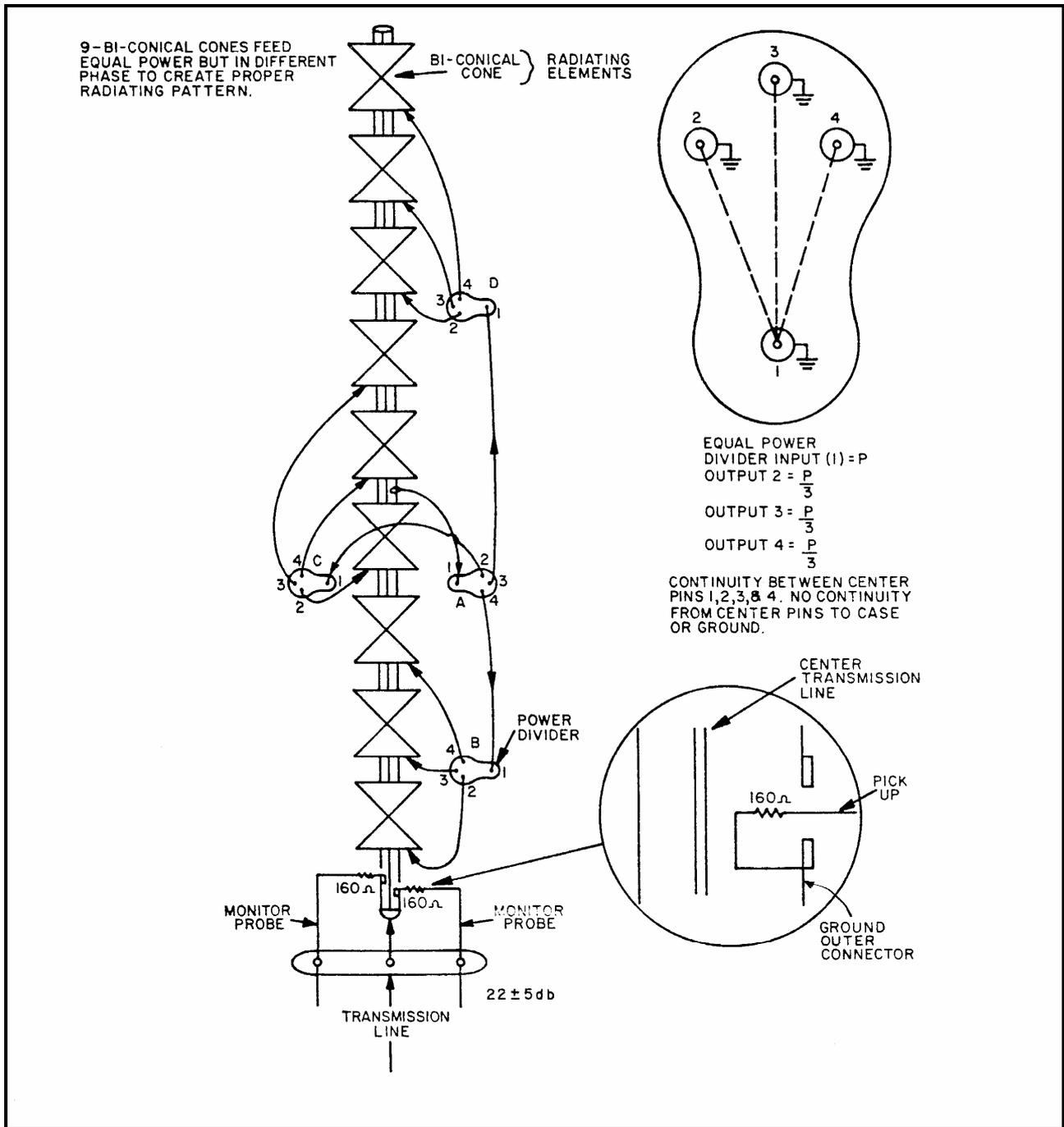


Figura 5.6 – Estrutura interna da antena de transmissão.

## 5.2 Setup de Recepção

No lado da recepção, utilizou-se uma das antenas disponíveis na aeronave e que opera na faixa do sinal transmitido (vide figura 5.9), fixa à fuselagem (Não houve acesso ao diagrama de irradiação da antena de recepção e não foi possível checar o seu ganho). Assim, do lado de dentro da aeronave, no bastidor onde chegam os sinais provenientes desta antena, conectou-se um cabo coaxial e, em seguida, um amplificador de baixo ruído (LNA), cujo ganho para a frequência de 1140 MHz foi medido em laboratório, obtendo-se o valor aproximado de 12 dB, conforme o cursor de número “1” na figura 5.7. Este LNA foi alimentado pela fonte mostrada na figura 5.8 e, assim, o sinal de radiofrequência foi levado à entrada de RF do analisador de espectro, através de um cabo coaxial com conectores tipo N. Antes de realizar as aquisições, foi necessário calibrar e, em seguida, ajustar a visualização no analisador de espectro, de modo que este realizasse a filtragem do ruído que chegava à sua entrada, apresentando somente, a portadora de 1140 MHz que estava sendo recebida, acrescida do Doppler.

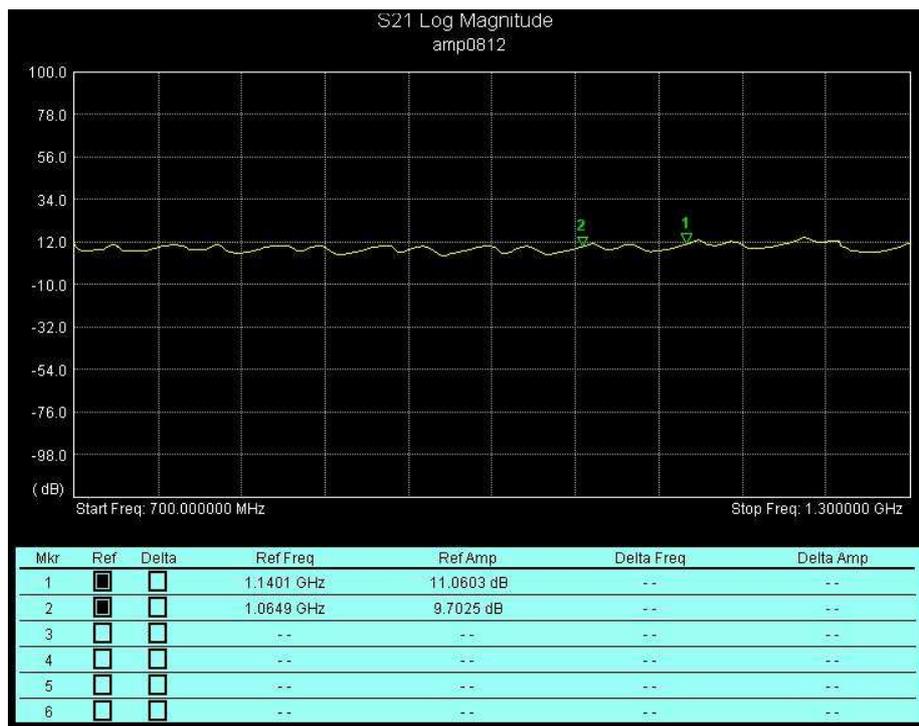


Figura 5.7 – Curva de ganho do LNA ZEL-0812LN da Mini-Circuits obtida em laboratório.



Figura 5.8 - Fonte ICCEL PS-1500.

Nº DO ITEM	COMPONENT REFERENCE	Part Number	Fabricante	UNIFIS 3000/QTY.	Nº DO ITEM	COMPONENT REFERENCE	Part Number	Fabricante	UNIFIS 3000/QTY.
1	AFIS VOR-LOC	DM N4-45	Dorne & Margolin	2	19	TCAS UPPER	TRE-920	Collins	1
2	AFIS GP 1	DM N9-11	Dorne & Margolin	1	20	DUAL ADF	ANT-4628	Collins	1
3	AFIS GP 1&2	DM N25-2	Dorne & Margolin	1	21	IRS-GPS 4	IRS-GPS 4	Sensor Systems Inc	1
4	AFIS MKR	522-0854-069	Collins	1	22	IRS-GPS 3	IRS-GPS 4	Sensor Systems Inc	1
5	AFIS DME 1	DM N150-6-2	Dorne & Margolin	1	23	XPDR UPPER	ANT42	Collins	1
6					24	V-UHF VOR-LOC	12-127	Chelton	1
7	AFIS GPS 1	AV37	Trimble	1	25	HF			1
8	AFIS GPS 2	AV37	Trimble	1	26	VHF 2	16-21-11	Chelton	1
9	AFIS UHF DGPS	CF275-5	Cobham	1	27	ELT	110-328-1	Arlex	1
10	AFIS UHF DRIT	HR 10-104-1	HR Smith	1	28	VHF 1	16-21-11	Chelton	1
11	AFIS V-VHF-SA ACFT DME 2	10-105-23	HR Smith	1	29	XPDR 1	10-A1	Chelton	1
12	GPS RFI	S67-1575-14	Sensor Systems Inc	1	30	DME 1	10-A1	Chelton	1
13	SATCOM	IGA-2100B	Collins	1	31	RADIO ALTIMETER	S65-2002-2		2
14	VDL-VHF	S65-8282	Sensor Systems Inc	1	32	XPDR 2	10-A1	Chelton	1
15	AFIS DME 2	DM N150-6-2	Dorne & Margolin	1	33	TCAS LOWER	522-2632-000	Collins	1
16	AFIS DME SA	DM N150-6-2	Dorne & Margolin	1	34	WEATHER RADAR	RTA-858	Collins	1
17	GPS 1	10704	Universal	1	35	GLIDESLOPE	17-21-F6	Chelton	1
18	GPS 2	10704	Universal	1	36	MARKER 1	17-SC	Chelton	1

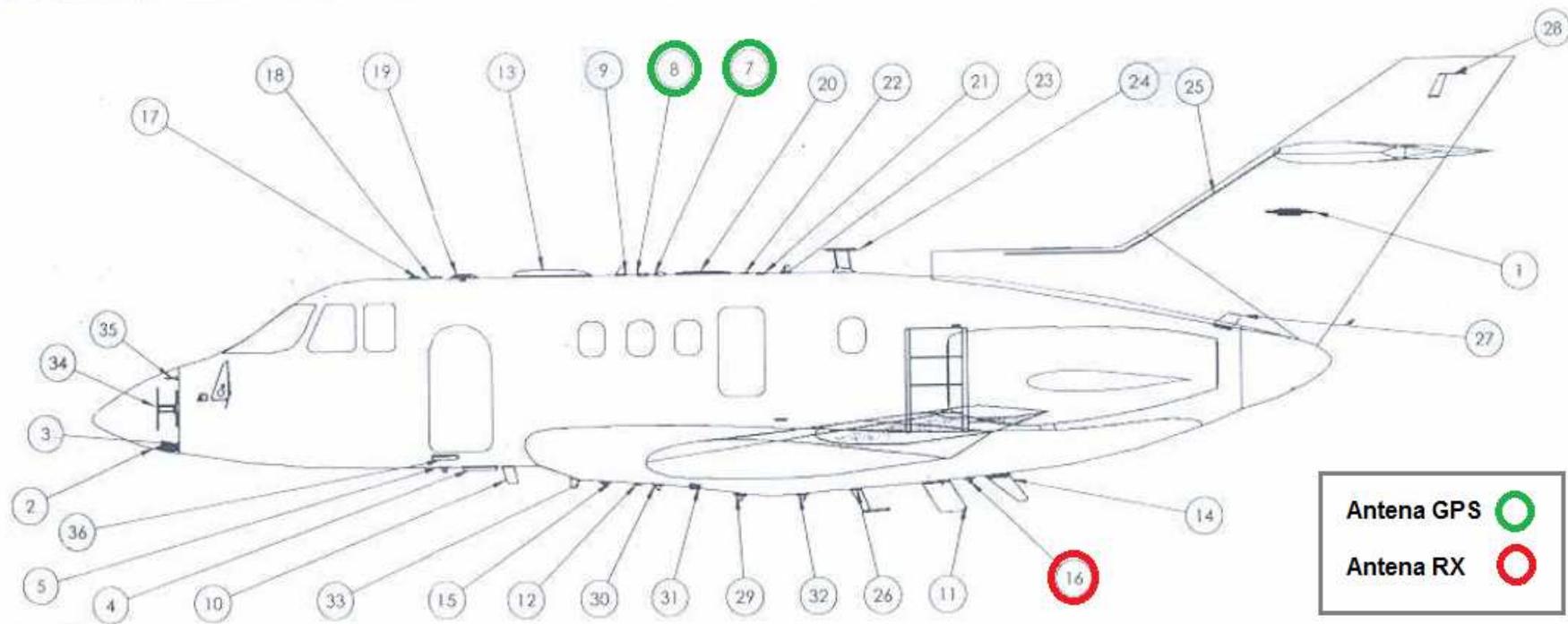


Figura 5.9 – Diagrama de antenas da aeronave.

Para o ajuste de visualização no analisador de espectro, foram utilizados os seguintes parâmetros, constantes da tabela 5.3:

Parâmetro	Valor
RBW	3 MHz
VBW	1 MHz
SPAM	0 Hz
Varredura	58 ms
Frequência	1140 MHz
Nível de Referência	0 dBm

Tabela 5.5 - Lista de parâmetros utilizados no analisador de espectro durante as medições.

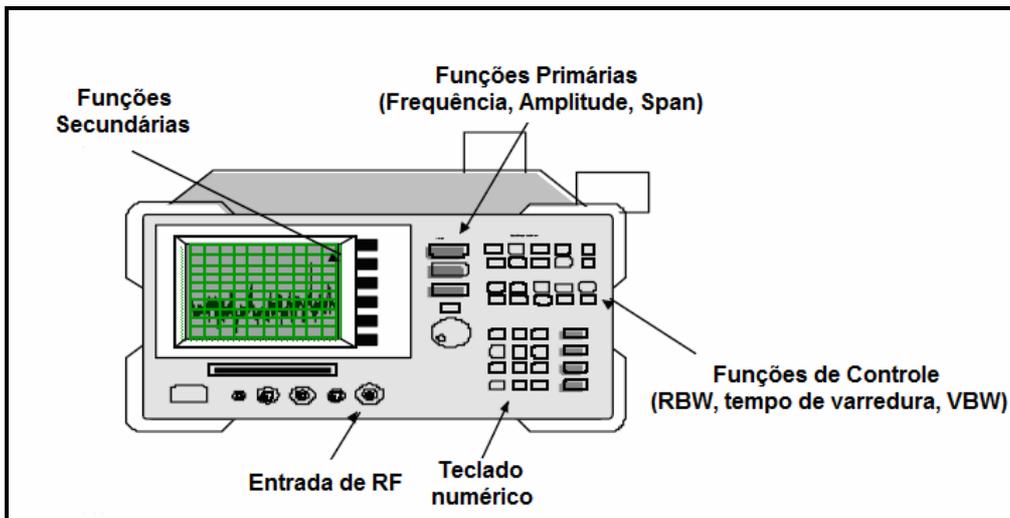


Figura 5.10 - Visão frontal do analisador de espectro.



Figura 5.11 - Analisador de espectro 8594E.

Na parte traseira do Analisador de Espectro, mostrado na figura 5.12, existe uma saída de vídeo (*Aux Vídeo Output*) que fornece em, *Volts*, o sinal que chega à entrada de RF do analisador, de forma contínua. Nesta saída, um cabo (conector tipo BNC) conduz o sinal até a interface de aquisição de sinais da *National Instruments*, mostrada na figura 5.13a. A saída USB da interface é conectada ao *laptop* da figura 5.13b, possibilitando desta maneira, o armazenamento dos dados relativos às amostras recebidas da interface, na taxa desejada, a ser detalhada no item 5.2.2.



Figura 5.12 - Visão traseira do analisador de espectro.

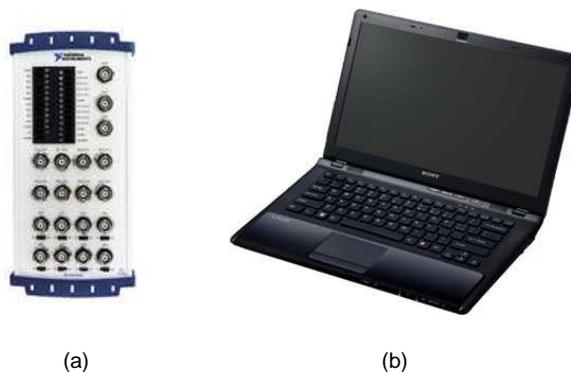


Figura 5.13 – (a) Placa de aquisição da *National Instruments* (Modelo NI USB-6212), (b) *Laptop* Sony Vaio.

Desta forma, o sistema de recepção mostrado na foto 5.5, foi todo montado dentro de uma aeronave modelo EMB-110 Bandeirante (fabricada pela Embraer) de propriedade da Força Aérea Brasileira, mostrada na foto 5.6. A figura 5.14, meramente ilustrativa, apresenta o esquema de conexão dos equipamentos de recepção na aeronave.

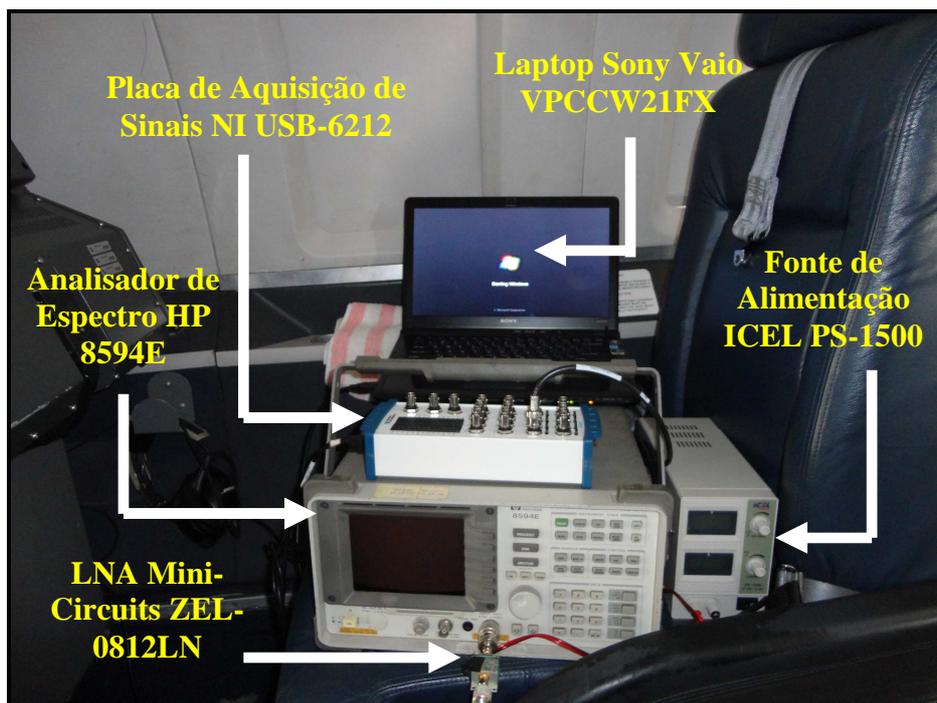


Foto 5.5 – Sistema de recepção montado dentro da aeronave.



Foto 5.6 – Aeronave utilizada na campanha de medições - Modelo EMB-110 Bandeirante, fabricada pela Embraer.

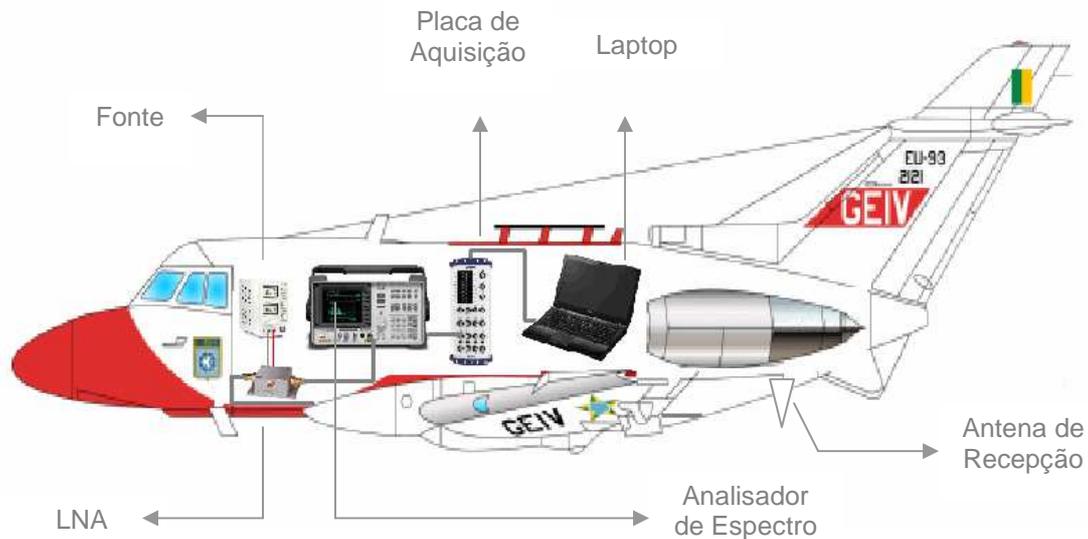


Figura 5.14 - Conexão dos equipamentos de recepção na aeronave.

O sinal GPS foi gravado a partir do painel de inspeção da própria aeronave e, ao final do voo, foi exportado para um *pen-drive* e armazenado no *laptop*. O relógio do *laptop* foi sincronizado com o GPS e, para cada início de gravação das medições, o *software LabView*<sup>37</sup> criou uma pasta contendo três arquivos, um com os dados gravados contendo o nível do sinal recebido em *Volts* e o tempo em que cada amostra foi adquirida (este tempo de aquisição está relacionado com a taxa de aquisição escolhida), outro arquivo contendo o *log* da medição (este arquivo armazena entre outras informações, o horário de início das medições e o tempo de duração da gravação) e um terceiro arquivo sem informação útil a este trabalho. De posse do arquivo de informações GPS, contendo a latitude, a longitude, a altitude, a hora, os minutos, os segundos e a velocidade, e de posse do arquivo de informações gravadas pelo sistema de recepção contendo a hora, os minutos, os segundos, o instante de aquisição de cada amostra e o nível em *Volts* do sinal recebido, foi possível criar um arquivo único, contendo todos estes dados, compondo, desta maneira, uma base de dados unificada e com todas as informações necessárias às análises pretendidas.

<sup>37</sup> Labview – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*: é uma linguagem de programação gráfica originária da National Instruments. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os Sistemas Operacionais Windows, Linux e Solaris. Os principais campos de aplicação do *LabVIEW* são a realização de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação.

**Nota:** Todo o sistema de recepção foi energizado através de tomadas 127 Volts disponíveis na própria aeronave laboratório, utilizada para as medições.

### 5.2.1 Obtenção da curva de calibração do analisador de espectro (Receptor)

Os níveis de potência recebidos foram armazenados de acordo com a voltagem fornecida pela saída de vídeo do analisador de espectro. Desta forma, para uma posterior correlação entre o nível de potência do sinal recebido e o valor em Volts armazenado no *laptop*, durante as medições em campo, fez-se necessária a obtenção da curva de calibração do analisador de espectro utilizado em laboratório (Faixa Dinâmica do analisador de Espectro). Para a criação desta curva foram utilizados os seguintes equipamentos:

	Equipamento	Marca	Modelo	Foto
<b>Transmissão</b>	Gerador de RF	Rohde & Schwarz	SM 300	
	Cabo coaxial 1			
<b>Recepção</b>	Analisador de Espectro	Hewlett Packard	8594E	
<b>Medição</b>	Multímetro	Fluke		

Tabela 5.6 - Lista de equipamentos utilizados para obter a curva de ajuste do analisador de espectro.

Os procedimentos realizados para a obtenção da curva de calibração são descritos a seguir:

1. Com o gerador de RF ligado foi ajustada a frequência de 1140 *MHz*,
2. Com o auxílio de um cabo<sup>38</sup> conector tipo N (fêmea), conectou-se a saída de RF do gerador à entrada do analisador de espectro;
3. O analisador de espectro foi ajustado conforme descrição anterior;
4. O nível de sinal transmitido pelo gerador foi, inicialmente, colocado em -77 *dBm* (nível de ruído do analisador de espectro) e incrementado até que fosse possível enxergar no visor do analisador de espectro (com o auxílio da ferramenta *marker*) um nível de sinal diferente do nível de ruído. Então, com a ajuda de um multímetro, mediu-se o valor de tensão obtido na saída de vídeo deste analisador. Em seguida, incrementou-se a potência gerada de modo a sensibilizar o valor mostrado pela ferramenta *marker* do analisador, tomando-se o respectivo valor de tensão obtido na referida saída de vídeo. Esse procedimento foi repetido até o valor 0,88 *dBm*. Todos os valores medidos estão registrados na tabela 5.7, chamada de tabela de calibração do analisador de espectro para a frequência de 1140 *MHz*.

---

<sup>38</sup> A atenuação presente no cabo utilizado foi de 0,73 *dB*.

<b>Potência gerada (dBm)</b>	<b>Tensão medida na saída de vídeo do analisador de espectro (Volts)</b>
-77	0,0381
-75	0,0548
-72	0,0798
-71	0,0926
-68	0,118
-66	0,169
-63	0,231
-59	0,297
-55	0,361
-50,3	0,428
-45,5	0,493
-40,7	0,559
-35,8	0,624
-30,8	0,69
-25,82	0,755
-20,84	0,819
-15,83	0,884
-14,7	0,899
-9,6	0,967
-4,56	1,031
0,88	1,098

Tabela 5.7: Tabela de calibração do analisador de espectro para a frequência de 1140 MHz.

Com a ajuda do *Software Excell* foi possível construir a curva de calibração (dBm versus Volts) do analisador de espectro para a frequência de 1140 MHz.

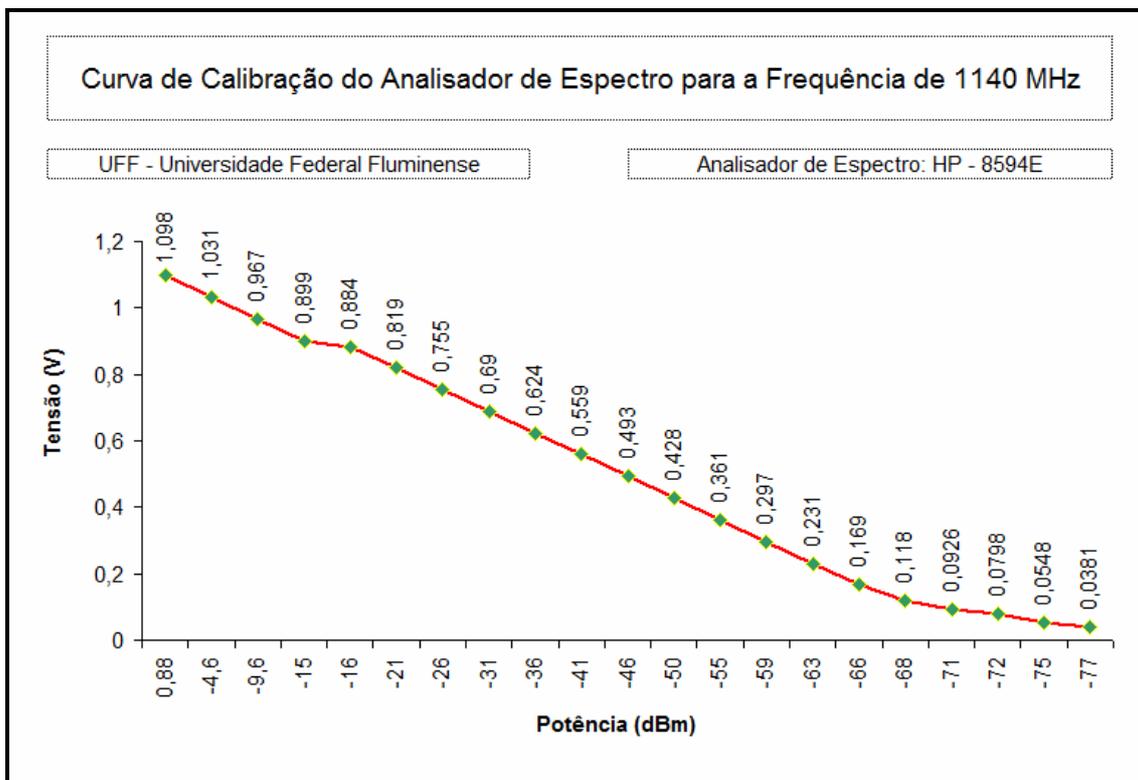


Figura 5.15: Curva de ajuste do analisador de espectro para a frequência de 1140 MHz.

## 5.2.2 Escolha da Taxa de Aquisição

A fim de que a placa da *National Instruments* fosse capaz de fornecer ao sistema de recepção uma quantidade de amostras suficientemente grande, de modo a possibilitar a análise em faixa estreita, foi necessário estipular a taxa para a aquisição do sinal. É sabido que amostras são adquiridas ao longo do tempo durante a medição, sendo este tempo proporcional à distância, para uma velocidade constante. Assim, para que desvanecimentos (*fadings*) profundos sejam detectados, é necessário que a distância entre duas amostras esteja abaixo de  $0,5\lambda$ . *Parsons* [28] sugere que para a detecção de tais *fadings* profundos, deve-se utilizar  $0,01\lambda$ . De fato, a condição a ser satisfeita é a taxa *Nyquist*, ou seja:

- Taxa de amostragem  $\geq 2B$  amostras (Teorema de *Nyquist*), onde  $B$  é a faixa do sinal a ser amostrado. Isto garante recuperação do sinal sem *aliasing*<sup>39</sup>.

<sup>39</sup> Aliasing – É um fenômeno que ocorre durante a amostragem de um sinal analógico, quando a taxa de amostragem não é suficientemente alta para representar corretamente o sinal.

- Taxa de amostragem  $\geq 2 \times (2f_m) = 4V/\lambda = V/(0,25\lambda)$ , pois o sinal móvel sofre deslocamento de sua portadora (efeito *Doppler*) e sua faixa passa a ser igual a  $2 f_m$ . Assim, fica satisfeita a taxa de *Nyquist* levando em conta o deslocamento *Doppler* sofrido pela portadora transmitida;
- Taxa de amostragem  $\geq V/(0,01\lambda) = 100V/\lambda$ , segundo *Parsons*, pois o sinal transmitido sofrerá o efeito do canal, e para detectar o desvanecimento profundo a taxa a ser utilizada deve ser maior que aquela calculada, de  $4 V/\lambda$ .

Na prática, tem-se observado (Daniel e Mateus - [46] e [47]), em ambientes externos e internos, que com  $d \geq 0,05\lambda$  as estatísticas de variabilidade não se alteram, sendo, por isso, tomada neste trabalho:

- Taxa de amostragem  $= V/(0,05\lambda) = 20V/\lambda$ , o que equivale a  $1/5$  do valor sugerido por *Parsons*. Desta forma, o sinal de variabilidade medido se aproxima muito daquele que seria medido com taxa igual a  $100V/\lambda$  e o processamento se torna mais rápido.

Antes, calcula-se o comprimento de onda do sinal transmitido:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1140 \text{ MHz}} = 0,2632 \text{ m} \quad (5.6)$$

Assim, a taxa de amostragem ideal para se verificar os possíveis desvanecimentos (*fadings*) profundos com um pós-processamento mais rápido, necessária à análise em faixa estreita, considerando uma velocidade média de deslocamento de  $142 \text{ nós}$  ( $73 \text{ m/s}$ ) para o receptor a bordo da aeronave é de:

$$\text{Taxa de amostragem} = \frac{20 \times V}{\lambda} = 5.547 \text{ Hz} \quad (5.7)$$

Foram feitos alguns testes de aquisições com a placa NI USB-6212 e com o *laptop* antes do início das medições, obtendo-se excelentes resultados para aquisições de até  $20 \text{ KHz}$ . Desta forma, para garantir uma análise apurada, mesmo que desnecessária, decidiu-se pela taxa de amostragem igual a  $20 \text{ KHz}$ .

### 5.3 Condições climáticas durante as medições

As condições climáticas presentes no aeródromo de decolagem, durante as medições, podem ser cheçadas através dos Meteogramas constantes no item 5.3.1. As medições foram feitas no espaço aéreo da região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, próximo à Baía de Guanabara, no dia 19/05/2012, portanto no outono, entre 13:48h e 14:17h (horário de Brasília - GMT-3), em um dia ensolarado e com boa visibilidade. O aeródromo do Aeroporto Santos Dumont, local de decolagem, registrou temperaturas em torno dos 23° C, pressão atmosférica em torno de 1020 hPa (hectopascal), visibilidade predominante em torno de 10.000 metros, praticamente sem ventos. Como não houve acesso aos instrumentos meteorológicos da aeronave, não foi possível checar os citados parâmetros nas regiões sobrevoadas durante as medições.

#### 5.3.1 Meteogramas

Consiste de cinco gráficos, representando a evolução temporal de acordo com as seguintes variáveis:

- Temperatura na superfície (a temperatura do ar próxima à superfície em *graus Celcius* [C]).
- Pressão ao nível do mar (mede o peso de toda a coluna atmosférica acima do local referido, descontando a altura topográfica, expressa em *milibares* [mb] ou *hectopascals* [hPa]);
- Vento na superfície (representada de duas formas: em azul a magnitude em *metros por segundo* [m/s], e em setas pretas, a direção e a magnitude);
- Umidade Relativa (conteúdo de água em comparação com o seu valor de saturação, expressa em porcentagem [%]);
- Precipitação (quantidade de chuva, granizo e neve convertida para água equivalente, expressa em milímetros por hora [mm/h], 1 mm de chuva é igual a 1 litro de água sobre 1 m<sup>2</sup> de área horizontal);

As condições climáticas no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont, durante as medições, estão reunidas nos meteogramas abaixo, obtidos da REDEMET (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica). As horas estão no horário UTC (*Universal Coordinated Time*), logo as leituras a serem feitas nos gráficos abaixo terão de ser feitas entre o intervalo de 11:00h e 23:00h, mas precisamente no entorno das 17:00h (UTC).

Fonte: REDEMET (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica):

<http://www.redemet.aer.mil.br/>

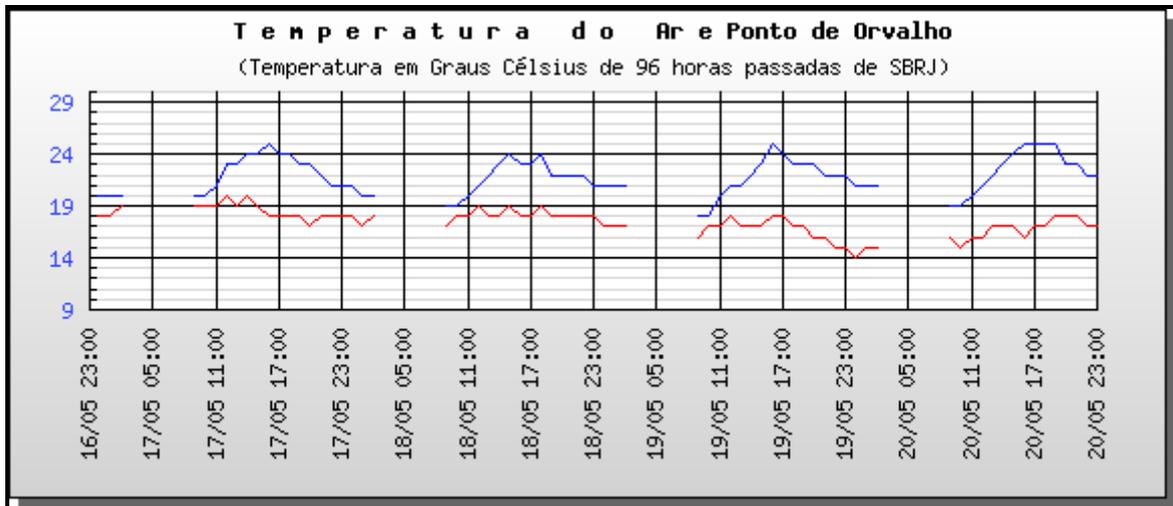


Gráfico 5.1: Temperatura do ar e ponto de orvalho no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.

**Nota:** No gráfico 5.1, a linha azul representa a temperatura do ar e a linha vermelha o ponto de orvalho (em graus Celsius [C]).

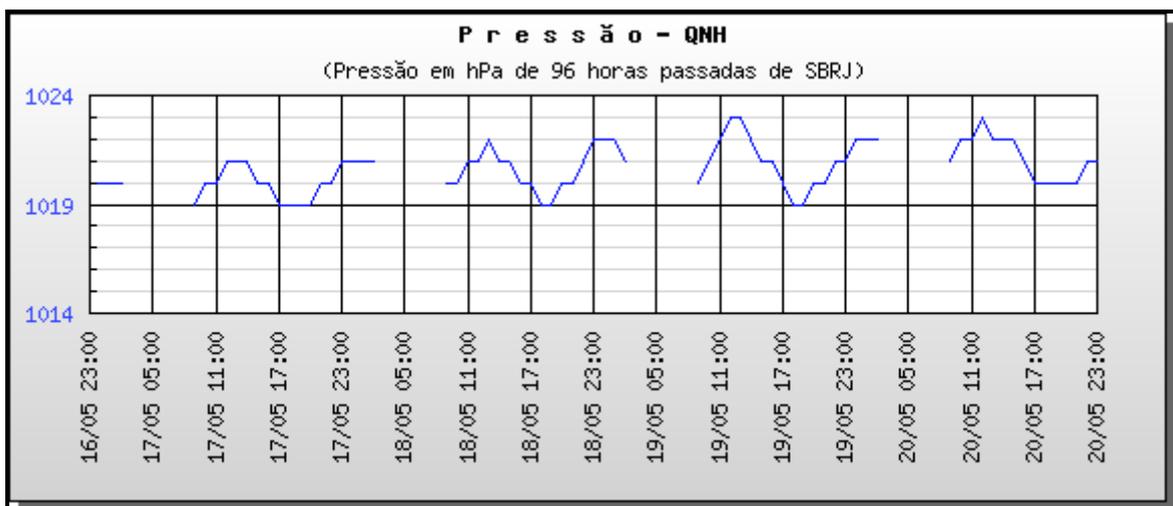


Gráfico 5.2: Gráfico da pressão atmosférica no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.

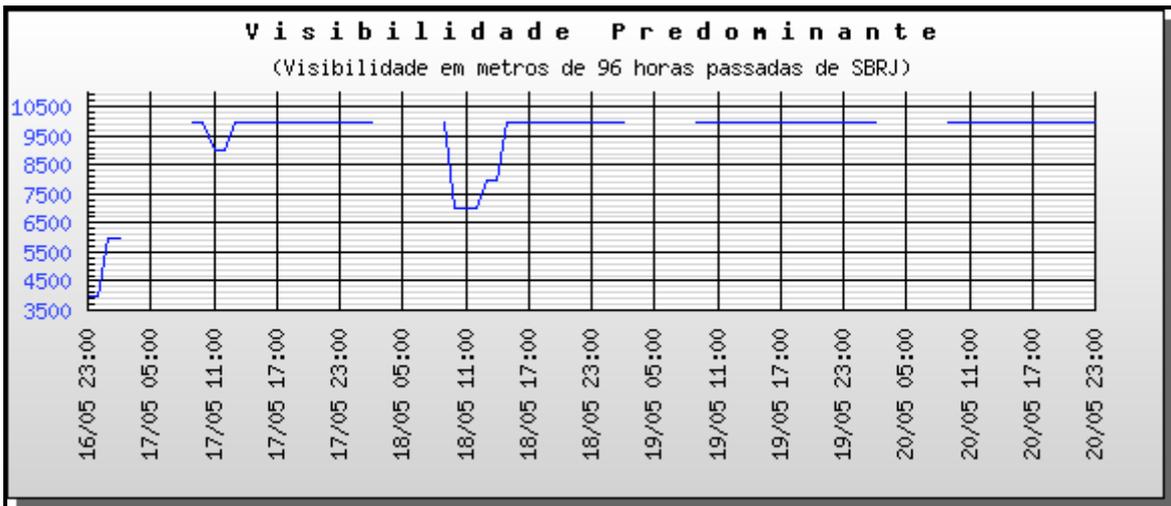


Gráfico 5.3: Gráfico da visibilidade predominante no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.



Gráfico 5.4: Gráfico da direção do vento no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.

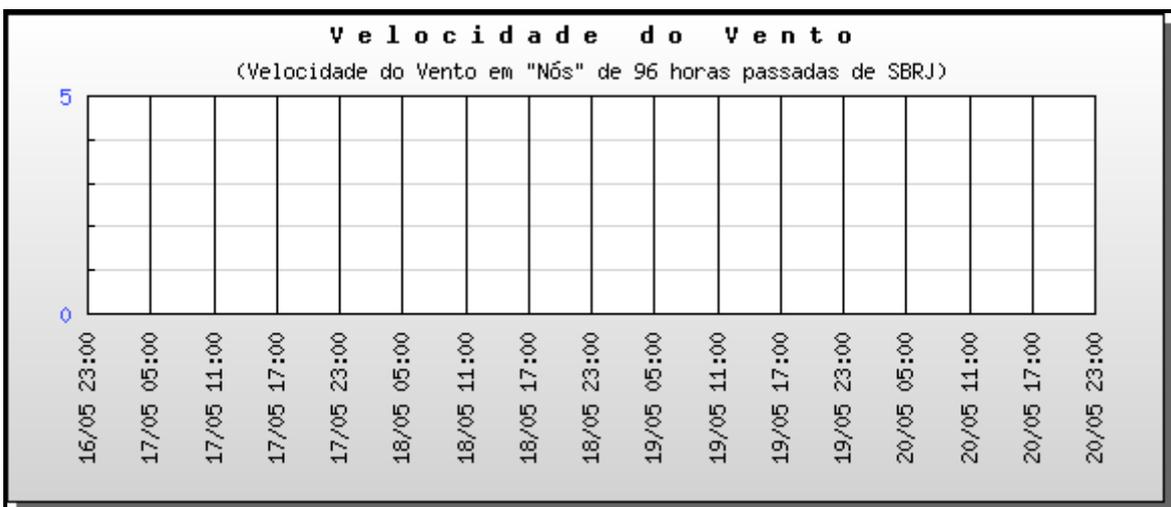


Gráfico 5.5: Gráfico da velocidade do vento no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ.

### 5.3.2 METAR

METAR (*METEorological Aerodrome Report* - Relatório Meteorológico de Aeródromo), é um relatório codificado, associado às observações meteorológicas, e utilizado para fornecer informações sobre condições do tempo em um aeródromo específico.

É a codificação de uma observação meteorológica de rotina para a aviação. Na maioria dos aeródromos tem sua confecção de hora em hora, nas horas cheias, porém, pode-se ter relatórios em outros horários caso o clima esteja instável e seja necessária uma atualização mais frequente.

O gráfico 6 representa o METAR SBRJ (Aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ), em horário UTC, tomado durante o dia 19/05/2012, durante o horário dos voos.

Data	Mensagem ( METAR_SPECI )
19/05/2012	SBRJ 191600Z METAR SBRJ 191600Z 17008KT 9999 SCT020 BKN060 25/18 Q1021=
19/05/2012	SBRJ 191700Z METAR SBRJ 191700Z 15009KT 9999 SCT025 BKN070 24/18 Q1020=
19/05/2012	SBRJ 191800Z METAR SBRJ 191800Z 13013KT 9999 SCT025 23/17 Q1019=

Gráfico 5.6: METAR no aeródromo do Aeroporto Santos Dumont/RJ – SBRJ, durante o voo, em 19/05/2012.

**Nota 1:** As explicações sobre a leitura do METAR podem ser encontradas na página de internet da REDEMET.

## 5.4 Processamento e Análise dos Dados

Após o término dos voos, obteve-se 2 arquivos de dados contendo níveis de sinais em *Volts*, a partir do sinal gravado com o auxílio do *software Labview*, e 2 arquivos de dados contendo informações GPS, a partir do receptor GPS a bordo da aeronave.

Após trabalhos iniciais de formatação das bases de dados, foram checados quais intervalos de dados contendo níveis de sinais em *Volts* seriam aproveitáveis em função dos dados GPS obtidos, uma vez que a aeronave utilizada estava em operação para inspeção do ILS<sup>40</sup> (*Instrument Landing System*) instalado no aeródromo do Aeroporto do Galeão e, conseqüentemente, não permitiu a gravação dos dados GPS durante todo o voo. A seleção inicial consistiu em identificar para quais trechos da base de dados do sinal gravado em *Volts* se poderia obter uma correlação, através da informação horária, com os dados GPS gravados durante o voo.

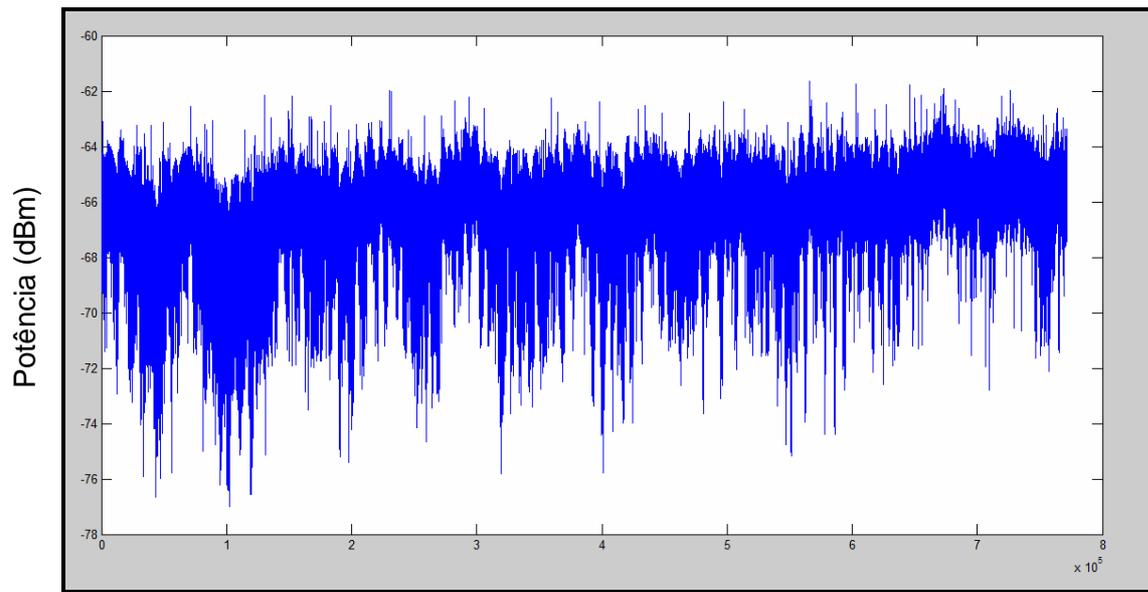
**Nota 1:** Os arquivos coletados pelo *software Labview* estavam sincronizados com o horário GPS.

Para converter de *Volts* para *dBm* os níveis de tensões coletadas foi utilizado o programa em *Matlab*<sup>41</sup> chamado “medição.m”. O algoritmo do programa “medição.m”, anexo A.1, leva em consideração a curva de calibração do analisador de espectro, obtida segundo o item 5.2.1. Após isto, por conveniência visual, em função dos gráficos obtidos a partir dos níveis de sinais coletados, dividiu-se a base de dados em 5 trechos, os quais chamaremos de Rota, de 1 a 5. Os gráficos de 5.7 a 5.11 mostram o sinal adquirido em cada trecho. O anexo A.2 contém o programa “distancia.m”, que calcula a distância percorrida pelo receptor a cada instante de aquisição.

---

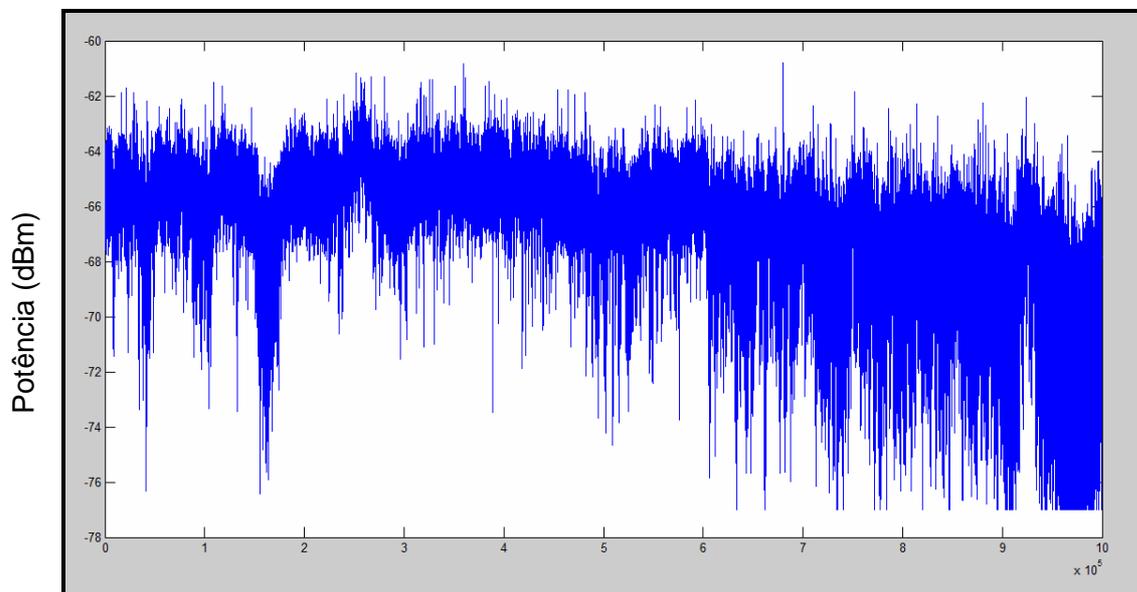
<sup>40</sup> ILS – *Instrument Landing System* é um sistema de aproximação por instrumentos, que dá uma orientação precisa ao avião que esteja pousando em determinada pista. Ele consiste em dois sistemas distintos, um deles mostra a orientação lateral do avião em relação à pista (localizer ou localizador), e o outro mostra o ângulo de descida, ou orientação vertical (*glideslope*).

<sup>41</sup> *Matlab* – MATrix LABoratory: É um *software* interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico. Integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em um ambiente fácil de usar.



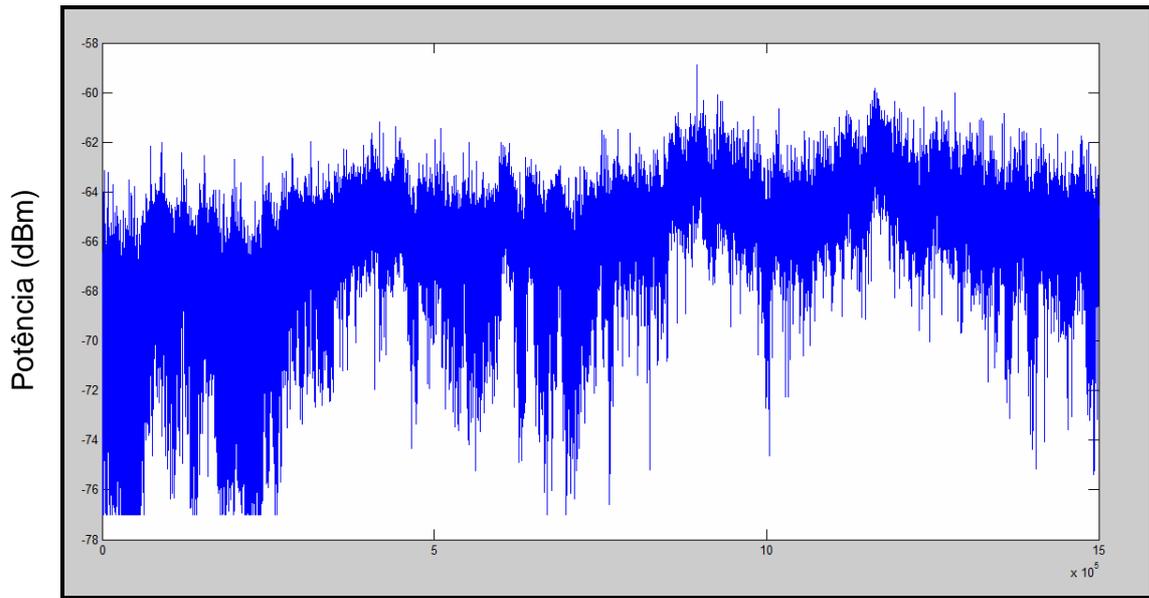
Número de Aquisições

Gráfico 5.7: Sinal coletado no trecho definido como Rota 1.



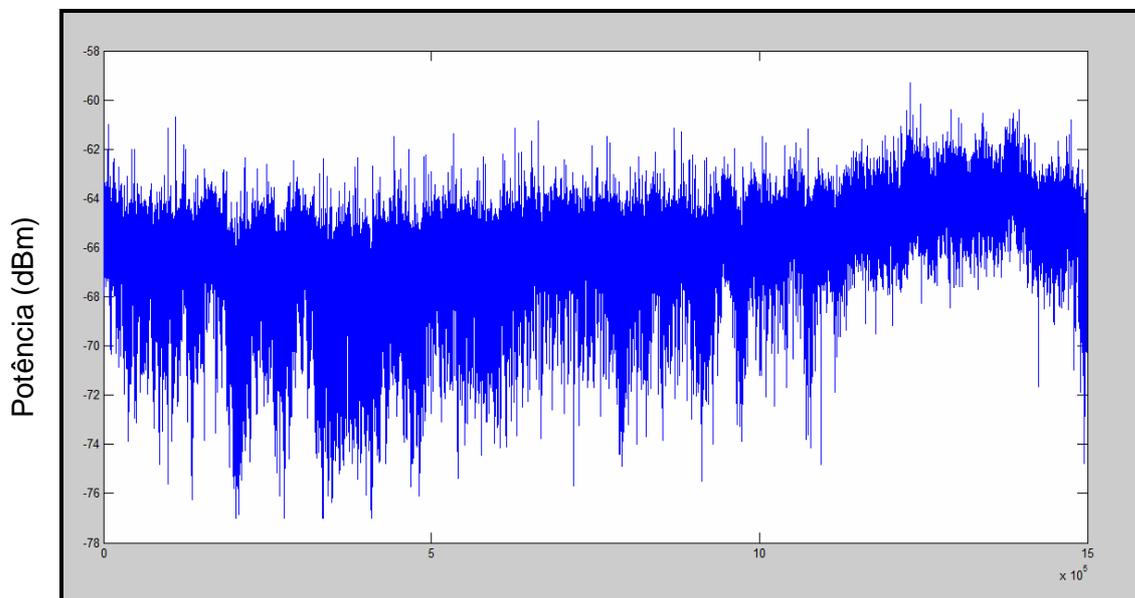
Número de Aquisições

Gráfico 5.8: Sinal coletado no trecho definido como Rota 2.



Número de Aquisições

Gráfico 5.9: Sinal coletado no trecho definido como Rota 3.



Número de Aquisições

Gráfico 5.10: Sinal coletado no trecho definido como Rota 4.

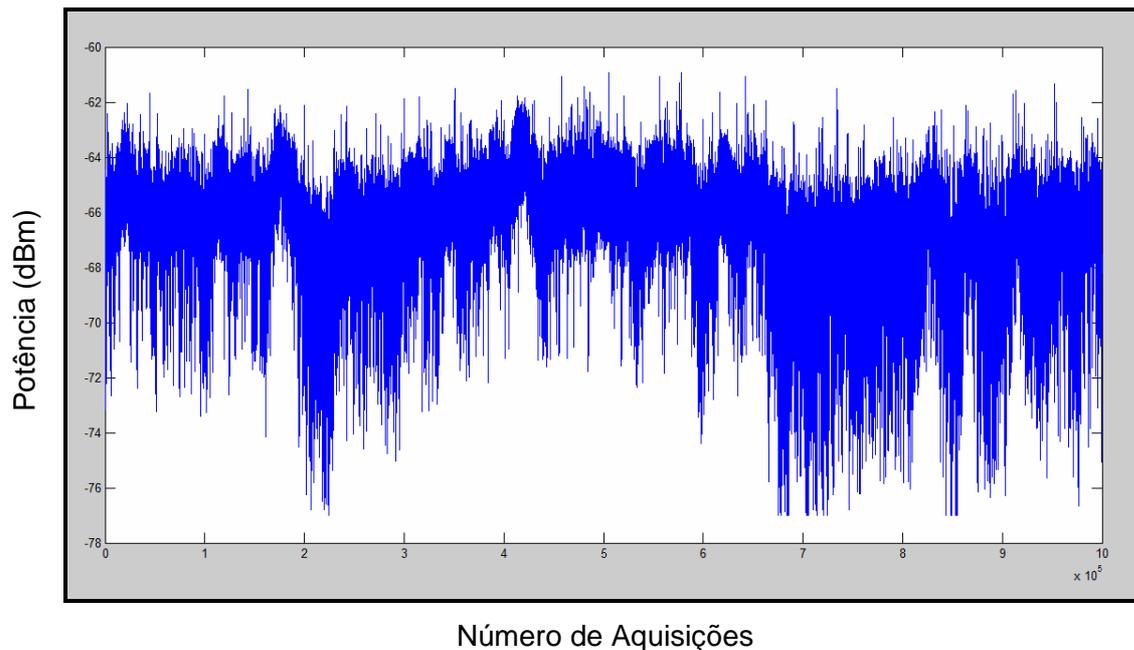


Gráfico 5.11: Sinal coletado no trecho definido como Rota 5.

Segundo Lee [39], um método adequado para a determinação das potências médias locais, é tomar setores de  $20$  a  $40 \lambda$ , onde o desvanecimento lento se apresenta, praticamente, constante. Baseado nisso e na observação gráfica do sinal medido, tomado a intervalos de  $20$  a  $40 \lambda$ , onde o nível de sinal manteve um comportamento médio aproximadamente constante, dividiram-se as rotas em setores com o comprimento máximo sugerido, ou seja,  $40 \lambda$ , objetivando reduzir ao máximo o número de setores por rota, em função da grande quantidade de dados gravados.

Conhecendo as rotas e o tamanho dos setores, iniciou-se o desenvolvimento lógico que deu origem aos programas em linguagem *Matlab* “setores\_rota.m” e “setores.m”, constantes dos Anexos A.3 e A.4, respectivamente, que serviram como ferramentas para tratamento e obtenção dos dados imprescindíveis às análises estatísticas às quais se objetiva a presente dissertação.

Inicialmente, se fez necessário o conhecimento da distância horizontal entre cada instante de aquisição. Esse cálculo foi obtido através da diferenciação dos dados de latitude e longitude da amostra atual em relação à amostra anterior, resultando em uma distância horizontal  $k$ , que é uma constante criada no programa *Matlab* “distancia.m”. A fim de calcular a distância real, percorrida pelo receptor, faz-se necessária a inclusão da informação de altitude de cada instante de aquisição e, assim, por geometria plana, se obtém a distância de cada ponto em relação ao início da rota, conforme pode ser observado na rotina do citado programa.

**Nota 2:** Para os cálculos de distância percorrida, considerou-se o raio de curvatura da Terra<sup>42</sup> igual a 6.371 km.

Através da lógica de processamento, constante no programa “setores\_rota.m”, que se utiliza de uma “regra de três” entre as distâncias de cada ponto em relação à origem da rota e o tamanho do setor, obtém-se as latitudes e longitudes em graus decimais, as altitudes em metros e os instantes de tempo em segundos de cada setor a ser plotado no *software Google Earth*.

Para dar prosseguimento à extração de informações necessárias às análises que se pretende, conforme dito anteriormente, foi desenvolvido em *Matlab* o programa “setores.m”, objetivando setorizar em  $40 \lambda$  as amostras aquisitadas e obter as 3 bases de dados, abaixo relacionadas:

- pot\_setorxx: Contém os níveis de potência em *dBm* de cada sinal adquirido, considerando cada linha um setor de comprimento igual a  $40 \lambda$ .
- pos\_setorxx: Contém a distância em metros do receptor em relação ao transmissor e o nível de potência em *dBm*, para cada um dos setores definidos em “pot\_setorxx”. Para a obtenção da distância do receptor em relação ao transmissor foi necessário converter, de graus decimais para graus radianos, as latitudes e as longitudes fornecidas pelo receptor GPS, conforme equações (5.8) e (5.9):

$$Lat_{gr} = Lat_{gd} \times \pi / 180 \quad (5.8)$$

$$Lon_{gr} = Lon_{gd} \times \pi / 180 \quad (5.9)$$

onde

$Lat_{gr}$  é a latitude em graus radianos,

$Lat_{gd}$  é a latitude em graus decimais,

$Lon_{gr}$  é a longitude em graus radianos, e

$Lon_{gd}$  é a longitude em graus decimais.

---

<sup>42</sup> É sabido que a Terra não é uma esfera perfeita, logo não há um único valor que sirva como seu raio natural. Sendo a Terra, quase esférica, vários valores, desde o raio polar (de 6 357 km) ao raio equatorial (6 378 km) são utilizados, de acordo com a necessidade. Modelos que assumem a Terra como uma esfera, utilizam um raio médio de 6 371 km.

- pos\_GPSxx: Contém a latitude e a longitude em graus decimais do receptor (a partir dos dados de latitude e longitude obtidas através do programa “setores\_rota.m”) e a potência média em *dBm* de cada setor, ou seja, a soma do nível de potência de todas as amostras do setor dividida pelo número de amostras do setor. Estes dados, aliados à altitude do setor, obtida anteriormente, serão utilizados para a visualização dos setores no *software Google Earth*.

**Nota 3:** Em função da velocidade variável do receptor os setores não possuem tamanhos fixos. Assim, para setores onde a velocidade do receptor era mais alta, se obteve um número menor de amostras e para setores onde a velocidade do receptor era mais baixa o inverso pode ser observado.

Após processamento, foi possível quantificar o número de setores obtidos para cada rota. A tabela 5.8 mostra o citado quantitativo.

Rota Nº.	Quantidade de Setores
1	260
2	340
3	504
4	520
5	337

Tabela 5.8: Quantidade de setores por rota.

Com o término dos processamentos acima descritos, foi possível construir as bases de dados contendo as informações de latitude e longitude em graus radianos, a altitude e a distância percorrida pelo receptor em metros e a potência média em *dBm* de cada setor, para todas as rotas.

Para visualizar o caminho percorrido pelo receptor, a bordo da aeronave, no *software Google Earth*, foram utilizados os programas em linguagem Matlab “google\_earth.m” e “gscatter.m”, itens A.5 e A.6 dos anexos. As figuras de 5.16 a 5.24, geradas no *Google Earth*, representam o caminho percorrido pelo receptor para cada rota ou conjunto de rotas, conforme caminho colorido, predominantemente, em verde. O comprimento [L] de cada rota consta da tabela 5.10. As rotas são formadas por conjuntos de setores e cada setor é formado por um conjunto de amostras, correspondentes a um percurso de comprimento igual a  $40\lambda$ , ou seja:

$$\text{Comprimento do setor} = 40\lambda = 40 \times \frac{c}{f} = 40 \times \frac{(3 \times 10^8)}{1140 \times 10^6} = 10,53 \text{ m} \quad (5.10)$$

onde:

$$c = \text{Velocidade da luz} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$f = \text{frequência de transmissão} = 1140 \times 10^6 \text{ Hz}$$

Desta forma, os setores foram representados no *software Google Earth* por um ponto colorido, obedecendo à escala de cores mostrada na tabela 5.9.

PARÂMETROS	CÓDIGO HEXADECIMAL	COR
Menor que -74 dBm	FF0000	
Maior ou igual a -74 dBm e menor que -72 dBm	FF3C00	
Maior ou igual a -72 dBm e menor que -70 dBm	FF9600	
Maior ou igual a -70 dBm e menor que -68 dBm	FFFF00	
Maior ou igual a -68 dBm e menor que -66 dBm	96FF00	
Maior ou igual a -66 dBm e menor que -64 dBm	00FF00	
Maior ou igual a -64 dBm e menor que -62 dBm	00B400	
Maior ou igual a -62 dBm	005000	

Tabela 5.9: Escala de cores utilizadas no *Software Google Earth* para a representação do nível de potência média recebida em cada setor.

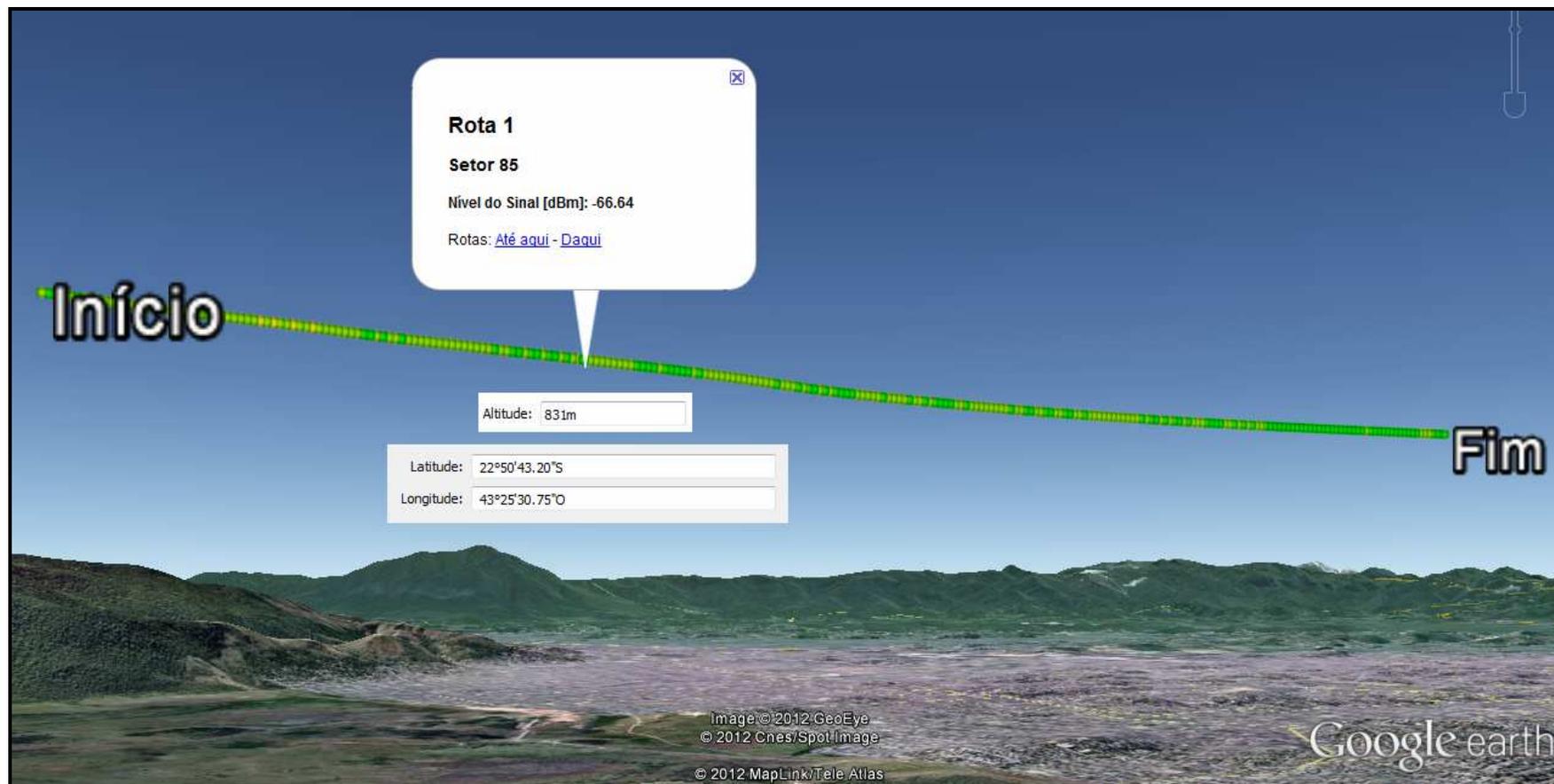


Figura 5.16: Visão 3D da Rota 1 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 2.737,53 m).

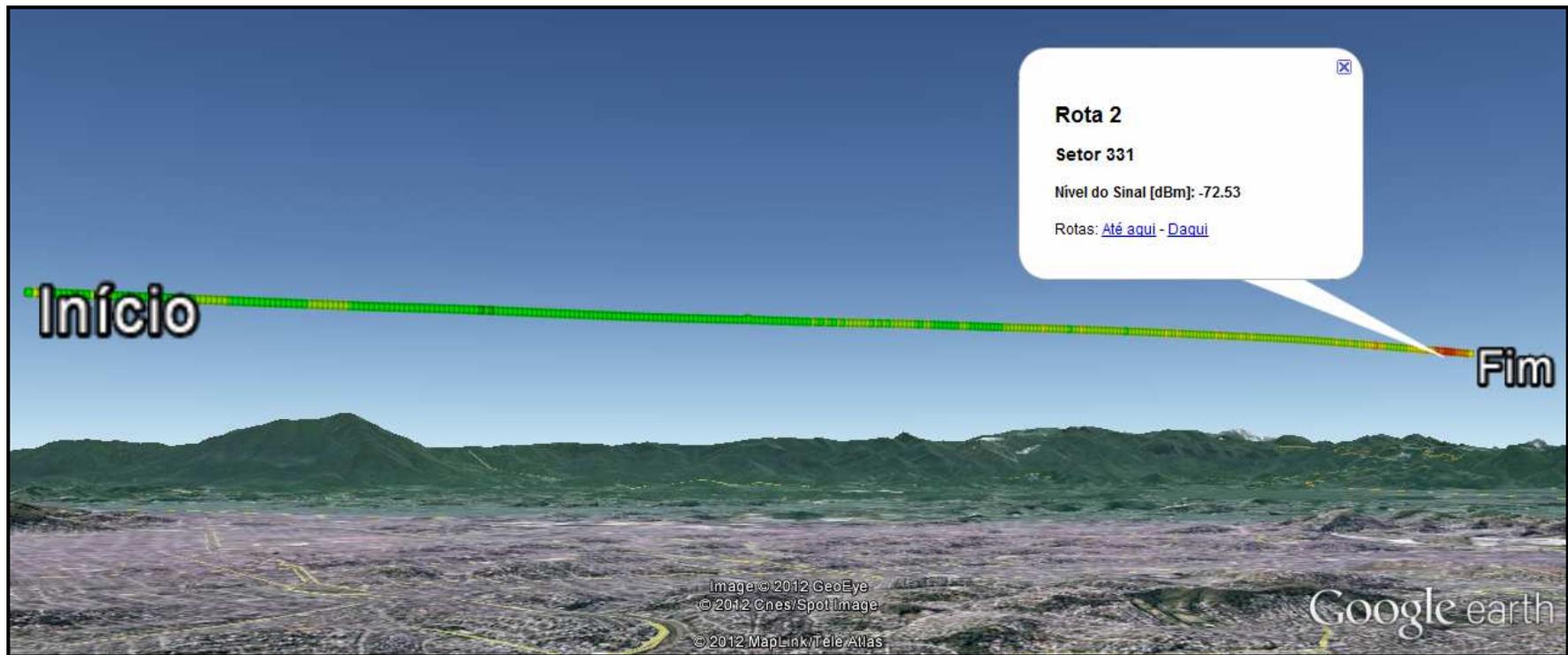


Figura 5.17: Visão 3D da Rota 2 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 3.585,68 m).

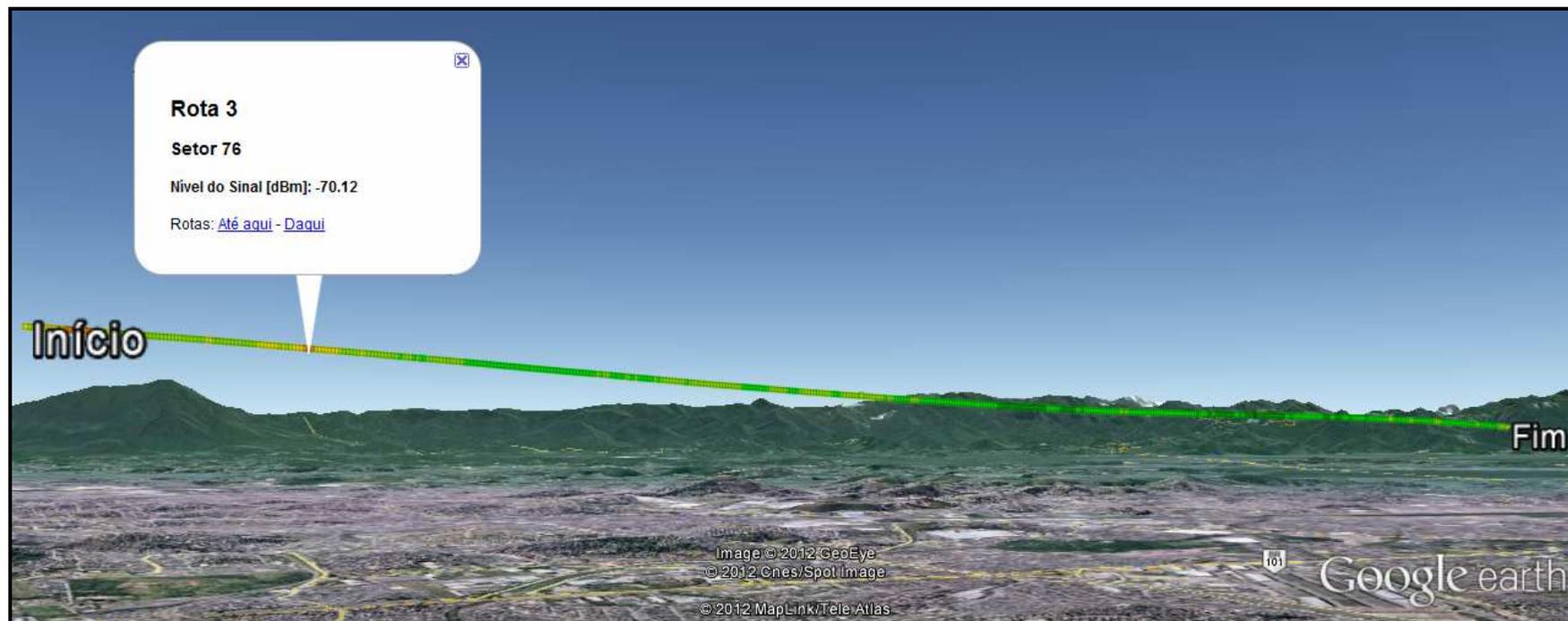


Figura 5.18: Visão 3D da Rota 3 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 5.312,53 m).

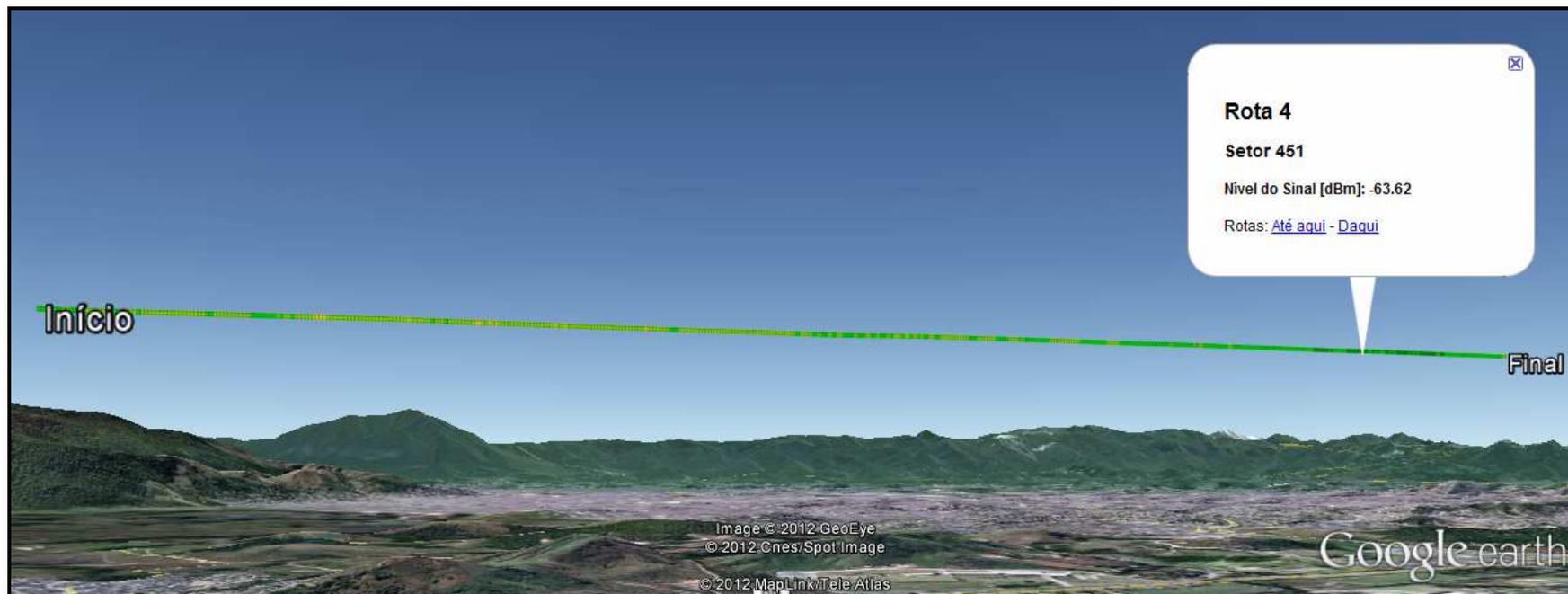


Figura 5.19: Visão 3D da Rota 4 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 5.476,98 m).



Figura 5.20: Visão 3D da Rota 5 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 3.556,87 m).



Figura 5.21: Visão 2D das Rotas 1, 2 e 3 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 11.635,74 m).



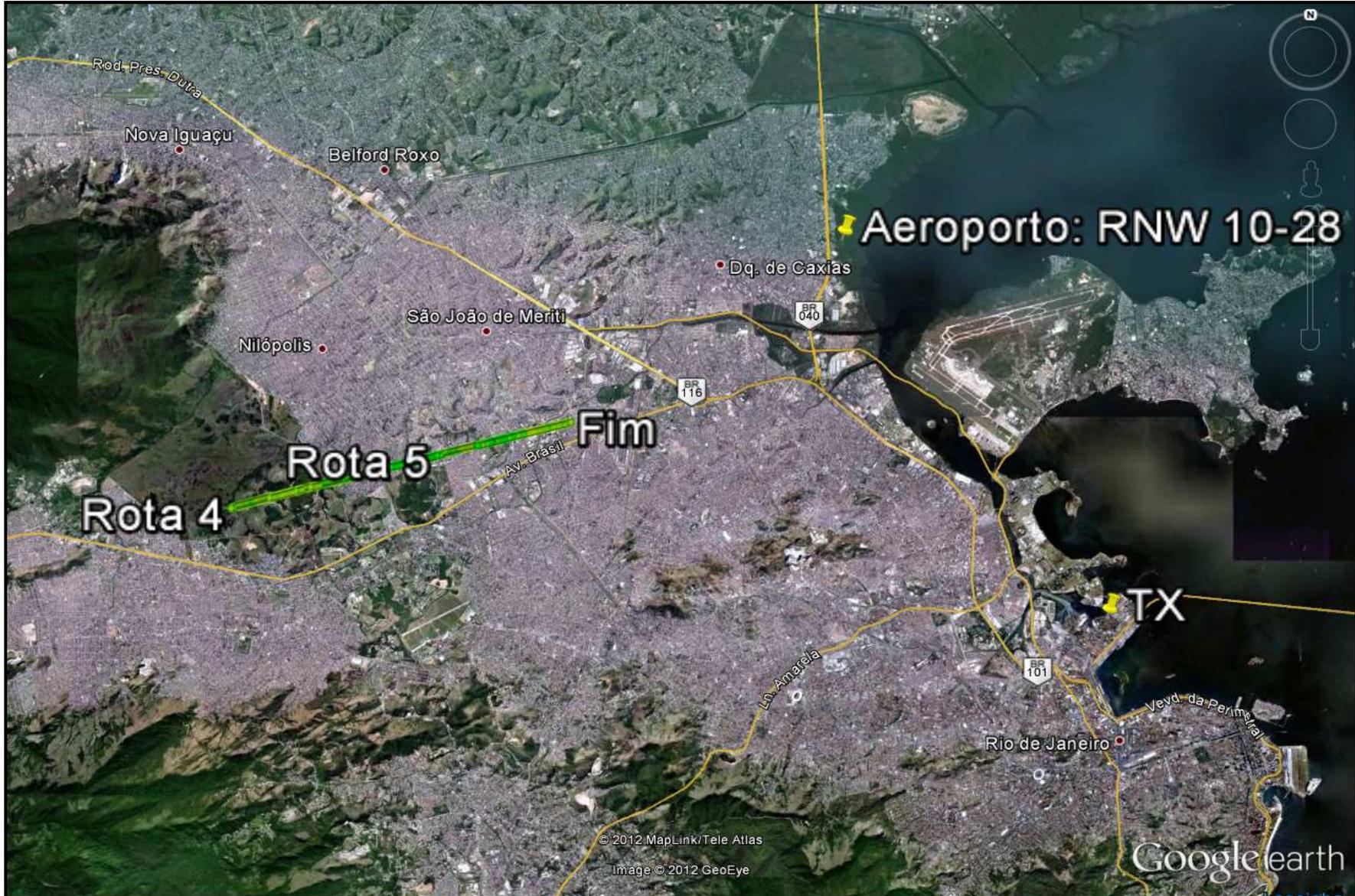


Figura 5.23: Visão 2D das Rotas 4 e 5 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 9.033,85 m).

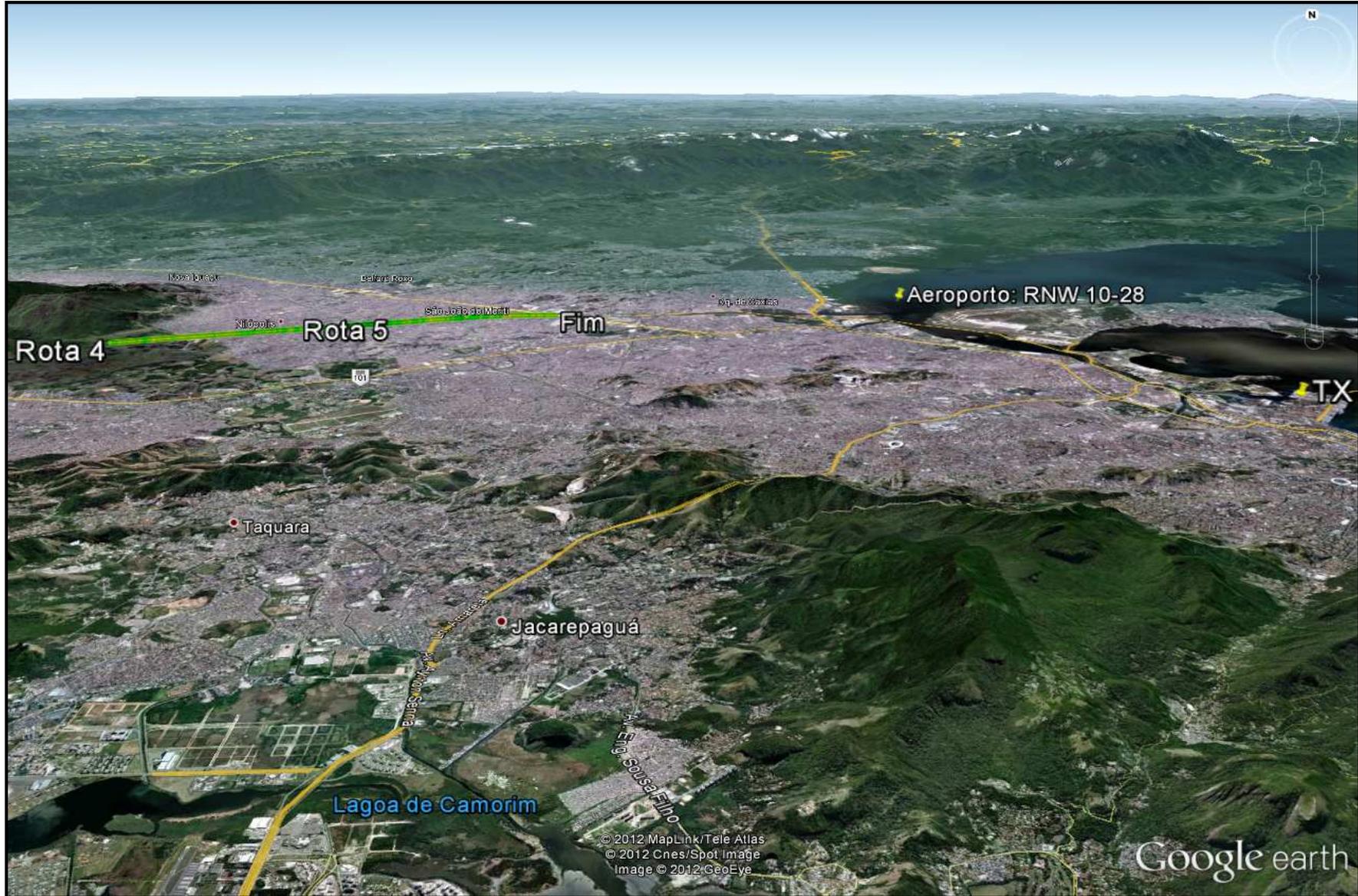


Figura 5.24: Visão 3D das Rotas 4 e 5 – Aproximação para pouso no Aeroporto Galeão (L = 9.033,85 m).

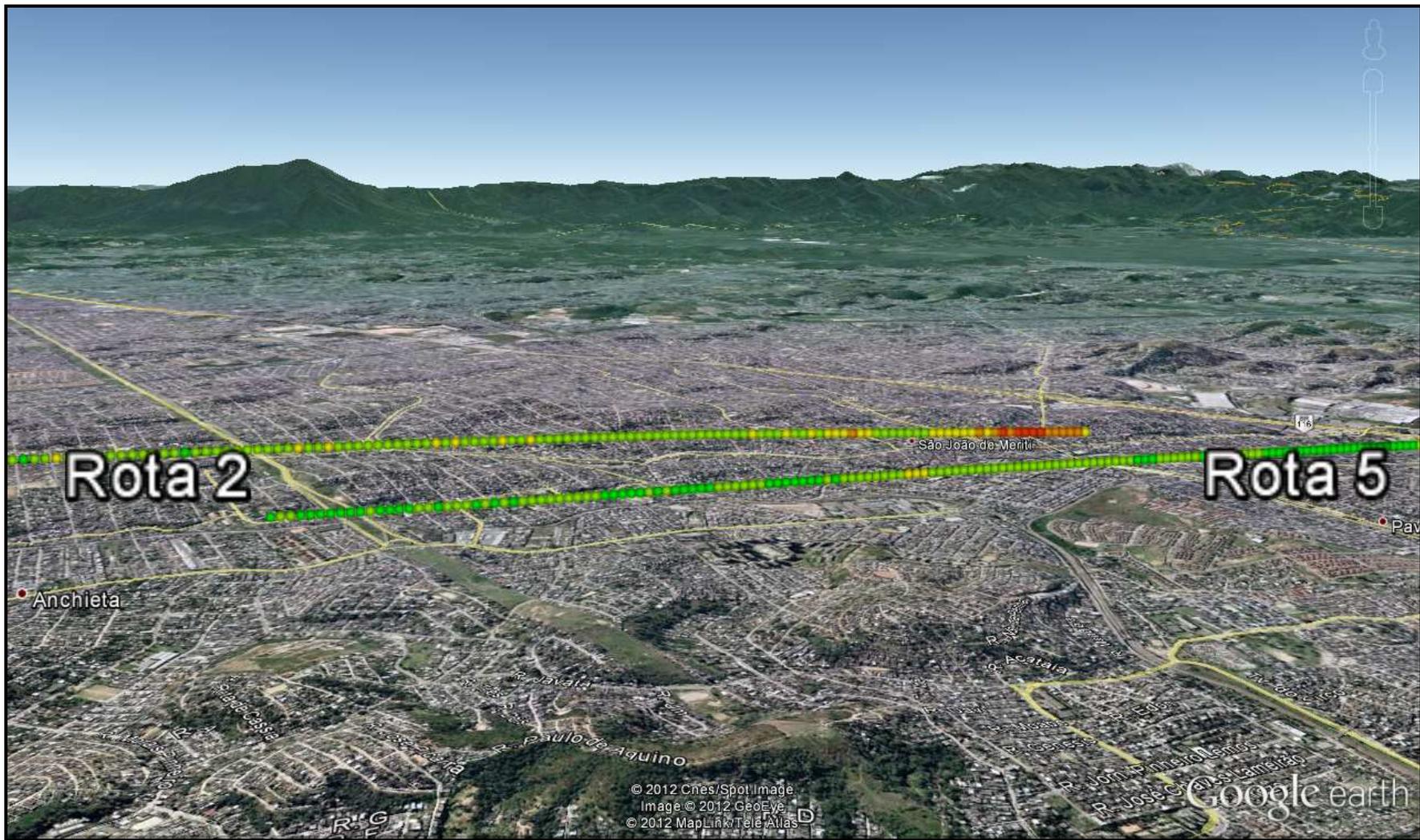


Figura 5.25: Visão 3D de parte das Rotas 2 e 5.

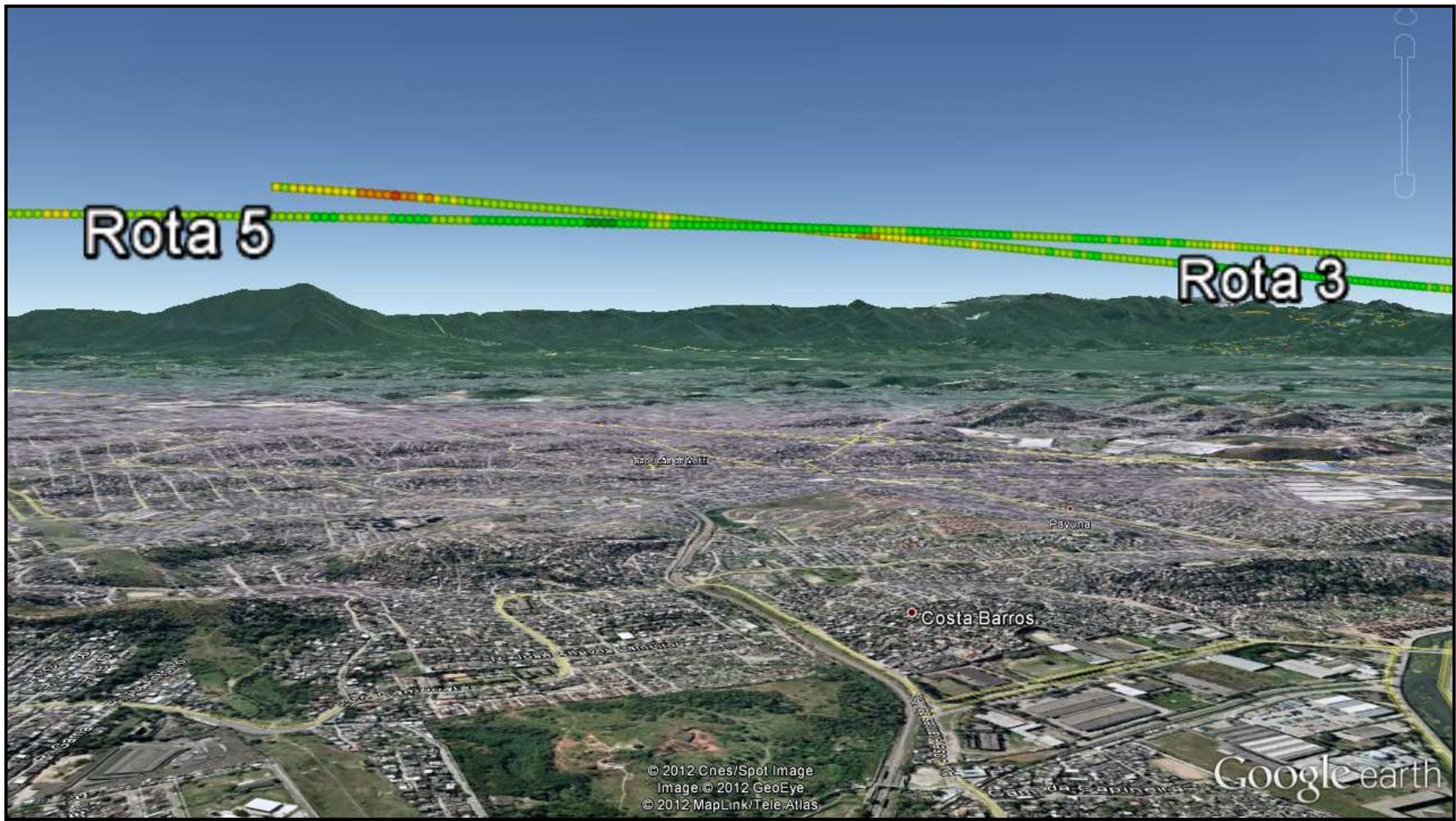


Figura 5.26: Visão 3D de parte das Rotas 3 e 5.

É sabido que as rotas analisadas, nesta dissertação, não apresentam obstruções entre o sistema de transmissão e recepção, conforme figuras 5.21 a 5.24, portanto, o ambiente escolhido encontra-se, predominantemente, em visada direta. Deve-se observar, entretanto, a queda de potência em alguns setores no final da rota 2 e início da rota 3, que curiosamente não foi observado na rota 5, que engloba as latitudes e longitudes dos setores afetados das rotas 2 e 3, porém com ligeira diferença de altitudes, conforme pode ser visto nas figuras 5.25 e 5.26. Possivelmente esta queda de potência está atrelada à existência dos conjuntos montanhosos do Morro do Alemão, Morro do Caricó, Morro do Juramento, Morro da Serrinha e Morro do Sapê (pico mais alto em torno de 170 metros em relação ao nível do mar – Fonte: *Google Earth*), que embora mais baixos do que a altitude média de voo (vide tabela 5.10), geraram reflexões que alteraram o nível do sinal recebido.

Rota Nº	Altitude Inicial (metros)	Altitude Final (metros)	Altitude Média (metros)	Comprimento [L] (metros)	Distância Inicial em Relação ao TX (metros)	Distância Final em Relação ao TX (metros)	Distância Percorrida (metros)
1	901	758	807	2.737,53	22.761,99	20.269,51	2.492,48
2	758	715	745	3.585,68	20.253,15	17.126,50	3.126,65
3	715	434	552	5.312,53	17.105,61	12.867,44	4.238,17
4	674	672	675	5.476,98	22.895,60	17.987,90	4.907,70
5	672	583	655	3.556,87	17.969,90	14.997,97	2.971,93

Tabela 5.10: Informações úteis de cada Rota.

Como visto no capítulo 4, a Distribuição Rayleigh, normalmente, se ajusta em ambientes onde existe um número suficientemente grande de componentes de multipercursos com diferentes fases e potências próximas, ou seja, quando não há uma componente dominante, já a Distribuição Rice é a mais adequada para ambientes com múltiplos percursos em que existe uma componente em visada direta, com intensidade muito superior às componentes de multipercurso, ou seja, quando o percurso direto é dominante, portanto, de acordo com a teoria, é de se esperar que na maioria dos setores, objetos de estudo desta dissertação, a Distribuição Rayleigh não seja a fdp de melhor ajuste para as análises de variabilidade em pequena escala, entretanto, a título de estudo, será utilizada como método de ajuste e posterior verificação. Ainda, conforme o citado capítulo, a Distribuição Nakagami-m é aplicável na caracterização de ambientes na faixa de HF (3 a 30 MHz) e que apresentam desvanecimentos mais severos e a Distribuição de Weibull é mais uma que pode ser

empregada para caracterizar o desvanecimento em um ambiente de multipercursos. Estas duas últimas distribuições não serão abordadas como métodos de ajustes durante o processamento dos dados. A Distribuição  $\alpha - \mu$ , que é dotada de peculiaridades, é uma distribuição mais geral e também não será abordada. Sabendo que o nível de sinal recebido, em todas as rotas, manteve um comportamento sem grandes variações, o processamento dos desvanecimentos em pequena escala do sinal obtido incluirá análises de ajuste segundo uma Distribuição Gaussiana (Log-normal), em comparação às distribuições de Rayleigh e Rice.

#### 5.4.1 Desvanecimento em Pequena Escala, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração Média de Desvanecimentos.

Para dar início às análises estatísticas do desvanecimento em pequena escala, da taxa de cruzamento de nível e da duração média de desvanecimentos do sinal coletado, foi utilizado o programa “desvanecimento\_peq\_escala.m”, item A.7 dos anexos. Este programa utiliza como dados de entrada a base de dados “pot\_setorxx” gerada pelo programa “setores.m” e uma base de dados chamada “vetor\_posição”, que contém em cada uma de suas linhas a quantidade máxima de dados úteis, isto é, diferentes de zero, presente na base de dados “pot\_setorxx”. Como dito anteriormente, os setores possuem tamanhos diferentes, logo cada linha da base de dados “pot\_setorxx” possui um tamanho útil diferente. O programa em Matlab “posição\_setor.m”, anexo A.8, gerou a base “vetor\_posição”.

Segundo Bertoni [35], para separar o desvanecimento em pequena escala do sombreamento, deve-se dividir cada sinal coletado no setor de interesse (em *Volts*) pelo valor médio do nível de tensão do sinal recebido neste setor. Assim, para efeito de processamento, após ler as potências em *dBm*, presentes na base de dados “pot\_setorxx”, o programa “desvanecimento\_peq\_escala.m” se utiliza da fórmula matemática (5.11) para converter em *Watts* as potências adquiridas e, em seguida, através da fórmula (5.12), se obtém o valor de tensão correspondente, já que a impedância do sistema é conhecida ( $R = 50 \Omega$ ).

$$Pot_{Watts} = 0,001 \times \left( 10^{\frac{P_{dBm}}{10}} \right) \quad (5.11)$$

$$V_{Volts} = \sqrt{Pot_{Watts} \times R} \quad (5.12)$$

O programa “desvanecimento\_peq\_escala.m” gera três gráficos, para cada um dos setores, sendo eles:

- a) Comparação das estatísticas da PDF Rice (para o melhor fator  $K$ , isto é, para o  $K$  que melhor se ajusta ao sinal adquirido), Gauss e Rayleigh, em relação à PDF empírica, ou seja, em relação à pdf do sinal coletado,
- b) A taxa de cruzamento de nível normalizada para os modelos de Rice e Rayleigh, e
- c) A duração média de desvanecimentos normalizada.

O programa “desvanecimento\_peq\_escala.m” gera, também, a tabela “dados\_pdf\_teste\_qui\_rotax.mat”, que contém a base de dados necessária ao teste do qui-quadrado.

Em função da grande quantidade de setores existentes em cada rota e a fim de mostrar graficamente os resultados obtidos, decidiu-se por dividir cada rota em 3 segmentos medianos. Desta forma, cada rota será representada por quatro setores, assim definidos:

- Rota 1: Possui 260 setores, dos quais apenas os setores de número 01, 87, 173 e 260 estão, aqui, apresentados, o que divide a rota em 3 segmentos medianos. Assim, os gráficos 5.12 e 5.13 mostram os resultados obtidos nos referidos setores.
- Rota 2: Possui 340 setores, dos quais apenas os setores de número 01, 113, 226 e 340 estão, aqui, apresentados. Assim, os gráficos 5.14 e 5.15 mostram os resultados obtidos nos referidos setores.
- Rota 3: Possui 504 setores, dos quais apenas os setores de número 01, 168, 336 e 504 estão, aqui, apresentados. Assim, os gráficos 5.16 e 5.17 mostram os resultados obtidos nos referidos setores.
- Rota 4: Possui 520 setores, dos quais apenas os setores de número 01, 173, 346 e 520 estão, aqui, apresentados. Assim, os gráficos 5.18 e 5.19 mostram os resultados obtidos nos referidos setores.
- Rota 5: Possui 337 setores, dos quais apenas os setores de número 01, 112, 224 e 337 estão, aqui, apresentados. Assim, os gráficos 5.20 e 5.21 mostram os resultados obtidos nos referidos setores.

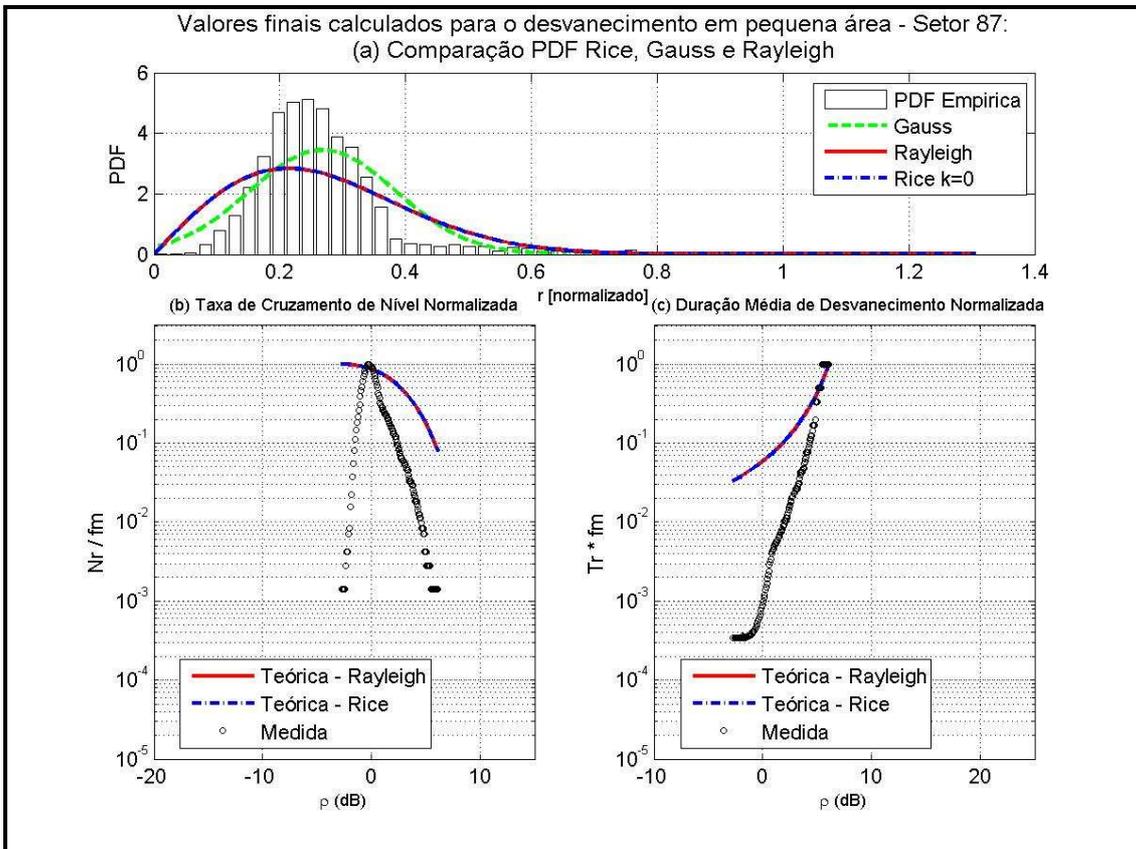
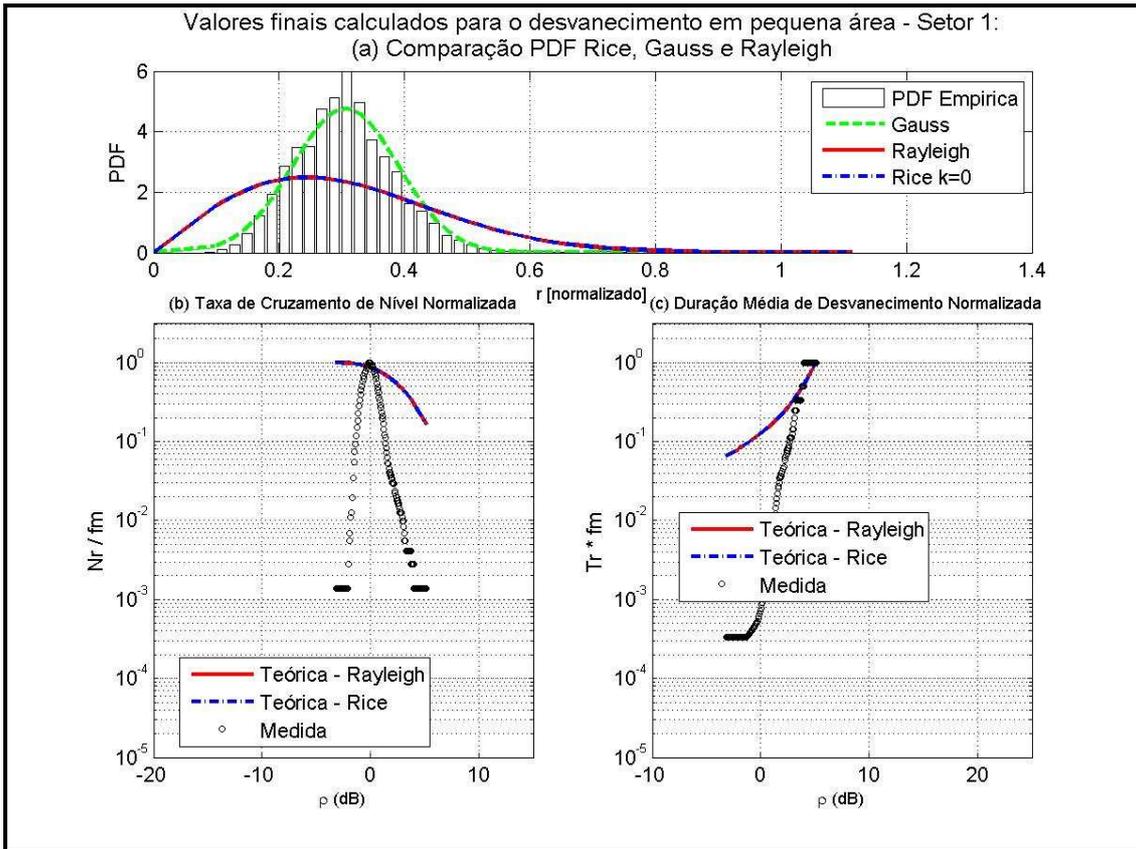


Gráfico 5.12: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 87 da Rota1.

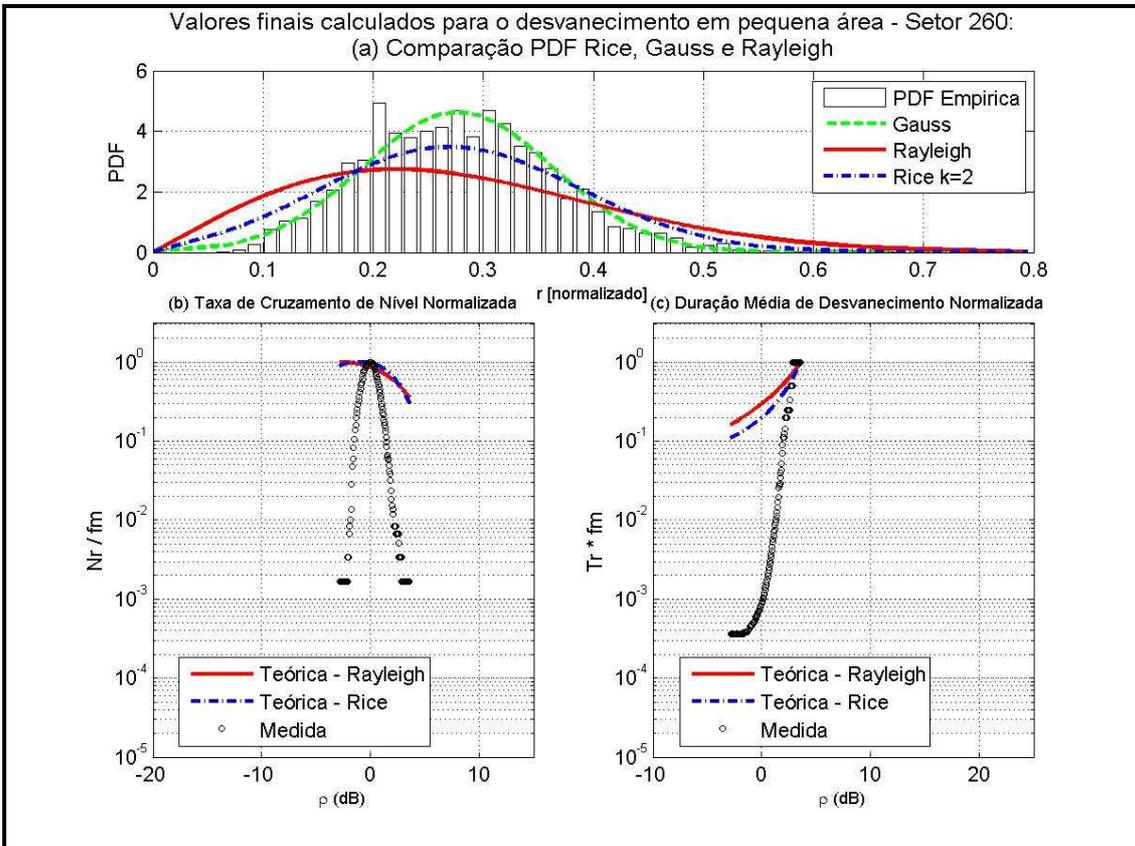
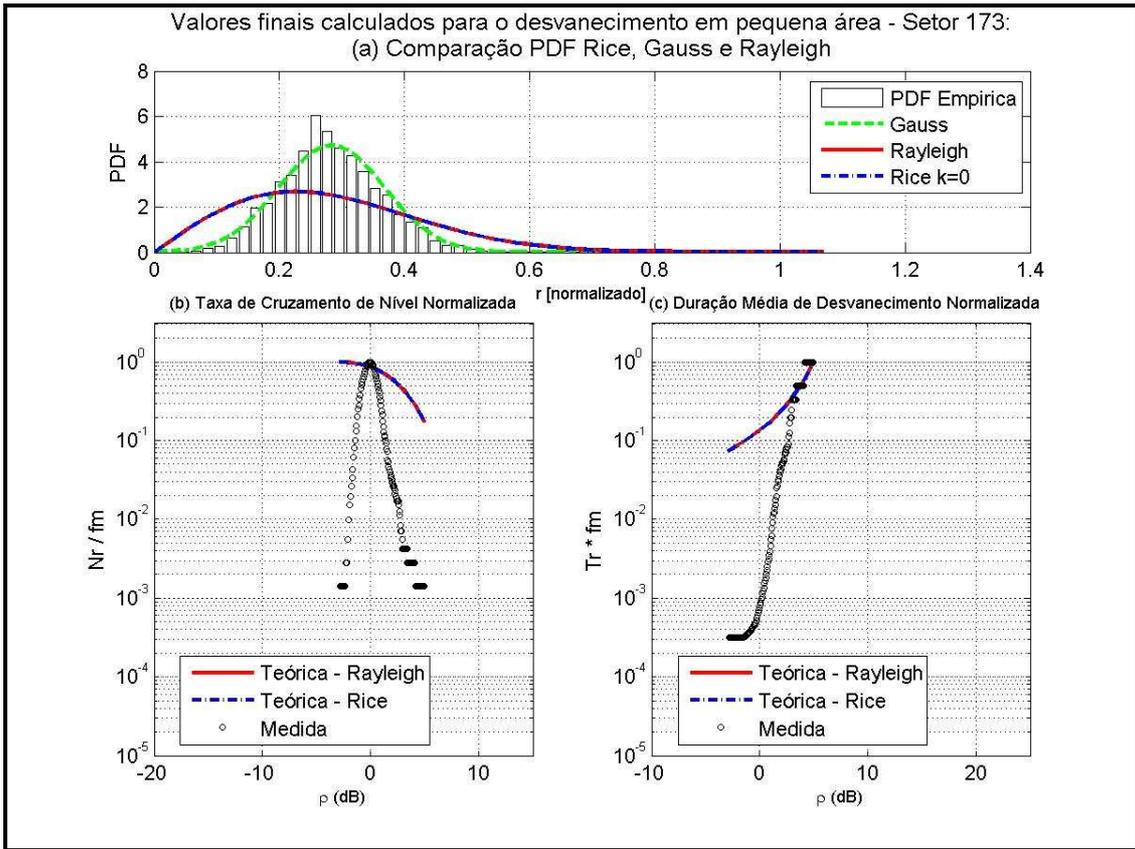


Gráfico 5.13: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 173 e 260 da Rota1.

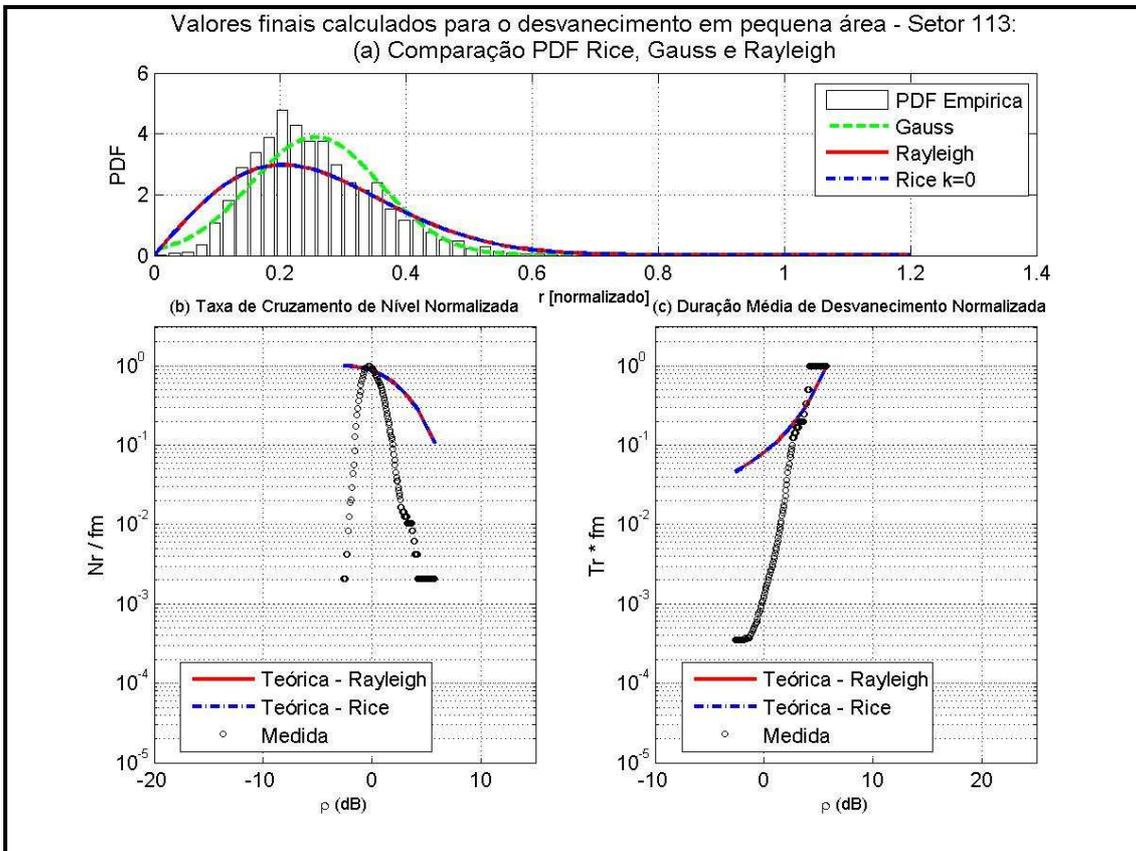
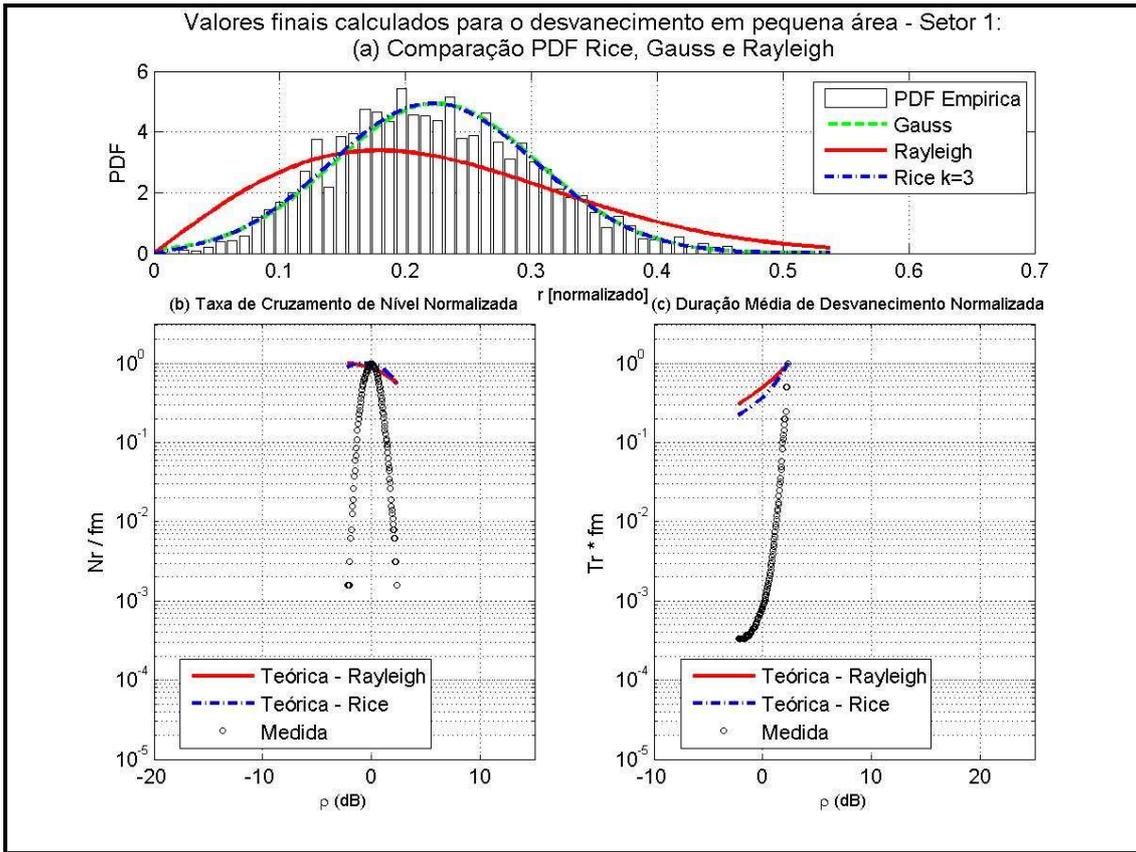


Gráfico 5.14: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 113 da Rota2.

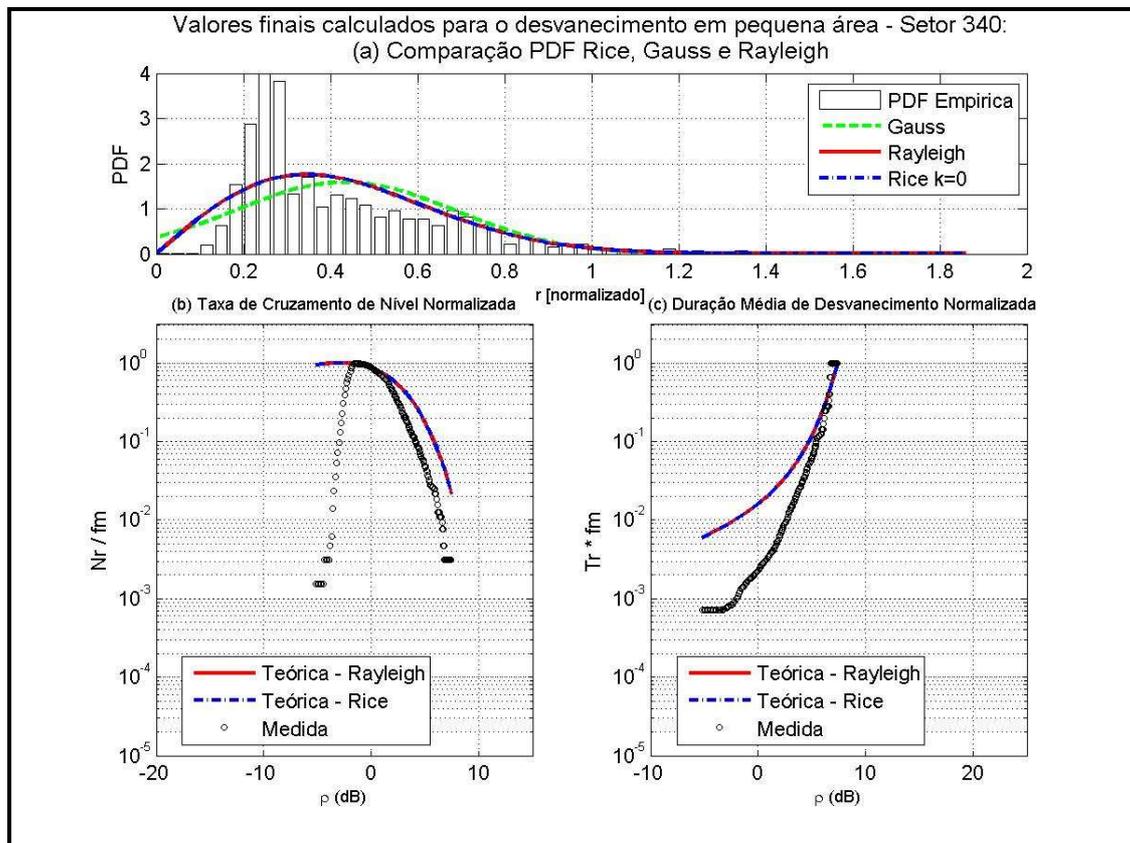
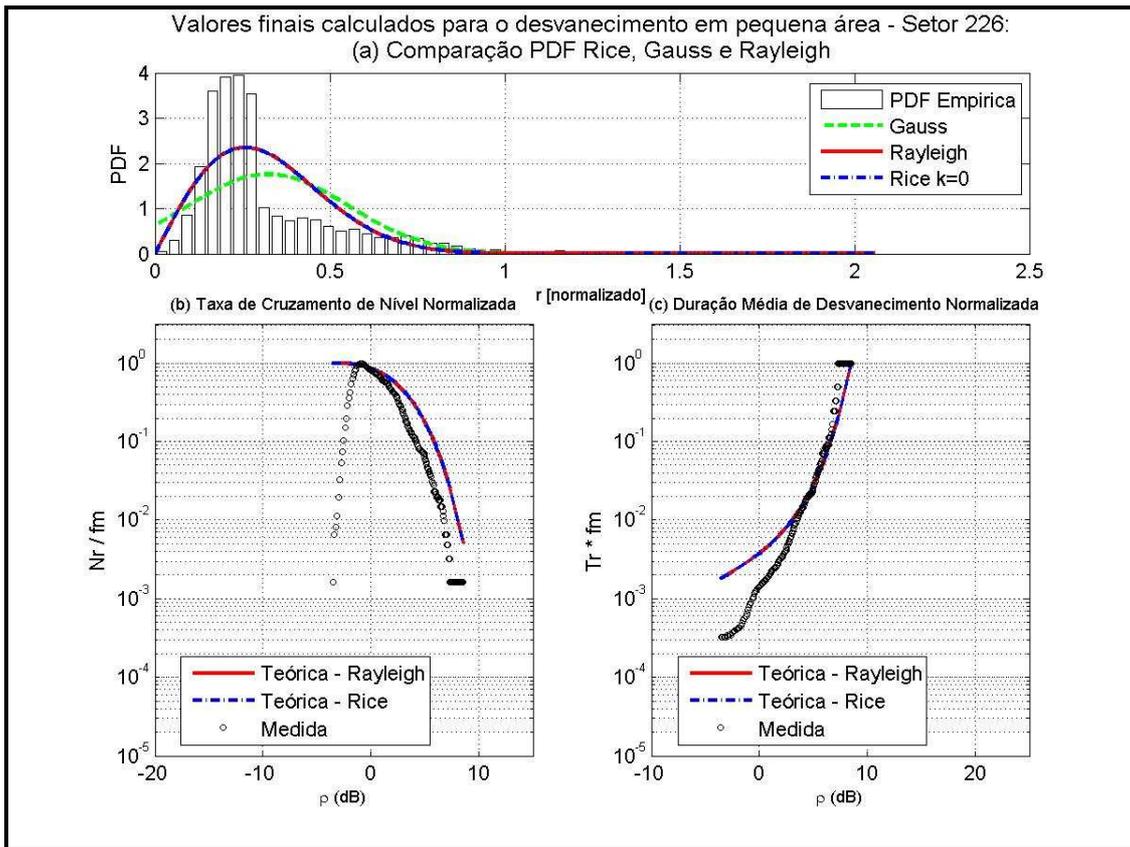


Gráfico 5.15: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 226 e 340 da Rota2.

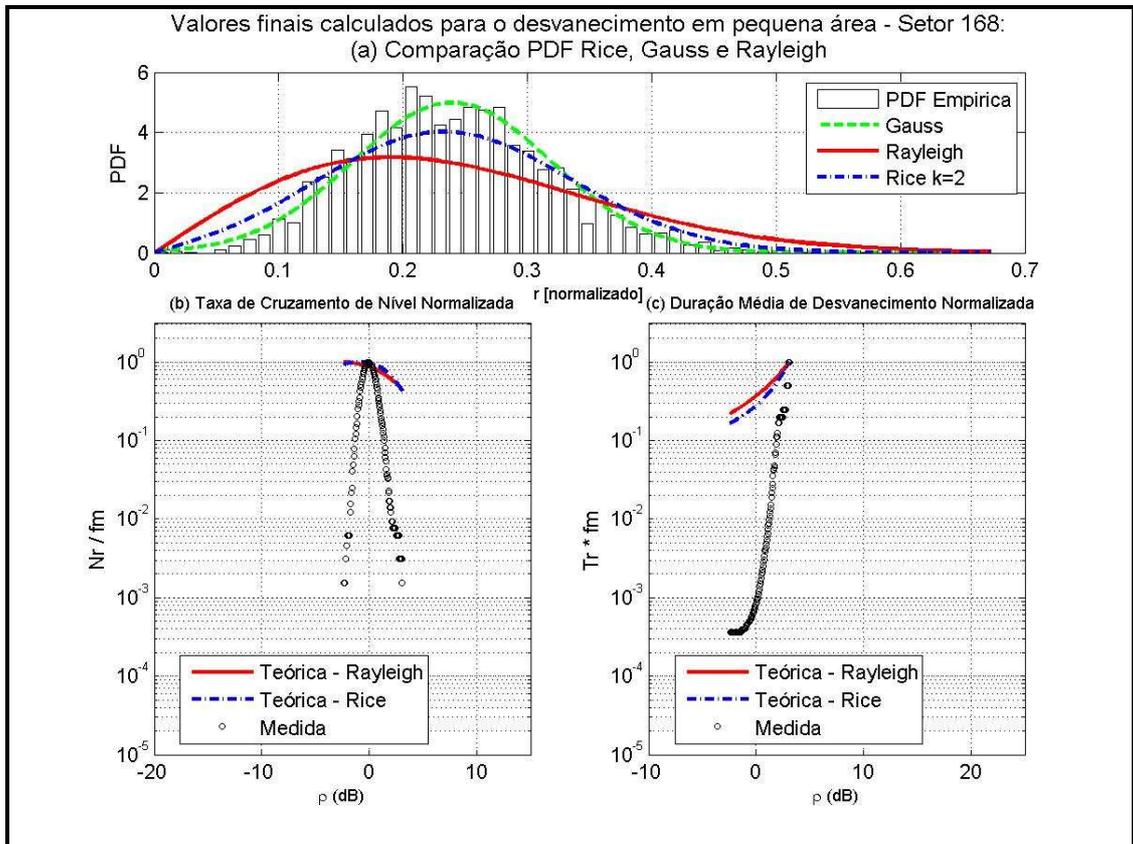
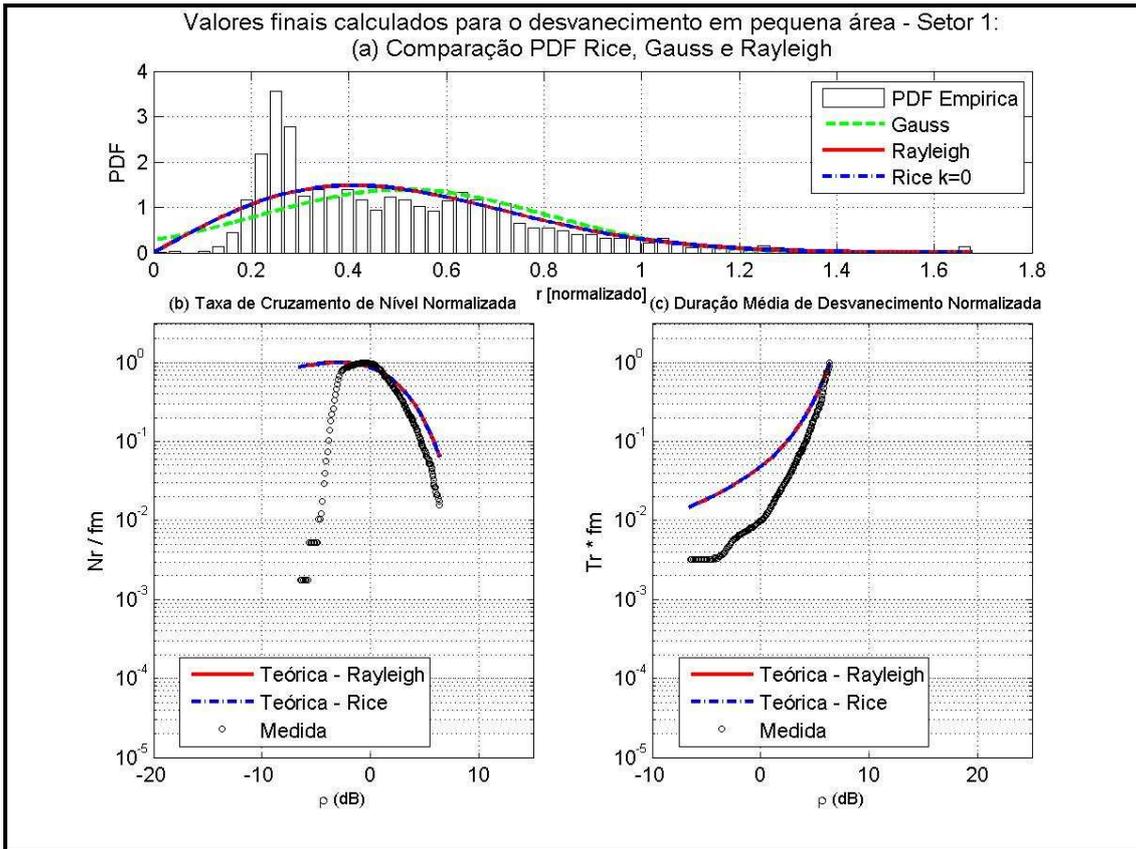


Gráfico 5.16: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 168 da Rota3.

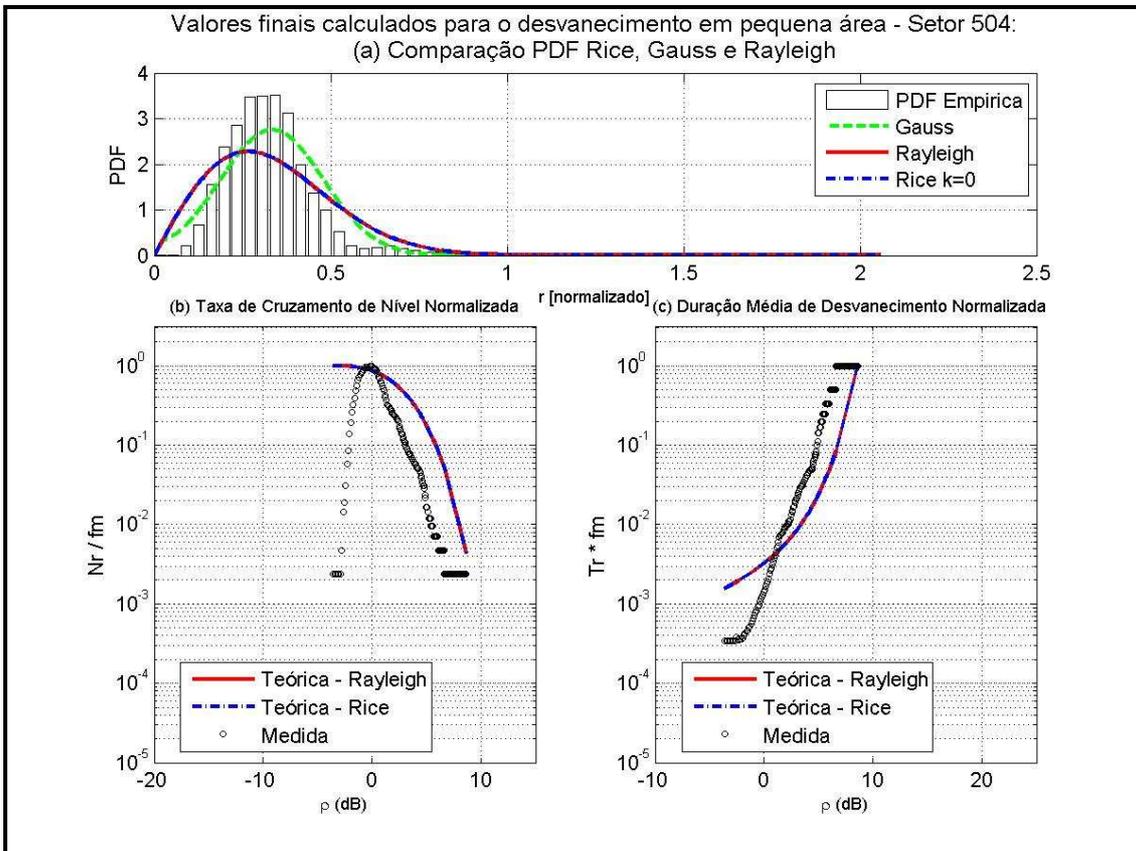
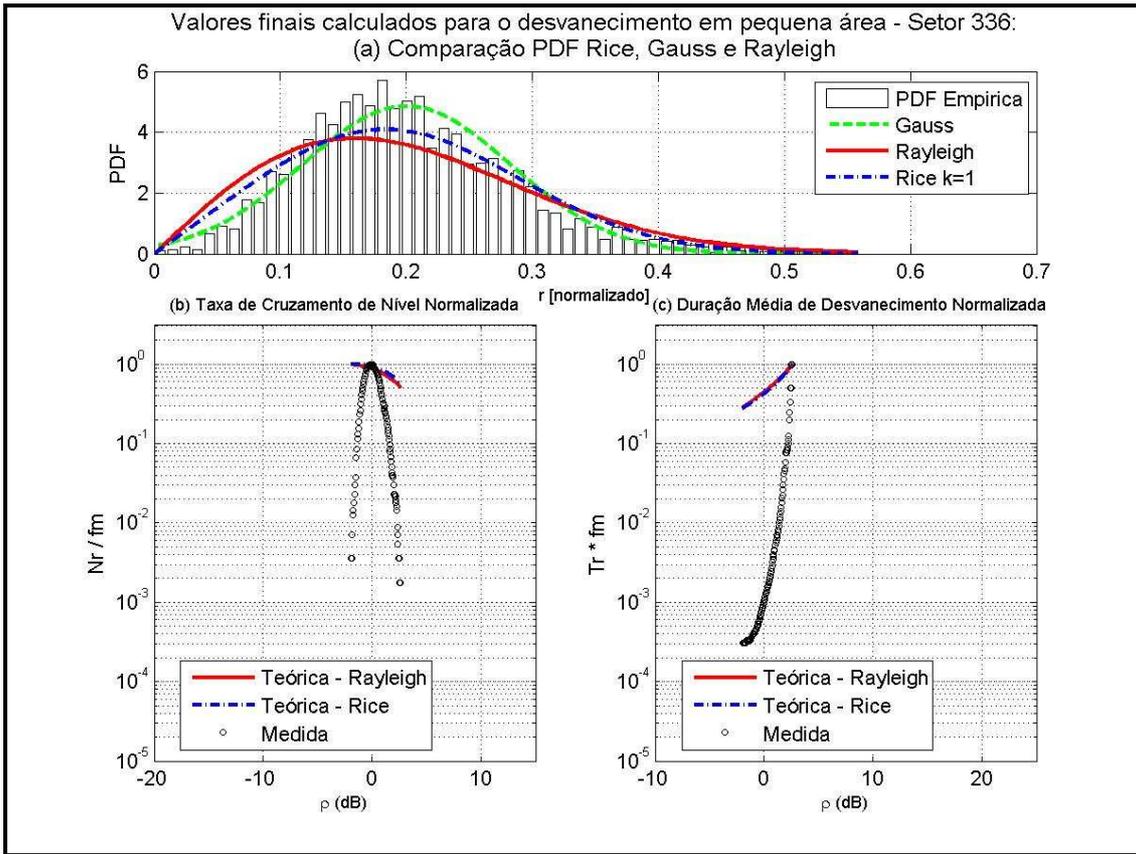


Gráfico 5.17: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 336 e 504 da Rota3.

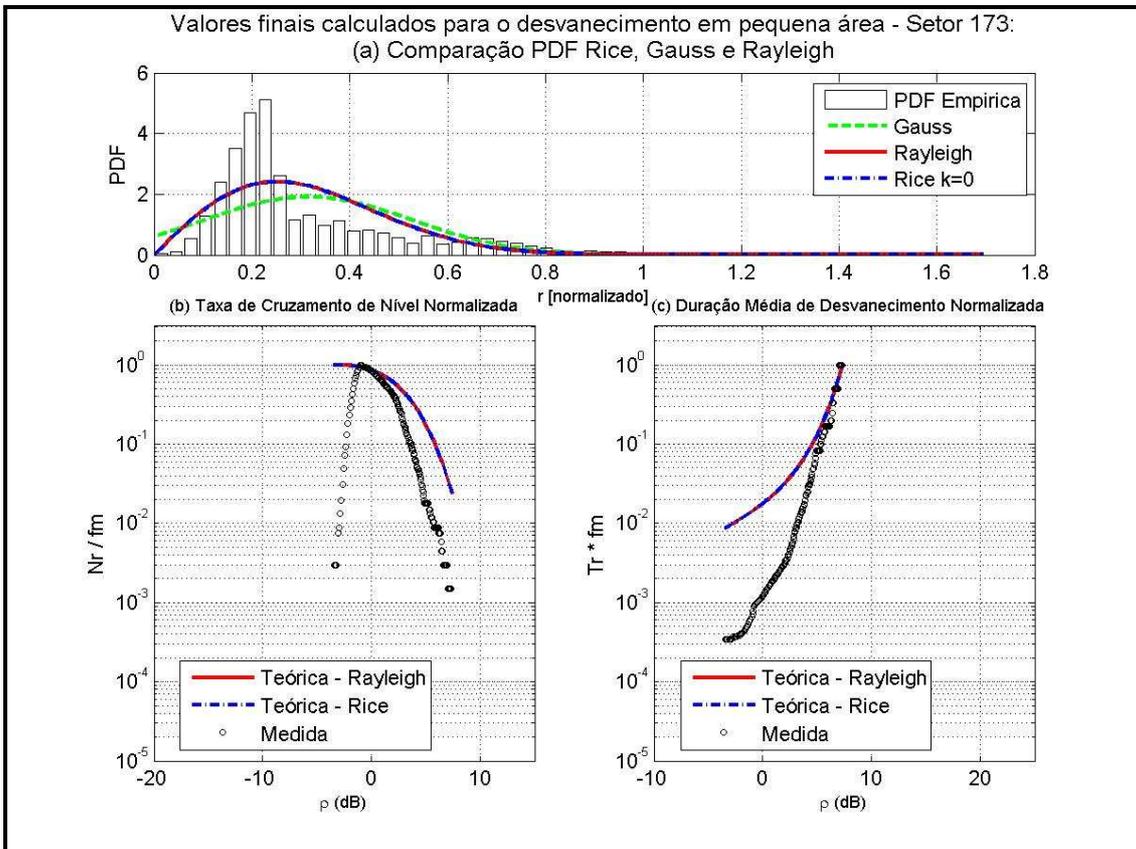
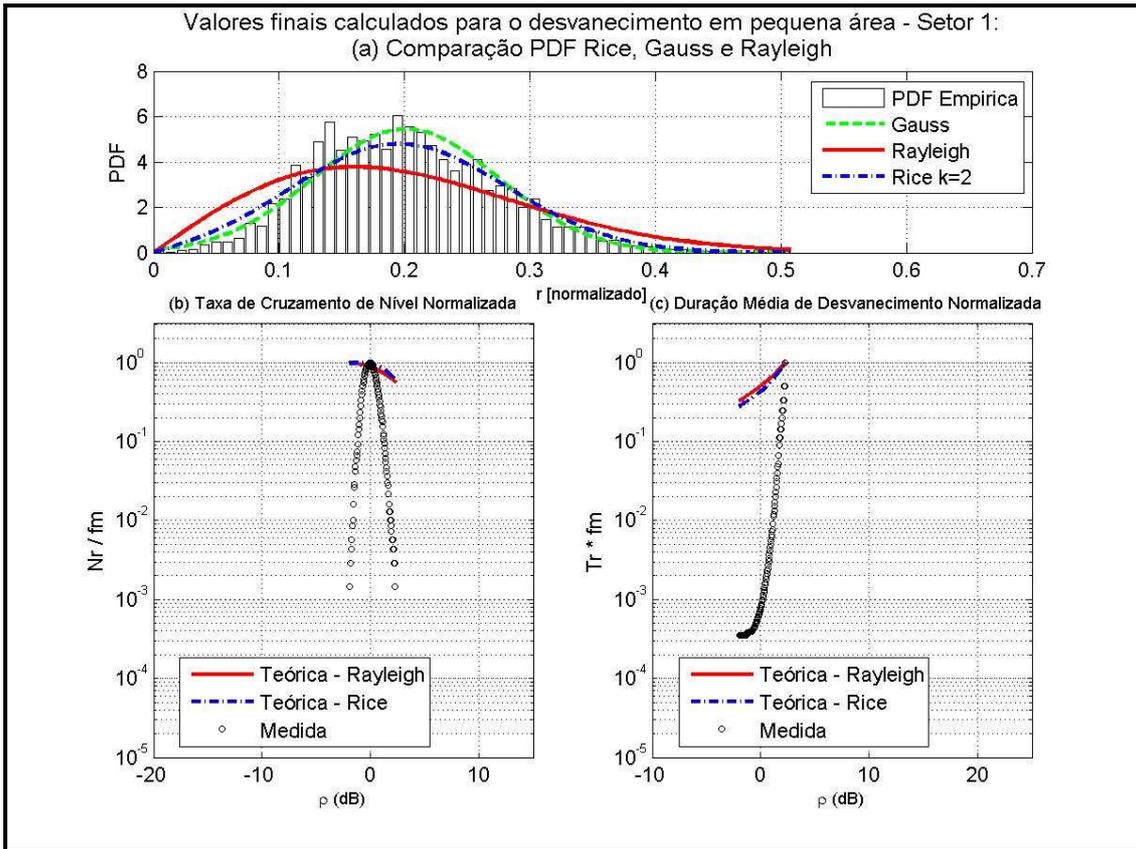


Gráfico 5.18: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 173 da Rota4.

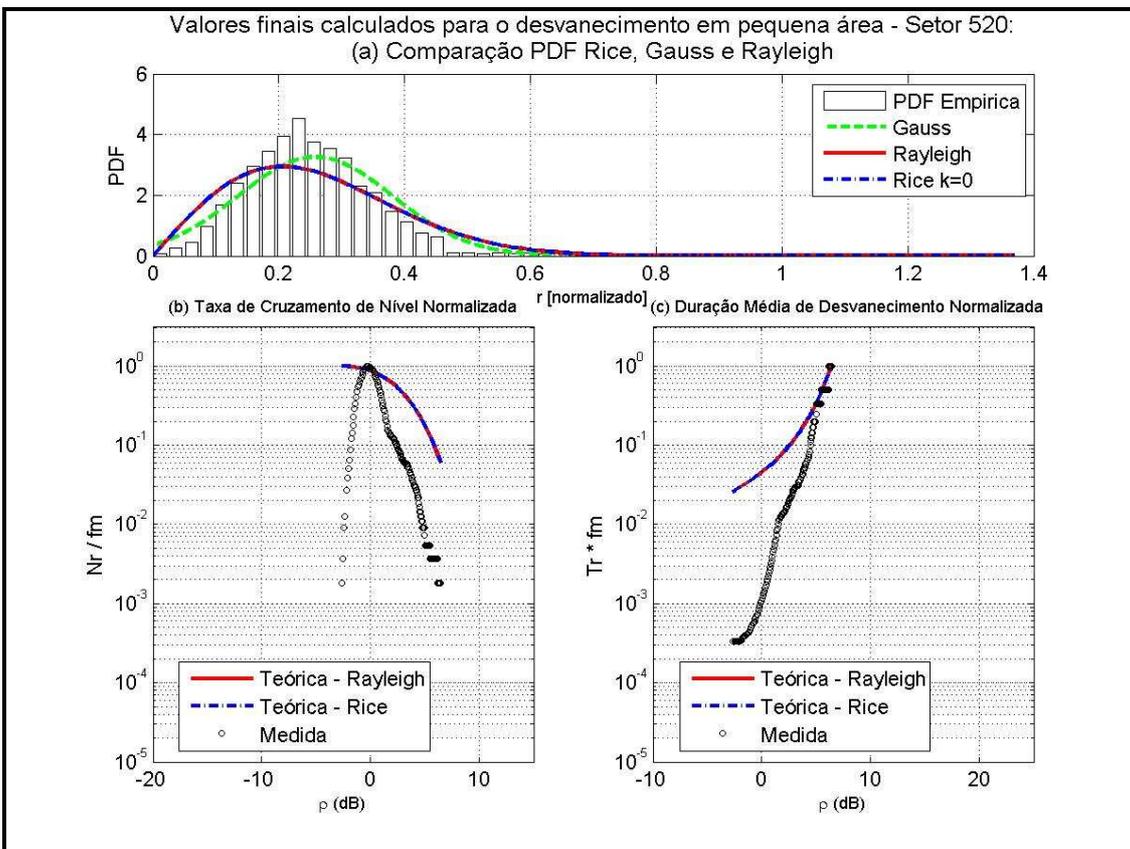
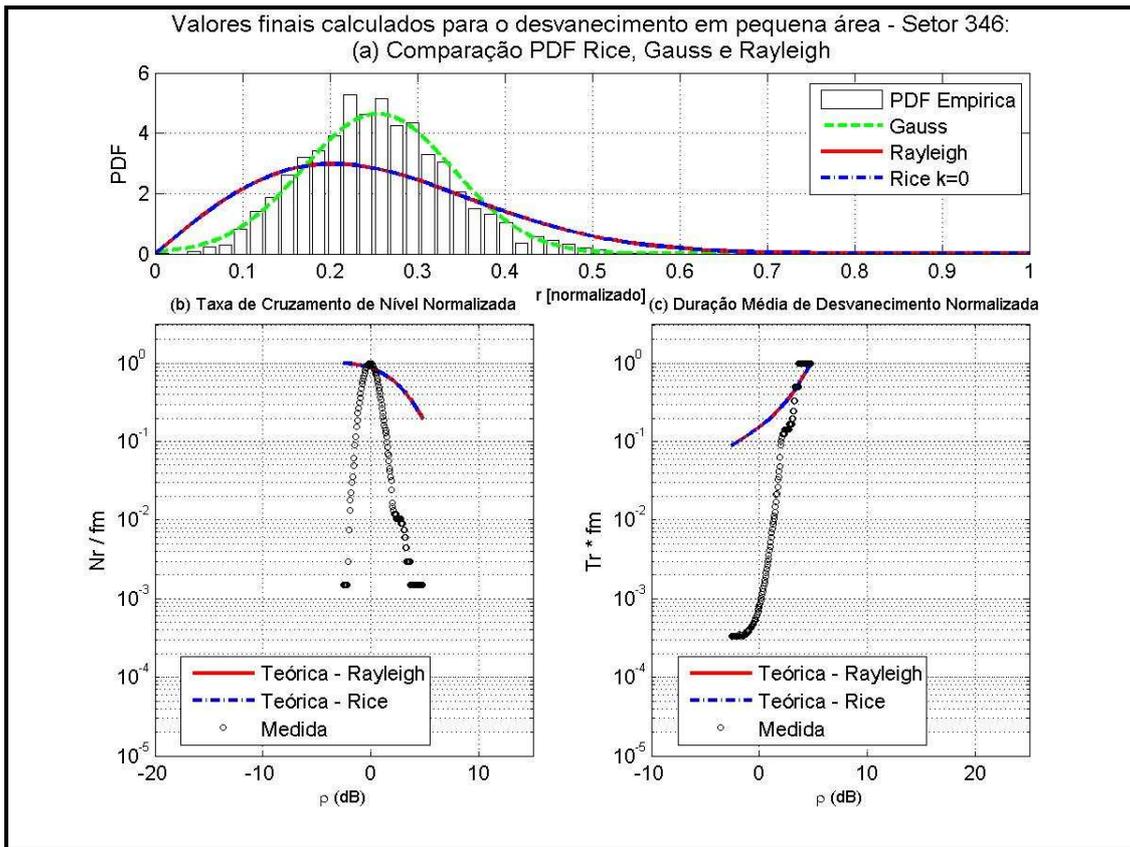


Gráfico 5.19: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 346 e 520 da Rota4.

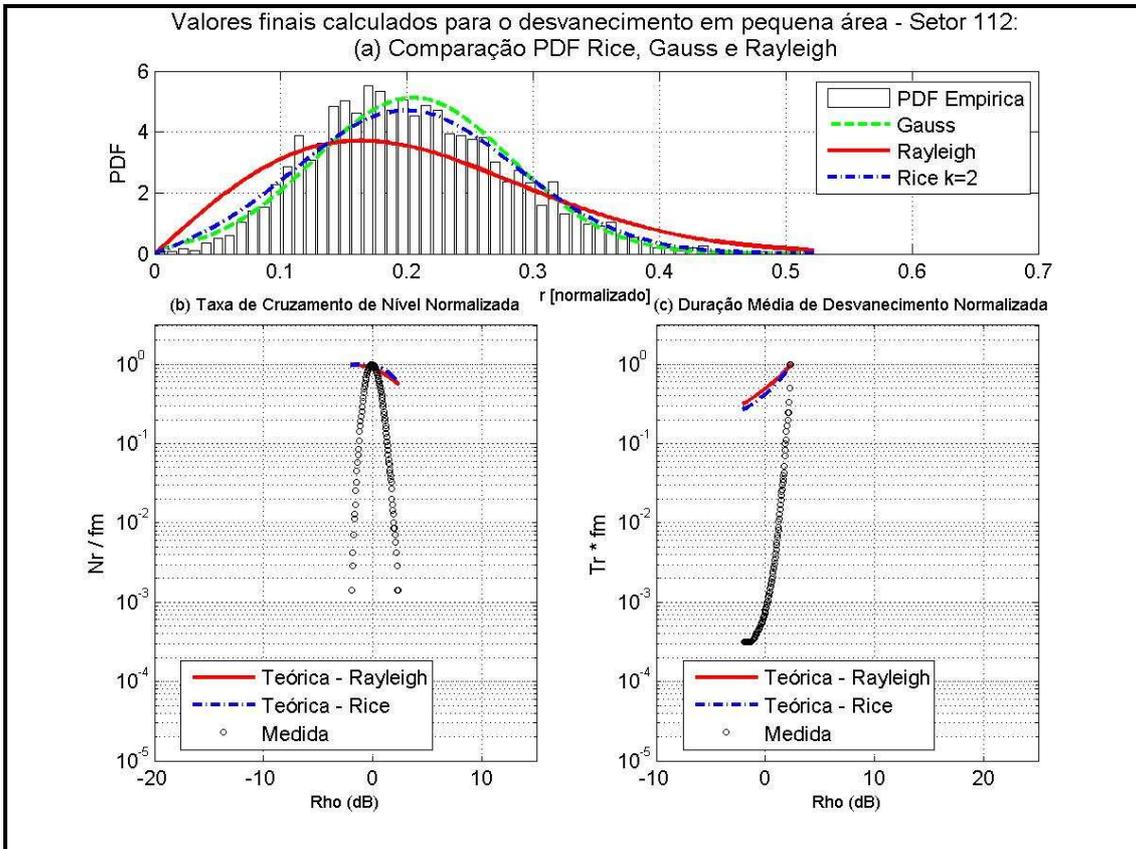
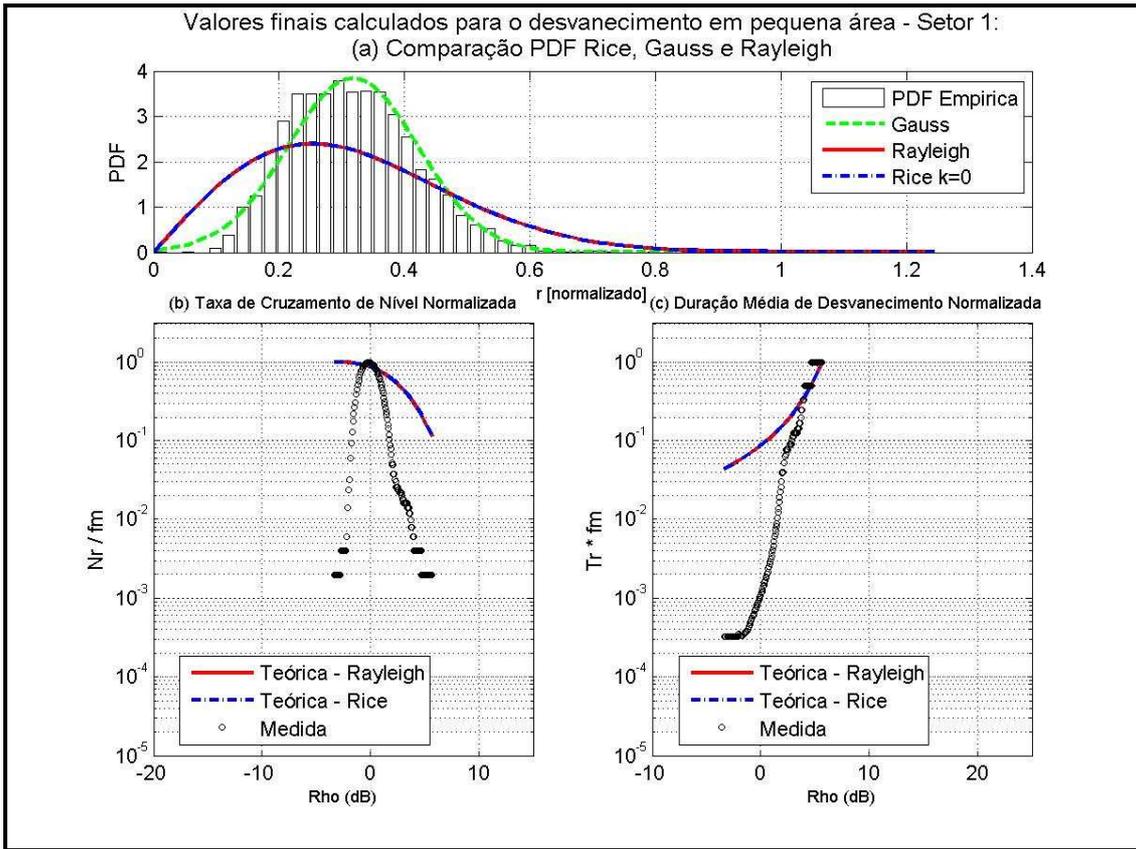


Gráfico 5.20: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 01 e 112 da Rota5.

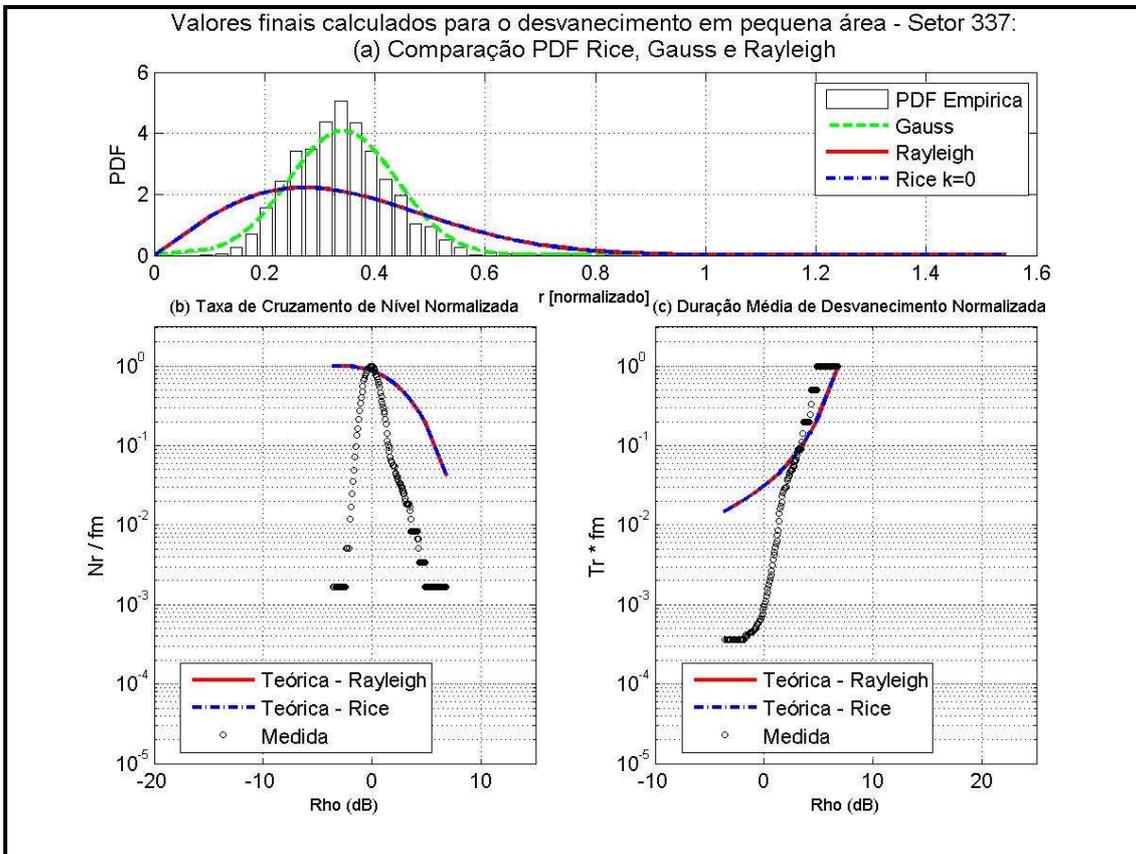
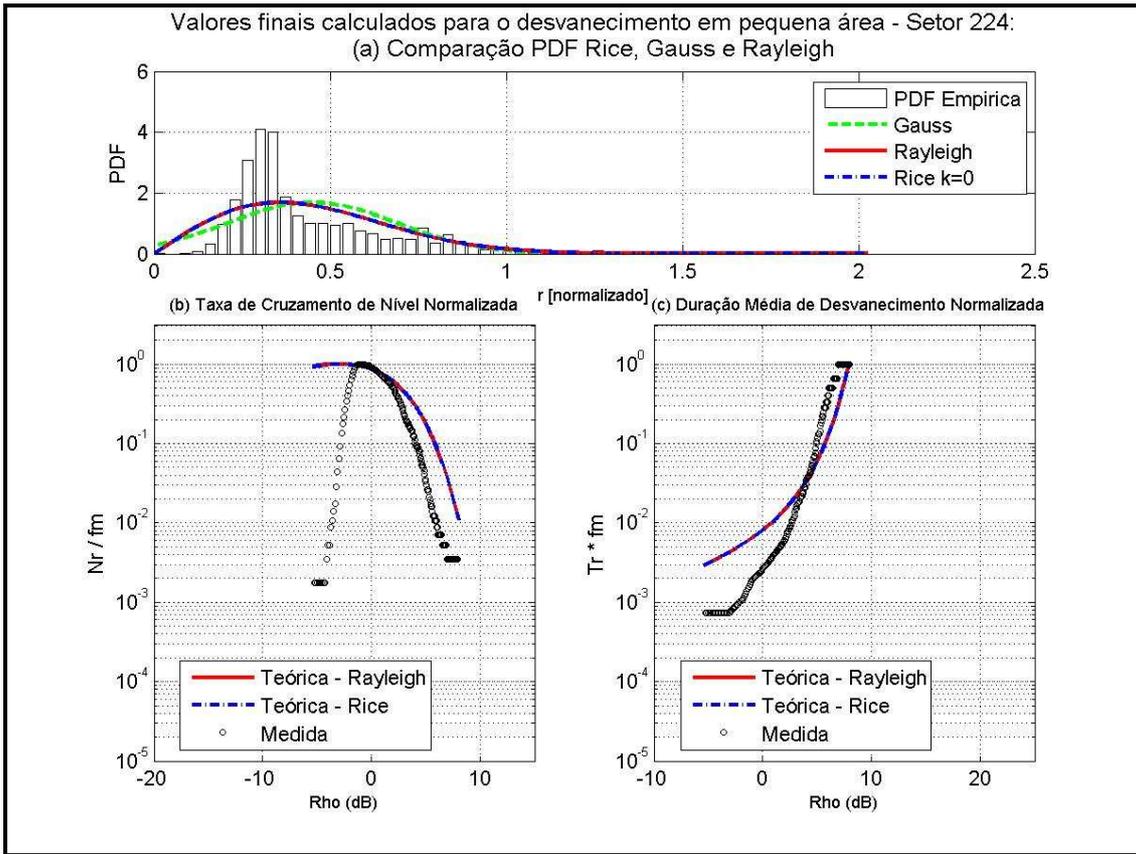


Gráfico 5.21: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh, Taxa de Cruzamento de Nível e Duração média de Desvanecimentos para os setores 224 e 337 da Rota5.

Devido à grande quantidade de gráficos gerados apenas o resultado do teste qui-quadrado será parte integrante desta tese, conforme item 5.4.1.1.

#### 5.4.1.1 TESTE DO QUI-QUADRADO

A fim de verificar o grau de aderência das funções densidade de probabilidade teóricas calculadas em relação aos valores de variabilidade rápida do sinal medido, foi realizado o teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ), cuja lógica de processamento em *Matlab* consta do anexo A.9, programa “tabela\_final\_testequi.m”. O objetivo deste teste é verificar se o valor encontrado é menor que o valor crítico da distribuição qui-quadrado tabelada, considerando o grau de liberdade, para uma ocorrência que seja excedida em apenas 5% dos casos. Basicamente, o teste do qui-quadrado verifica a frequência com que um determinado acontecimento observado em uma amostra se desvia significativamente ou não da frequência com que ele é esperado. Teoricamente, *Karl Pearson*<sup>43</sup> propôs a seguinte fórmula para medir as possíveis discrepâncias entre proporções observadas e esperadas:

$$\chi^2 = \sum \left[ \frac{(o - e)^2}{e} \right] \quad (5.13)$$

Em que “o” é a frequência observada e “e” é a frequência esperada.

Nota-se que  $(o - e)$  é o desvio  $d$ , portanto a equação (5.13) também pode ser escrita como:

$$\chi^2 = \sum \left( \frac{d^2}{e} \right) \quad (5.14)$$

Assim, as frequências observadas são obtidas diretamente dos dados das amostras adquiridas, enquanto que as frequências esperadas são calculadas para a distribuição adotada. É importante notar que o desvio  $d=(o - e)$  é a diferença entre a frequência observada e a esperada. Quando as frequências observadas são muito próximas às esperadas, o valor de  $\chi^2$  é pequeno, mas quando as divergências são grandes  $d=(o - e)$  passa a ser grande também e, conseqüentemente,  $\chi^2$  assume valores altos.

---

<sup>43</sup> Karl Pearson (27 de março de 1857 - 27 abr 1936) – Foi um grande contribuidor para o desenvolvimento da Estatística como uma disciplina científica séria e independente. Ele foi o fundador do Departamento de Estatística Aplicada na *University College London* em 1911, que foi o primeiro departamento universitário dedicado à estatística em todo o mundo.

Para o teste do qui-quadrado é necessário obter duas estatísticas denominadas  $\chi^2$  (calculado) e  $\chi_c^2$  (tabelado), onde a letra “c” representa o valor crítico de  $\chi^2$  (tabelado). A tabela 5.11 contém os valores tabelados de  $\chi^2$ . Assim,  $\chi^2$  (calculado) é obtido a partir dos dados experimentais, levando-se em consideração os valores observados e os esperados, conforme equação (5.14) e  $\chi^2$  (tabelado) depende do número de graus de liberdade e do nível de significância adotado. A tomada de decisão é feita comparando-se os dois valores de  $\chi^2$ :

- Se  $\chi^2$  (calculado) for maior ou igual a  $\chi_c^2$  (tabelado), se rejeita a hipótese de igualdade estatística entre os números de observados e de esperados, e
- Se  $\chi^2$  (calculado) for menor do que  $\chi_c^2$  (tabelado), se aceita a hipótese de igualdade estatística entre os números de observados e de esperados, ou seja, admite-se que os desvios não são significativos.

Quando se consulta a tabela de  $\chi^2$  observa-se que é determinada uma probabilidade de ocorrência daquele acontecimento. Na tabela 5.11, G.L. (Grau de Liberdade) é número de classes menos 1 e o número de classes, na verdade, é o número de eventos (possibilidades) e P é o valor da probabilidade. Na coluna referente a 5% de probabilidade, destacada em negrito, encontra-se o valor crítico de qui-quadrado ( $\chi_c^2$ ), com o qual deve ser comparado o valor calculado de  $\chi^2$ .

**Nota:** Se um modelo puder ser representado pelo modelo teórico proposto, pequenos desvios casuais entre proporções esperadas e observadas ocorrerão em maior número do que grandes desvios.

Assim, após processamento de cada uma das rotas, foi gerado um resumo contendo as informações mais relevantes, objetivando facilitar a identificação da função de densidade de probabilidade predominante em cada uma das rotas, assim como, os principais parâmetros. O resumo de cada rota e os resultados obtidos para os setores citados no item 5.4.1, gráficos 5.14 a 5.21, constam das tabelas 5.12 a 5.21. A análise completa de cada Rota, por setor, consta do anexo C.

GL\P	0,99	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	<b>0,05</b>	0,02	0,01	0,001
01	,0002	0,004	0,016	0,064	0,148	0,455	1,074	1,642	2,706	<b>3,841</b>	5,412	6,635	10,827
02	0,020	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,408	3,219	4,605	<b>5,991</b>	7,824	9,210	13,815
03	0,115	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,665	4,642	6,251	<b>7,815</b>	9,837	11,345	16,266
04	0,297	0,711	1,064	1,649	2,195	3,357	4,878	5,989	7,779	<b>9,488</b>	11,668	13,277	18,467
05	0,554	1,145	1,610	2,343	3,000	4,351	6,064	7,289	9,236	<b>11,070</b>	13,388	15,080	20,515
06	0,872	1,635	2,204	3,070	3,828	5,348	7,231	8,558	10,645	<b>12,592</b>	15,033	16,812	22,457
07	1,239	2,167	2,833	3,822	4,671	6,346	8,383	9,803	12,017	<b>14,067</b>	16,622	18,475	24,322
08	1,646	2,733	3,490	4,594	5,527	7,344	9,524	11,030	13,362	<b>15,507</b>	18,168	20,090	26,125
09	2,088	3,325	4,168	5,380	6,393	8,343	10,656	12,242	14,684	<b>16,919</b>	19,679	21,666	27,877
10	2,558	3,940	4,865	6,179	7,267	9,342	11,781	13,442	15,987	<b>18,307</b>	21,161	23,209	29,588
11	3,053	4,575	5,578	6,989	8,148	10,341	12,899	14,631	17,275	<b>19,675</b>	22,618	24,725	31,264
12	3,571	5,226	6,304	7,807	9,034	11,340	14,011	15,812	18,549	<b>21,026</b>	24,054	26,217	32,909
13	4,107	5,892	7,042	8,634	9,926	12,340	15,119	16,985	19,812	<b>22,362</b>	25,472	27,688	34,528
14	4,660	6,571	7,790	9,467	10,821	13,339	16,222	18,151	21,064	<b>23,685</b>	26,873	29,141	36,123
15	5,229	7,261	8,547	10,307	11,721	14,339	17,322	19,311	22,307	<b>24,996</b>	28,259	30,578	37,697
16	5,812	7,692	9,312	11,152	12,624	15,338	18,418	20,465	23,542	<b>26,296</b>	29,633	32,000	39,252
17	6,408	8,672	10,085	12,002	13,531	16,338	19,511	21,615	24,769	<b>27,587</b>	30,995	33,409	40,790
18	7,015	9,390	10,865	12,857	14,440	17,338	20,601	22,760	25,989	<b>28,869</b>	32,346	34,805	42,312
19	7,633	10,117	11,651	13,716	15,532	18,338	21,689	23,900	27,204	<b>30,144</b>	33,687	36,191	43,820
20	8,260	10,851	12,443	14,572	16,266	19,337	22,775	25,038	28,412	<b>31,410</b>	35,020	37,566	45,315

Tabela 5.11: Tabela dos valores do teste qui-quadrado.

<b>Rota: 1</b>		<b>Quantidade total setores no trecho: 260</b>		
<b>Análise</b>	<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado (95%)	167	167	32	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado com menor valor <b>O maior valor indica a PDF de melhor ajuste</b>	<b>162</b>	74	0	
Menor valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto menor o valor do teste, melhor o ajuste</b>	3.99	7.31	4.88	
Maior valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto maior o valor do teste, pior o ajuste</b>	68.21	68.36	58.80	
Quantidade de vezes que a PDF passou exclusivamente no Teste Qui-quadrado	0	0	0	
Quantidade de vezes que nenhuma PDF passou no Teste Qui-quadrado	93	93	93	
Quantidade de vezes que todas as PDF passaram ao mesmo tempo	32	32	32	
	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>	
<b>Valor de K da PDF de Rice</b>	0	0.54	6	
	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	
<b>PDF</b>	Rice	Rayleigh	Gauss	

Tabela 5.12: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 1.

Resultados para os setores 01, 87, 173 e 260, gráficos 5.12 e 5.13:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice/Rayleigh	-	-
<b>Setor 87</b>	-	-	-
<b>Setor 173</b>	Rice/Rayleigh	-	-
<b>Setor 260</b>	Rice	Rayleigh	-

Tabela 5.13: Resultados do Teste qui-quadrado para os setores 01, 87, 173 e 260 da Rota 1.

<b>Rota: 2</b>		<b>Quantidade total setores no trecho: 340</b>		
<b>Análise</b>	<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado (95%)	223	221	99	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado com menor valor <b>O maior valor indica a PDF de melhor ajuste</b>	<b>216</b>	75	3	
Menor valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto menor o valor do teste, melhor o ajuste</b>	2.23	6.77	2.77	
Maior valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto maior o valor do teste, pior o ajuste</b>	69.63	69.63	66.96	
Quantidade de vezes que a PDF passou exclusivamente no Teste Qui-quadrado	0	0	0	
Quantidade de vezes que nenhuma PDF passou no Teste Qui-quadrado	117	117	117	
Quantidade de vezes que todas as PDF passaram ao mesmo tempo	97	97	97	
		<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>
<b>Valor de K da PDF de Rice</b>		0	0.99	8
		<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Ordem de melhor ajuste</b>				
<b>PDF</b>	Rice	Rayleigh	Gauss	

Tabela 5.14: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 2.

Resultados para os setores 01, 113, 226 e 340, gráficos 5.14 e 5.15:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice	Gauss	Rayleigh
<b>Setor 113</b>	-	-	-
<b>Setor 226</b>	-	-	-
<b>Setor 340</b>	Rice/Rayleigh	-	-

Tabela 5.15: Resultados do Teste qui-quadrado os setores 01, 113, 226 e 340 da Rota 2.

<b>Rota: 3</b>		<b>Quantidade total setores no trecho: 504</b>		
<b>Análise</b>	<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado (95%)	335	334	143	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado com menor valor <b>O maior valor indica a PDF de melhor ajuste</b>	<b>329</b>	81	3	
Menor valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto menor o valor do teste, melhor o ajuste</b>	2.72	5.89	3.28	
Maior valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto maior o valor do teste, pior o ajuste</b>	70.58	72.98	70.54	
Quantidade de vezes que a PDF passou exclusivamente no Teste Qui-quadrado	1	0	2	
Quantidade de vezes que nenhuma PDF passou no Teste Qui-quadrado	167	167	167	
Quantidade de vezes que todas as PDF passaram ao mesmo tempo	141	141	141	
	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>	
<b>Valor de K da PDF de Rice</b>	0	1.20	8	
	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	
<b>PDF</b>	Rice	Rayleigh	Gauss	

Tabela 5.16: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 3.

Resultados para os setores 01, 168, 336 e 504, gráficos 5.16 e 5.17:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 168</b>	Rice	Rayleigh	-
<b>Setor 336</b>	Rice	Rayleigh	Gauss
<b>Setor 504</b>	-	-	-

Tabela 5.17: Resultados do Teste qui-quadrado para os setores 01, 168, 336 e 504 da Rota 3.

<b>Rota: 4</b>		<b>Quantidade total setores no trecho: 520</b>		
<b>Análise</b>	<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado (95%)	362	356	98	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado com menor valor <b>O maior valor indica a PDF de melhor ajuste</b>	<b>353</b>	110	1	
Menor valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto menor o valor do teste, melhor o ajuste</b>	3.22	5.49	4.65	
Maior valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto maior o valor do teste, pior o ajuste</b>	70.86	72.03	70.50	
Quantidade de vezes que a PDF passou exclusivamente no Teste Qui-quadrado	4	0	0	
Quantidade de vezes que nenhuma PDF passou no Teste Qui-quadrado	158	158	158	
Quantidade de vezes que todas as PDF passaram ao mesmo tempo	96	96	96	
	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>	
<b>Valor de K da PDF de Rice</b>	0	1.12	8	
	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	
<b>PDF</b>	Rice	Rayleigh	Gauss	

Tabela 5.18: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 4.

Resultados para os setores 01, 173, 346 e 520, gráficos 5.18 e 5.19:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice	Gauss	Rayleigh
<b>Setor 173</b>	-	-	-
<b>Setor 346</b>	Rice/Rayleigh	-	-
<b>Setor 520</b>	-	-	-

Tabela 5.19: Resultados do Teste qui-quadrado para os setores 01, 173, 346 e 520 da Rota 4.

<b>Rota: 5</b>		<b>Quantidade total setores no trecho: 337</b>		
<b>Análise</b>	<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado (95%)	189	189	45	
Quantidade de vezes que a PDF passou no Teste Qui-quadrado com menor valor <b>O maior valor indica a PDF de melhor ajuste</b>	<b>183</b>	85	0	
Menor valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto menor o valor do teste, melhor o ajuste</b>	4.18	5.79	5.15	
Maior valor do Teste Qui-quadrado para cada PDF <b>Quanto maior o valor do teste, pior o ajuste</b>	69.91	69.91	66.77	
Quantidade de vezes que a PDF passou exclusivamente no Teste Qui-quadrado	0	0	0	
Quantidade de vezes que nenhuma PDF passou no Teste Qui-quadrado	148	148	148	
Quantidade de vezes que todas as PDF passaram ao mesmo tempo	45	45	45	
	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>	
<b>Valor de K da PDF de Rice</b>	0	0.60	7	
	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	
<b>PDF</b>	Rice	Rayleigh	Gauss	

Tabela 5.20: Resultados do Teste qui-quadrado para a Rota 5.

Resultados para os setores 01, 112, 224 e 337, gráficos 5.20 e 5.21:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice/Rayleigh	-	-
<b>Setor 112</b>	Rice	Gauss	Rayleigh
<b>Setor 224</b>	-	-	-
<b>Setor 337</b>	-	-	-

Tabela 5.21: Resultados do Teste qui-quadrado para os setores 01, 112, 224 e 337 da Rota 5.

Conforme resultados apresentados pelo teste qui-quadrado, a PDF de Rice apresentou a melhor aderência seguida pela PDF de Rayleigh e Gauss.

**Observação:** Os resultados do teste qui-quadrado retornaram uma grande quantidade de valores “NaN”, principalmente, para a PDF de Gauss. Na verdade, o que se percebe é que quando a curva da PDF teórica (valor esperado) decai rapidamente, isto é, tende a zero, a equação do teste do qui-quadrado (5.13) tende ao infinito e, assim, rejeita-se a hipótese de igualdade estatística entre os números de observados e de esperados, pois o teste torna-se inconclusivo.

Os gráficos de 5.22 a 5.36 mostram os setores que apresentaram o melhor (Menor Qui) e o pior (Maior Qui) ajuste pelo teste qui-quadrado, em cada uma das rotas.

Rota 1:

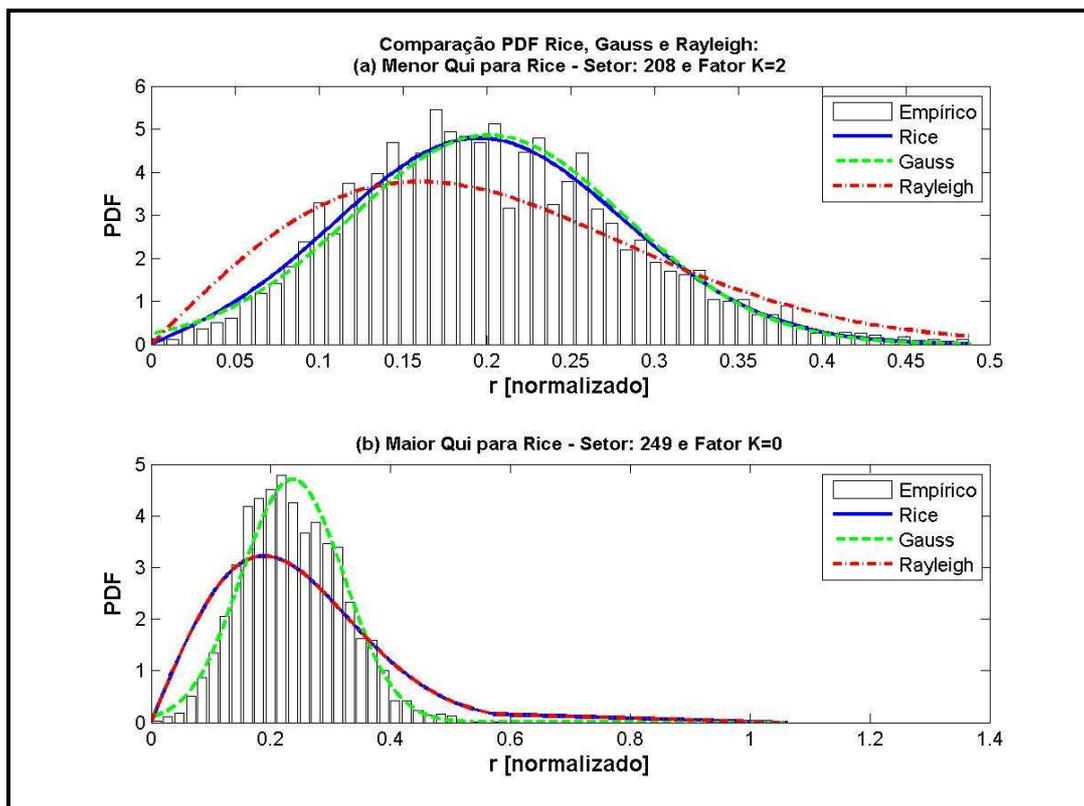


Gráfico 5.22: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 1: Gráficos “a” e “b”).

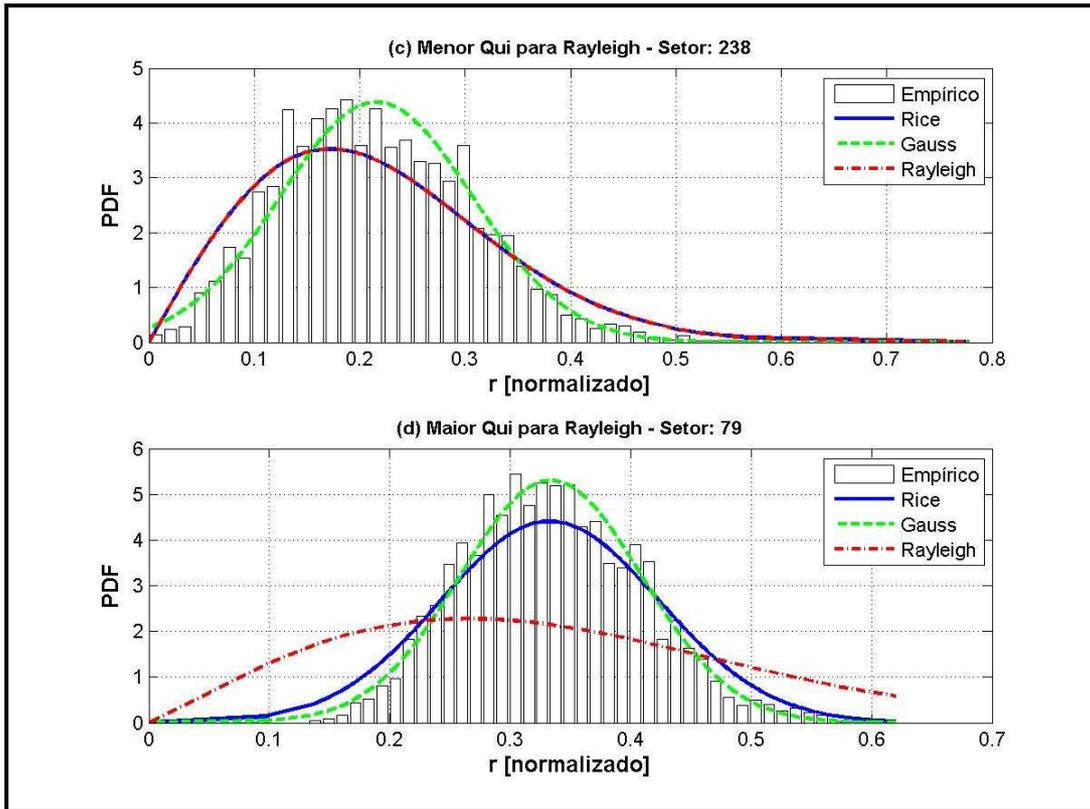


Gráfico 5.23: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 1 – Gráficos “c” e “d”).

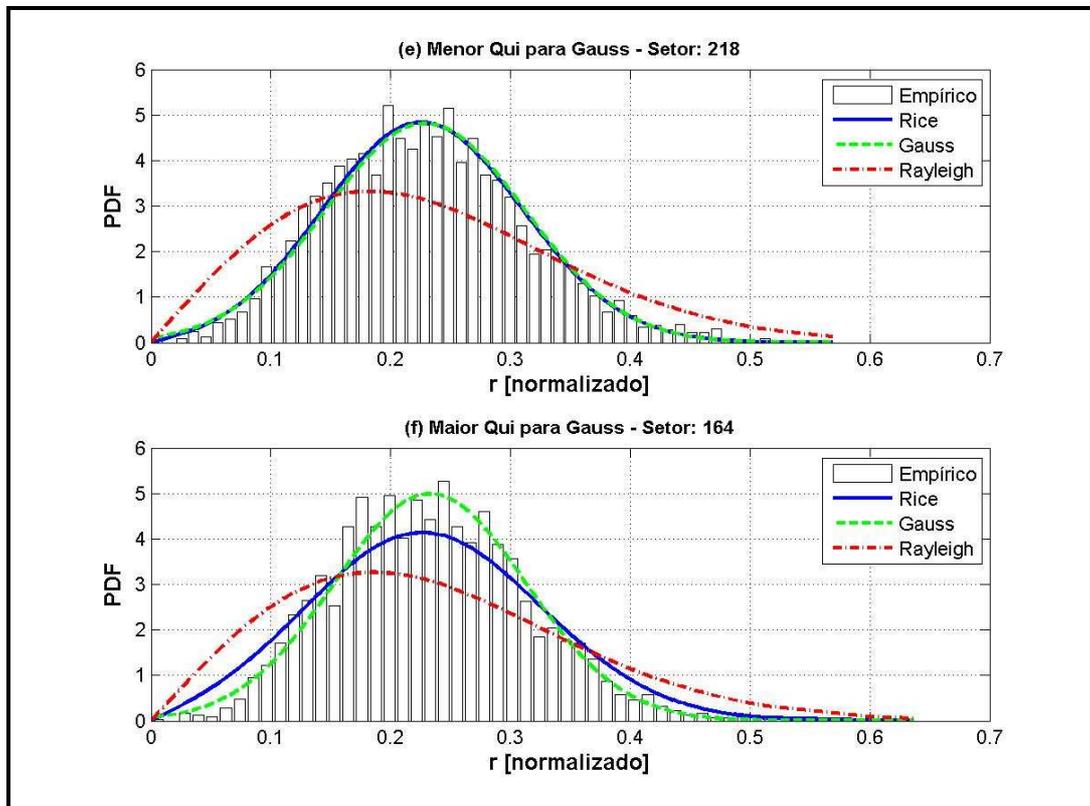


Gráfico 5.24: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 1 - Gráficos “e” e “f”).

Rota 2:

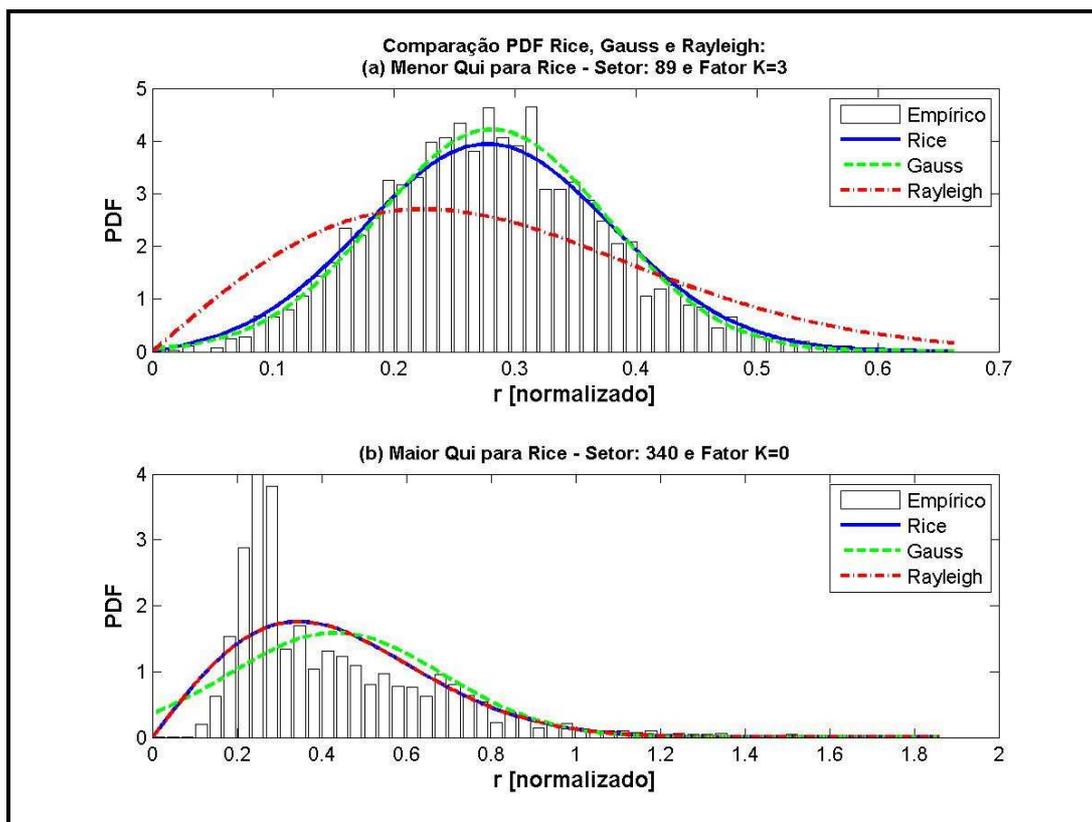


Gráfico 5.25: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 2 - Gráficos “a” e “b”).

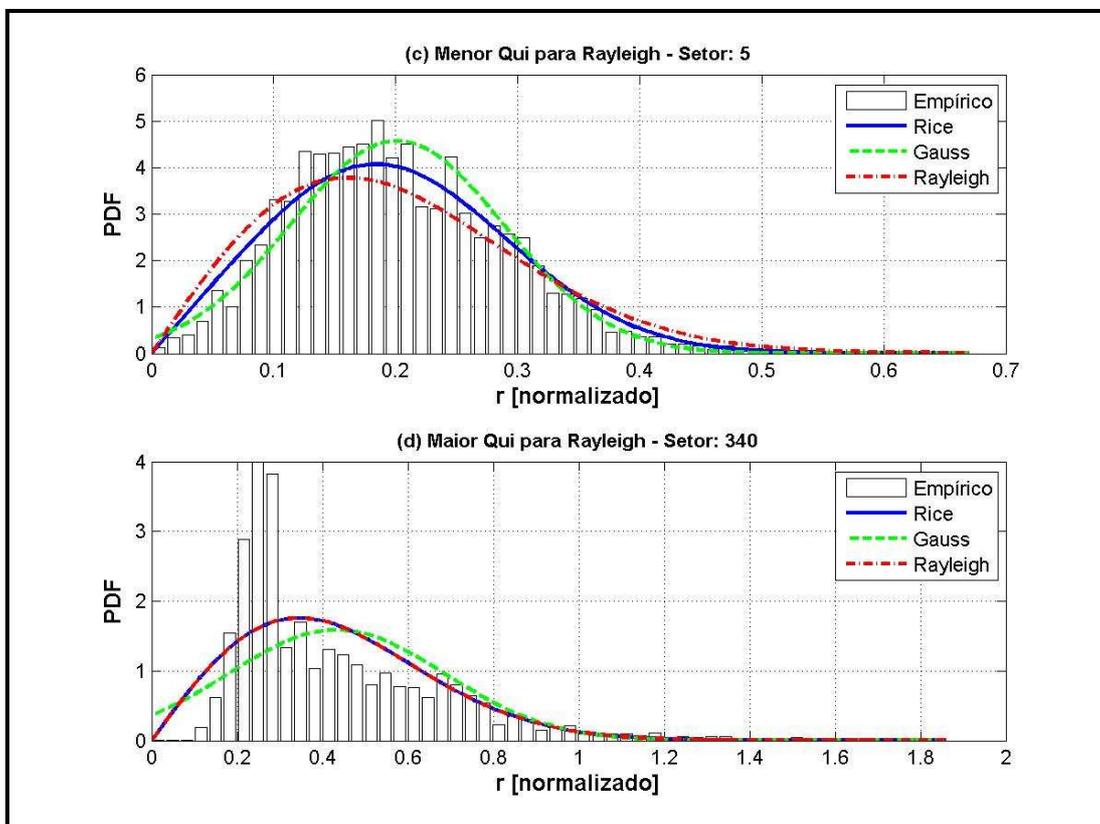


Gráfico 5.26: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 2 - Gráficos “c” e “d”).

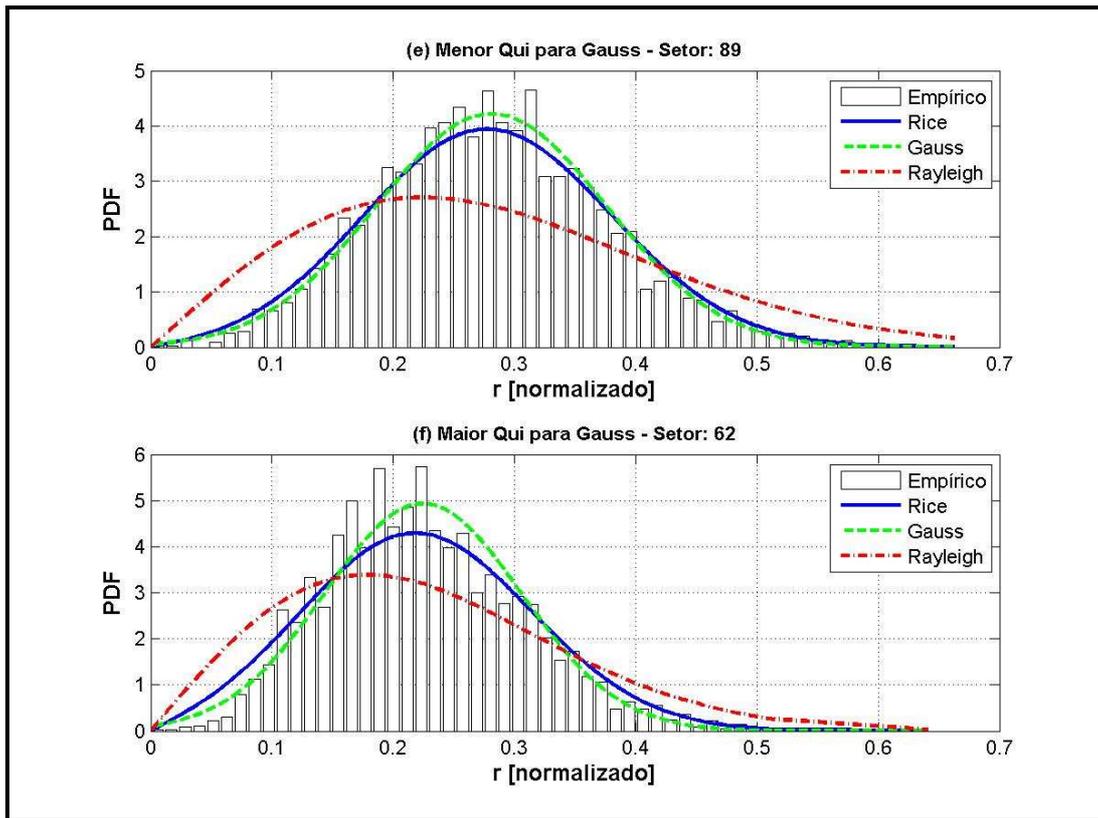


Gráfico 5.27: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 2 - Gráficos “e” e “f”).

Rota 3:

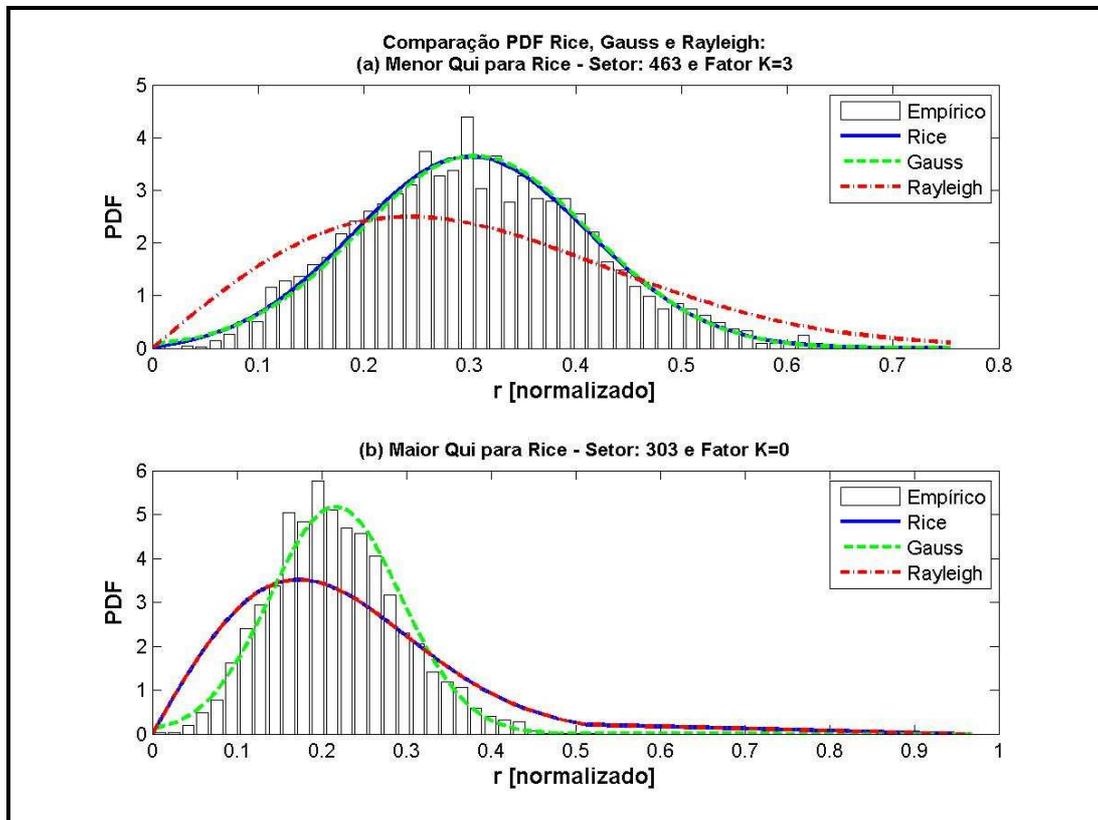


Gráfico 5.28: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 3 - Gráficos “a” e “b”).

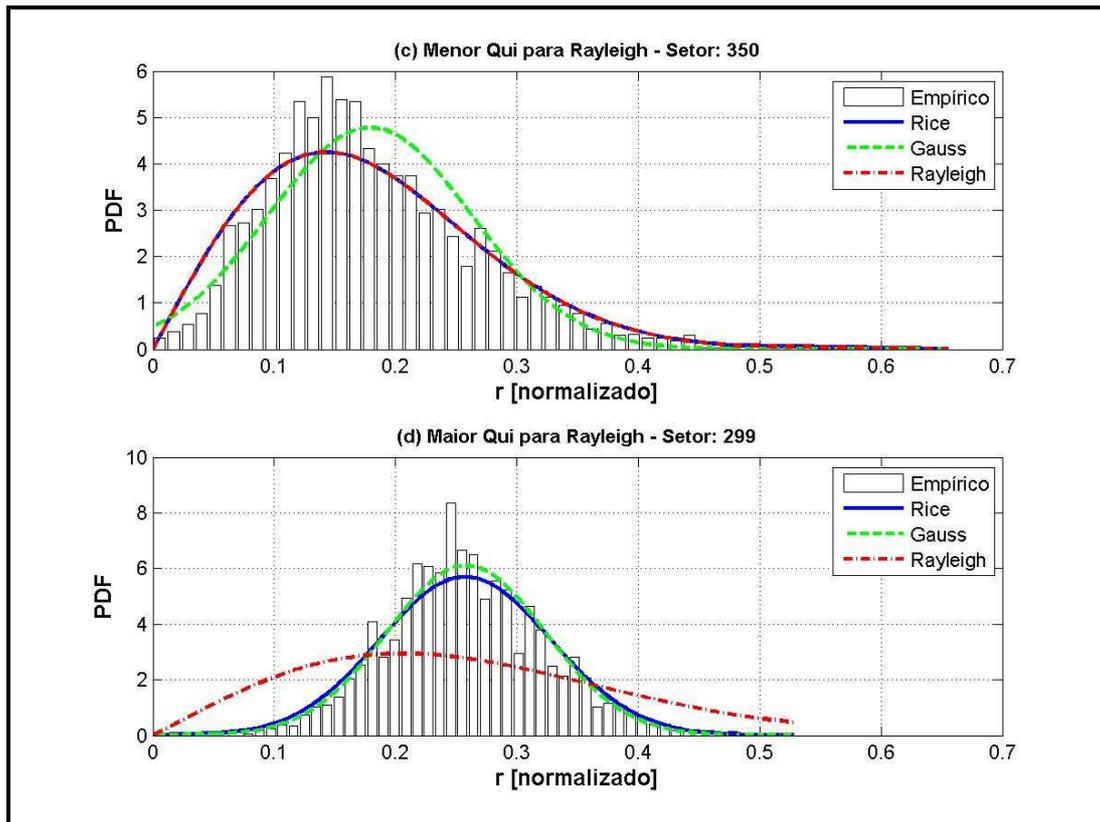


Gráfico 5.29: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 3 - Gráficos “c” e “d”).

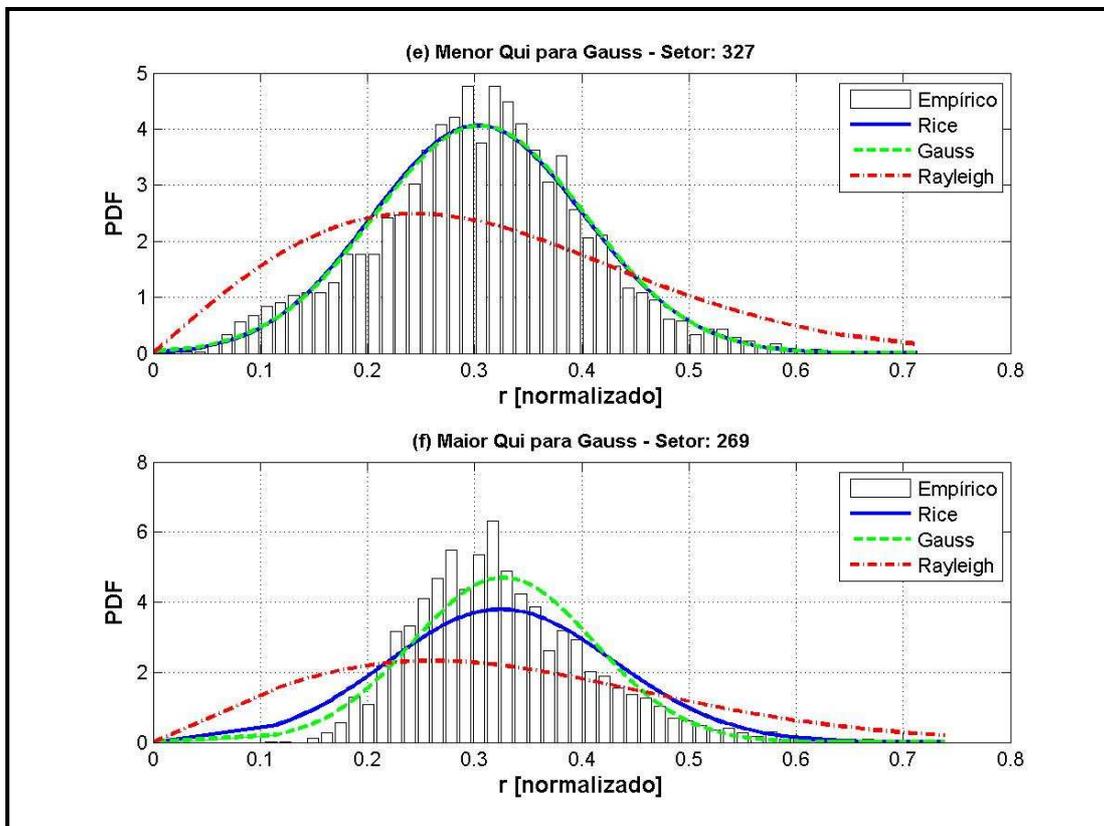


Gráfico 5.30: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 3 - Gráficos “e” e “f”).

Rota 4:

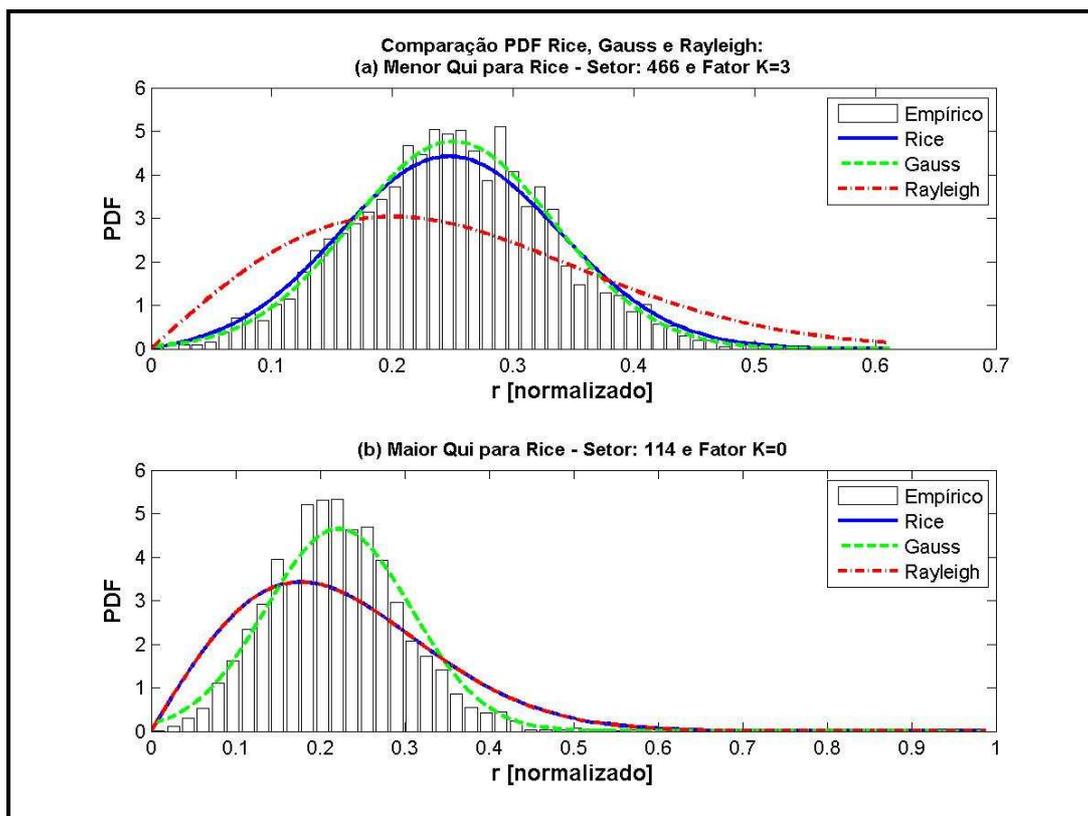


Gráfico 5.31: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 4- Gráficos “a” e “b”).

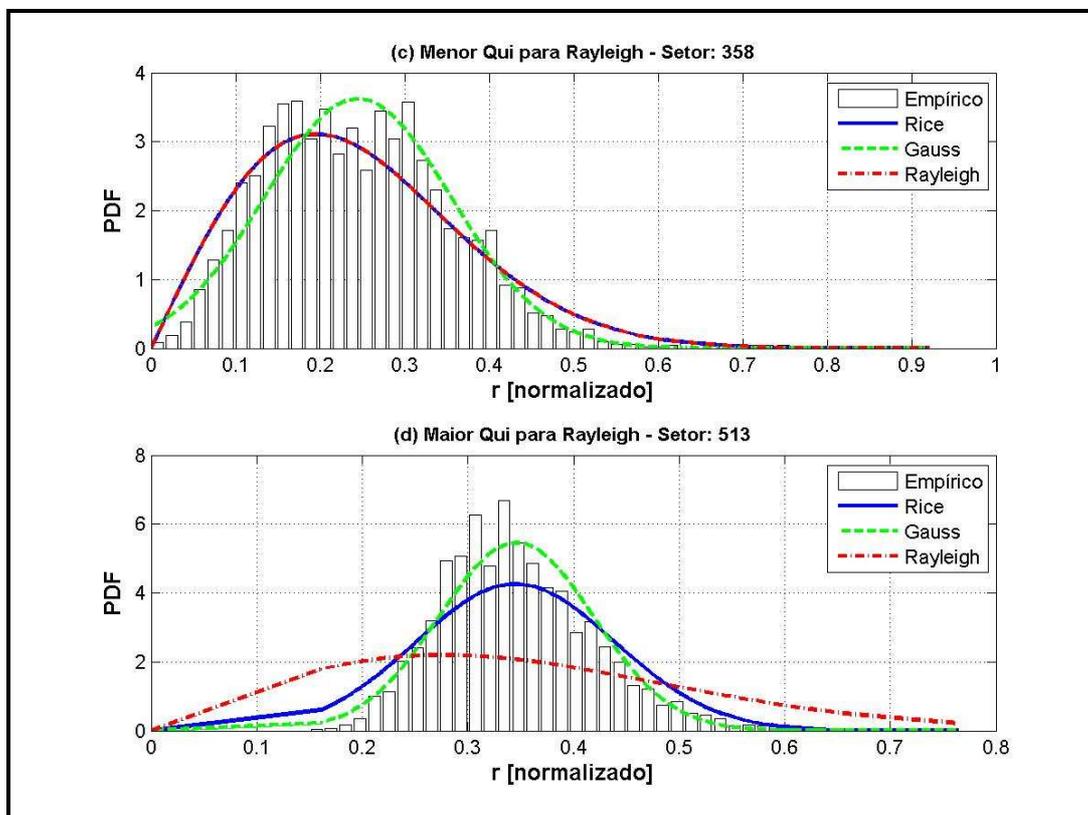


Gráfico 5.32: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 4 - Gráficos “c” e “d”).

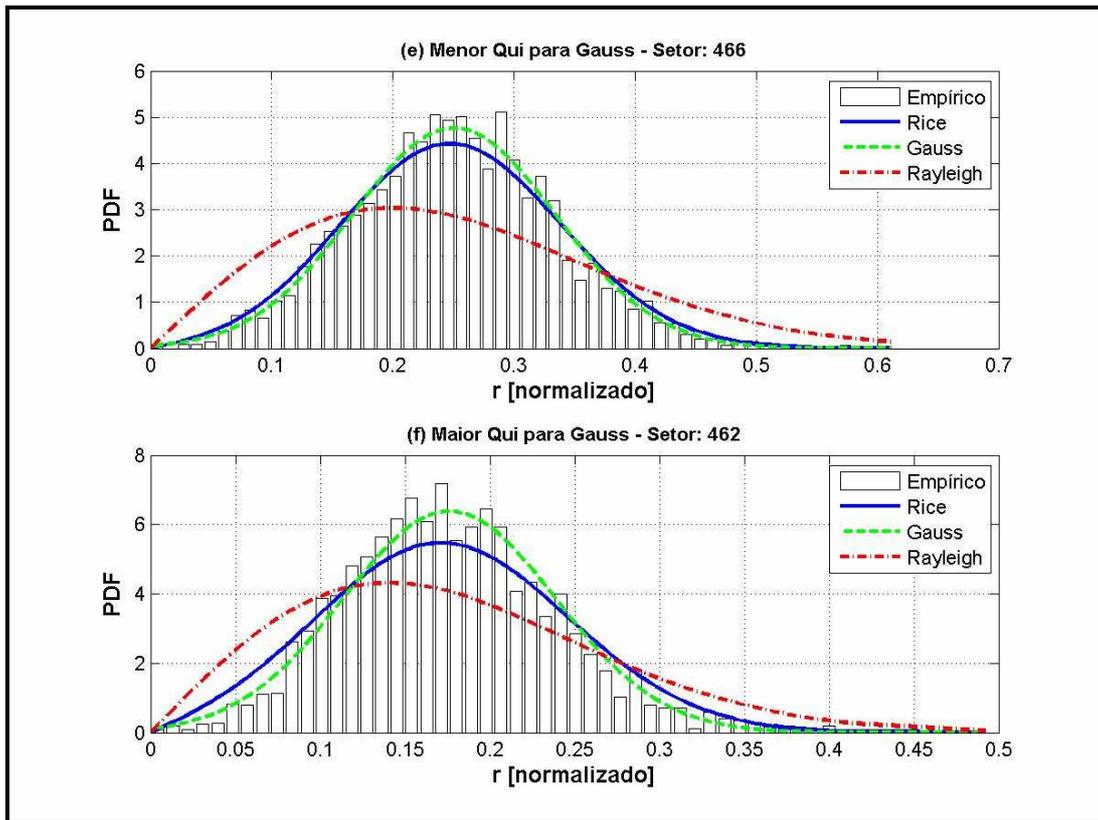


Gráfico 5.33: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 4 - Gráficos “e” e “f”).

Rota 5:

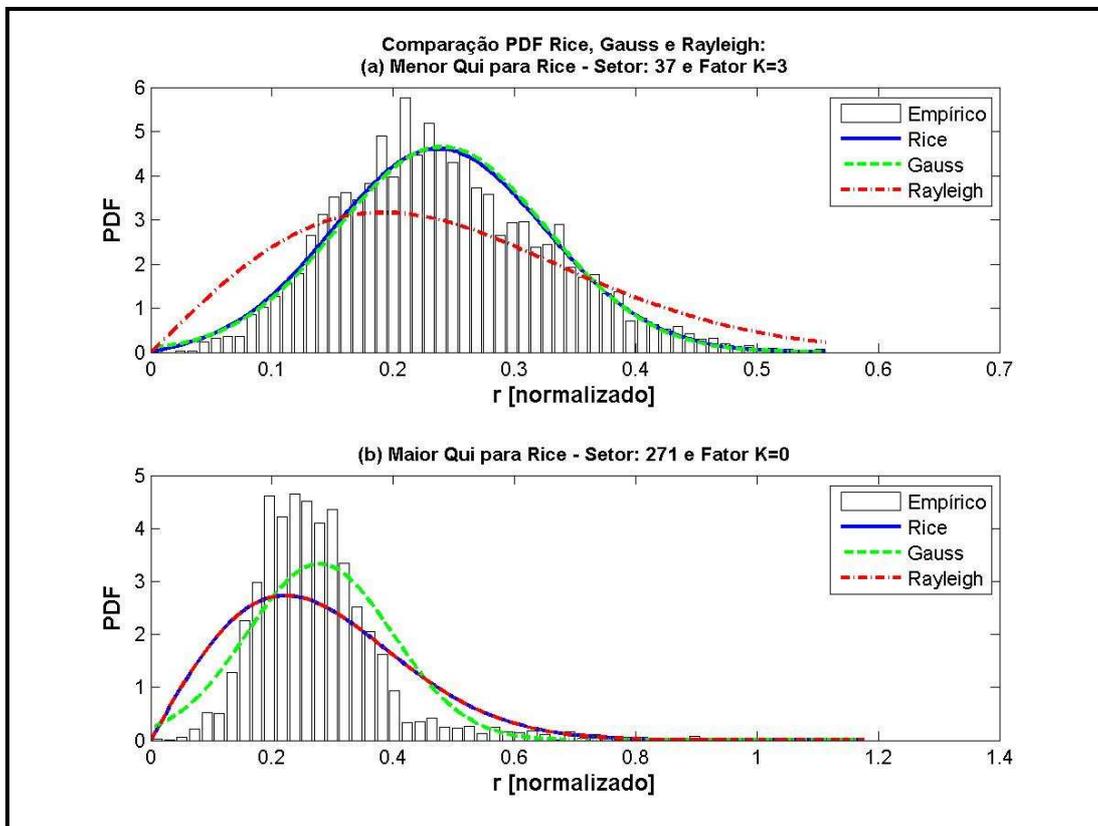


Gráfico 5.34: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 5 - Gráficos “a” e “b”).

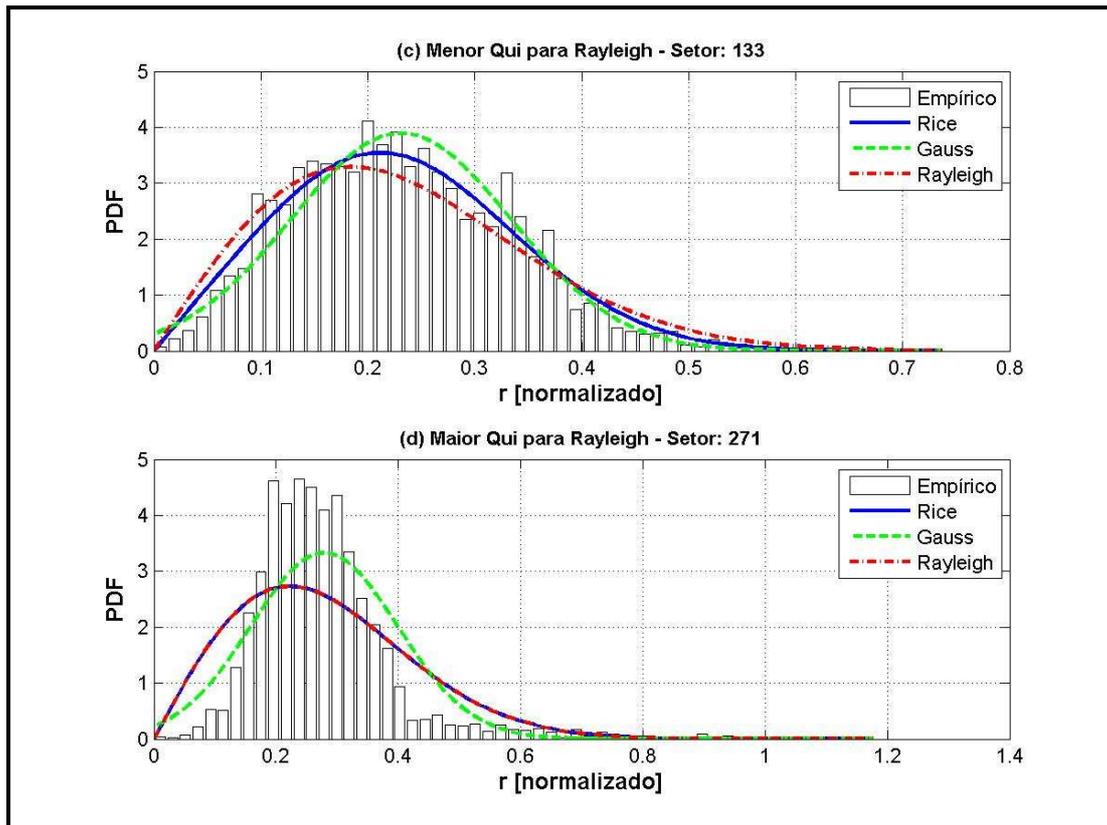


Gráfico 5.35: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 5 - Gráficos “c” e “d”).

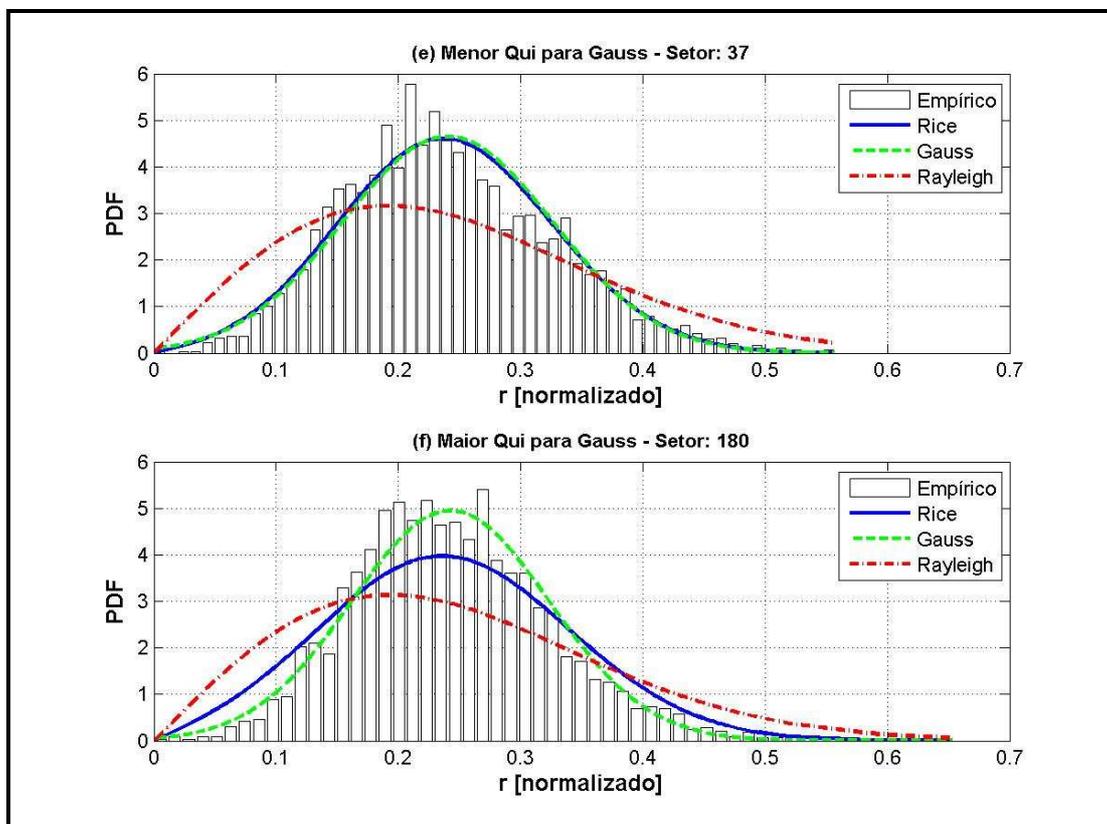


Gráfico 5.36: Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh (Rota 5 - Gráficos “e” e “f”).

#### 5.4.1.2 TESTE DO COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH-SUTCLIFFE (E)

Em função da grande quantidade de resultados inconclusivos apresentados pelo teste do qui-quadrado, especialmente, para o modelo de Gauss, desenvolveu-se uma rotina em Matlab, anexo A.9, elaborada a partir do modelo do Coeficiente de Eficiência de *Nash-Sutcliffe* (E) [48], dado por:

$$E = 1 - \frac{\sum (V_o - V_e)^2}{\sum (V_o - M_o)^2} \quad (5.15)$$

Onde:

$E$  é o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe ( $-\infty < E \leq 1$ ).

$V_o$  é a tensão observada em *Volts*.

$V_e$  é a tensão esperada em *Volts*.

$M_o$  é a média de  $V_o$ .

$$\text{Equivalentemente: } E = 1 - \frac{EMQ}{\text{Variância Observada}} \quad (5.16)$$

Onde  $EMQ$  é o Erro Médio Quadrático, assim calculado:

$$EMQ = \frac{1}{n} \times \sum (V_e - V_o)^2 \quad (5.17)$$

Onde  $n$  é o número de eventos.

**Nota:** O Erro Médio Quadrático penaliza quadraticamente os erros.

Assim:

- ( $E = 1$ ) : Uma eficiência igual a um corresponde a uma combinação perfeita, onde o modelo testado se ajusta aos dados observados.
- ( $0 < E < 1$ ): Uma eficiência maior que zero e menor que um significa que o Erro Médio Quadrático é menor que a variância dos dados observados, logo é melhor do que estimar pela média destes.
- ( $E = 0$ ) : Uma eficiência igual a zero indica que as previsões do modelo são tão precisas como a média dos dados observados, isto é, o Erro Médio Quadrático é igual à variância dos dados observados.

- ( $E < 0$ ) : Uma eficiência menor do que zero significa que o Erro Médio Quadrático é maior que a variância dos dados observados, logo é pior do que estimar pela média.

Portanto, quanto mais próximo de 1 for o modelo, maior será a sua eficiência.

Visando melhor caracterizar o ajuste das funções de densidade de probabilidade de Gauss, Rayleigh e Rice, o programa de análise estatística do anexo A.9 calcula uma medida de erro relativo (E - Coeficiente de Eficiência de *Nash-Sutcliffe*) e uma medida de erro absoluto (EMQ - Erro Médio Quadrático). Desta forma, obtém-se os seguintes parâmetros estatísticos:

- $M_o$  - Média das tensões coletadas (observadas).
- $M_{e(Gauss)}$  - Média das tensões modeladas (esperadas) para Gauss.
- $M_{e(Rayleigh)}$  - Média das tensões modeladas (esperadas) para Rayleigh.
- $M_{e(Rice)}$  - Média das tensões modeladas (esperadas) para Rice.
- $dp_o$  - Desvio padrão das tensões coletadas (observadas).
- $dp_{e(Gauss)}$  - Desvio padrão das tensões modeladas (esperadas) para Gauss.
- $dp_{e(Rayleigh)}$  - Desvio padrão das tensões modeladas (esperadas) para Rayleigh.
- $dp_{e(Rice)}$  - Desvio padrão das tensões modeladas (esperadas) para Rice.
- $EMQ_{Gauss}$  - Erro Médio Quadrático das tensões modeladas (esperadas) para Gauss.
- $EMQ_{Rayleigh}$  - Erro Médio Quadrático das tensões modeladas (esperadas) para Rayleigh.
- $EMQ_{Rice}$  - Erro Médio Quadrático das tensões modeladas (esperadas) para Rice
- $E_{Gauss}$  - Coeficiente de Eficiência de *Nash-Sutcliffe* para Gauss.
- $E_{Rayleigh}$  - Coeficiente de Eficiência de *Nash-Sutcliffe* para Rayleigh.
- $E_{Rice}$  - Coeficiente de Eficiência de *Nash-Sutcliffe* para Rice.

A análise final do presente teste consta das tabelas (5.22) a (5.31) e, no geral, confirmam o mesmo resultado obtido pelo teste do qui-quadrado, que caracteriza a PDF de Rice como a função de melhor ajuste, seguida por Rayleigh e Gauss.

<b>Rota: 1</b>				<b>Quantidade total setores no trecho: 260</b>			
<b>Análise</b>		<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>			
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe		252	189	0			
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, exclusivamente		71	8	0			
<b>Ordem de melhor ajuste</b>		<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>			
<b>PDF</b>		Rice	Rayleigh	Gauss			

Tabela 5.22: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 1.

Resultados obtidos para os setores 01, 87, 173 e 260, gráficos 5.12 e 5.13:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 87</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 173</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 260</b>	Rice	Rayleigh	Gauss

Tabela 5.23: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 87, 173 e 260 da Rota 1.

<b>Rota: 2</b>		<b>Quantidade total setores no trecho: 340</b>		
<b>Análise</b>		<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe		314	222	5
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, exclusivamente		113	21	5
	<b>Ordem de melhor ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
	<b>PDF</b>	Rice	Rayleigh	Gauss

Tabela 5.24: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 2.

Resultados obtidos para os setores 01, 113, 226 e 340, gráficos 5.14 e 5.15:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice	Rayleigh	Gauss
<b>Setor 113</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 226</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 340</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-

Tabela 5.25: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 113, 226 e 340 da Rota 2.

<b>Rota: 3</b>		<b>Quantidade total setores no trecho: 504</b>		
<b>Análise</b>		<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe		468	297	2
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, exclusivamente		205	34	2
	<b>Ordem de melhor ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
	<b>PDF</b>	Rice	Rayleigh	Gauss

Tabela 5.26: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 3.

Resultados obtidos para os setores 01, 168, 336 e 504, gráficos 5.16 e 5.17:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 168</b>	Rice	Rayleigh	Gauss
<b>Setor 336</b>	Rice	Rayleigh	Gauss
<b>Setor 504</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-

Tabela 5.27: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 168, 336 e 504 da Rota 3.

<b>Rota: 4</b>		<b>Quantidade total setores no trecho: 520</b>		
<b>Análise</b>		<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe		481	322	0
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, exclusivamente		198	39	0
	<b>Ordem de melhor ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
	<b>PDF</b>	Rice	Rayleigh	Gauss

Tabela 5.28: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 4.

Resultados obtidos para os setores 01, 173, 346 e 520, gráficos 5.18 e 5.19:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice	Rayleigh	Gauss
<b>Setor 173</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 346</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 520</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-

Tabela 5.29: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 173, 346 e 520 da Rota 4.

<b>Rota: 5</b>		<b>Quantidade total setores no trecho: 337</b>		
<b>Análise</b>		<b>Rice</b>	<b>Rayleigh</b>	<b>Gauss</b>
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe		319	253	2
Quantidade de vezes que a PDF apresentou o menor Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, exclusivamente		82	16	2
	<b>Ordem de melhor ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
	<b>PDF</b>	Rice	Rayleigh	Gauss

Tabela 5.30: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a Rota 5.

Resultados obtidos para os setores 01, 112, 224 e 337, gráficos 5.20 e 5.21:

<b>Ordem de Ajuste</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>
<b>Setor 01</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 112</b>	Rice	Rayleigh	Gauss
<b>Setor 224</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-
<b>Setor 337</b>	Rice/Rayleigh	Gauss	-

Tabela 5.31: Resultados do Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 112, 224 e 337 da Rota 5.

**Nota:** Para o teste do coeficiente de eficiência, o melhor ajuste é dado pela PDF que apresenta o menor Erro Médio Quadrático (EMQ) no setor em teste.

As tabelas 5.32 a 5.36 apresentam uma comparação entre os resultados obtidos no teste do qui-quadrado e no teste do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para cada uma das cinco rotas.

	<b>Melhor Ajuste</b>	<b>Para o Teste do Qui-quadrado</b>	<b>Para o Teste do Coeficiente de Nash-Sutcliffe</b>
<b>Rota 1</b>	<b>Setor 01</b>	Rice/Rayleigh	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 87</b>	-	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 173</b>	Rice/Rayleigh	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 260</b>	Rice	Rice

Tabela 5.32: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 87, 173 e 260 da Rota 1.

	<b>Melhor Ajuste</b>	<b>Para o Teste do Qui-quadrado</b>	<b>Para o Teste do Coeficiente de Nash-Sutcliffe</b>
<b>Rota 2</b>	<b>Setor 01</b>	Rice	Rice
	<b>Setor 113</b>	-	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 226</b>	-	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 340</b>	Rice/Rayleigh	Rice/Rayleigh

Tabela 5.33: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 113, 226 e 340 da Rota 2.

	<b>Melhor Ajuste</b>	<b>Para o Teste do Qui-quadrado</b>	<b>Para o Teste do Coeficiente de Nash-Sutcliffe</b>
<b>Rota 3</b>	<b>Setor 01</b>	Rice/Rayleigh	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 168</b>	Rice	Rice
	<b>Setor 336</b>	Rice	Rice
	<b>Setor 504</b>	-	Rice/Rayleigh

Tabela 5.34: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 168, 336 e 504 da Rota 3.

	<b>Melhor Ajuste</b>	<b>Para o Teste do Qui-quadrado</b>	<b>Para o Teste do Coeficiente de Nash-Sutcliffe</b>
<b>Rota 4</b>	<b>Setor 01</b>	Rice	Rice
	<b>Setor 173</b>	-	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 346</b>	Rice/Rayleigh	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 520</b>	-	Rice/Rayleigh

Tabela 5.35: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 173, 346 e 520 da Rota 4.

	<b>Melhor Ajuste</b>	<b>Para o Teste do Qui-quadrado</b>	<b>Para o Teste do Coeficiente de Nash-Sutcliffe</b>
<b>Rota 5</b>	<b>Setor 01</b>	Rice/Rayleigh	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 112</b>	Rice	Rice
	<b>Setor 224</b>	-	Rice/Rayleigh
	<b>Setor 337</b>	-	Rice/Rayleigh

Tabela 5.36: Comparação entre os resultados obtidos no Teste do qui-quadrado e no Teste do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para os setores 01, 112, 224 e 337 da Rota 5.

#### 5.4.2 DESVANECIMENTO EM GRANDE ESCALA

Para as análises de desvanecimento em grande escala, utilizou-se o programa “desvanecimento\_grande\_escala.m”, também em Matlab, anexo A.11, onde os dados de entrada são as distâncias de cada setor, em relação ao transmissor, e o nível de potência correspondente (dados obtidos a partir das bases de dados “pos\_setorxx”, gerada pelo programa “setores.m”). Os gráficos gerados são:

- A reta de melhor ajuste, ou seja, a perda no percurso, e o seu respectivo fator de atenuação, em função do nível de potência em  $dBm$  da amostra aquisitada e do logaritmo da distância (em  $km$ ) em relação ao transmissor,
- A Função Densidade de Probabilidade empírica (aquisitada) e a respectiva Log-normal que a caracteriza,
- A variação lenta do sinal coletado no domínio do tempo, considerando a perda no percurso, e

- A variação lenta do sinal coletado no domínio do tempo, desconsiderando a perda no percurso.

**Nota:** O fator de atenuação ( $n$ ) nos permite verificar a cobertura do sinal.

Os gráficos de 5.37 a 5.56 são os resultados obtidos após o processamento, para cada uma das rotas, assim definidos:

- Rota 1: Gráficos de 5.37 a 5.40,
  - Rota 2: Gráficos de 5.41 a 5.44,
  - Rota 3: Gráficos de 5.45 a 5.48,
  - Rota 4: Gráficos de 5.49 a 5.52, e
  - Rota 5: Gráficos de 5.53 a 5.56.
- 
- Rota 1:

Analisando a plotagem da Rota 1 no *Google Earth* (ver figura 5.16) e sabendo que a referida rota se iniciou em um ponto mais distante da antena de transmissão e terminou em uma posição geográfica mais próxima desta, é possível constatar que, na média, houve um ganho na potência recebida à medida que a aeronave se movimentava, devido a diminuição da distância entre o receptor e o transmissor. O gráfico 5.37 apresenta a perda no percurso considerando o eixo  $x$  como o logaritmo da distância do posicionamento do receptor em relação ao transmissor.

**Nota:** A perda no percurso é linear com o logaritmo da distância logo, estando esta última em escala logarítmica, é possível traçar a reta de melhor ajuste através do método dos mínimos quadrados.

O desvanecimento em grande escala causado pelo canal no sinal é ajustado por uma FDP Log-normal, conforme gráfico 5.38. Nos gráficos 5.39 e 5.40 podemos observar tal desvanecimento ao longo dos 260 setores da rota em questão, tomados a partir do ponto mais distante do transmissor, considerando e desconsiderando a perda no percurso sofrida pelo sinal recebido, respectivamente.

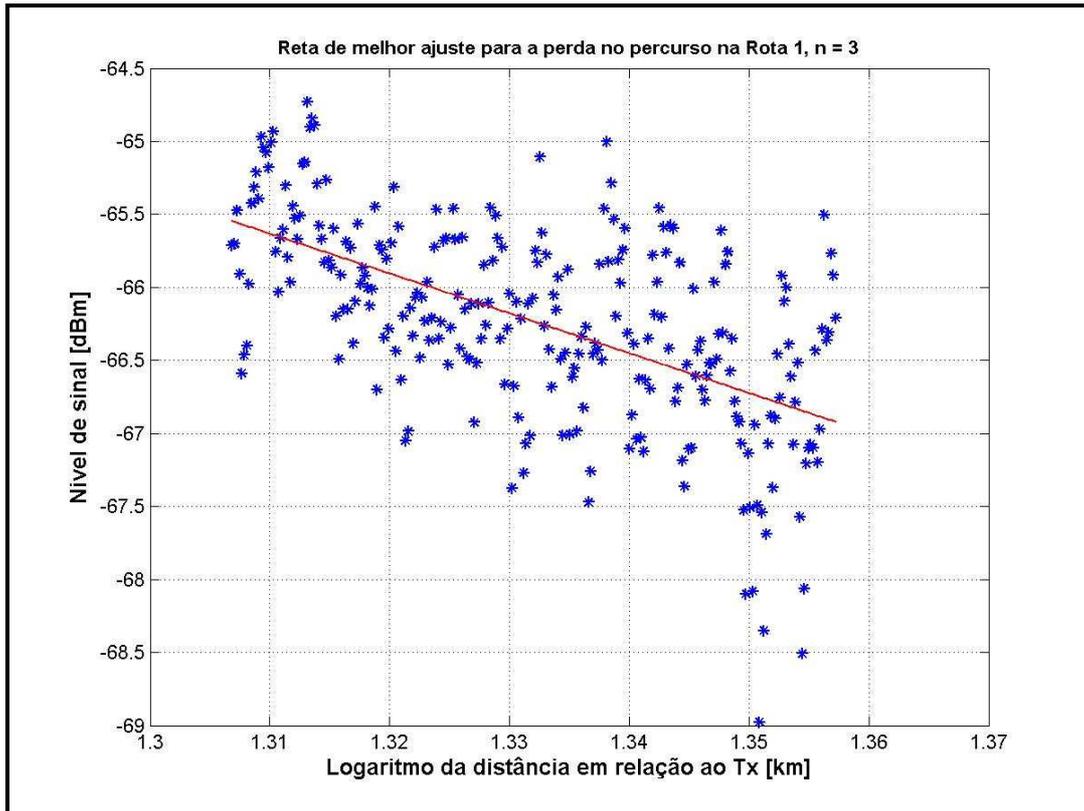


Gráfico 5.37: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 1.

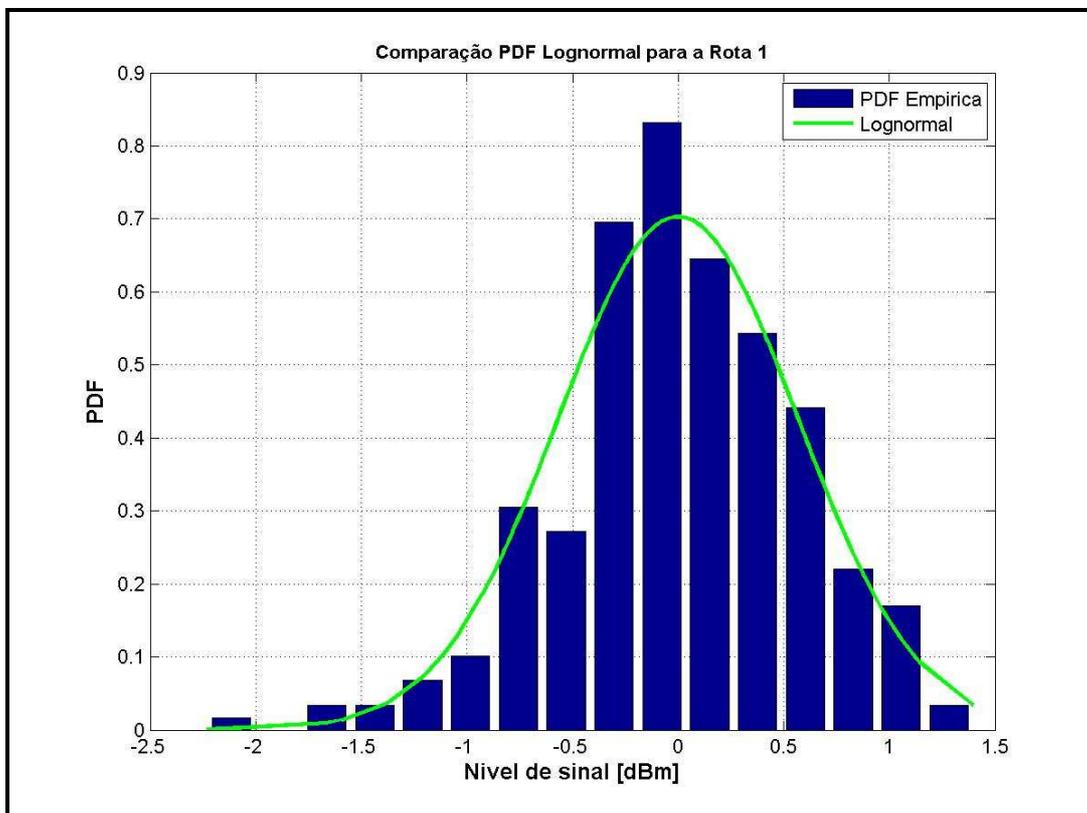


Gráfico 5.38: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 1.

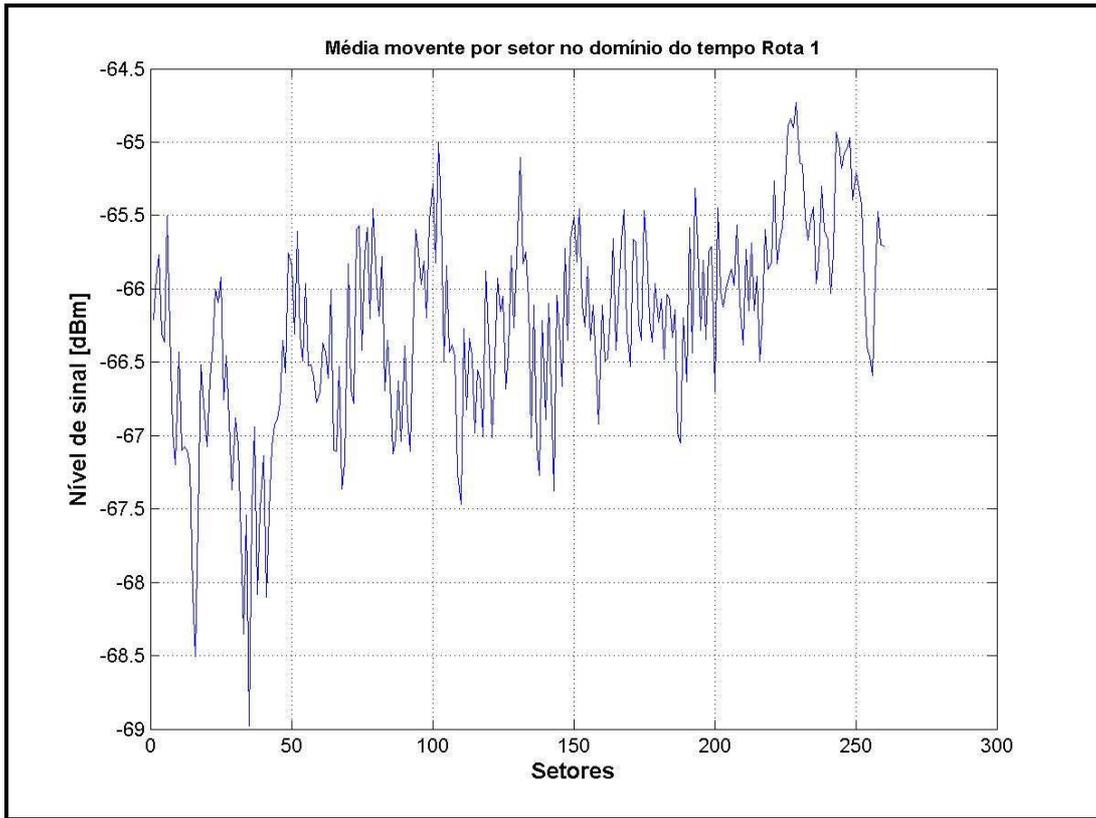


Gráfico 5.39: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 1.

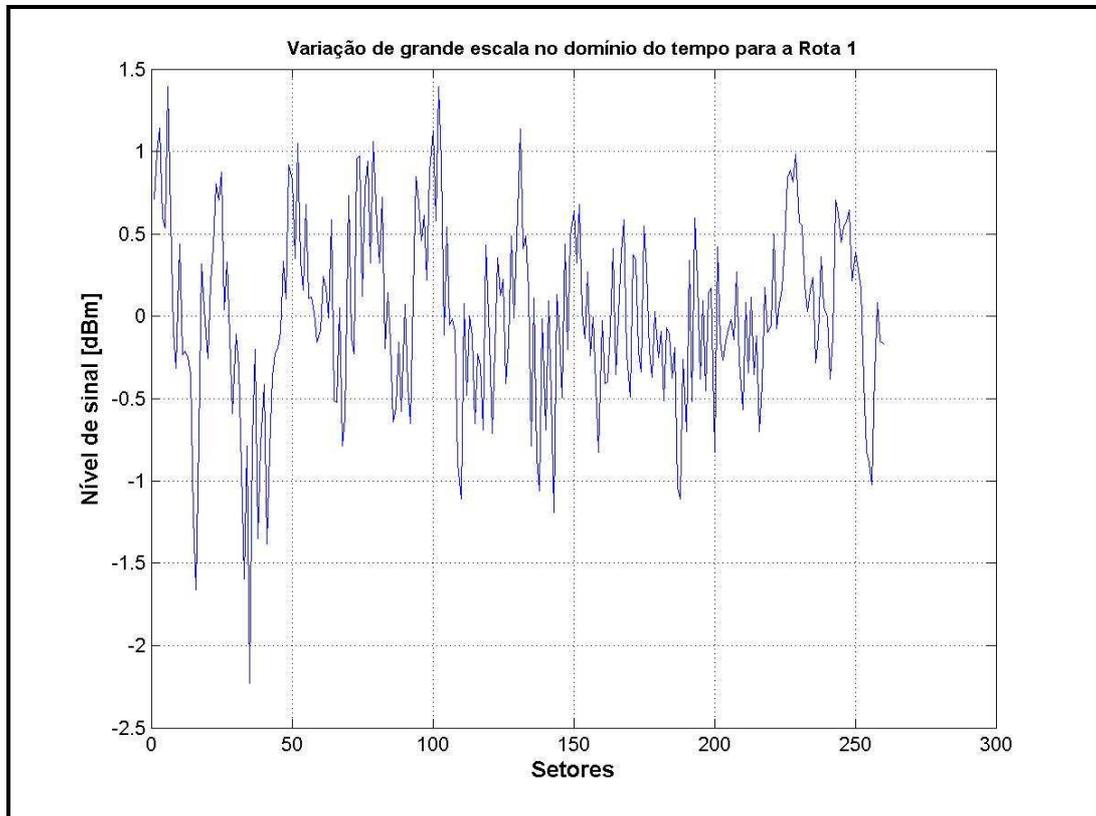


Gráfico 5.40: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 1.

- Rota 2:

Analisando a plotagem da Rota 2 no *Google Earth* (ver figura 5.17) e sabendo que embora a referida rota tenha sido iniciada em um ponto mais distante da antena de transmissão e finalizada em uma posição geográfica mais próxima desta, é possível constatar que, na média, houve uma queda no nível de sinal recebido, à medida que a aeronave se movimentava. Esta queda observada está relacionada à existência dos conjuntos montanhosos do Morro do Alemão, Morro do Caricó, Morro do Juramento, Morro da Serrinha e Morro do Sapê, que causaram espalhamentos e reflexões no sinal transmitido. O gráfico 5.41 apresenta a perda no percurso considerando o eixo x como o logaritmo da distância do posicionamento do receptor em relação ao transmissor. Nele, observa-se que, inicialmente, houve um ganho de sinal, à medida que a aeronave se deslocava do início para o fim da rota. Tal ganho, relacionado com a diminuição da distância entre o receptor e o transmissor, deixou de existir em função dos efeitos destrutivos causados pelas reflexões que chegaram ao receptor, advindas dos citados conjuntos montanhosos, causando uma atenuação no nível de sinal recebido, que aumentou, gradualmente, à medida que a aeronave se locomovia em direção ao aeroporto. Esta queda gradual na intensidade do sinal recebido está relacionada com o fato do receptor ter sofrido uma maior influência destrutiva ao se aproximar de tais morros.

O desvanecimento em grande escala causado pelo canal no sinal é ajustado por uma FDP Log-normal, conforme gráfico 5.42. Nos gráficos 5.43 e 5.44 podemos observar tal desvanecimento ao longo dos 340 setores da rota em questão, tomados a partir do ponto mais distante do transmissor, considerando e desconsiderando a perda no percurso sofrida pelo sinal recebido, respectivamente.

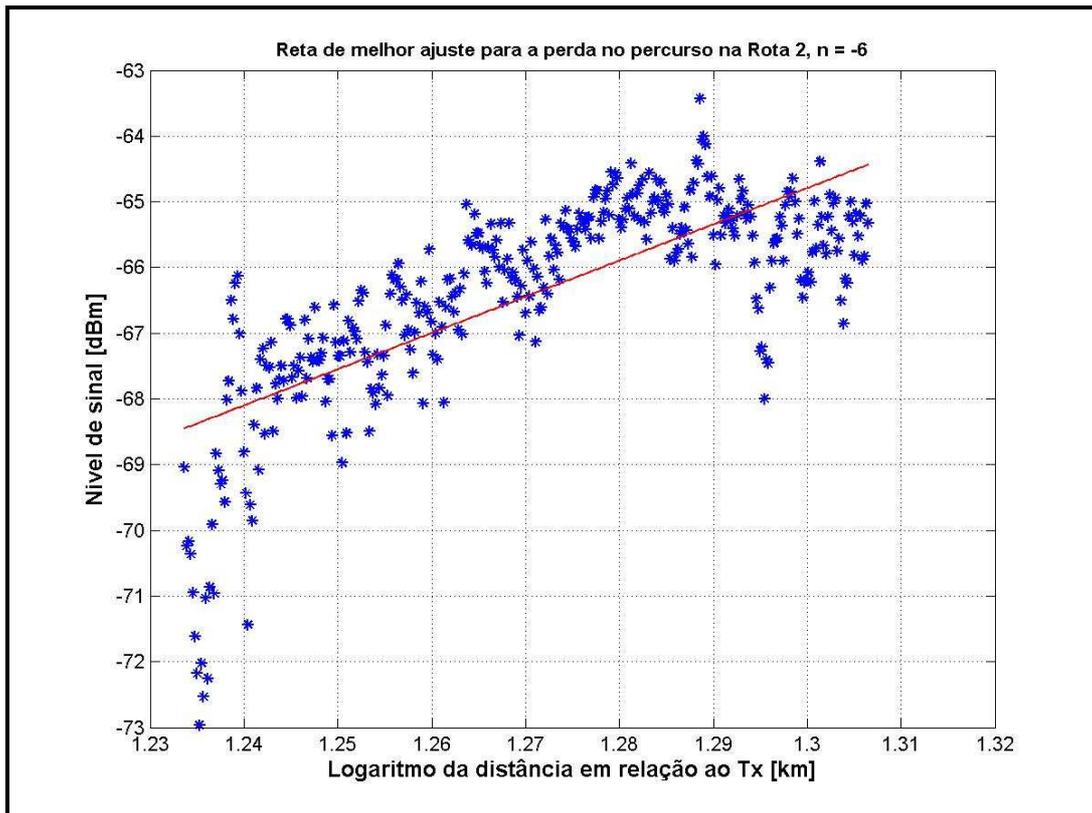


Gráfico 5.41: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 2.

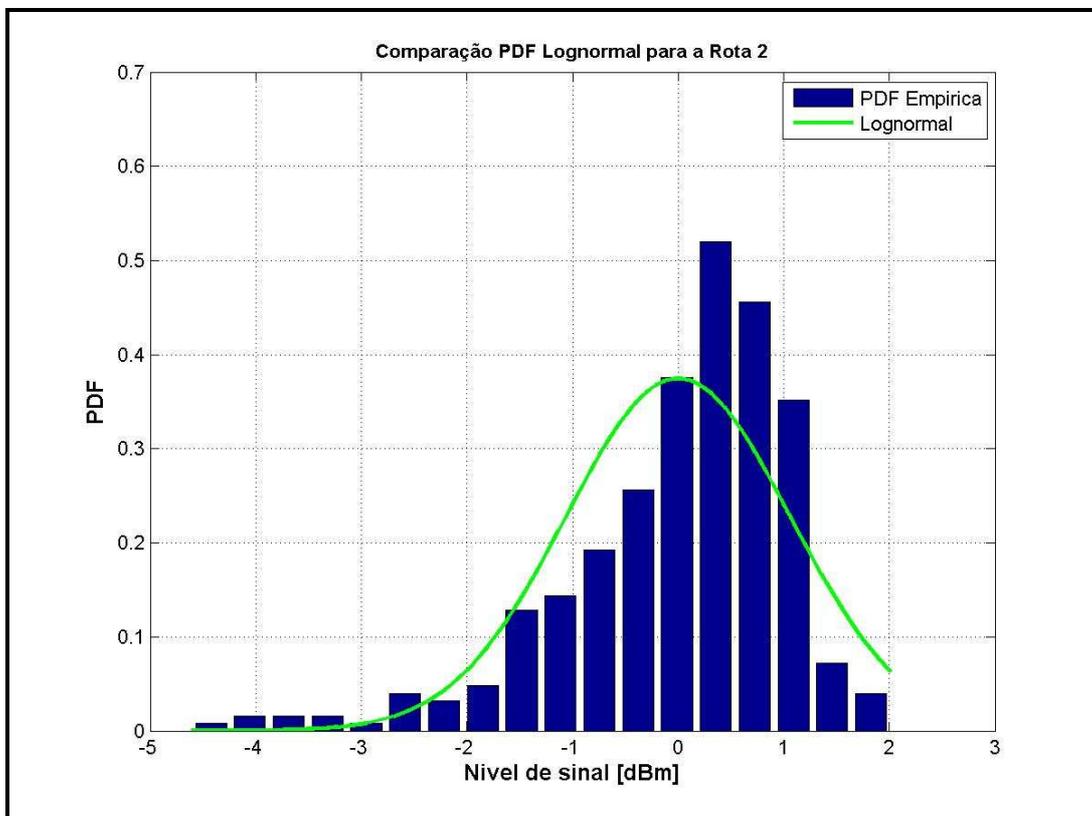


Gráfico 5.42: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 2.

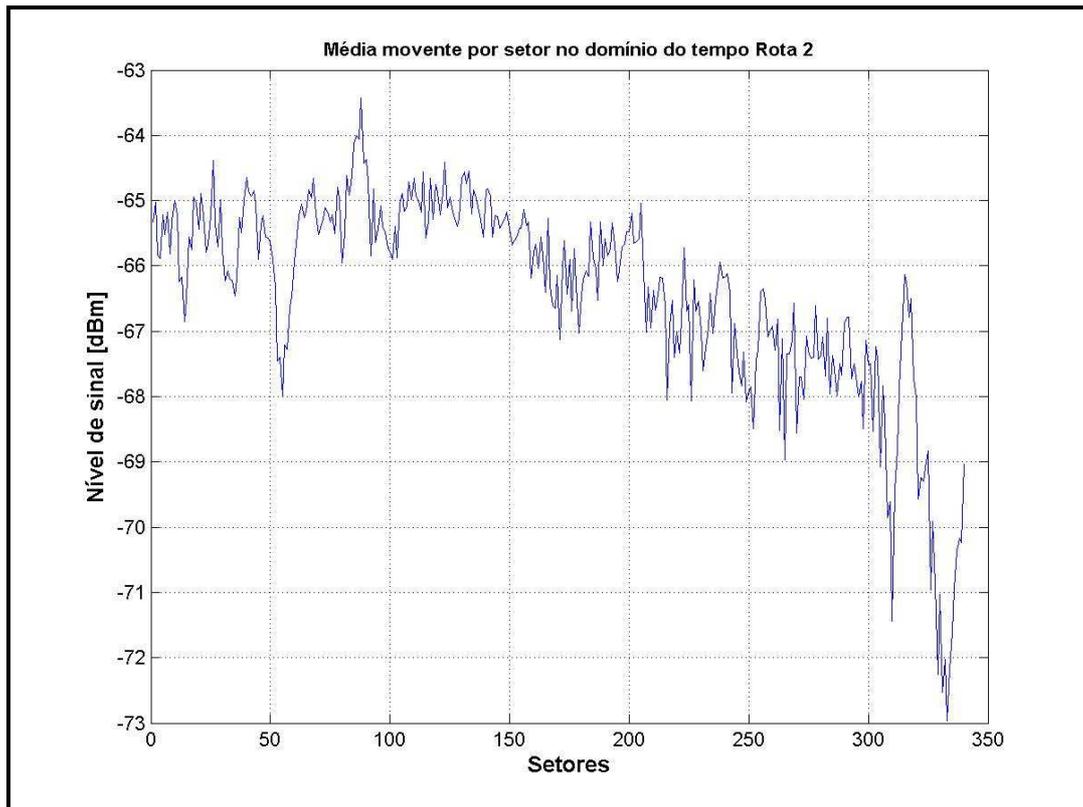


Gráfico 5.43: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 2.

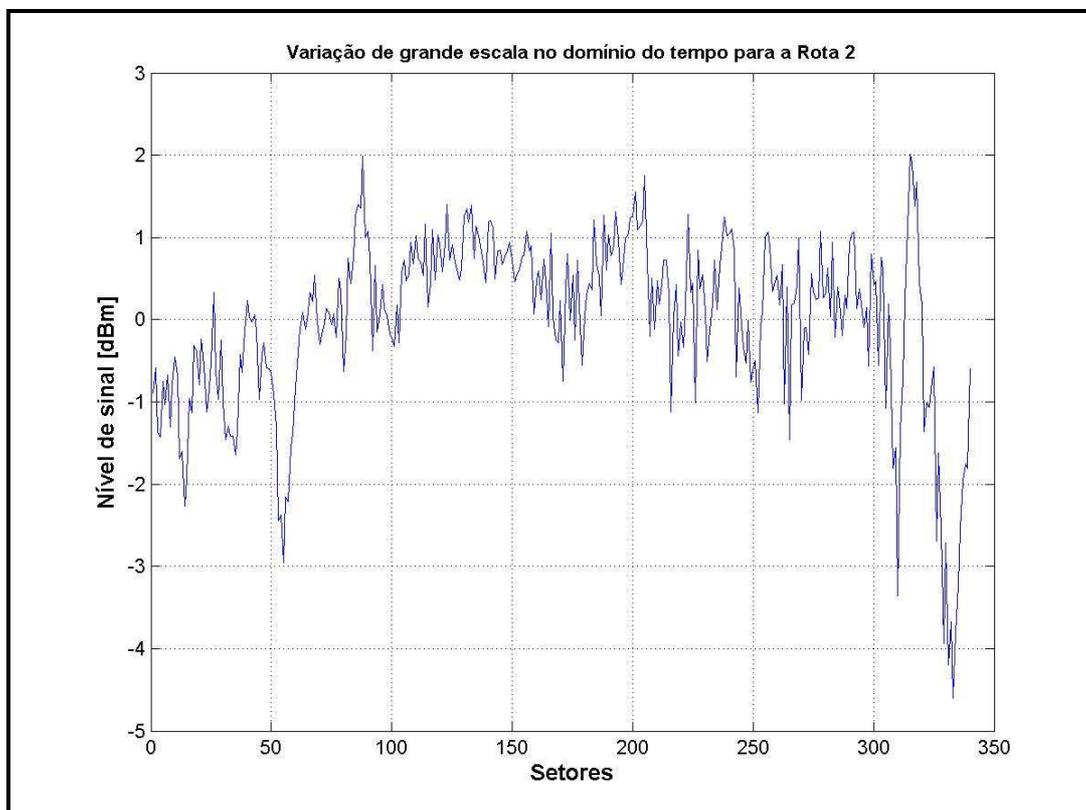


Gráfico 5.44: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 2.

- Rota 3:

Analisando a plotagem da Rota 3 no *Google Earth* (ver figura 5.18) percebe-se que a referida rota se iniciou em um ponto mais distante da antena de transmissão e terminou em uma posição geográfica mais próxima desta. Também percebe-se que, em relação à antena de transmissão, toda a rota encontra-se, praticamente, na direção dos conjuntos montanhosos do Morro do Alemão, Morro do Caricó, Morro do Juramento, Morro da Serrinha e Morro do Sapê, o que causou grande atenuação nos primeiros setores e, em menor grau, em outros setores ao longo da rota. Tais atenuações, deve-se aos efeitos de espalhamento e reflexão do sinal transmitido, causados pelos morros acima citados. Na média, o nível de sinal recebido apresentou-se de maneira ascendente, devido a diminuição da distância entre o receptor e o transmissor. Esta média é representada no gráfico 5.45 pela perda no percurso, considerando o eixo x como o logaritmo da distância do posicionamento do receptor em relação ao transmissor.

O desvanecimento em grande escala causado pelo canal no sinal é ajustado por uma FDP Log-normal, conforme gráfico 5.46. Nos gráficos 5.47 e 5.48 podemos observar tal desvanecimento ao longo dos 504 setores da rota em questão, tomados a partir do ponto mais distante do transmissor, considerando e desconsiderando a perda no percurso sofrida pelo sinal recebido, respectivamente.

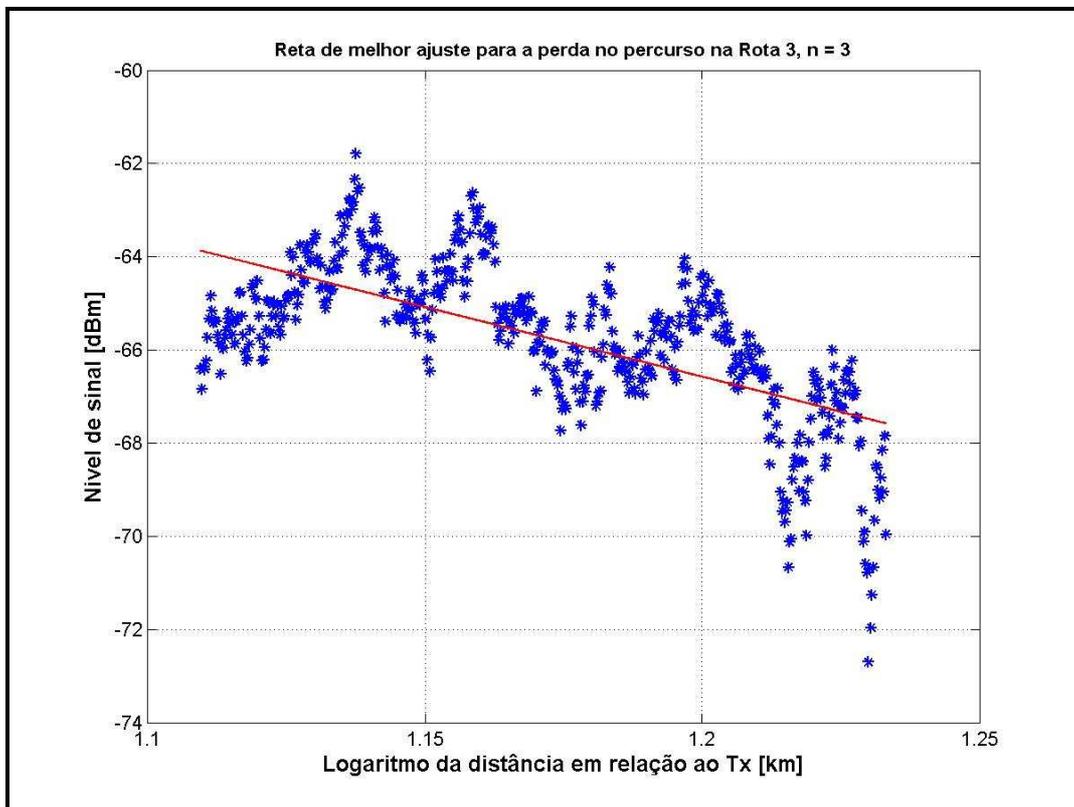


Gráfico 5.45: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 3.

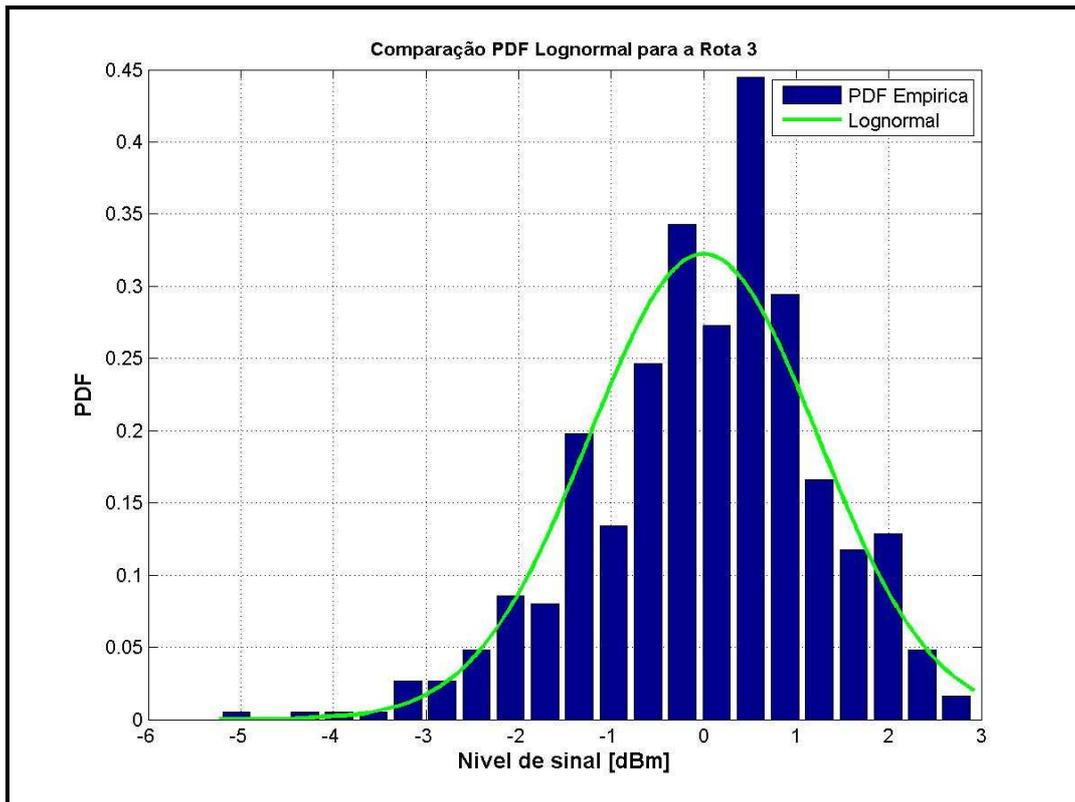


Gráfico 5.46: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 3.

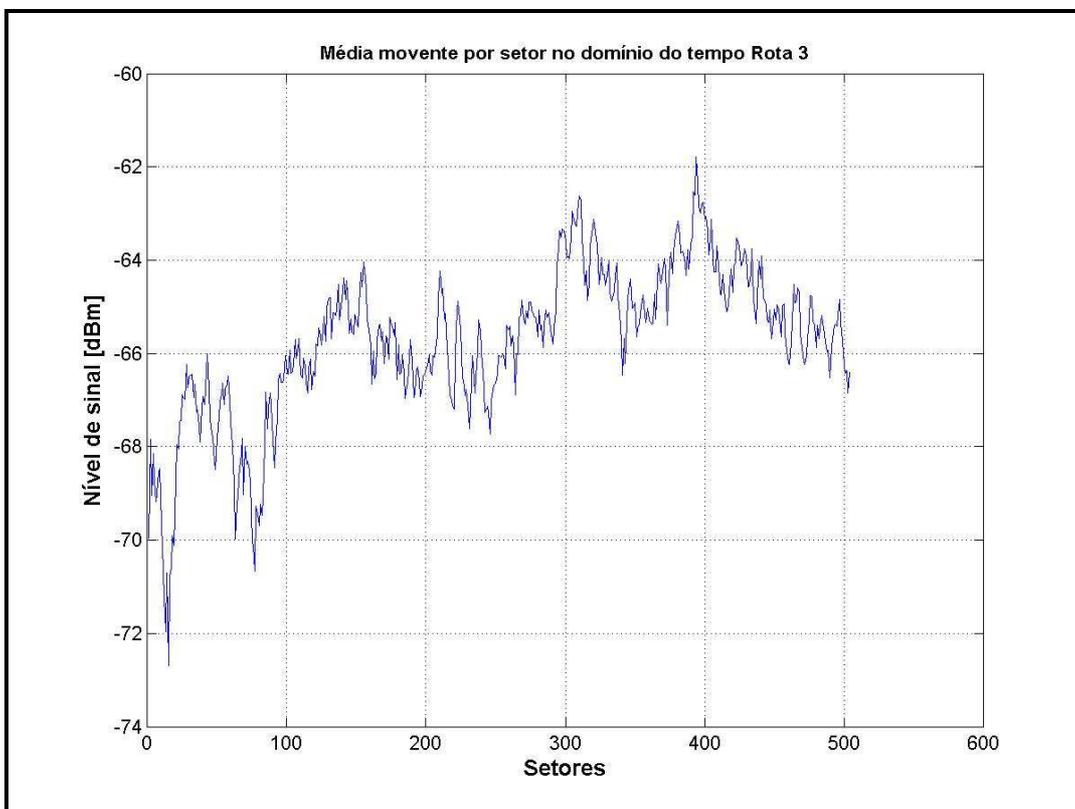


Gráfico 5.47: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 3.

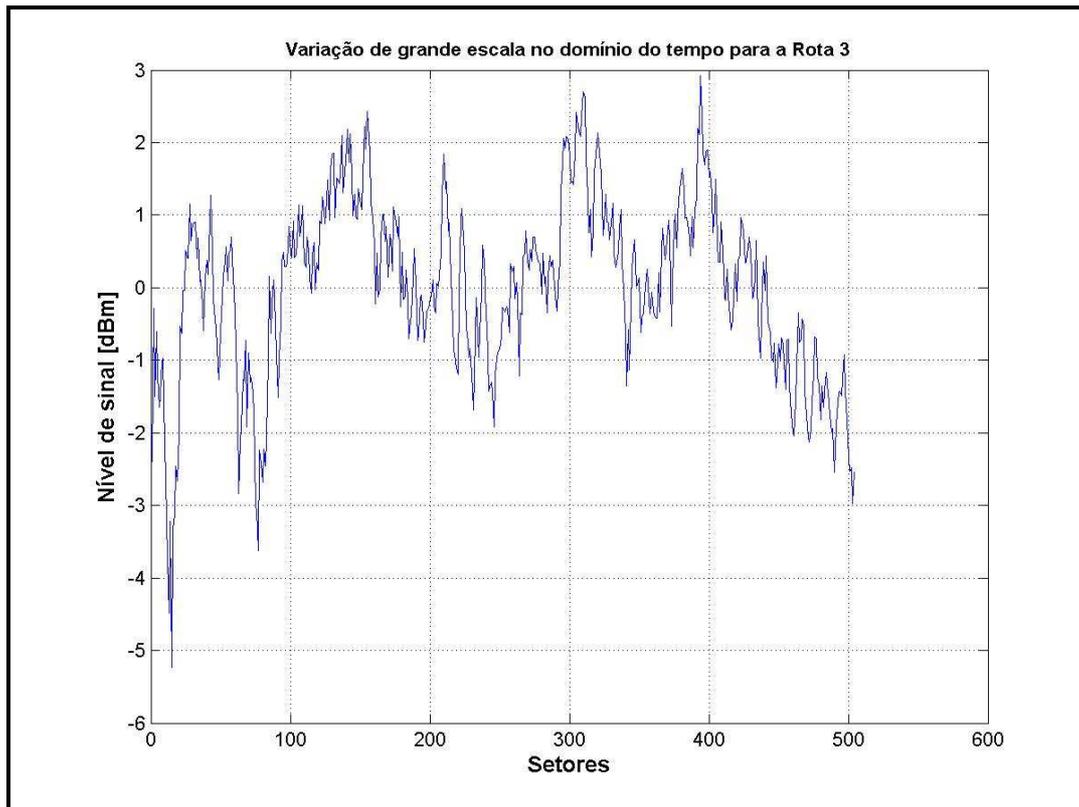


Gráfico 5.48: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 3.

- Rota 4:

Analisando a plotagem da Rota 4 no *Google Earth* (ver figura 5.19) e sabendo que a referida rota se iniciou em um ponto mais distante da antena de transmissão e terminou em uma posição geográfica mais próxima desta, é possível constatar que, na média, houve um ganho na potência recebida à medida que a aeronave se movimentava do início para o fim da rota, devido a diminuição da distância entre o receptor e o transmissor. O gráfico 5.49 apresenta a perda no percurso, considerando o eixo x como o logaritmo da distância do posicionamento do receptor em relação ao transmissor.

O desvanecimento em grande escala causado pelo canal no sinal é ajustado por uma FDP Log-normal, conforme gráfico 5.50. Nos gráficos 5.51 e 5.52 podemos observar tal desvanecimento ao longo dos 520 setores da rota em questão, tomados a partir do ponto mais distante do transmissor, considerando e desconsiderando a perda no percurso sofrida pelo sinal recebido, respectivamente.

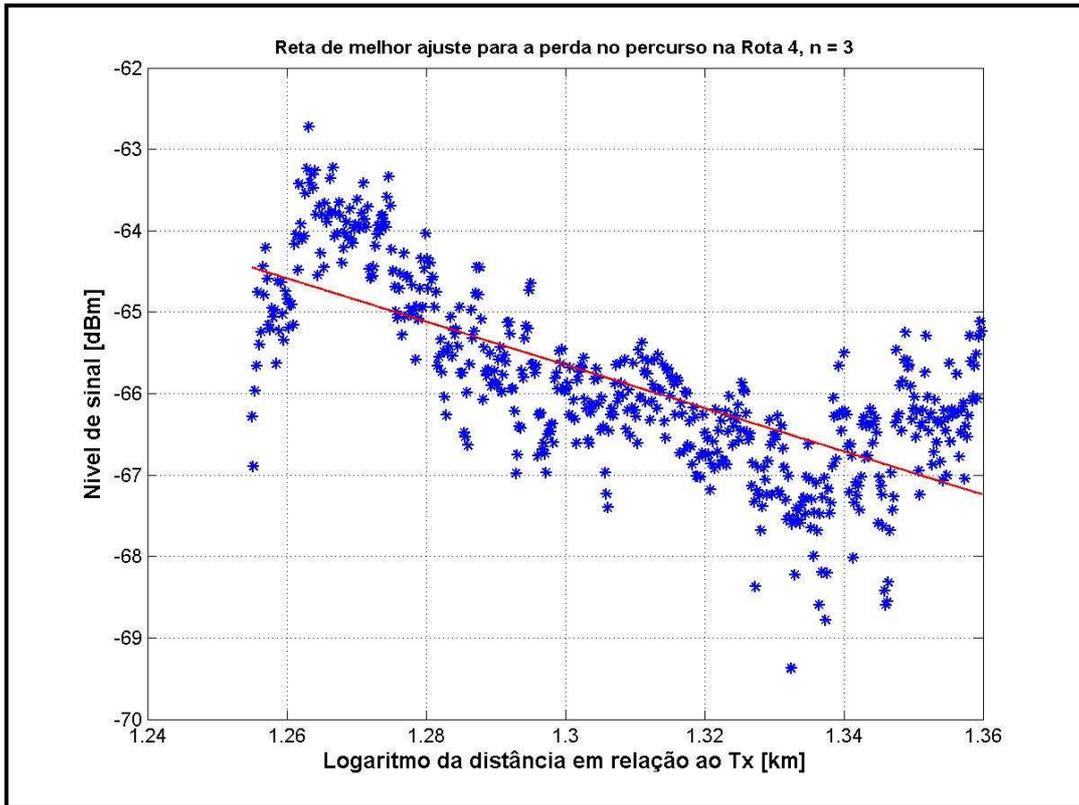


Gráfico 5.49: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 4.

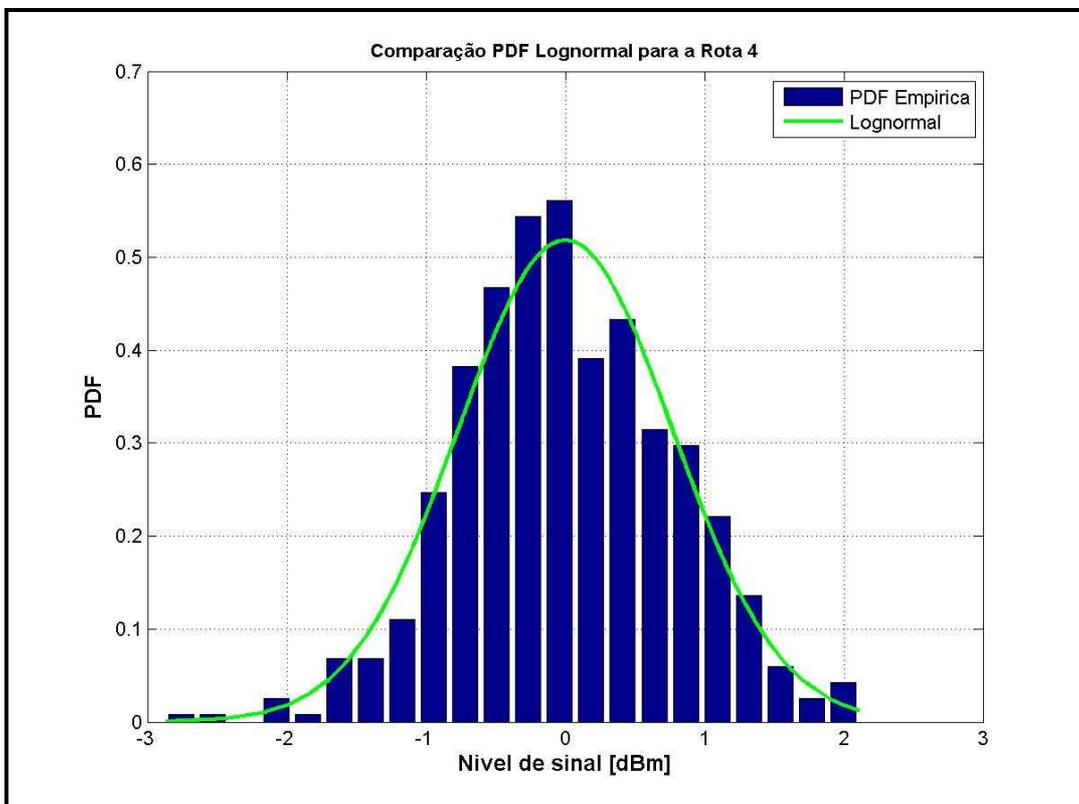


Gráfico 5.50: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 3.

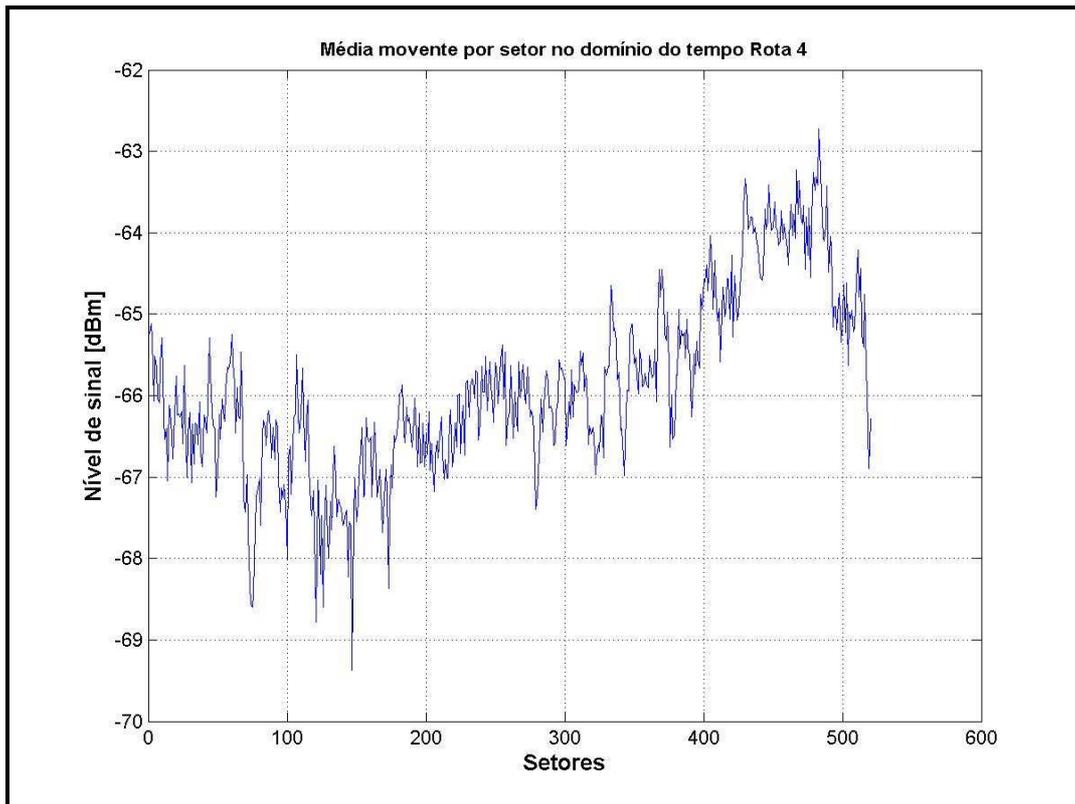


Gráfico 5.51: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 4.

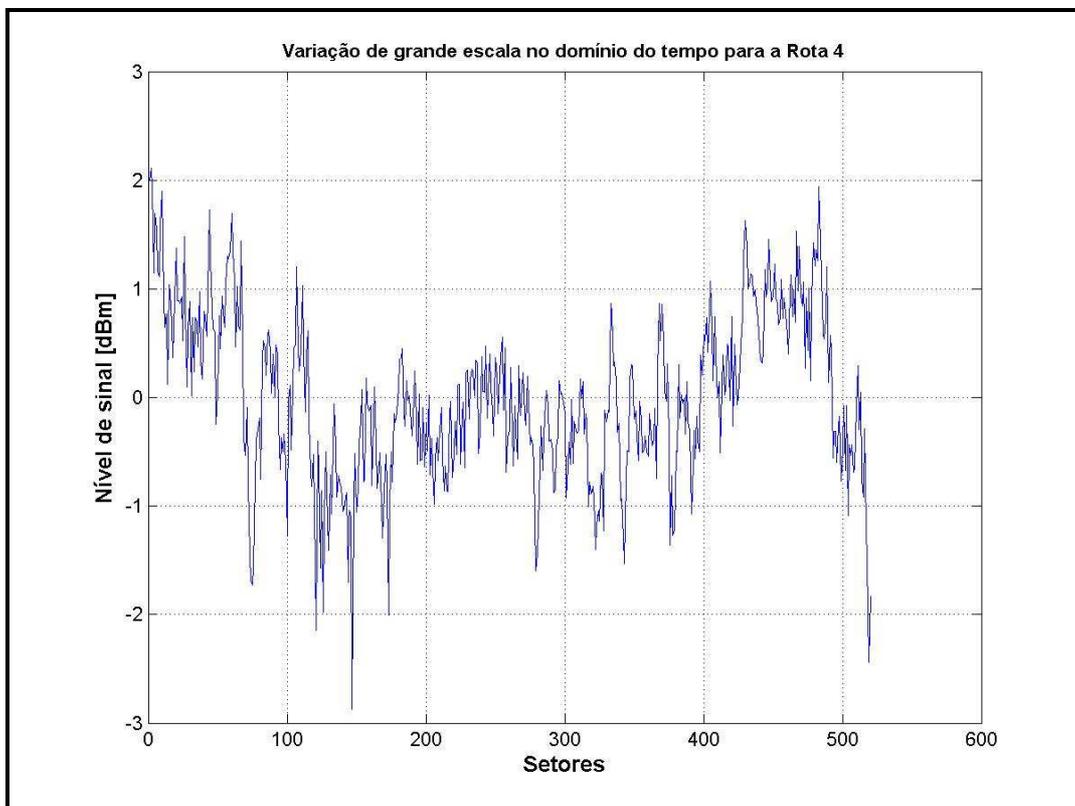


Gráfico 5.52: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 4.

- Rota 5:

Analisando a plotagem da Rota 5 no *Google Earth* (ver figura 5.20) e sabendo que a referida rota se iniciou em um ponto mais distante da antena de transmissão e terminou em uma posição geográfica mais próxima desta e que a mesma se encontra completamente na direção dos conjuntos montanhosos do Morro do Alemão, Morro do Caricó, Morro do Juramento, Morro da Serrinha e Morro do Sapê, é possível constatar uma oscilação no nível de potência recebida à medida que a aeronave se movimentava, com um grau de variação ligeiramente decrescente à medida que a aeronave se deslocava do início para o fim da rota. Essa queda de potência está representada no gráfico 5.53 pela reta de melhor ajuste, cujo fator de atenuação ( $n$ ) é negativo, devido às reflexões causadas pelos citados conjuntos montanhosos. O gráfico 5.53 apresenta a perda no percurso, considerando o eixo x como o logaritmo da distância do posicionamento do receptor em relação ao transmissor.

O desvanecimento em grande escala causado pelo canal no sinal é ajustado por uma FDP Log-normal, conforme gráfico 5.54. Nos gráficos 5.55 e 5.56 podemos observar tal desvanecimento ao longo dos 337 setores da rota em questão, tomados a partir do ponto mais distante do transmissor, considerando e desconsiderando a perda no percurso sofrida pelo sinal recebido, respectivamente.

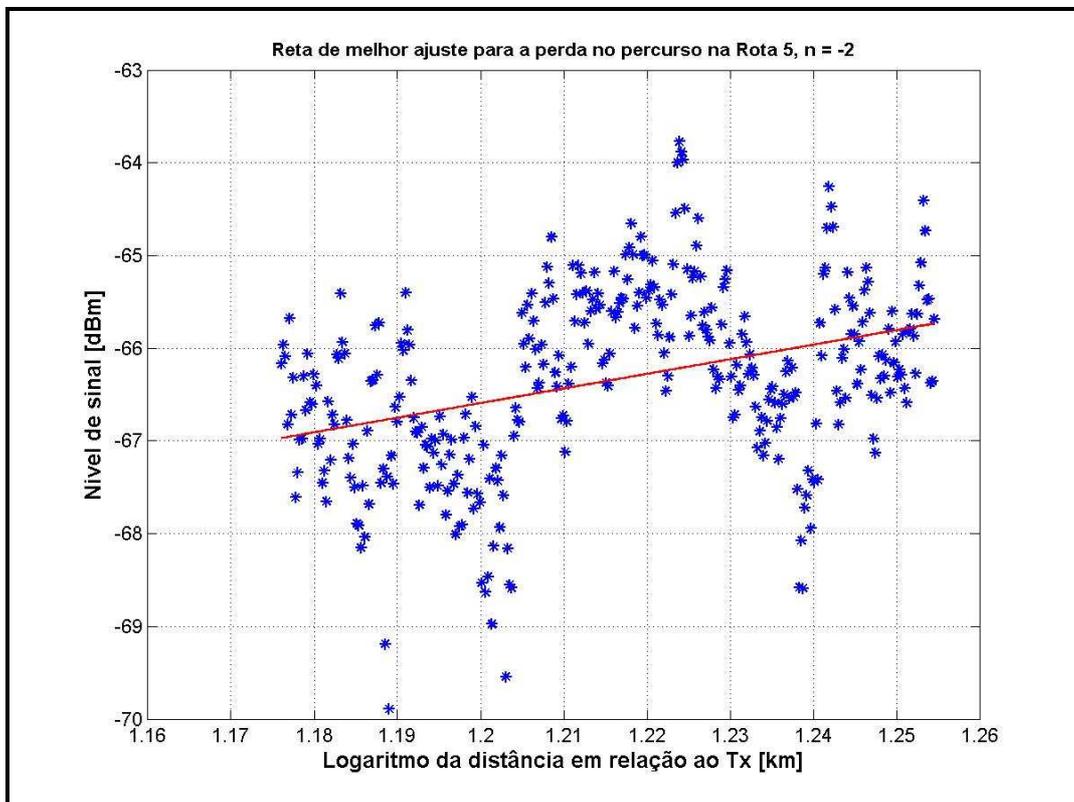


Gráfico 5.53: Reta de melhor ajuste – Perda no percurso para a Rota 5.

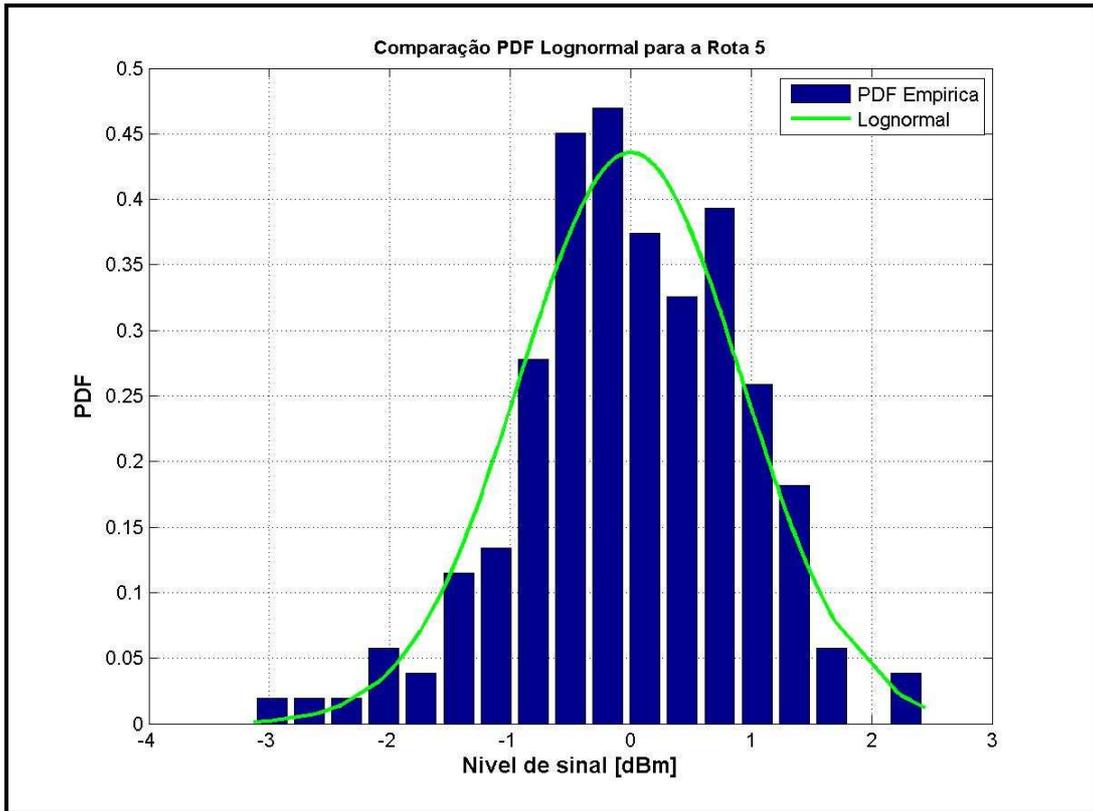


Gráfico 5.54: Ajuste do desvanecimento em grande escala observado na Rota 5.

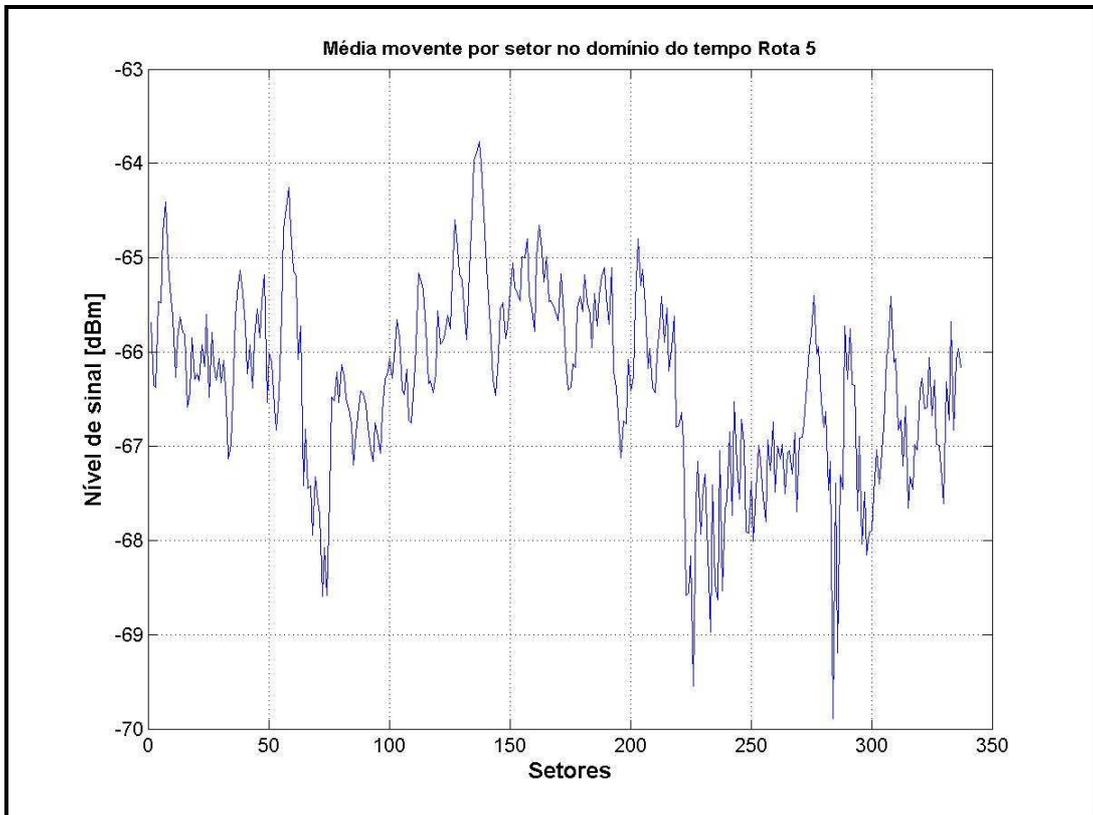


Gráfico 5.55: Variação de grande escala considerando a perda no percurso para a Rota 5.

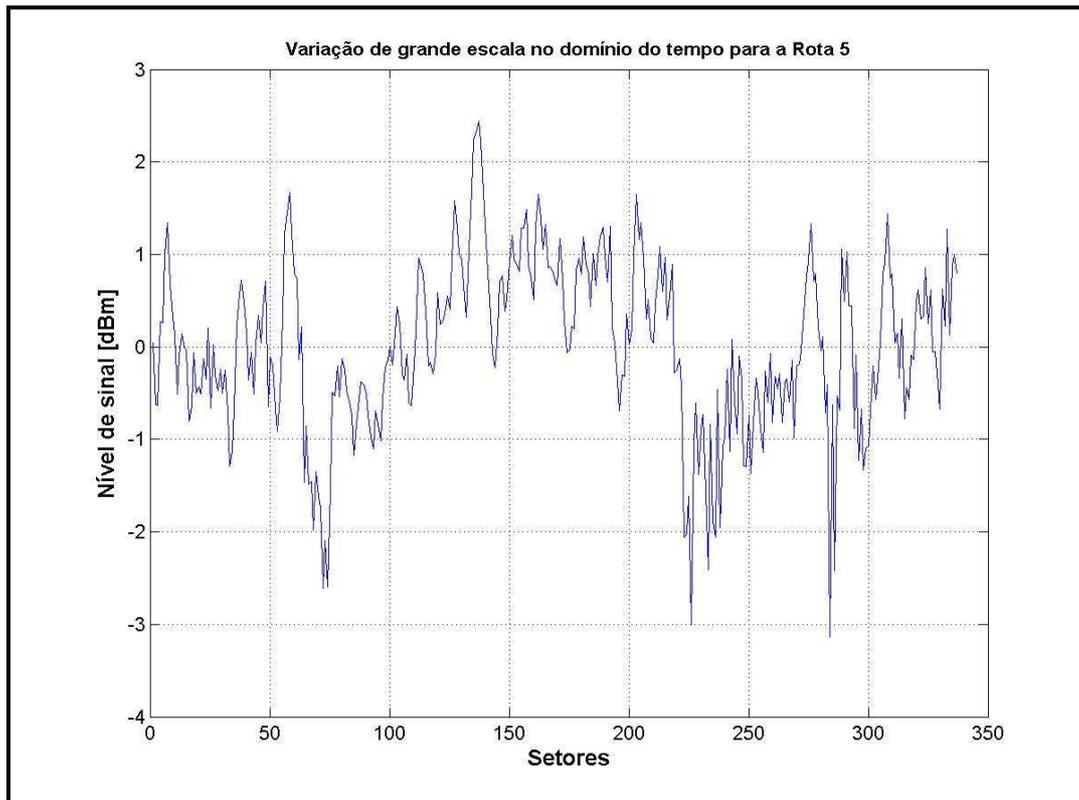


Gráfico 5.56: Variação de grande escala desconsiderando a perda no percurso para a Rota 5.

#### 5.4.2.1 TESTE DO QUI-QUADRADO

Para verificar a aderência entre os valores do sinal de variabilidade em larga escala e a Distribuição Log-normal, foi realizado o teste do qui-quadrado, cuja lógica de processamento está contida no programa “desvanecimento\_grande\_escala.m”, onde é possível extrair o valor do teste qui-quadrado, verificar se a FDP Log-normal passou no teste e o fator de atenuação correspondente para cada uma das rotas, através das variáveis “qui\_teste\_gauss”, “prob\_gauss” e “fator\_n\_prx” respectivamente. Os valores das potências mínima e máxima recebidas em cada rota foram checados a partir da base de dados do sinal medido. A tabela 5.37 reúne os valores encontrados pelo referido teste.

**Nota:** Quando a variável “prob\_gauss”, constante do programa “desvanecimento\_grande\_escala.m”, for igual a “1”, significa que a rota passou no teste qui-quadrado. Quando esse valor for igual “0”, significa que a rota não passou no teste qui-quadrado.

Rota	Potência Mínima	Potência Máxima	Valor Teste QUI Gauss	Passou no Teste	Fator de Atenuação (aproximado)
1	-68,98	-64,73	0,62	Sim	2,73
2	-72,97	-63,43	2,59	Sim	-5,51
3	-72,70	-61,79	0,60	Sim	2,99
4	-69,37	-62,73	0,25	Sim	2,66
5	-69,77	-63,77	0,35	Sim	-1,57

Tabela 5.37: Resultados do ajuste do desvanecimento em grande escala através do teste do qui-quadrado.

**Nota:** Os valores negativos para os fatores de atenuação das rotas 2 e 5 estão relacionados ao fato de que, conforme observado nos gráficos 5.41 e 5.53, a potência recebida tende a ficar menor à medida que o receptor se aproxima do transmissor. Esta queda está relacionada à existência dos conjuntos montanhosos do Morro do Alemão, Morro do Caricó, Morro do Juramento, Morro da Serrinha e Morro do Sapê, que causaram espalhamento e reflexões do sinal transmitido, influenciando, destrutivamente, no nível de sinal recebido.

Sabe-se que todas as rotas estavam, praticamente, com visada direta para o transmissor e que, em relação a este, as distâncias do receptor não representam grandes afastamentos, o que refletiu em bons níveis de sinal coletados. Sabe-se, também, que, em função do vôo oportuno, as rotas apresentam-se, relativamente, oblíquas à reta de aproximação à antena de transmissão. Sabe-se, ainda, que as rotas 2 e 5 não são exatamente iguais, embora os últimos setores da primeira, possuam, praticamente, as mesmas latitudes e longitudes dos primeiros setores da segunda, entretanto, o fator de atenuação na rota 2 mostrou-se três vezes maior que aquele observado na rota 5. Isto mostra que as reflexões advindas dos morros e que chegam aos últimos setores da rota 2 contribuem de forma diferente daquelas que chegam aos primeiros setores da rota 5, conforme se observa na figura 5.25. Isto se explica pelo fato da rota 2 distar da ordem de 100 metros acima da rota 5.

Os resultados do ajuste para todas as rotas, sugerem, conforme dados experimentais já têm demonstrado, uma boa adequação à fdp Log-normal.

### 5.4.3 SIMULAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS PARA PREDIÇÃO DE COBERTURA E VISIBILIDADE DO CANAL RÁDIO MÓVEL

Para checar o alcance do volume de cobertura do sinal transmitido, como também, checar a visibilidade da antena transmissora no espaço aéreo, foi utilizado o *software* de cobertura EMACS, desenvolvido pela empresa IDS - *Ingegneria dei Sistemi* S.p.A. Tal *software* possui a capacidade de simular, eletronicamente, o nível de sinal recebido e checar se há visibilidade óptica em qualquer lugar do espaço e possui, ainda, a facilidade de plotar tais simulações (diagramas) no *Google Earth*, permitindo uma avaliação espacial da propagação do sinal transmitido. As simulações geradas consideram o relevo existente, entretanto não levam em consideração as obstruções artificiais como edificações e nem as obstruções causadas por árvores ou possíveis interferências causadas por outros sistemas eletrônicos irradiantes, como também não considera as condições atmosféricas típicas, ou sequer particulares, do local, portanto, os resultados medidos nem sempre correspondem aos resultados simulados, devido às variáveis não consideradas pelo *software*.

As simulações de cobertura constantes das figuras 5.27 a 5.31 foram feitas para os níveis 1.000 pés, 2.647 pés (nível correspondente ao nível médio de voo da Rota 1 – 807 metros), 5.000 pés, 10.000 pés e 20.000 pés respectivamente, utilizando um diagrama de irradiação típico de antenas DME. A figura 5.32 mostra o diagrama de visibilidade para a antena de transmissão. Todas as simulações foram feitas considerando um espaço aéreo contido em um quadrado de lado igual 120 MN (222.240 metros) centrado na antena de transmissão.

As figuras 5.27 a 5.31, representativas das simulações feitas no EMACS, em modo estático, não permitem uma boa avaliação, ao contrário de quando analisamos dinamicamente no *Google Earth*. Com objetivo de verificar o alcance do sinal transmitido, tomaremos como exemplo o diagrama de cobertura obtido para a Rota 1 (nível médio de vôo: 2.647 pés), constante da figura 5.33, onde cada anel tracejado está centrado na antena de transmissão e dista 10 MN (18.520 metros) entre si. A radial tracejada em vermelho ( $254,50^\circ$ ), nesta figura, representa a direção aproximada dos voos e a seta vermelha, a direção. Para as demais altitudes médias sobrevoadas (vide tabela 5.10), o diagrama de cobertura apresenta resultados similares. Após análise quantitativa entre os valores medidos e simulados e, sabendo que durante as medições foi utilizado um amplificador de potência, que entregava ao receptor um ganho de 12 *dB* ao receptor, na faixa de frequência do sinal transmitido, percebe-se a equivalência. É importante notar que as pequenas discrepâncias que podem existir estão relacionadas às variáveis não consideradas pelo *software* de simulação.

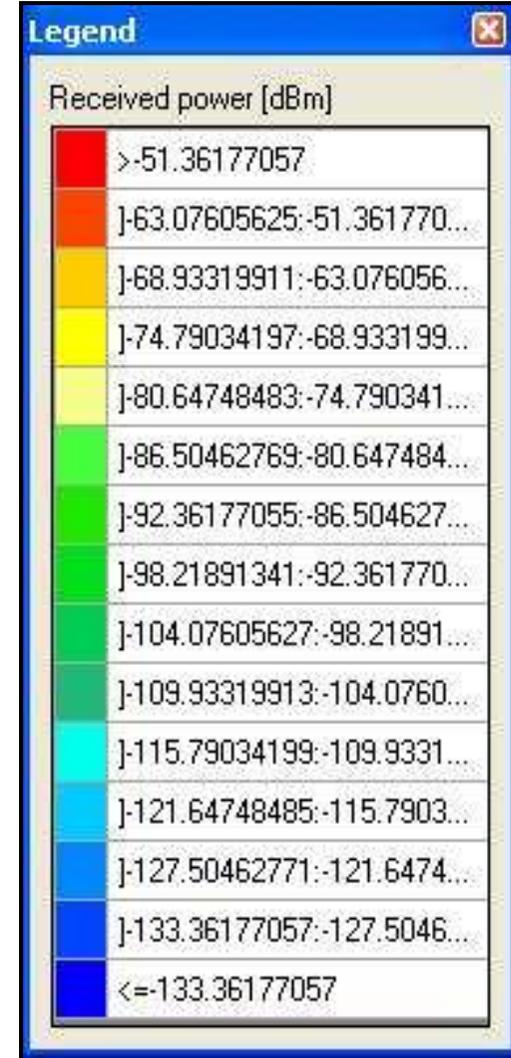
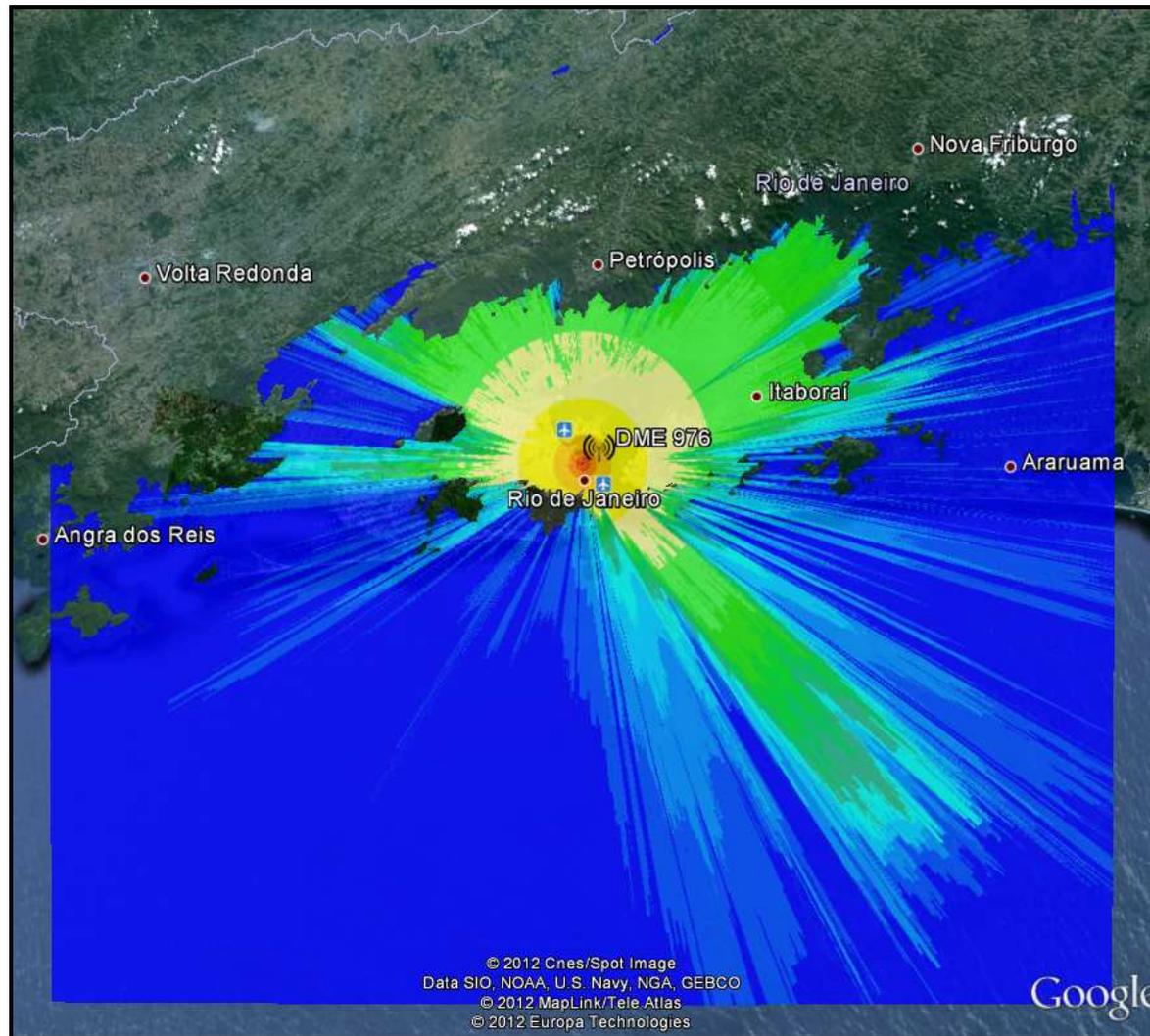


Figura 5.27: Diagrama de cobertura: 1.000 pés.

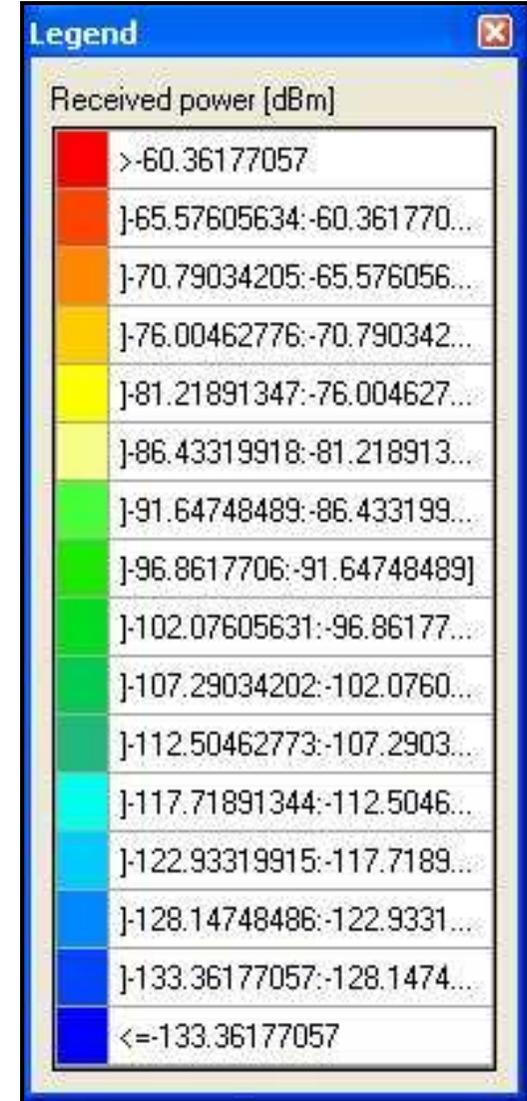
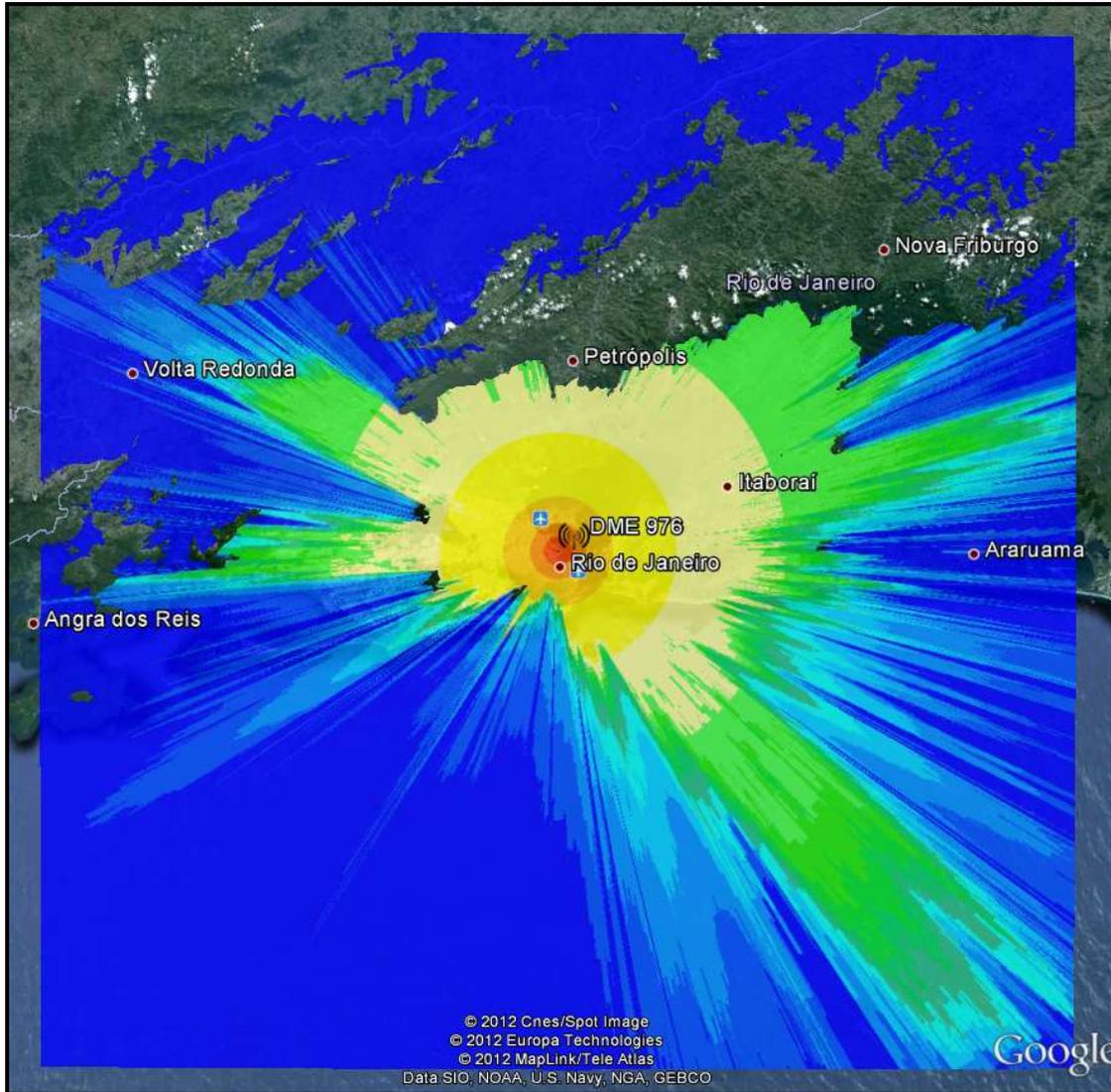


Figura 5.28: Diagrama de cobertura: 2.647 pés – Altitude média de voo para a Rota 1.

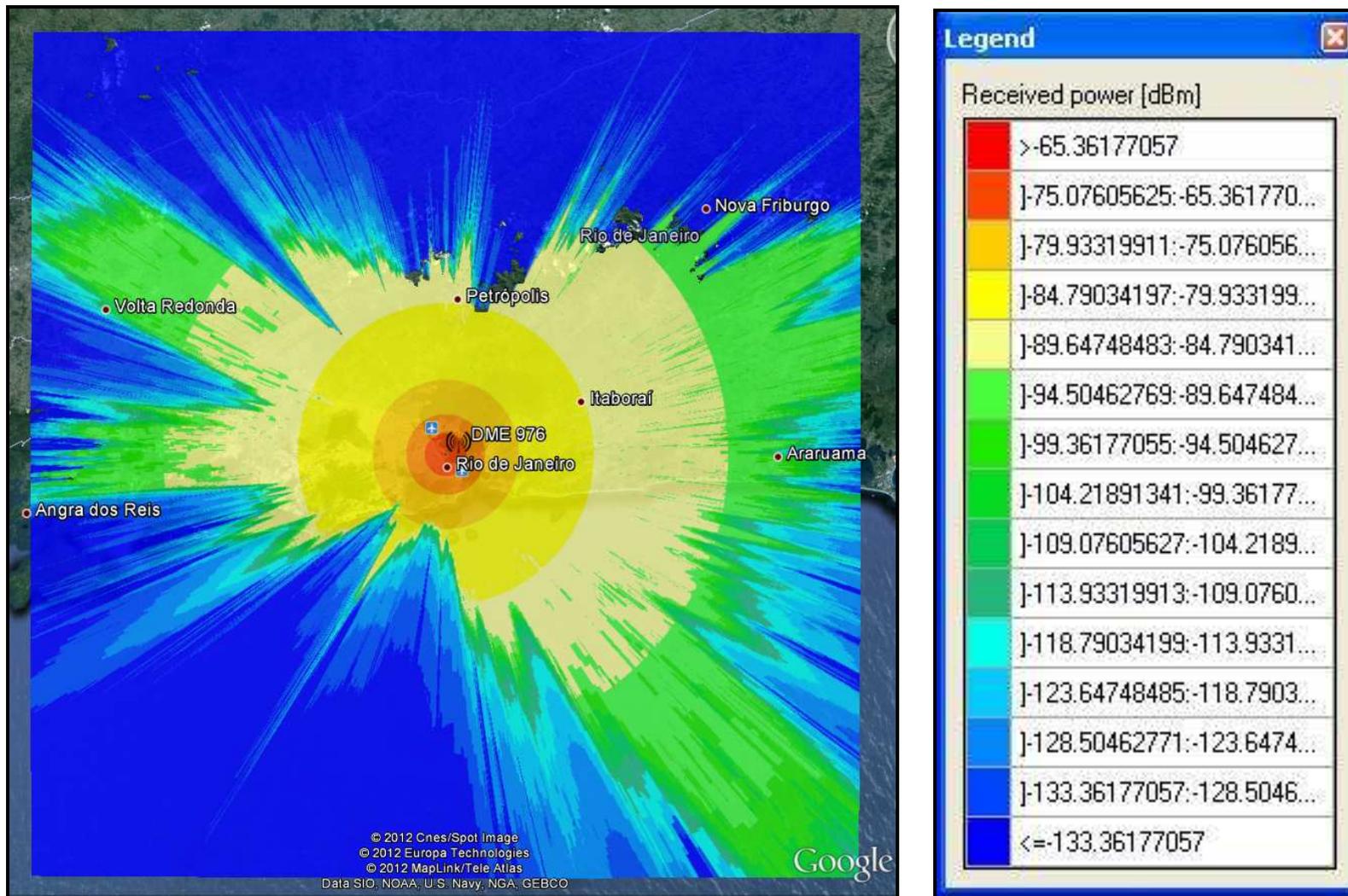


Figura 5.29: Diagrama de cobertura: 5.000 pés.

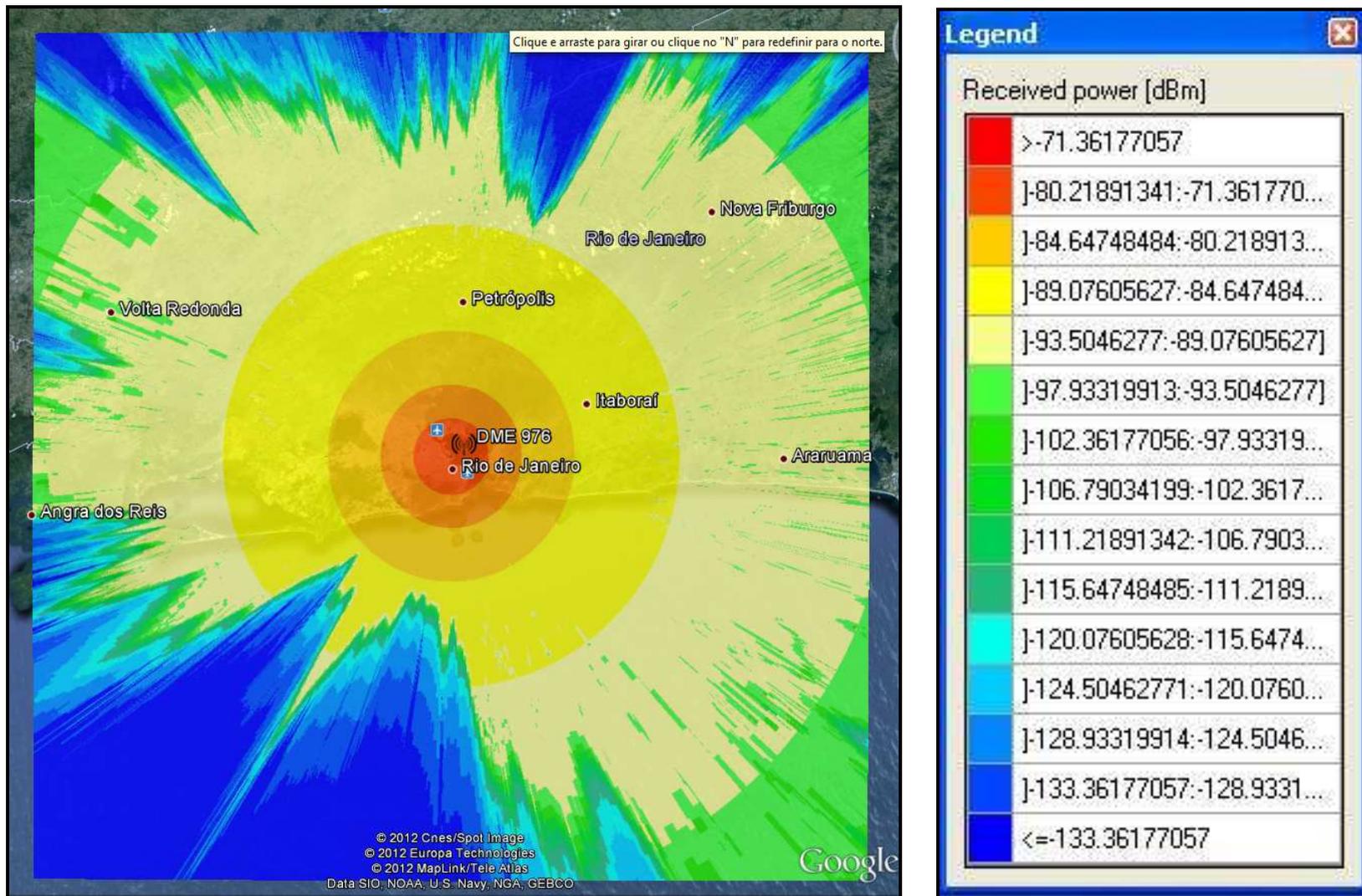


Figura 5.30: Diagrama de cobertura: 10.000 pés.

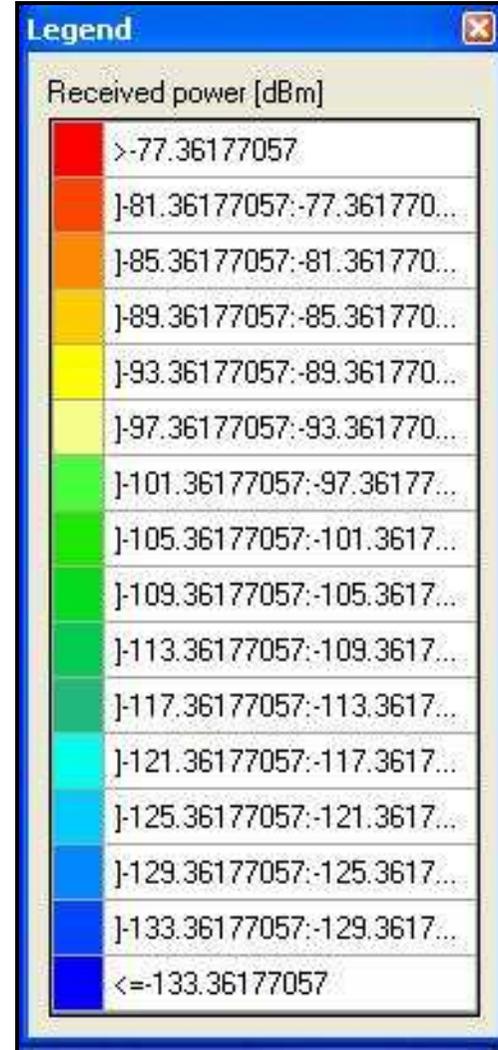
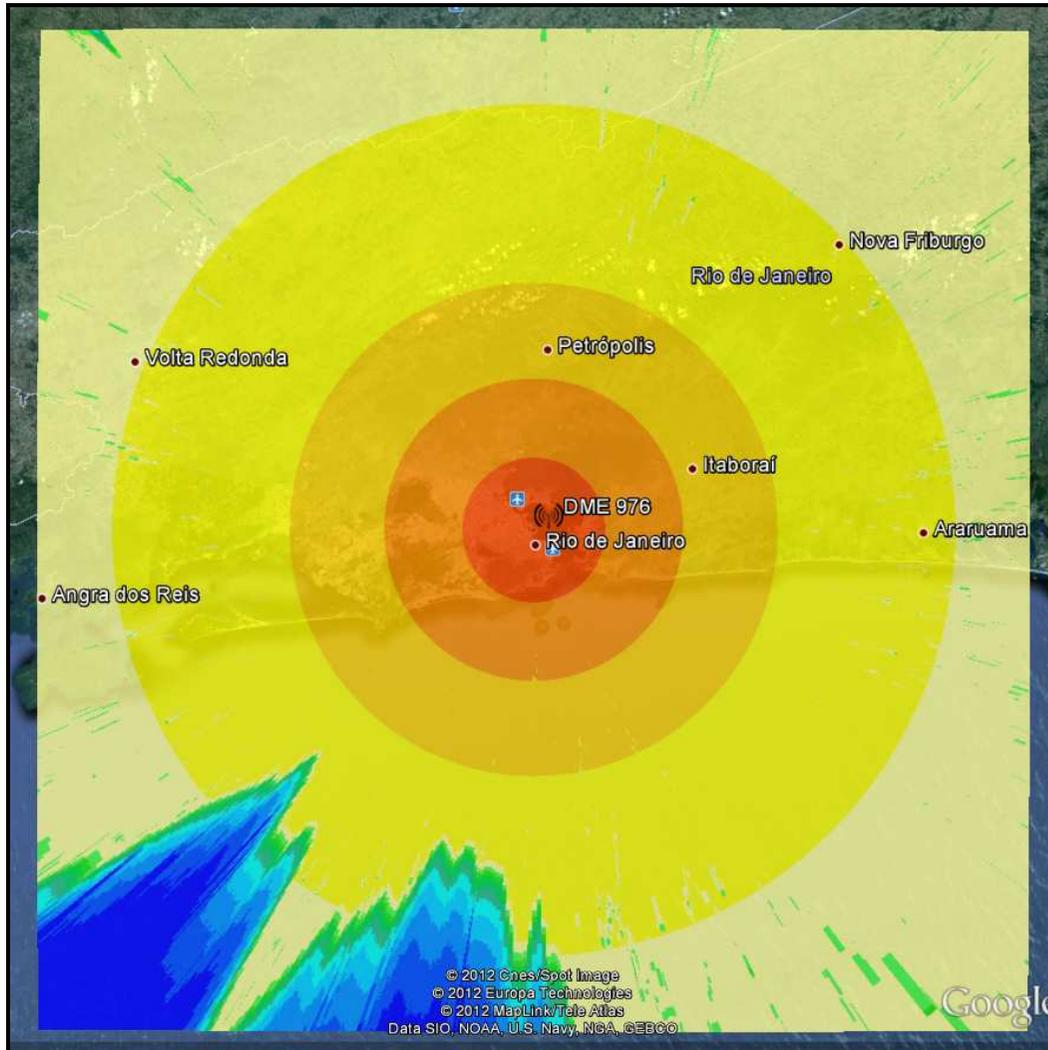


Figura 5.31: Diagrama de cobertura: 20.000 pés.

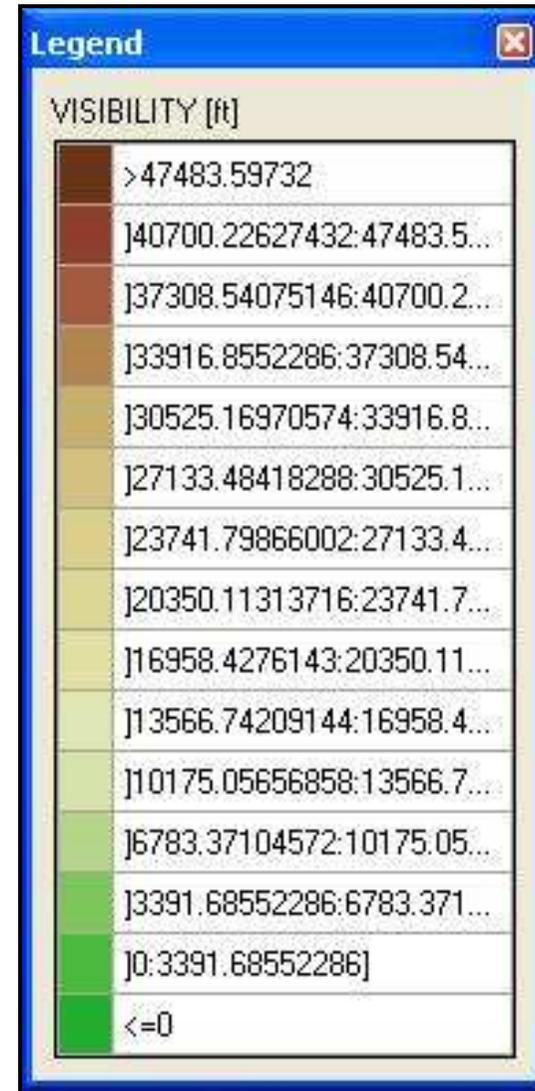
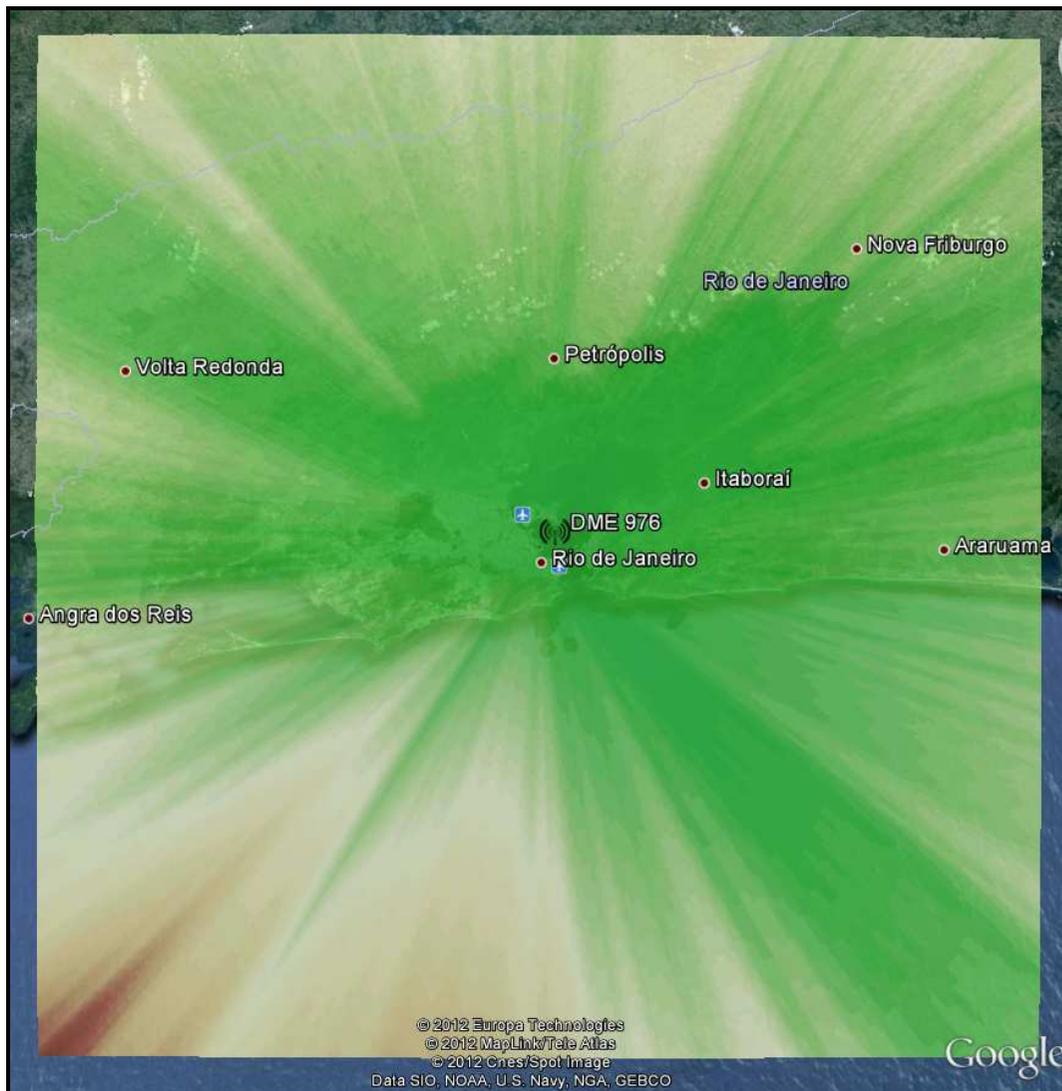


Figura 5.32: Diagrama de visibilidade.

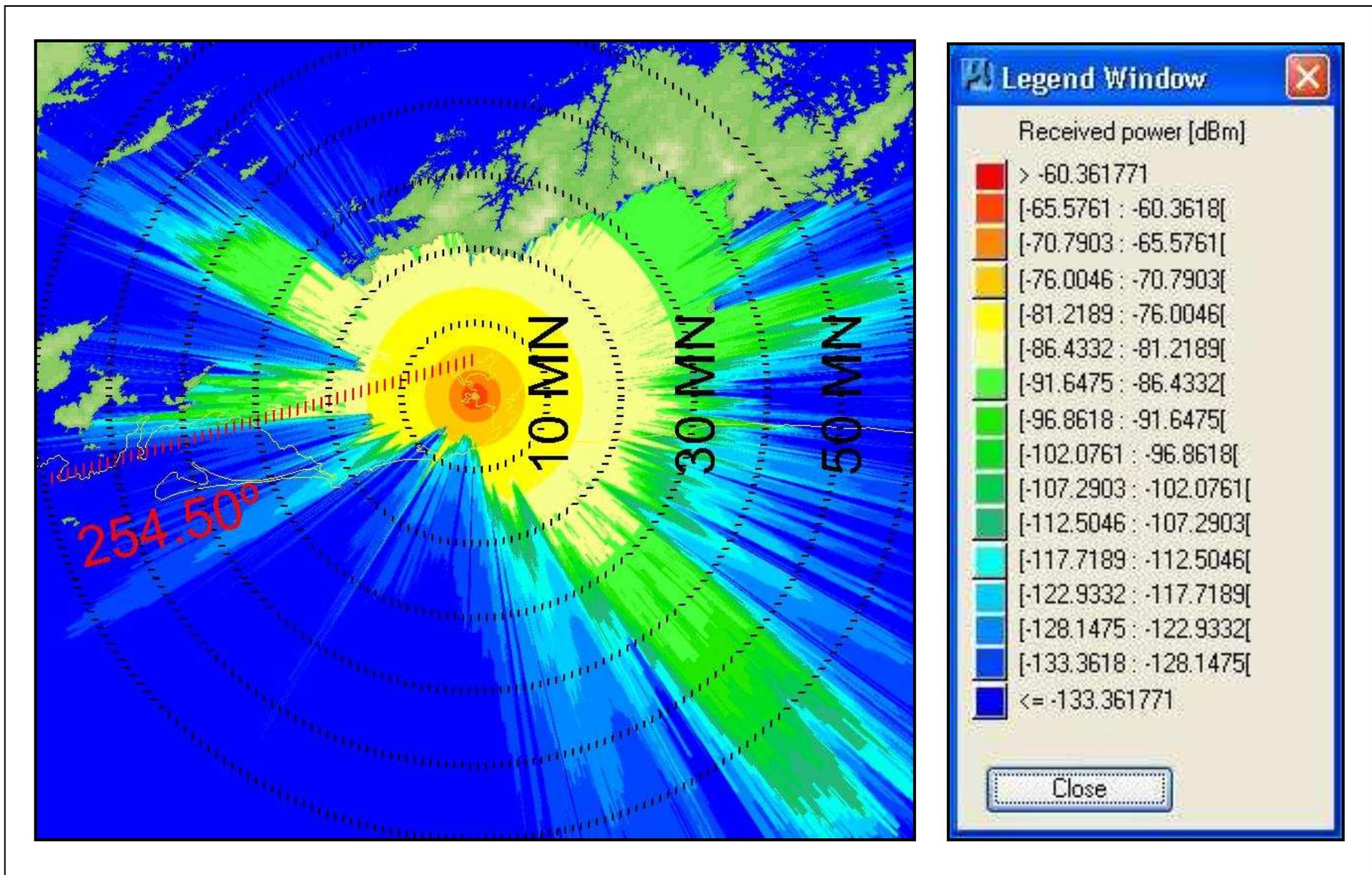


Figura 5.33: Diagrama de cobertura escalonado: 2.647 pés Altitude média de voo para a Rota 1.

## 6 CONCLUSÕES

---

Nesta dissertação de mestrado foi apresentado o comportamento, em faixa estreita, do canal rádio estabelecido entre a transmissão e a recepção de uma portadora centrada na frequência de 1140 MHz, frequência esta bem próxima ao enlace de dados *Extended Squitter* (1090 MHz) ADS-B, transmitida a partir de uma antena fixa, localizada no Parque de Material de Eletrônica da Aeronáutica (PAME-RJ), no bairro do Caju, às margens da baía de Guanabara, na cidade do Rio de Janeiro, e recebida em uma aeronave, em pleno voo, em alta velocidade, na reta de aproximação para pouso na cabeceira 28 do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, Maestro Antônio Carlos Jobim - Galeão. Deve-se destacar a importância deste estudo em função da carência por trabalhos similares feitos em aeronaves em pleno voo. Além disso, o ADS-B, que é uma tecnologia para controle de tráfego aéreo, encontra-se em franca utilização em diversos países e o Brasil está prestes a ter o seu primeiro sistema instalado na Bacia de Campos, no Estado do Rio de Janeiro, para dar apoio às operações de tráfego de helicópteros que realizam transporte de passageiros, nas operações *off-shore* daquela região.

A análise da variabilidade em pequena escala do sinal coletado foi realizada, de modo a verificar o melhor ajuste das funções densidade de probabilidade de Gauss, Rayleigh e Rice aplicando, inclusive, os testes do qui-quadrado e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, de modo a verificar o grau de aderência para cada função densidade de probabilidade. As estatísticas de segunda ordem, como a taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimentos foram ajustadas para as funções de Rice e Gauss. As análises de variabilidade em grande escala consistiram em ajustar a curva do sinal recebido à uma curva Log-normal, como também, em verificar o grau de aderência da referida função, atestando se a mesma passou ou não no teste do qui-quadrado. Adicionalmente, foi obtida a reta de melhor ajuste que caracteriza a perda no percurso e o seu respectivo fator de atenuação para cada uma das rotas. Todos os resultados foram reunidos qualitativamente e quantitativamente através de gráficos, tabelas e simulações.

A tabela 6.1 sumariza os melhores ajustes para os desvanecimentos em pequena e em grande escala, como também o fator de atenuação para cada uma das rotas analisadas.

Rota	Melhor Ajuste para o Desvanecimento em Pequena Escala pelo Teste do Qui-quadrado e pelo Teste do Coeficiente de Eficiência (E)			Verificação de Ajuste para o Desvanecimento em Grande Escala pelo Teste do Qui-quadrado	Fator de Atenuação
	1º	2º	3º		
	1	Rice	Rayleigh		
2	Rice	Rayleigh	Gauss	Log-normal (passou no teste)	-5,51
3	Rice	Rayleigh	Gauss	Log-normal (passou no teste)	2,99
4	Rice	Rayleigh	Gauss	Log-normal (passou no teste)	2,66
5	Rice	Rayleigh	Gauss	Log-normal (passou no teste)	-1,57

Tabela 6.1: Resumo dos melhores ajustes para os desvanecimentos em pequena e em grande escala.

O que se conclui para o desvanecimento em pequena escala é que a Distribuição de Rice é a que melhor caracteriza o ambiente sondado em função dos multipercursos existentes. Os multipercursos advindos, em geral, de reflexões no solo, causaram efeitos destrutivos em alguns setores, mas não causaram desvanecimentos profundos e nem a perda do sinal, conforme observa-se nos diagramas da taxa de cruzamento de nível experimental, já que os valores medidos se situaram no entorno do valor eficaz + 2 ou + 3 dB e que a duração média de fading variou, em geral, dentro da mesma faixa de valores. Nota-se que, justamente nos setores onde a taxa de cruzamento de nível se demonstrou mais espalhada é onde o nível de sinal recebido foi mais baixo. O grau de espalhamento é proporcional ao nível de sinal recebido, ou seja, quanto mais fraco o sinal, mais espalhada ficou a taxa de cruzamento de nível.

Para o desvanecimento em grande escala, como era de se esperar, a Distribuição Log-normal apresentou uma boa aderência. Sabe-se que havia visada entre as antenas de transmissão e recepção, durante todo o vôo, e que o nível de sinal recebido durante a aquisição manteve uma boa qualidade. Não se pôde avaliar a cobertura do sinal, uma vez que a sondagem foi realizada enquanto o vôo de inspeção do ILS do Galeão era realizado, logo não se pode fazer a sondagem em regiões mais afastadas, entretanto o coeficiente de atenuação pôde ser calculado e nos serve de parâmetro. O nível de sinal recebido na aeronave se manteve, aproximadamente, entre - 61 dB e - 73 dB, o afastamento entre as antenas de recepção e transmissão variou, aproximadamente, de 22,762 a 17,970 km, e as altitudes sobrevoadas variaram de 901 a 583 metros.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do futuro promissor da tecnologia ADS-B e da carência por trabalhos científicos de medições e análises estatísticas do canal rádio móvel utilizando aeronaves em pleno vôo e em alta velocidade, os seguintes tópicos podem ser abordados em trabalhos futuros:

- Medição em outros espaços aéreos, estabelecendo canais rádio móvel com outras características (com visada direta, parcialmente obstruído e sem visada direta), utilizando trechos de voos em rota, em decolagem, ou mesmo em aproximação para pouso, como estabelecido nesta dissertação, ou ainda, utilizando aeronaves em taxiamento (em solo);
- Medições em rotas mais longas para se ter o alcance da cobertura do sinal;
- Análises estatísticas utilizando outras funções de densidade de probabilidade, como as distribuições de Nakagami-m e  $\alpha - \mu$  ou quiçá outras distribuições propostas mais recentemente, de forma a verificar a caracterização do canal rádio móvel. Como exemplos de novas distribuições, citam-se a  $\eta - \kappa$  simétrica,  $\eta - \kappa$  assimétrica,  $\lambda - \mu$ ,  $\alpha - \kappa - \mu$ ,  $\alpha - \eta - \mu$  e  $\alpha - \eta - \kappa - \mu$ ;
- Fazer análises estatísticas utilizando outros tipos de enlaces de dados, como o UAT e o VDL *mode 4* que operam em outras frequências; e
- Analisar o comportamento do sinal em uma atmosfera turbulenta.

## 7 REFERÊNCIAS

---

- [1] Henrique Lins de Barros, Santos Dumont e a invenção do voo. 2ª edição, Jorge Zahar Editor Ltda - 2004.
- [2] Rogério Sidaoui, Curiosidades Históricas. São Paulo: IBRASA - 2004.
- [3] Richard Shenkman, As mais famosas lendas, mitos e mentiras da história do mundo. Ediouro publicações Ltda. - 2002.
- [4] Eugene F. Knott / John F. Shaeffer / Michael T. Tuley, *Radar Cross Section. Second edition* - 2004.
- [5] Louis Brown, Taylor e Francis Group, *Technical and Military Imperatives – A radar history of World War II* - 1999.
- [6] H. V. Sudarshan, *Seamless Sky. Ashgate Publishing Limited* - 2003.
- [7] M. Rycroft, *Satellite Navigation Systems: Policy, Commercial and Technical Interaction. Kluwer Academic Publishers* - 2003.
- [8] *Aviation and the Global Atmosphere, Intergovernmental Panel on Climate Change, published by the Predd Syndicate of the University of Cambridge* - 1999.
- [9] Gouchang Xu, Springer, *GPS, Theory, Algorithms and applications. Second edition.*
- [10] João Francisco Galera Mônico, Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS, Descrição, fundamentos e aplicações. Editora UNESP - 2000.
- [11] W. Schofield and M. Breach, *Engineering Surveying. Sixth edition*, BH - 2007.
- [12] Jaizki Mendizabal, Roc Berenguer and Juan Meléndez, *GPS and GALILEO, Dual RF front-end receiver design, fabrication, and test, Communication Engineering*, McGraw-Hill - 2009.
- [13] Myron Kayton, Water R. Fried, *Navigation Systems. Second edition* - 1997.
- [14] *The Global Positioning System, A shared National Asset, Recommendations for Technical Improvements and Enhancements, National Research Council* - 1995.
- [15] Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty, *Understanding GPS, Principles and Applications, second edition*, Artech House INC - 2006.
- [16] W. Parkinson & James J. Spilker Jr., *Global Positioning System: Theory and Applications. Volume I, edited by Bradford, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.* – 1996.
- [17] [http://www.apolo11.com/spacenews.php?titulo=Agencia Europeia lanca o mais preciso relógio atômico no espaço&posic=dat\\_20080428-095134.inc](http://www.apolo11.com/spacenews.php?titulo=Agencia+Europeia+lanca+o+mais+preciso+relogio+atomico+no+espaco&posic=dat_20080428-095134.inc)
- [18] *Thecnical Manual THALES, Automatic Dependent Surveillance Broadcast, - Description, Operation and Maintenance, AS 68x Family and LCMS/RCMS, THALES ATM GmbH, Germany* – 2010.
- [19] ITT CNS / ATM Seminar 2009 – Brazil, Rio de Janeiro - Maio 2009;
- [20] THALES ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) Seminar, Rio de Janeiro - Junho 2009 e Outubro 2009.
- [21] *White book, Multilateration & ADS-B, ERA* – [www.multilateration.com](http://www.multilateration.com)
- [22] Robert Horonjeff, Francis X. Mckelvey, William J. Sproule, Seth B. Young, *Planning & Design of Airports. Fifth edition*, McGraw-Hill - 2010.

- [23] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications – Principles & Practice*, Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series - 1996.
- [24] Michel Daoud Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*. 2000.
- [25] <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/ricepdf/rice.htm>
- [26] Michel Daoud Yacoub, *The  $\alpha - \mu$  Distribution: A General Fading Distribution*, in *Proc. IEEE Inter. Symp. On Personal, Indoor and Mobile Raduio Commun.*, vol. 2 – September 2002.
- [27] TOR Aulin, *A modified Model for the Fading Signal at a Mobile Radio Chanel*. IEE *Transactions on Vehicular Technology*, Vol. VT-28, Nº. 3 - August 1979.
- [28] John David Parsons, *The Mobile Radio Propagation channel*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons LTD. – 2000.
- [29] [http://www.eurocontrol.int/cascade/public/subsite\\_homepage/homepage.html](http://www.eurocontrol.int/cascade/public/subsite_homepage/homepage.html)
- [29] RTCA DO-260/A – *Minimum Operational Performance Standard for 1090 MHz Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B)*.
- [30] [www.gazetarussa.com.br](http://www.gazetarussa.com.br)
- [31] [http://portuguese.ruvr.ru/tag\\_6146492/2011/](http://portuguese.ruvr.ru/tag_6146492/2011/) (Voz da Rússia).
- [32] [www.telesatelite.net](http://www.telesatelite.net)
- [33] [http://www.esa.int/SPECIALS/Galileo\\_IOV/](http://www.esa.int/SPECIALS/Galileo_IOV/)
- [34] [http://www.eurocontrol.int/cascade/public/subsite\\_homepage/homepage.html](http://www.eurocontrol.int/cascade/public/subsite_homepage/homepage.html)
- [35] , Henry L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless systems*. Prentice Hall PTR - 2000.
- [36] Anexo 10 à Convenção Internacional de Aviação Civil (ICAO), Volume 4 (*Surveillance and Collision Avoidance systems*), 4<sup>a</sup> Edição - Julho 2007.
- [37] Pedro Carvalho Rodrigues, *Bioestatística*. Ed. Uff, Niterói/RJ - 2002.
- [38] William W. Hines, Douglas C. Montgomery, David M. Goldsman e Connie M. Borror, *Probabilidade e Estatística na Engenharia*. Tradução Vara Regina Lima de Farias e Flores, quarta edição, Editora LTC, Rio de Janeiro - 2006.
- [39] William C. Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, McGrall-Hill - 1990.
- [40] Athanasios Papoulis, *Probability, Random Variables and Stochastic Process*. McGraw-Hill – 2001.
- [41] Spiegel, M. R., *Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas*. Coleção Schaum, McGraw Hill – 1973.
- [42] Pedro Armando Vieira, *Análise da Resposta em Banda Estreita de um Canal Marítimo na Faixa de 3,5 GHz*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ – 2010.
- [43] Fábio José Barroso da Fonseca, *Análise do comportamento Faixa Estreita do Canal Rádio Móvel em 3,5 GHz*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ – 2011.
- [44] Eduardo da Silva Leão, *Análise Estatística da Variabilidade do Sinal Rádio Móvel em ambiente de Vegetação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ – 2012.

[45] Leni J. Matos, Gilbert P. Ferreira, Jose S. G. Panaro, Leonardo M. Barreira and Elias Mainetti, *Time and Frequency Fading Statistics for Underwater Acoustic signals in Shallow Water – Underwater communications Proceedings – UComms – September 2012.*

[46] Daniel Goltara Machado, *Análise Estatística do Desvanecimento Rápido – aplicação a um sinal Rádio-Móvel de 1,75 GHz, em Ambiente LOS Indoor.* Projeto Final de Curso (Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ – 2010.

[47] Matheus Bernardes de Moura, *Estatística de Desvanecimento Rápido de sinal Rádio Móvel em Ambientes Interiores na Faixa de 430 MHz.* Projeto Final de Curso (Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ – 2011.

[48] *Lambert M Surhone, Mariam T Tennoe, Susan F Henssonow. Nash-Sutcliffe Model Efficiency Coefficient. Betascript Publishing, 2011.*

## ANEXOS

---

### A - Programas MATLAB

#### A.1 - Programa “medição.m”: Converte tensão (Volts) em potência (dBm).

```
a = Dev1_ai0; %leitura da tabela com os valores medidos
dim = size(a); %dimensão da tabela
lim_a = dim(1); %número total de linhas da tabela

b = xlsread('tabela de calibração nova');
dim = size(b);
lim_b = dim(1);

k = 1;
for i = 1:lim_a
    while k < lim_b
        k = k + 1;
        if and(a(i) >= b(k-1,2), a(i) < b(k,2))
            coef = (b(k,1) - b(k-1,1))/(b(k,2) - b(k-1,2));
            pot(i) = (a(i) - b(k-1,2))*coef + b(k-1,1);
        end
        if a(i) >= b(lim_b,2)
            pot(i) = b(lim_b,1);
        end
        if a(i) <= b(1,2)
            pot(i) = b(1,1);
        end
    end
    k = 1;
end
```

#### A.2 - Programa “distancia.m”: Calcula a distância percorrida pelo receptor a cada instante de aquisição.

```
lim = length(Latitude_gd);
lat1_gd = Latitude_gd(1); %latitude da posição inicial da rota em graus decimais
lon1_gd = Longitude_gd(1); %longitude da posição inicial da rota em graus decimais
lat1 = lat1_gd*pi/180; %em radianos
lon1 = lon1_gd*pi/180; %em radianos

r = 6371000; %raio da Terra
d = 1:lim;
d(1) = 0;

for i = 2:lim
    lat1_gd = Latitude_gd(i-1); %latitude da posição i - 1 da rota em graus decimais
    lon1_gd = Longitude_gd(i-1); %longitude da posição i - 1 da rota em graus decimais
    lat1 = lat1_gd*pi/180; %em radianos
    lon1 = lon1_gd*pi/180; %em radianos
    lat2_gd = Latitude_gd(i); %latitude da posição i da rota em graus decimais
    lon2_gd = Longitude_gd(i); %longitude da posição i da rota em graus decimais
    lat2 = lat2_gd*pi/180; %em radianos
    lon2 = lon2_gd*pi/180; %em radianos
    dlat = lat2 - lat1;
    dlon = lon2 - lon1;
    k = 2*r*asin(sqrt((sin(dlat/2))^2+cos(lat1)*cos(lat2)*(sin(dlon/2))^2)); %distancia
do arco
    o = k/r; %angulo teta
    d(i) = sqrt((r + Altitude_m(i-1))^2 + (r + Altitude_m(i))^2 - 2*(r + Altitude_m(i-1))*(r + Altitude_m(i))*cos(o)) + d(i-1);
end

dist = d';
xlswrite('distancia.xlsx',dist)
```

### A.3 - Programa “setores\_rota.m”: Estima o instante de tempo em que ocorre o início de cada setor.

```
%%Dados de Entrada%%
f = 1140;           %frequencia em MHz
x = 40;            %setor de x lambdas
%%Processamento%%
lim = length(Distancia_m);
tamanho_setor = x*300/f; %comprimento do setor
tempo_setor(1) = Hora_s(1); %instante do setor 1
latitude_setor(1) = Latitude_gd(1); %latitude do setor 1
longitude_setor(1) = Longitude_gd(1); %longitude do setor 1
altitude_setor(1) = Altitude_m(1); %altitude do setor 1
pos = 2;           %para selecionar os vetores de entrada
num_setor = 1;     %para selecionar o numero do setor
setor = tamanho_setor; %comprimento de cada setor (inicialmente igual a posição do
segundo setor)
while setor < Distancia_m(lim)
    if setor < Distancia_m(pos)
        num_setor = num_setor + 1;
        tempo_setor(num_setor) = (setor - Distancia_m(pos-1))*(Hora_s(pos) - Hora_s(pos-
1))/(Distancia_m(pos) - Distancia_m(pos-1)) + Hora_s(pos-1);
        latitude_setor(num_setor) = (setor - Distancia_m(pos-1))*(Latitude_gd(pos) -
Latitude_gd(pos-1))/(Distancia_m(pos) - Distancia_m(pos-1)) + Latitude_gd(pos-1);
        longitude_setor(num_setor) = (setor - Distancia_m(pos-1))*(Longitude_gd(pos) -
Longitude_gd(pos-1))/(Distancia_m(pos) - Distancia_m(pos-1)) + Longitude_gd(pos-1);
        altitude_setor(num_setor) = (setor - Distancia_m(pos-1))*(Altitude_m(pos) -
Altitude_m(pos-1))/(Distancia_m(pos) - Distancia_m(pos-1)) + Altitude_m(pos-1);
        setor = setor + tamanho_setor;
    else
        pos = pos + 1;
    end
end
setor = setor - tamanho_setor; %posição do último setor
%%Dados de Saída%%
ts = tempo_setor';
ts = roundn(ts, -3);
lats = latitude_setor';
lons = longitude_setor';
as = altitude_setor';
xlswrite('Tempo do Setor.xlsx',ts)
xlswrite('Latitude do Setor.xlsx',lats)
xlswrite('Longitude do Setor.xlsx',lons)
xlswrite('Altitude do Setor.xlsx',as)
save('Tempo do Setor','ts')
save('Latitude do Setor','lats')
save('Longitude do Setor','lons')
save('Altitude do Setor','as')
```

#### A.4 - Programa “setores.m”: Utilizado para setORIZAR as rotas.

```
%%Dados de Entrada%%
tempo = tempoll; %vetor que contém os instantes de tempo de cada amostra
potencia = potencial1; %vetor que contém as potências
lat_t_gd = -22.873694; %latITUDE do transmissor em graus decimais
lon_t_gd = -43.213397; %longITUDE do transmissor em graus decimais
alt_t = 22; %altITUDE do transmissor em metros
r = 6371000; %raio da Terra
%%Processamento%%
lim = length(tempo); %número total de amostras
total_setor = length(ts); %número total de setores
lat1 = lat_t_gd*pi/180; %em radianos
lon1 = lon_t_gd*pi/180; %em radianos
num_setor = 1; %variável que indica o número do setor
tempo_setor = ts(2); %todos as amostras até ts(2) pertencem a ts(1), até ts(3) pertencem
a ts(2)...
potencia_media = 1:(total_setor-1);
k = 0; %para percorrer as linhas
media = 0;
for i = 1:lim
    if tempo(i) > ts(1)
        k = k + 1;
        if tempo(i) < tempo_setor
            pot_setor(num_setor,k) = potencia(i);
            media = media + potencia(i);
        else
            potencia_media(num_setor) = media/k;
            k = 0;
            media = 0;
            num_setor = num_setor + 1; %passa para o próximo setor
            i = i - 1;
            if num_setor < total_setor
                tempo_setor = ts(num_setor+1);
            else
                break
            end
        end
    end
end
total_setor_p = total_setor - 1; %número total de setores completos
pos_GPS = zeros(total_setor_p, 3);
pos_setor = zeros(total_setor_p, 2);
for i = 1:total_setor_p
    pos_GPS(i,1) = lats(i);
    pos_GPS(i,2) = lons(i);
    pos_GPS(i,3) = potencia_media(i);
    lat2_gd = lats(i); %latITUDE do setor em graus decimais
    lon2_gd = lons(i); %longITUDE do setor em graus decimais
    lat2 = lat2_gd*pi/180; %em radianos
    lon2 = lon2_gd*pi/180; %em radianos
    dlat = lat2 - lat1;
    dlon = lon2 - lon1;
    k = 2*r*asin(sqrt((sin(dlat/2))^2+cos(lat1)*cos(lat2)*(sin(dlon/2))^2)); %distancia
do arco
    o = k/r; %angulo teta
    pos_setor(i,1) = sqrt((r + alt_t)^2 + (r + as(i))^2 - 2*(r + alt_t)*(r +
as(i))*cos(o));
    pos_setor(i,2) = potencia_media(i);
end
%%Dados de Saída%%
pos_setor11 = pos_setor;
pot_setor11 = pot_setor;
pos_GPS11 = pos_GPS;
xlswrite('pot_setor11.xlsx',pot_setor11)
xlswrite('pos_setor11.xlsx',pos_setor11)
xlswrite('pos_GPS11.xlsx',pos_GPS11)

save('pot_setor11','pot_setor11')
save('pos_setor11','pos_setor11')
save('pos_GPS11','pos_GPS11')
```

## A.5 - Programa “google\_earth.m”: Chama o programa “gscatter.m”.

```
load ('pos_GPS11.mat')
load ('pos_GPS12.mat')
load ('pos_GPS13_14a.mat')
load ('pos_GPS3b_4.mat')
load ('pos_GPS5.mat')
gscatter('Rota 1.kml',pos_GPS11(:,2),pos_GPS11(:,1),pos_GPS11(:,3), pos_GPS11(:,4))
gscatter('Rota 2.kml',pos_GPS12(:,2),pos_GPS12(:,1),pos_GPS12(:,3), pos_GPS12(:,4))
gscatter('Rota 3.kml',pos_GPS13_14a(:,2),pos_GPS13_14a(:,1),pos_GPS13_14a(:,3),
pos_GPS13_14a(:,4))
gscatter('Rota 4.kml',pos_GPS3b_4(:,2),pos_GPS3b_4(:,1),pos_GPS3b_4(:,3),
pos_GPS3b_4(:,4))
gscatter('Rota 5.kml',pos_GPS5(:,2),pos_GPS5(:,1),pos_GPS5(:,3), pos_GPS5(:,4))
```

## A.6 - Programa “gscatter.m”: Gera as rotas no *Google Earth*.

```
function gscatter(filename,lon,lat,c,alt,varargin)
% GSCATTER - create a scatter plot in Google Earth
%
%   GSCATTER(FILENAME,LON,LAT,C) - creates a .kml file that
%   displays colored circles at the locations specified by the
%   vectors LON and LAT similar to ML's builtin function, SCATTER.
%   The color of the circles is scaled relative to the
%   values provided in third input, C.
%
%   OPTIONS AND SYNTAX - Optional inputs are entered as
%   property/value pairs. Valid optional properties are:
%
%   GSCATTER(...,'colormap','hot') - uses Matlabs 'hot'
%   colormap instead of the default (jet). Also accepts function
%   handles (@hot), or custom colormaps (m x 3 matrices).
%
%   GSCATTER(...,'clims',[low high]) - limit the color
%   values to a specified values (similar to CAXIS on a ML
%   figure). Clims should be supplied as a 2-element array.
%
%   GSCATTER(...,'time',timevector) - assigns a time to each
%   point. The length of the timevector array should be the same
%   as LAT, LON, and C.
%
%   GSCATTER(...,'scale',size) - scales the size of the dots in the
%   Google Earth file. Default value is 0.4.
%
%   EXAMPLE
%
%   %generate some data
%   x=(0:0.05:6*pi);
%   lon = -122.170087 + cos(x)*0.01;
%   lat = 37.455697 + x*0.001;
%
%   %color the points according to their latitude
%   gscatter('foo.kml',lon,lat,lat)
%
% SEE ALSO scatter

% A. Stevens @ USGS 3/04/2009
% astevens@usgs.gov

%default values
clims=[-97.6728875452004 -32.8979910608927];
cmap=fliplr(jet);
t=[];
scale=0.5;
%parse inputs and do some error-checking
if nargin>0
    [m,n]=size(varargin);
    opts={'clims','time','scale','colormap'};
    for i=1:n;
        indi=strncmpi(varargin{i},opts);
        ind=find(indi==1);
        if isempty(ind)~=1
            switch ind
```



```

    rgb2{i}='00FFFF';
end
if c(i)>=-68&& c(i)<=-66
    rgb2{i}='00FF96';
end
if c(i)>=-66&& c(i)<=-64
    rgb2{i}='00FF00';
end
if c(i)>=-64&& c(i)<=-62
    rgb2{i}='00B400';
end
if c(i)>=-62
    rgb2{i}='005000';
end

%create a style to hide each point in one document
fprintf(fid, '%s \n', '<Style id="folderStyle">');
fprintf(fid, '%s \n', '<ListStyle>');
fprintf(fid, '%s \n', '<ListItemType>checkHideChildren</ListItemType>');
fprintf(fid, '%s \n', '</ListStyle>');
fprintf(fid, '%s \n', '</Style>');

%define the point style

fprintf(fid, '%s \n', '<Style id="cpoint">');
fprintf(fid, '%s \n', '<IconStyle>');
fprintf(fid, '%s \n', ['<color>ff', rgb2{i}, '</color>']);
fprintf(fid, '%s \n', ['<scale>', sprintf('%.1f', scale), '</scale>']);
fprintf(fid, '%s \n', ['<Icon><href>http://maps.google.com/mapfiles/,...
    'kml/shapes/shaded_dot.png</href></Icon>']);
fprintf(fid, '%s \n', '</IconStyle>');
fprintf(fid, '%s \n', '</Style>');

%add the placemark
fprintf(fid, '%s \n', '<Placemark>');
fprintf(fid, '%s \n', '<styleUrl>#cpoint</styleUrl>');

%create a simple description for each point
fprintf(fid, '%s \n', '<description><![CDATA[<table width="200"></table>');
fprintf(fid, '%s \n', ['<h2>', namer, '<br>']);
k = int2str(i);
fprintf(fid, '%s \n', ['<h3>Setor ', k, '<br>']);
fprintf(fid, '%s \n', ['<h4>Nível do Sinal [dBm]: ', sprintf('%.2f', c(i)), '<br>']);
if ~isempty(t)
    fprintf(fid, '%s \n', ['Time (GMT): ', datestr(t(i)), '<br>']);
end
fprintf(fid, '%s \n', ']]></description>');

fprintf(fid, '%s \n', '<Point>');
fprintf(fid, '%s', '<coordinates>');
fprintf(fid, '%s \n', ['%.6f, %.6f, %.2f', [lon(i) lat(i) alt(i)]];
fprintf(fid, '%s \n', '</coordinates>');
fprintf(fid, '%s \n', '<altitudeMode>absolute</altitudeMode>');
fprintf(fid, '%s \n', '</Point>');

if ~isempty(t)
    fprintf(fid, '%s \n', '<TimeSpan>');
    fprintf(fid, '%s \n', ['<begin>', datestr(t(1), 29), ...
        'T', datestr(t(1), 13), 'Z</begin>']);
    fprintf(fid, '%s \n', ['<end>', datestr(t(end), 29), ...
        'T', datestr(t(end), 13), 'Z</end>']);
    fprintf(fid, '%s \n', '</TimeSpan>');
end

fprintf(fid, '%s \n', '</Placemark>');

waitbar(i/length(lon), h, sprintf('%d%% complete...', ...
    round((i/length(lon))*100)));

end

fprintf(fid, '%s \n', '<styleUrl>#folderStyle</styleUrl>');
fprintf(fid, '%s \n', footer);

close(h);
fclose(fid);

```

## A.7 - Programa “desvanecimento\_peq\_escala”: Gera as análises de desvanecimento em pequena escala.

```

clear all;
close all;
clc;

%-----
% Variáveis do programa %
%-----
ndBm_trecho=[];
V_trecho=zeros(260,3179); % zeros(qtd_setores,maior_valor"vetor_posicao").
r_trecho=zeros(260,3179); % zeros(qtd_setores,maior_valor"vetor_posicao").
n_trecho=[];
xout_trecho=[];
n_pdf_trecho=[];
p1_trecho=zeros(260,3179); % zeros(qtd_setores,maior_valor"vetor_posicao").
p2_trecho=zeros(260,3179); % zeros(qtd_setores,maior_valor"vetor_posicao").
p3_rice_trecho=zeros(260,3179); % zeros(qtd_setores,maior_valor"vetor_posicao").
p1_qui_trecho=[];
p2_qui_trecho=[];
p3_rice_qui_trecho=[];
h_gauss_trecho=[];
p_gauss_trecho=[];
st_gauss_trecho=[];
st_gauss_df_trecho=[];
qui_teste_gauss_trecho=[];
x_qui_teste_gauss_trecho=[];
h_ray_trecho=[];
p_ray_trecho=[];
st_ray_trecho=[];
st_ray_df_trecho=[];
qui_teste_ray_trecho=[];
x_qui_teste_ray_trecho=[];
k_max=0;
kmin=0;
k_inc=0;
sigma_rice_trecho=[];
k_rice_trecho=[];
r_zero_trecho=[];
h_rice_trecho=[];
p_rice_trecho=[];
st_rice_trecho=[];
st_rice_df_trecho=[];
qui_teste_rice_trecho=[];
x_qui_teste_rice_trecho=[];

%-----
load pot_setor11; % Le o arquivo de potencia da Rota em questao.
load vetor_posicao; % Le o "vetor_posicao".

potdbm=abs(pot_setor11); % Esta em dBm. Recebe o valor absoluto de
"pot_setor11", ou seja, o modulo.

for ml=1:size(potdbm,1);
    % ml representa o setor que será analisada(índice da linha na matriz).
    % ml=1; % Caso queira fazer a análise somente de um setor.
    sinaltotals=potdbm(ml,1:vetor_posicao(ml)); % Esta em dBm. Cria o vetor
"sinaltotals", cuja primeira linha contem ml=1, a segunda ml=2... obedecendo a dimensao
do "vetor_posicao". Apos rodar o programa ele guarda os valores do ultimo rodado,
pois vai subescrevendo os anteriores.

    R=50; % Impedância em Ohm.
    P=sinaltotals;
    Pot_W=0.001.*(10.^(P./10)); % Potência em Watts. (1mW = 0.001W)
    V=sqrt(Pot_W.*R); % Tensão em Volts.

    media_setor= mean(V); % Tensão em Volts.
    sinal=V/media_setor; % Divide pela media para separar o Desv. Rápido.
    Sinal(V)=Lento(V)*Rapido(V).
    sinal_ord=sort(sinal); % Ordena números para melhorar gráfico.
    r=sinal_ord; % "r" e a envoltoria.
    r=r-min(r); % Coloca o valor inicial em zero

```

```

%%-----
%% Calculo de PDF pelo histograma %
%%-----

Dmax=max(vetor_posicao);      % Dimensao max do vetor posicao.
num_div=fix(sqrt(Dmax));    % Pega a parte inteira da raiz quadrada de "Dmax".

% Dados do histograma
[n,xout] = hist(r,num_div); % "n"=numero de observacoes (empirico). Quantas vezes
obtive os valores, "xout"=e o valor inicial da barrinha.
delta_x=xout(2)-xout(1);
area_hist=delta_x.*n;
soma_area_hist=sum(area_hist);
area_pdf=area_hist/soma_area_hist;
n_pdf=area_pdf/delta_x;

% Desenha histograma
figure(2)
bar(xout,n_pdf,'w'),zoom on,grid on
hold on;

%%-----
%% Calculo das FDPs teóricas %
%%-----
%*****
% Distribuição de Gauss (Gaussiana): p1
%*****

nu=mean(r);
sigma=std(r);      % Desvio padrao de "r".
p1=(1/(sqrt(2*pi)*sigma)).*exp((-1.*(r-nu).^2)/(2*sigma^2));

% Desenha gráfico de Gauss
%figure(m1)

plot(r,p1,'--g','LineWidth',2);
hold on;

%*****
% Distribuição de Rayleigh: p2
%*****

sigma_ray=mean(r)*sqrt(2/pi);
p2=(r./(sigma_ray^2)).*(exp(-(r.^2)/(2*(sigma_ray^2))));

% Desenha gráfico de Rayleigh
plot(r,p2,'-r','LineWidth',2);
hold on;

%*****
% Distribuição de Rice para k fixo: p3
%*****

kc=2;
sigma_rice=mean(r)/(((sqrt(pi/2)*exp(-kc/2)).*((1+kc).*(besseli(0,kc/2))+...
(kc*besseli(1,kc/2)))));
r_zero=sqrt(kc*2*(sigma_rice^2));
p3=(r./(sigma_rice^2)).*(exp(-((r.^2+r_zero^2)/(2*sigma_rice^2)))).*...
besseli(0,(r_zero.*r)/(sigma_rice^2));

% Desenha gráfico de Rice para k fixo
%figure
Valor_k=int2str(kc);
setor=int2str(m1);
plot(r,p3,'-b','LineWidth',2);
h = legend('PDF Empírica','Gauss','Rayleigh',[ 'Rice
k=',Valor_k],2,'Location','NorthEast');
set(h,'Interpreter','none');
xlabel('r [normalizado]', 'FontSize', 11,'FontWeight', 'bold')
ylabel('PDF ', 'FontSize', 11,'FontWeight', 'bold')
titulo=({'Comparação PDF RICE, Gauss e Rayleigh para o Setor ',setor});
title(titulo, 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');
hold off;
%saveas(figure(1),['figasetor_',setor], 'jpg');

```

```

%*****
% Distribuição de Rice variando K %:p3
%*****

k_min=0; % Valor mínimo de k.
k_inc=1; % Incremento de k.
k_max=50; % Fator K de Rice máximo.
p3=[];
p3_tot=[];

for k_ri= k_min:k_inc:k_max;
sigma_ri=mean(r)/((sqrt(pi/2)*exp(-
k_ri/2)).*((1+k_ri).*(besseli(0,k_ri/2))+...
(k_ri*besseli(1,k_ri/2)))));
r_zero=sqrt(k_ri*2*(sigma_ri^2));
p3=(r./(sigma_ri^2)).*(exp(-((r.^2+r_zero^2)/(2*sigma_ri^2)))).*...
besseli(0,(r_zero.*r)/(sigma_ri^2));
p3_tot=[p3_tot;p3];
end

% Desenha gráfico de Rice variando K com incremento de 10
%k_inc=100;
%for k_ri=k_min:k_inc:k_max;
%Ind_k_ri=k_ri+1;
%k_fig=k_ri+100;
%%figure(k_fig)
%%plot(r,p3_tot(Ind_k_ri,:),'-b');
%%titulo={'PDF RICE com k-inc=10'};
%%title(titulo, 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');
%end

%-----
%% Teste Qui-quadrado para PDF pelo histograma %
% Número de pontos para uso no teste <<<===
% -----
bins=0:(length(xout)-1);

%*****
% PDF Gaussiana
%*****

p1_qui=(1/(sqrt(2*pi)*sigma)).*exp((-1.*(xout-nu).^2)/(2*sigma^2));

% Teste Qui-quadrado PDF Gaussiana

[h_gauss,p_gauss,st_gauss] =
chi2gof(bins,'ctrs',bins,'frequency',n_pdf,'expected',p1_qui,'emin',0,'nparams',2);
st_gauss_df=st_gauss.df;
qui_teste_gauss=st_gauss.chi2stat; % Estatística Q-quad, O menor
valor indica o melhor ajuste.
x_qui_teste_gauss = chi2inv(p_gauss,st_gauss.df); % O maior valor indica o melhor
ajuste.

%*****
% PDF Rayleigh
%*****

p2_qui=(xout./(sigma_ray^2)).*(exp(-((xout.^2)/(2*sigma_ray^2))));

% Teste Qui-quadrado PDF Rayleigh

[h_ray,p_ray,st_ray] =
chi2gof(bins,'ctrs',bins,'frequency',n_pdf,'expected',p2_qui,'emin',0,'nparams',1);
st_ray_df=st_ray.df;
qui_teste_ray=st_ray.chi2stat; % O menor valor indica o melhor
ajuste.
x_qui_teste_ray = chi2inv(p_ray,st_ray.df); % O maior valor indica o melhor
ajuste.

%*****
% PDF Rice
%*****

p3_qui=[];
p3_qui_tot=[];
sigma_ri_tot=[];
k_ri_tot=[];

```

```

r_zero_tot=[];

h_rice_tot=[];
p_rice_tot=[];
st_rice_tot=[];
st_rice_df_tot=[];
qui_teste_rice_tot=[];
x_qui_teste_rice_tot=[];

k_min=0; % Valor mínimo de k.
k_inc=1; % Incremento de k.
k_max=50; % Fator K de Rice máximo.

for k_rice=k_min:k_inc:k_max
sigma_rice=mean(r)./((sqrt(pi/2)*exp(-
k_rice/2)).*((1+k_rice).*(besseli(0,k_rice/2)))+...
(k_rice*besseli(1,k_rice/2))));
r_zero=sqrt(k_rice*2*(sigma_rice^2));
p3_qui=(xout./(sigma_rice^2)).*(exp(-((xout.^2+r_zero^2)/...
(2*sigma_rice^2))).*besseli(0,(r_zero.*xout)/(sigma_rice^2)));
p3_qui_tot=[p3_qui_tot;p3_qui];

% Teste Qui-quadrado PDF Rice

[h_rice,p_rice,st_rice] =
chi2gof(bins,'ctrs',bins,'frequency',n_pdf,'expected',p3_qui,'emin',0,'nparams',2);
qui_teste_rice=st_rice.chi2stat; % O menor valor indica o melhor
ajuste.
x_qui_teste_rice = chi2inv(p_rice,st_rice.df); % O maior valor indica o melhor
ajuste.
% Acumula valores

sigma_rice_tot=[sigma_rice_tot;sigma_rice];
k_rice_tot=[k_rice_tot;k_rice];
r_zero_tot=[r_zero_tot;r_zero];

h_rice_tot=[h_rice_tot;h_rice];
p_rice_tot=[p_rice_tot;p_rice];
st_rice_tot=[st_rice_tot;st_rice];
st_rice_df_tot=[st_rice_df_tot;st_rice.df];
qui_teste_rice_tot=[qui_teste_rice_tot;qui_teste_rice];
x_qui_teste_rice_tot=[x_qui_teste_rice_tot;x_qui_teste_rice];
end

% -----
% *** Valores finais da análise de Rice ***
% -----
% Valor mínimo da estatística QUI-QUADRADO
% -----

[Cmin,Imin] = min(qui_teste_rice_tot); % O menor valor indica o melhor ajuste
[Cmax,Imax] = max(x_qui_teste_rice_tot);

% Alternativamente poderia ser: [Cmax,Imax] = max(x_qui_teste_rice_tot); %O MAIOR
valor indica o melhor ajuste
%-----
% Guardar valores de Rice somente para o fator K com menor valor no QUI-QUADRADO.
% IMPORTANTE: K=(Imin-1)é o valor K que ocasiona o menor resultado no QUI-QUADRADO

p3_fim=p3_tot(Imin,:);
p3_qui_fim=p3_qui_tot(Imin,:);
sigma_rice_fim=sigma_rice_tot(Imin);
k_rice_fim=k_rice_tot(Imin);
r_zero_fim=r_zero_tot(Imin);
h_rice_fim=h_rice_tot(Imin);
p_rice_fim=p_rice_tot(Imin);
st_rice_fim=st_rice_tot(Imin);
st_rice_df_fim=st_rice_df_tot(Imin);
qui_teste_rice_fim=qui_teste_rice_tot(Imin);
x_qui_teste_rice_fim=x_qui_teste_rice_tot(Imin);

```

```

%-----
%% Teste Qui-quadrado para PDF pelo histograma usando a definição K fixo %
% quiquadrado=somatório(valor observado-valor esperado)^2/valor esperado
%-----

quiquadrado_gauss=0;
quiquadrado_ray=0;
quiquadrado_rice_fixo=0;
n_niveis=length(xout);
I_kc=kc+1;
for i=1:n_niveis
quiquadrado_gauss=((n_pdf(i)-p1_qui(i))^2/p1_qui(i))+quiquadrado_gauss;
quiquadrado_ray=((n_pdf(i)-p2_qui(i))^2/p2_qui(i))+quiquadrado_ray;
quiquadrado_rice_fixo=((n_pdf(i)-
p3_qui_tot(I_kc,i))^2/p3_qui_tot(I_kc,i))+quiquadrado_rice_fixo;
end

%% quiquadrado_gauss_trecho(m1)=quiquadrado_gauss;
%% quiquadrado_ray_trecho(m1)=quiquadrado_ray;

%-----
%% Teste Qui-quadrado para PDF Rice pelo histograma, usando a definição, com K
variando %
%% quiquadrado=somatório(valor observado-valor esperado)^2/valor esperado
%-----

quiquadrado_rice_tot=[];
k_min=0; % Valor mínimo de k
k_inc=1; % Incremento de k
k_max=50; % Fator K de Rice máximo

for k_rice=k_min:k_inc:k_max

% Teste Qui-quadrado PDF Rice

quiquadrado_rice=0;
I_k_rice=k_rice+1;
for i=1:n_niveis
quiquadrado_rice=((n_pdf(i)-
p3_qui_tot(I_k_rice,i))^2/p3_qui_tot(I_k_rice,i))+quiquadrado_rice;
end

% Acumula valores
quiquadrado_rice_tot=[quiquadrado_rice_tot;quiquadrado_rice];
end
%
%-----
% *** Valores finais da análise de Rice pelo ***
% -----
% Valor mínimo da estatística QUI-QUADRADO usando a definição
% -----
[Cdmin,Idmin] = min(quiquadrado_rice_tot); % O menor valor indica o melhor ajuste.

% Guardar valores de Rice somente para o fator K com menor valor no QUI-QUADRADO
usando a definição.
% IMPORTANTE: K=(Idmin-1)é o valor K que ocasiona o menor resultado no QUI-QUADRADO.

p3_fimd=p3_tot(Idmin,:);
p3_qui_fimd=p3_qui_tot(Idmin,:);
sigma_rice_fimd=sigma_rice_tot(Idmin);
k_rice_fimd=k_rice_tot(Idmin);
r_zero_fimd=r_zero_tot(Idmin);
quiquadrado_rice_fim=quiquadrado_rice_tot(Idmin);
%%quiquadrado_rice_trecho(m1)=quiquadrado_rice_fim;

% -----
% Desenho dos valores finais da PDF calculada da pequena área
% -----

Valor_kf=int2str(k_rice_fim);
figure(1)
subplot(3,2,1:2)

%%plot(xiouta,pdfma, '.k', 'MarkerSize',5),zoom on,grid on
%%hold on;

bar(xout,n_pdf, 'w');zoom on,grid on;

```

```

%%plot(xout,n_pdf, '.m')
hold on;
plot(r,p1,'--g','LineWidth',2);
plot(r,p2,'-r','LineWidth',2);
plot(r,p3_fim,'-b','LineWidth',2);
h = legend('PDF Empirica','Gauss','Rayleigh',[ 'Rice
k=','Valor_kf'],2,'Location','NorthEast');
set(h,'Interpreter','none');
titulo=({'Valores finais calculados para o desvanecimento em pequena área - Setor
',setor,':');...
'(a) Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh'});
title(titulo, 'FontSize', 12);
xlabel('r [normalizado]', 'FontSize',9)
ylabel('PDF', 'FontSize', 10)

hold off
%%saveas(figure(2),['figbsetor_',setor], 'jpg');

%-----
%% Calcula da Taxa de cruzamento de níveis e duração média de fading %
%-----

%*****
% Cálculo da taxa de cruzamentos de nível e tempo
% médio de desvanecimento teóricos por Rayleigh
%*****

sinal_RMS=norm(sinal_ord)/sqrt(length(sinal_ord)); % Valor RMS do sinal
Ro=sinal_ord./sinal_RMS;
Ro_db=20*log10(Ro); % Ro em dB.
NR_Ray=(sqrt(2*pi).*Ro.*exp(-(Ro.^2)));
AFD_Ray=((exp(Ro.^2))-1)/(Ro.*sqrt(2*pi));
NR_Ray=NR_Ray./max(NR_Ray); % Normaliza para o valor máximo.
AFD_Ray=AFD_Ray./max(AFD_Ray); % Normaliza para o valor máximo.

%*****
% Calculo do numero de cruzamentos de nível e tempo
% médio de desvanecimento teóricos por Rice
%*****

NR_Rice=(sqrt((2*pi*(1+k_rice_fim))).*Ro.*(exp((-k_rice_fim-
(1+k_rice_fim)).*(Ro.^2))).*(besseli(0,2.*Ro.*(sqrt(k_rice_fim.*(1+k_rice_fim)))));
AFD_rice=(1-marcumq(sqrt(2.*k_rice_fim),sqrt(2.*(1+k_rice_fim).*Ro.^2)))/(NR_Rice);
NR_Rice=NR_Rice./max(NR_Rice); % Normaliza para o valor máximo.
AFD_rice=AFD_rice./max(AFD_rice); % Normaliza para o valor máximo.
%*****
% Calculo do numero de cruzamentos de nível e tempo
% médio de desvanecimento a partir dos dados do sinal medido (empírico)
%*****

sig_RMS=norm(sinal_ord)/sqrt(length(sinal_ord)); % Valor RMS do sinal
Ro_thr=sinal./sig_RMS;
thri=linspace(0.1,(max(Ro_thr)),250);
thr=(thri(1:(length(thri)-1)));
thr_norm_db=20*log10(thr); % Passa para dB

%*****
% Calcula a taxa de cruzamento e duração média do desvanecimento para cada limite
%*****

lcf=zeros(size(thr));
afd=zeros(size(thr));
temp_am=1/(20*10^3); %tempo de amostragem
for i = 1:length(thr),
%-----
% Taxa de cruzamento de nível
%-----
tmp = ( Ro_thr > thr(i) );
tmp = diff( tmp );
lcf( i ) = sum( tmp==1 );
%-----
tmp_afd = (Ro_thr < thr(i));
afd( i)=(sum(tmp_afd==1))/(vetor_posicao(m1))/(lcf( i )); % Prob. / NR
end

lcf=lcf./((temp_am)*(vetor_posicao(m1)));% divide pelo periodo de duração do setor

```

```

%lcf=lcf./(20*10^-3);% divide pelo periodo de duracao do setor
lcf_fm=lcf./(277); % divide pelo máximo desvio da frequencia (Freq. Doppler)
afd=afd.*((temp_am)*(vetor_posicao(m1)));% Multiplica pelo periodo de duracao do
setor
%afd=afd.*(20*10^-3);% Multiplica pelo periodo de duracao do setor
afdx_fm=afd*(277);% multiplica pelo máximo desvio da frequencia

lcf=(lcf./max(lcf)); % Normaliza para o valor máximo.
lcf_fm=(lcf_fm./max(lcf_fm)); % Normaliza para o valor máximo.
afd=(afd./max(afd)); % Normaliza para o valor máximo.
afdx_fm=(afdx_fm./max(afdx_fm)); % Normaliza para o valor máximo.

%-----
% Gráfico do numero de cruzamentos de nível por Rayleigh,Rice e do Sinal medido
%-----

subplot(3,2,[3 5])
%%%figure
semilogy(Ro_db,NR_Ray, '-r','LineWidth',2)
axis([-20 15 10^-5 10^0.5]); % Limita os eixos.
zoom on,grid on
hold on
semilogy(Ro_db,NR_Rice,'-.b','LineWidth',2)
hold on
semilogy(thr_norm_db,lcf_fm,'ok','MarkerSize',3)
ylabel('Nr / fm','FontSize',10)
xlabel('\rho (dB)','FontSize',9)
titulo=({'(b) Taxa de Cruzamento de Nível Normalizada'});
title(titulo, 'FontSize',8);
legend('Teórica - Rayleigh','Teórica - Rice','Medida','Location','Best')
hold off

%%%saveas(figure(3),'figcsetor_',setor],'jpg');
%-----
% Gráfico do numero do tempo médio de desvanecimento por Rayleigh,Rice e do Sinal
medido
%-----

subplot(3,2,[4 6])
%%%figure
semilogy(Ro_db,AFD_Ray,'-r','LineWidth',2)
axis([-10 25 10^-5 10^0.5]); % Limita os eixos
zoom on,grid on
hold on
semilogy(Ro_db,AFD_rice,'-.b','LineWidth',2)
hold on
semilogy(thr_norm_db,afdx_fm,'ok','MarkerSize',3)
ylabel('Tr * fm','FontSize',10)
xlabel('\rho (dB)','FontSize',9)
titulo=({'(c) Duração Média de Desvanecimento Normalizada'});
title(titulo, 'FontSize',8);
legend('Teórica - Rayleigh','Teórica -
Rice','Medida','FontSize',100,'Location','Best')
hold off
saveas(figure(1),'Desv_Rapido_Setor_',setor],'jpg');
%%%saveas(figure(4),'figdsetor_',setor],'jpg');

%% Acumula os valores de todos os setores do trecho %

% Acumula valores das pequenas áreas do trecho
% -----
% ndBm_trecho=[ndBm_trecho ndBm];
ndBm_trecho=[ndBm_trecho P];
V_trecho(m1,1:vetor_posicao(m1))=V(1:vetor_posicao(m1));
r_trecho(m1,1:vetor_posicao(m1))=r(1:vetor_posicao(m1));
n_trecho=[n_trecho;n];
xout_trecho=[xout_trecho;xout];
n_pdf_trecho=[n_pdf_trecho;n_pdf];
p1_trecho(m1,1:vetor_posicao(m1))=p1(1:vetor_posicao(m1));
p2_trecho(m1,1:vetor_posicao(m1))=p2(1:vetor_posicao(m1));
p3_rice_trecho(m1,1:vetor_posicao(m1))=p3_fim(1:vetor_posicao(m1));
p1_qui_trecho=[p1_qui_trecho;p1_qui];
p2_qui_trecho=[p2_qui_trecho;p2_qui];
p3_rice_qui_trecho=[p3_rice_qui_trecho;p3_qui_fim];
h_gauss_trecho=[h_gauss_trecho; h_gauss];
p_gauss_trecho=[p_gauss_trecho; p_gauss];
st_gauss_trecho=[st_gauss_trecho; st_gauss];

```

```

st_gauss_df_trecho=[st_gauss_df_trecho; st_gauss_df];
qui_teste_gauss_trecho=[qui_teste_gauss_trecho; qui_teste_gauss];
x_qui_teste_gauss_trecho=[x_qui_teste_gauss_trecho; x_qui_teste_gauss];
h_ray_trecho=[h_ray_trecho; h_ray];
p_ray_trecho=[p_ray_trecho; p_ray];
st_ray_trecho=[st_ray_trecho; st_ray];
st_ray_df_trecho=[st_ray_df_trecho; st_ray_df];
qui_teste_ray_trecho=[qui_teste_ray_trecho; qui_teste_ray];
x_qui_teste_ray_trecho=[x_qui_teste_ray_trecho; x_qui_teste_ray];
sigma_rice_trecho=[sigma_rice_trecho; sigma_rice_fim];
k_rice_trecho=[k_rice_trecho;k_rice_fim];
r_zero_trecho=[r_zero_trecho;r_zero_fim];
h_rice_trecho=[h_rice_trecho;h_rice_fim];
p_rice_trecho=[p_rice_trecho;p_rice_fim];
st_rice_trecho=[st_rice_trecho;st_rice_fim];
st_rice_df_trecho=[st_rice_df_trecho;st_rice_df_fim];
qui_teste_rice_trecho=[qui_teste_rice_trecho;qui_teste_rice_fim];
x_qui_teste_rice_trecho=[x_qui_teste_rice_trecho;x_qui_teste_rice_fim];

```

end

```

%-----
% Salva arquivo com valores finais de todas as pequenas áreas
%-----

```

```

arquivo_saida2=strcat('dados_pdf_teste_qui_Rotal.mat');
nome_arq=strcat(arquivo_saida2);
save(nome_arq,...
'ndBm_trecho',...
'V_trecho',...
'r_trecho',...
'n_trecho',...
'xout_trecho',...
'n_pdf_trecho',...
'p1_trecho',...
'p2_trecho',...
'p3_rice_trecho',...
'p1_qui_trecho',...
'p2_qui_trecho',...
'p3_rice_qui_trecho',...
'h_gauss_trecho',...
'p_gauss_trecho',...
'st_gauss_trecho',...
'st_gauss_df_trecho',...
'qui_teste_gauss_trecho',...
'x_qui_teste_gauss_trecho',...
'h_ray_trecho',...
'p_ray_trecho',...
'st_ray_trecho',...
'st_ray_df_trecho',...
'qui_teste_ray_trecho',...
'x_qui_teste_ray_trecho',...
'sigma_rice_trecho',...
'k_rice_trecho',...
'h_rice_trecho',...
'p_rice_trecho',...
'st_rice_trecho',...
'st_rice_df_trecho',...
'qui_teste_rice_trecho',...
'x_qui_teste_rice_trecho');

```

#### A.8 - Programa “posição\_setor.m”: Gera o vetor posição, utilizado para ler setores com tamanhos diferentes.

```
x = pot_setor11;
dim = size(x);
lim_i = dim(1);
lim_j = dim(2);
vetor = 1:lim_i;
for i = 1:lim_i
    for j = 1:lim_j
        if x(i,j) == 0
            vetor(i) = j - 1;
            break
        end
        if j == lim_j
            vetor(i) = j;
        end
    end
end
vetor_posicao = vetor;
save('vetor_posicao','vetor_posicao')
vetor_posicao = vetor_posicao;
xlswrite('vetor_posicao.xlsx',vetor_posicao)
```

#### A.9 - Programa “TabelaFinal\_TesteQui.m”: Realiza as análises do teste do qui-quadrado para o desvanecimento em pequena escala.

```
clear all; % Apaga todas as variáveis do Espaço de Trabalho
close all; % fecha os graficos
clc; % Apaga área de comando
% -----
% -----
% Carrega arquivo com dados de todas as pequenas áreas para sumarização
% -----
arquivo_entrada=strcat('dados_pdf_teste_qui_Rotal.mat');
nome_arq=strcat(arquivo_entrada);
load(nome_arq,...
'ndBm_trecho',...
'V_trecho',...
'r_trecho',...
'n_trecho',...
'xout_trecho',...
'n_pdf_trecho',...
'p1_trecho',...
'p2_trecho',...
'p3_rice_trecho',...
'p1_qui_trecho',...
'p2_qui_trecho',...
'p3_rice_qui_trecho',...
'h_gauss_trecho',...
'p_gauss_trecho',...
'st_gauss_trecho',...
'st_gauss_df_trecho',...
'qui_teste_gauss_trecho',...
'x_qui_teste_gauss_trecho',...
'h_ray_trecho',...
'p_ray_trecho',...
'st_ray_trecho',...
'st_ray_df_trecho',...
'qui_teste_ray_trecho',...
'x_qui_teste_ray_trecho',...
'sigma_rice_trecho',...
'k_rice_trecho',...
'h_rice_trecho',...
'p_rice_trecho',...
'st_rice_trecho',...
'st_rice_df_trecho',...
'qui_teste_rice_trecho',...
'x_qui_teste_rice_trecho');
load vetor_posicao
%-----
rt=1; %numero da Rota
```

```

%-----
%*****
% Processamento dos dados
% -----
compara_qui=[qui_teste_gauss_trecho qui_teste_ray_trecho qui_teste_rice_trecho];
compara_h=[h_gauss_trecho h_ray_trecho h_rice_trecho];
%
% Encontra menor e maior valor do teste Qui que passou no teste
% -----
% Posição e valor do menor e maior teste QUI com que Gauss passou
ind_passou_qui_gauss=find(h_gauss_trecho==0); % todos Gauss que passaram
[min_val_passou_qui_gauss
 ind_min_gauss]=min(qui_teste_gauss_trecho(ind_passou_qui_gauss));
[max_val_passou_qui_gauss
 ind_max_gauss]=max(qui_teste_gauss_trecho(ind_passou_qui_gauss));
ind_min_gauss=ind_passou_qui_gauss(ind_min_gauss);
ind_max_gauss=ind_passou_qui_gauss(ind_max_gauss);

% Posição e valor do menor e maior teste QUI com que Rayleigh passou
ind_passou_qui_ray=find(h_ray_trecho==0); % todos Ray que passaram
[min_val_passou_qui_ray ind_min_ray]=min(qui_teste_ray_trecho(ind_passou_qui_ray));
[max_val_passou_qui_ray ind_max_ray]=max(qui_teste_ray_trecho(ind_passou_qui_ray));
ind_min_ray=ind_passou_qui_ray(ind_min_ray);
ind_max_ray=ind_passou_qui_ray(ind_max_ray);

% Posição e valor do menor e maior teste QUI com que Rice passou
ind_passou_qui_rice=find(h_rice_trecho==0); % todos Rice que passaram
[min_val_passou_qui_rice ind_min_rice]=min(qui_teste_rice_trecho(ind_passou_qui_rice));
[max_val_passou_qui_rice ind_max_rice]=max(qui_teste_rice_trecho(ind_passou_qui_rice));
ind_min_rice=ind_passou_qui_rice(ind_min_rice);
ind_max_rice=ind_passou_qui_rice(ind_max_rice);

% Quantidade de vezes que uma PDF passou no teste e apresentou menor valor de Qui
[row_menor_qui_gauss,col_menor_qui_gauss] = find(compara_qui(:,1)<=compara_qui(:,2) &...
compara_qui(:,1)<=compara_qui(:,3)&...
compara_h(:,1)==0);
[row_menor_qui_ray,col_menor_qui_ray] = find(compara_qui(:,2)<=compara_qui(:,1) &...
compara_qui(:,2)<=compara_qui(:,3)&...
compara_h(:,2)==0);
[row_menor_qui_rice,col_menor_qui_rice] = find(compara_qui(:,3)<=compara_qui(:,2) &...
compara_qui(:,3)<=compara_qui(:,1) &...
compara_h(:,3)==0);

% Total de setores no trecho
disp('-----')
fprintf('Trecho: %1.0f \t | Quantidade total setores no trecho: %1.0f\n',...
rt,length(qui_teste_rice_trecho));
disp('-----')
disp('Quant. de vezes que a PDF passou no teste QUI: Gauss Rayleigh Rice')
disp(['Total PDF que passou no teste Qui (95%):          ',...
num2str(length(ind_passou_qui_gauss)), ' ',...
num2str(length(ind_passou_qui_ray)), ' ',...
num2str(length(ind_passou_qui_rice))])
disp('-----')
disp('Quantidade de vezes que a PDF passou no teste Qui com menor valor')
disp('          Gauss Rayleigh Rice')
disp(['Total com menor valor Qui:          ',...
num2str(length(row_menor_qui_gauss)), ' ',...
num2str(length(row_menor_qui_ray)), ' ',...
num2str(length(row_menor_qui_rice))])

% Valor de k de Rice para menor e maior QUI que passou no teste
k_rice_min_qui=k_rice_trecho(ind_min_rice);
k_rice_max_qui=k_rice_trecho(ind_max_rice);

% Valor de QUI que passou no teste para menor valor de K de Rice
ind_passou_k_rice=find(h_rice_trecho==0); % todos Rice que passaram
[min_k_rice ind_min_k_rice] = min(k_rice_trecho(ind_passou_k_rice));
[max_k_rice ind_max_k_rice] = max(k_rice_trecho(ind_passou_k_rice));
qui_rice_min_k=qui_teste_rice_trecho(ind_min_k_rice);
qui_rice_max_k=qui_teste_rice_trecho(ind_max_k_rice);

% Maior e menor valor de K e QUI que passou no teste
disp('-----')
disp('Maior e menor valor de K e QUI que passou no teste')

```

```

disp('-----')
fprintf('Menor valor de K: %6.2f para QUI: %6.2f\n', min_k_ri ce, qui_ri ce_min_k);
fprintf('Maior valor de K: %6.2f para QUI: %6.2f\n', max_k_ri ce, qui_ri ce_max_k);
disp('-----')
fprintf('Valor de K: %6.2f para menor QUI: %6.2f\n', k_ri ce_min_ qui,
min_val_passou_ qui_ri ce);
fprintf('Valor de K: %6.2f para maior QUI: %6.2f\n', k_ri ce_max_ qui,
max_val_passou_ qui_ri ce);

% Valores de K da PDF de RICE
disp('-----')
fprintf('Valor de K da PDF de Rice: mínimo médio máximo\n')
fprintf('          %6.2f %6.2f %6.2f\n', ...
min(k_ri ce_trecho),mean(k_ri ce_trecho),max(k_ri ce_trecho));

%%
% Menor e maior valor de Qui para cada PDF
disp('-----')
fprintf('Menor e maior valor de Qui para cada PDF: Gauss\tRayleigh Rice\n')
fprintf('Menor QUI:          %6.2f %6.2f\t %6.2f\t\n', ...
min_val_passou_ qui_gauss,min_val_passou_ qui_ray,min_val_passou_ qui_ri ce);
fprintf('Maior QUI:         %6.2f %6.2f\t %6.2f\t\n', ...
max_val_passou_ qui_gauss,max_val_passou_ qui_ray,max_val_passou_ qui_ri ce);

% Encontra posições onde nenhum teste passou
[row_nenhum,col_nenhum] = find(compara_h(:,1)==1 & compara_h(:,2)==1 &
compara_h(:,3)==1);
% Encontra posições onde todos passaram
[row_todos,col_todos] = find(compara_h(:,1)==0 & compara_h(:,2)==0 & compara_h(:,3)==0);
% Encontra posições onde somente Gauss passou
[row_so_gauss,col_so_gauss] = find(compara_h(:,1)==0 & compara_h(:,2)==1 &
compara_h(:,3)==1);
% Encontra posições onde somente Rayleigh passou
[row_so_ray,col_so_ray] = find(compara_h(:,1)==1 & compara_h(:,2)==0 &
compara_h(:,3)==1);
% Encontra posições onde somente Rice passou
[row_so_ri ce,col_so_ri ce] = find(compara_h(:,1)==1 & compara_h(:,2)==1 &
compara_h(:,3)==0);
% Quantidade que somente um passou

disp('-----')
disp('Qualidade de ajuste pelo teste Qui para cada PDF: Gauss Rayleigh Rice')
disp(['Passou exclusivamente:          ',...
num2str(length(col_so_gauss)), ' ',...
num2str(length(col_so_ray)), ' ',...
num2str(length(col_so_ri ce))]);
disp(['Nenhuma PDF passou:          ',...
num2str(length(col_nenhum)), ' ',...
num2str(length(col_nenhum)), ' ',...
num2str(length(col_nenhum))]);
disp(['Todas passaram ao mesmo tempo:          ',...
num2str(length(col_todos)), ' ',...
num2str(length(col_todos)), ' ',...
num2str(length(col_todos))]);

%% -----
%% Geração da tabela com os valores do teste Qui para cada setor  %%
%% -----
disp(' ')
disp('-----')
disp('Valores do teste Qui em cada setor para cada PDF: Gauss Rayleigh Rice')
disp('-----')
disp('Setor      QUI Gauss      QUI Ray      QUI Rice      k(ri ce)')
Sequencia=length(qui_teste_gauss_trecho);
Seq=zeros(1,Sequencia+1);
Seq = 1:Sequencia;
Seq2=Seq';

%% -----

for i = 1:Sequencia
    d=compara_h;

    if(d(i,1)==1)
        qui_teste_gauss_trecho(i)=0/0;
    else
        qui_teste_gauss_trecho(i)=qui_teste_gauss_trecho(i);
    end
end

```

```

end
if(d(i,2)==1)
    qui_teste_ray_trecho(i)=0/0;
else
    qui_teste_ray_trecho(i)=qui_teste_ray_trecho(i);
end
if(d(i,3)==1)
    qui_teste_rice_trecho(i)=0/0';
else
    qui_teste_rice_trecho(i)=qui_teste_rice_trecho(i);
end
fprintf(' %d          %6.2f          %6.2f          %6.2f          %d\n',...
Seq2(i),qui_teste_gauss_trecho(i),qui_teste_ray_trecho(i),qui_teste_rice_trecho(i),...
k_rice_trecho(i));
end

disp('-----')
disp('Obs.: NaN - Indica que a PDF não passou no teste Qui-quadrado para o setor')
% -----
%% Desenha gráfico das PDF onde todos passaram no teste
%plot(xout_trecho(row_todos,:),n_pdf_trecho(row_todos,),'dr','MarkerSize',8)
% -----
% Desenha PDF onde nenhum passou no teste
%plot(xout_trecho(row_nenhum,:),n_pdf_trecho(row_nenhum,),'dr','MarkerSize',8)
% -----
% Desenha PDF onde somente RICE passou no teste
%subplot(2,2,1:2)
%plot(xout_trecho(row_so_rice,:),n_pdf_trecho(row_so_rice,),'dr','MarkerSize',8)
% -----
% Desenha PDF onde RICE passou com menor Qui
figure(1)
subplot(2,1,1)
bar(xout_trecho(ind_min_rice,:),n_pdf_trecho(ind_min_rice,),'w')
hold on
%grid on
melhor_r_trecho(1:vetor_posicao(ind_min_rice))=r_trecho(ind_min_rice,1:vetor_posicao(ind_min_rice));
melhor_p3_rice_trecho(1:vetor_posicao(ind_min_rice))=p3_rice_trecho(ind_min_rice,1:vetor_posicao(ind_min_rice));
melhor_p1_trecho(1:vetor_posicao(ind_min_rice))=p1_trecho(ind_min_rice,1:vetor_posicao(ind_min_rice));
melhor_p2_trecho(1:vetor_posicao(ind_min_rice))=p2_trecho(ind_min_rice,1:vetor_posicao(ind_min_rice));
plot(melhor_r_trecho,melhor_p3_rice_trecho,'-b','LineWidth',2)
plot(melhor_r_trecho,melhor_p1_trecho,'--g','LineWidth',2)
plot(melhor_r_trecho,melhor_p2_trecho,'-r','LineWidth',2)
xlabel('r [normalizado]', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
ylabel('PDF', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
titulo=({'Comparação PDF Rice, Gauss e Rayleigh:';...
['(a) Menor Qui para Rice - Setor: ' num2str(ind_min_rice) ...
'e Fator K=' num2str(k_rice_trecho(ind_min_rice))]);
title(titulo, 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');
legend('Empírico','Rice', 'Gauss','Rayleigh','Location','NorthEast');
hold off
%
% -----
% Desenha PDF onde RICE passou com maior Qui
subplot(2,1,2)
bar(xout_trecho(ind_max_rice,:),n_pdf_trecho(ind_max_rice,),'w')
hold on
%grid on
pio_r_trecho(1:vetor_posicao(ind_max_rice))=r_trecho(ind_max_rice,1:vetor_posicao(ind_max_rice));
pio_r3_rice_trecho(1:vetor_posicao(ind_max_rice))=p3_rice_trecho(ind_max_rice,1:vetor_posicao(ind_max_rice));
pio_r1_trecho(1:vetor_posicao(ind_max_rice))=p1_trecho(ind_max_rice,1:vetor_posicao(ind_max_rice));
pio_r2_trecho(1:vetor_posicao(ind_max_rice))=p2_trecho(ind_max_rice,1:vetor_posicao(ind_max_rice));
plot(pio_r_trecho,pio_r3_rice_trecho,'-b','LineWidth',2)
plot(pio_r_trecho,pio_r1_trecho,'--g','LineWidth',2)
plot(pio_r_trecho,pio_r2_trecho,'-r','LineWidth',2)
xlabel('r [normalizado]', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
ylabel('PDF', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
titulo=({'(b) Maior Qui para Rice - Setor: ' num2str(ind_max_rice) ...
'e Fator K=' num2str(k_rice_trecho(ind_max_rice))});
title(titulo, 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');

```

```

legend('Empírico', 'Rice', 'Gauss', 'Rayleigh', 'Location', 'NorthEast');
hold off
saveas(figure(1), ['melhor_setor_Rice_', num2str(ind_min_rice)], 'jpg');
%
% -----
% Desenha PDF onde Rayleigh passou com menor Qui
figure(2)
subplot(2,1,1)
bar(xout_trecho(ind_min_ray,:), n_pdf_trecho(ind_min_ray,:), 'w')
hold on
grid on
melhor_r_trechoRay(1:vetor_posicao(ind_min_ray))=r_trecho(ind_min_ray,1:vetor_posicao(ind_min_ray));
melhor_p3_rice_trechoRay(1:vetor_posicao(ind_min_ray))=p3_rice_trecho(ind_min_ray,1:vetor_posicao(ind_min_ray));
melhor_p1_trechoRay(1:vetor_posicao(ind_min_ray))=p1_trecho(ind_min_ray,1:vetor_posicao(ind_min_ray));
melhor_p2_trechoRay(1:vetor_posicao(ind_min_ray))=p2_trecho(ind_min_ray,1:vetor_posicao(ind_min_ray));
plot(melhor_r_trechoRay, melhor_p3_rice_trechoRay, '-b', 'LineWidth', 2)
plot(melhor_r_trechoRay, melhor_p1_trechoRay, '--g', 'LineWidth', 2)
plot(melhor_r_trechoRay, melhor_p2_trechoRay, '-.r', 'LineWidth', 2)
xlabel('r [normalizado]', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('PDF', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
titulo=({'(c) Menor Qui para Rayleigh - Setor: ' num2str(ind_min_ray)});
title(titulo, 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold');
legend('Empírico', 'Rice', 'Gauss', 'Rayleigh', 'Location', 'NorthEast');
hold off
%
% -----
% Desenha PDF onde Rayleigh passou com maior Qui
subplot(2,1,2)
bar(xout_trecho(ind_max_ray,:), n_pdf_trecho(ind_max_ray,:), 'w')
hold on
grid on
pior_r_trechoRay(1:vetor_posicao(ind_max_ray))=r_trecho(ind_max_ray,1:vetor_posicao(ind_max_ray));
pior_p3_rice_trechoRay(1:vetor_posicao(ind_max_ray))=p3_rice_trecho(ind_max_ray,1:vetor_posicao(ind_max_ray));
pior_p1_trechoRay(1:vetor_posicao(ind_max_ray))=p1_trecho(ind_max_ray,1:vetor_posicao(ind_max_ray));
pior_p2_trechoRay(1:vetor_posicao(ind_max_ray))=p2_trecho(ind_max_ray,1:vetor_posicao(ind_max_ray));
plot(pior_r_trechoRay, pior_p3_rice_trechoRay, '-b', 'LineWidth', 2)
plot(pior_r_trechoRay, pior_p1_trechoRay, '--g', 'LineWidth', 2)
plot(pior_r_trechoRay, pior_p2_trechoRay, '-.r', 'LineWidth', 2)
xlabel('r [normalizado]', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('PDF', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
titulo=({'(d) Maior Qui para Rayleigh - Setor: ' num2str(ind_max_ray)});
title(titulo, 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold');
legend('Empírico', 'Rice', 'Gauss', 'Rayleigh', 'Location', 'NorthEast');
hold off
saveas(figure(2), ['melhor_setor_Ray_', num2str(ind_min_ray)], 'jpg');
%
% -----
% Desenha PDF onde Rayleigh Gauss passou com menor Qui
figure(3)
subplot(2,1,1)
bar(xout_trecho(ind_min_gauss,:), n_pdf_trecho(ind_min_gauss,:), 'w')
hold on
grid on
melhor_r_trechoGauss(1:vetor_posicao(ind_min_gauss))=r_trecho(ind_min_gauss,1:vetor_posicao(ind_min_gauss));
melhor_p3_rice_trechoGauss(1:vetor_posicao(ind_min_gauss))=p3_rice_trecho(ind_min_gauss,1:vetor_posicao(ind_min_gauss));
melhor_p1_trechoGauss(1:vetor_posicao(ind_min_gauss))=p1_trecho(ind_min_gauss,1:vetor_posicao(ind_min_gauss));
melhor_p2_trechoGauss(1:vetor_posicao(ind_min_gauss))=p2_trecho(ind_min_gauss,1:vetor_posicao(ind_min_gauss));
plot(melhor_r_trechoGauss, melhor_p3_rice_trechoGauss, '-b', 'LineWidth', 2)
plot(melhor_r_trechoGauss, melhor_p1_trechoGauss, '--g', 'LineWidth', 2)
plot(melhor_r_trechoGauss, melhor_p2_trechoGauss, '-.r', 'LineWidth', 2)
xlabel('r [normalizado]', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('PDF', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
titulo=({'(e) Menor Qui para Gauss - Setor: ' num2str(ind_min_gauss)});
title(titulo, 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold');
legend('Empírico', 'Rice', 'Gauss', 'Rayleigh', 'Location', 'NorthEast');

```

```

hold off
%
% -----
% Desenha PDF onde Gauss passou com maior Qui
subplot(2,1,2)
bar(xout_trecho(ind_max_gauss,:),n_pdf_trecho(ind_max_gauss,:), 'w')
hold on
grid on
pior_r_trechoGauss(1:vetor_posicao(ind_max_gauss))=r_trecho(ind_max_gauss,1:vetor_posicao(ind_max_gauss));
pior_p3_rice_trechoGauss(1:vetor_posicao(ind_max_gauss))=p3_rice_trecho(ind_max_gauss,1:vetor_posicao(ind_max_gauss));
pior_pl_trechoGauss(1:vetor_posicao(ind_max_gauss))=pl_trecho(ind_max_gauss,1:vetor_posicao(ind_max_gauss));
pior_p2_trechoGauss(1:vetor_posicao(ind_max_gauss))=p2_trecho(ind_max_gauss,1:vetor_posicao(ind_max_gauss));
plot(pior_r_trechoGauss,pior_p3_rice_trechoGauss,'-b','LineWidth',2)
plot(pior_r_trechoGauss,pior_pl_trechoGauss,'--g','LineWidth',2)
plot(pior_r_trechoGauss,pior_p2_trechoGauss,'-r','LineWidth',2)
xlabel('r [normalizado]', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
ylabel('PDF', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
titulo=({'(f) Maior Qui para Gauss - Setor: ' num2str(ind_max_gauss)});
title(titulo, 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');
legend('Empírico', 'Rice', 'Gauss', 'Rayleigh', 'Location', 'NorthEast');
hold off
saveas(figure(3), ['melhor_setor_Gauss_', num2str(ind_min_gauss)], 'jpg');

```

#### A.10 – Programa “Análise\_Coeficiente\_de\_Eficiência.m”: Calcula parâmetros estatísticos importantes para a obtenção do coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe.

```

clear all;
close all;
clc;

%-----
% Variáveis do programa %
%-----
Po_trecho=zeros(260,3179); % zeros(qtd_setores,maior_valor"vetor_posicao").
p1_trecho=zeros(260,3179); % zeros(qtd_setores,maior_valor"vetor_posicao").
p2_trecho=zeros(260,3179); % zeros(qtd_setores,maior_valor"vetor_posicao").
p3_trecho=zeros(260,3179); % zeros(qtd_setores,maior_valor"vetor_posicao").
Mo_trecho=[];
Me_gauss_trecho=[];
Me_rayleigh_trecho=[];
Me_rice_trecho=[];
dpo_trecho=[];
dpe_gauss_trecho=[];
dpe_rayleigh_trecho=[];
dpe_rice_trecho=[];
EMQ_gauss_trecho=[];
EMQ_rayleigh_trecho=[];
EMQ_rice_trecho=[];
REMQ_gauss_trecho=[];
REMQ_rayleigh_trecho=[];
REMQ_rice_trecho=[];
Elog_gauss_trecho=[];
Elog_rayleigh_trecho=[];
Elog_rice_trecho=[];
E_gauss_trecho=[];
E1_gauss_trecho=[];
E_rayleigh_trecho=[];
E1_rayleigh_trecho=[];
E_rice_trecho=[];
E1_rice_trecho=[];

k_rice_trecho=[];

%-----

load pot_setor11; % Le o arquivo de potencia da Rota em questao.
load vetor_posicao; % Le o "vetor_posicao".

load K_Rice;
K=K_Rice;

```

```

potdbm=abs(pot_setor11); % Esta em dBm. Recebe o valor absoluto de
"pot_setor11", ou seja, o modulo.

for ml=1:size(potdbm,1);
    % ml representa o setor que será analisada(índice da linha na matriz).
    % ml=1; % Caso queira fazer a análise somente de um setor.
    sinaltotals=potdbm(ml,1:vetor_posicao(ml)); % Esta em dBm. Cria o vetor
"sinaltotals", cuja primeira linha contem ml=1, a segunda ml=2... obedecendo a dimensao
do "vetor_posicao". Após rodar o programa ele guarda os valores do ultimo setor rodado,
pois vai sobrescrevendo os anteriores.
    k_rice=K(ml);

    R=50; % Impedância em Ohm.
    P=sinaltotals;
    Pot_W=0.001.*(10.^(P)./10)); % Potência em Watts. (1mW = 0.001W)

    media=mean(Pot_W); % Potencia em Watts. Calculo da Media Observada
    Po=Pot_W/media; % Divide pela media para tirar o Desvanecimento Lento.
Potencia observada (Desv. Lento).

    Mo=mean(Po); % Potencia media observada. Media do sinal de Desv.
Lento.
    %PoP=(Po-Mo).^2; % PoP = (Potencia observada - Potencia media
observada)^2
    dpo=std(Po,1); % Desvio Padrao observado = Raiz quadrada da media de
PoP.

    %-----
    %% Calculo das FDPs teóricas %
    %-----

    %*****
    % Distribuição de Gauss (Gaussiana): p1
    %*****

    p1=(1/(sqrt(2*pi)*dpo)).*exp((-1.*(Po-Mo).^2)./(2*dpo^2));

    Me_gauss=mean(p1); % Media Esperada para Gauss.
    dpe_gauss=std(p1,1); % Desvio Padrao Esperado para Gauss.
    PePo_gauss=(p1-Po).^2;
    EMQ_gauss=mean(PePo_gauss); % Erro Medio Quadratico para Gauss
    REMQ_gauss=(EMQ_gauss).^(1/2); % Raiz Quadrada do Erro Medio Quadratico
para Gauss

    %%Coeficiente de Log Eficiencia ou Log Nash-Sutcliffe Elog
    Elog_gauss=1-(sum((log10(Po)-log10(p1)).^2))./(sum((log10(Po)-log10(Mo)).^2));
    E_gauss=1-(sum((Po-p1).^2))./(sum((Po-Mo).^2));
    El_gauss=1-(EMQ_gauss./(dpo.^2)); % (dpo.^2) = variancia observada
    %*****
    %% Distribuição de Rayleigh: p2
    %*****

    sigma_ray=Mo*sqrt(2/pi);
    p2=(Po./(sigma_ray^2)).*(exp(-((Po.^2)./(2*(sigma_ray^2)))));

    Me_rayleigh=mean(p2); % Media Esperada para Rayleigh
    dpe_rayleigh=std(p2,1); % Desvio Padrao Esperado para Rayleigh
    PePo_rayleigh=(p2-Po).^2;
    EMQ_rayleigh=mean(PePo_rayleigh); % Erro Medio Quadratico para Rayleigh
    REMQ_rayleigh=(EMQ_rayleigh).^(1/2); % Raiz Quadrada do Erro Medio Quadratico
para Rayleigh

    %%Coeficiente de Log Eficiencia ou Log Nash-Sutcliffe Elog
    Elog_rayleigh=1-(sum((log10(Po)-log10(p2)).^2))./(sum((log10(Po)-log10(Mo)).^2));
    E_rayleigh=1-(sum((Po-p2).^2))./(sum((Po-Mo).^2));
    El_rayleigh=1-(EMQ_rayleigh./(dpo.^2));
    %*****
    %% Distribuição de Rice variando K %:p3
    %*****

    p3=[];

    sigma_rice=mean(Po)./(((sqrt(pi/2)*exp(-
k_rice/2)).*(((1+k_rice).*(besseli(0,k_rice/2)))+...
(k_rice*besseli(1,k_rice/2)))));
    r_zero=sqrt(k_rice*2*(sigma_rice^2));

```

```

p3=(Po./(sigma_rice^2)).*(exp(-((Po.^2+r_zero^2)/(2*sigma_rice^2)))).*...
besseli(0,(r_zero.*Po)/(sigma_rice^2));

Me_rice=mean(p3); % Media Esperada para Rice
dpe_rice=std(p3,1); % Desvio Padrao Esperado para Rice
PePo_rice=(p3-Po).^2;
EMQ_rice=mean(PePo_rice); % Erro Medio Quadratico para Rice
REMQ_rice=(EMQ_rice).^(1/2);

%%Coeficiente de Log Eficiencia ou Log Nash-Sutcliffe Elog
Elog_rice=1-sum((log10(Po)-log10(p3)).^2)./sum((log10(Po)-log10(Mo)).^2);
E_rice=1-(sum((Po-p3).^2))./(sum((Po-Mo).^2));
El_rice=1-(EMQ_rice./(dpo.^2));

%% Acumula os valores de todos os setores do trecho %

Po_trecho(m1,1:vetor_posicao(m1))=Po(1:vetor_posicao(m1));
p1_trecho(m1,1:vetor_posicao(m1))=p1(1:vetor_posicao(m1));
p2_trecho(m1,1:vetor_posicao(m1))=p2(1:vetor_posicao(m1));
p3_trecho(m1,1:vetor_posicao(m1))=p3(1:vetor_posicao(m1));

Mo_trecho=[Mo_trecho;Mo];
Me_gauss_trecho=[Me_gauss_trecho;Me_gauss];
Me_rayleigh_trecho=[Me_rayleigh_trecho;Me_rayleigh];
Me_rice_trecho=[Me_rice_trecho;Me_rice];

dpo_trecho=[dpo_trecho;dpo];
dpe_gauss_trecho=[dpe_gauss_trecho;dpe_gauss];
dpe_rayleigh_trecho=[dpe_rayleigh_trecho;dpe_rayleigh];
dpe_rice_trecho=[dpe_rice_trecho;dpe_rice];

EMQ_gauss_trecho=[EMQ_gauss_trecho;EMQ_gauss];
EMQ_rayleigh_trecho=[EMQ_rayleigh_trecho;EMQ_rayleigh];
EMQ_rice_trecho=[EMQ_rice_trecho;EMQ_rice];

REMQ_gauss_trecho=[REMQ_gauss_trecho;REMQ_gauss];
REMQ_rayleigh_trecho=[REMQ_rayleigh_trecho;REMQ_rayleigh];
REMQ_rice_trecho=[REMQ_rice_trecho;REMQ_rice];

Elog_gauss_trecho=[Elog_gauss_trecho;Elog_gauss];
Elog_rayleigh_trecho=[Elog_rayleigh_trecho;Elog_rayleigh];
Elog_rice_trecho=[Elog_rice_trecho;Elog_rice];

E_gauss_trecho=[E_gauss_trecho;E_gauss];
El_gauss_trecho=[El_gauss_trecho;El_gauss];
E_rayleigh_trecho=[E_rayleigh_trecho;E_rayleigh];
El_rayleigh_trecho=[El_rayleigh_trecho;El_rayleigh];
E_rice_trecho=[E_rice_trecho;E_rice];
El_rice_trecho=[El_rice_trecho;El_rice];

k_rice_trecho=[k_rice_trecho;k_rice];

end

xlswrite('Po_trecho.xlsx',Po_trecho)
xlswrite('p1_trecho.xlsx',p1_trecho)
xlswrite('p2_trecho.xlsx',p2_trecho)
xlswrite('p3_trecho.xlsx',p3_trecho)
xlswrite('Mo_trecho.xlsx',Mo_trecho)
xlswrite('Me_gauss_trecho.xlsx',Me_gauss_trecho)
xlswrite('Me_rayleigh_trecho.xlsx',Me_rayleigh_trecho)
xlswrite('Me_rice_trecho.xlsx',Me_rice_trecho)
xlswrite('dpo_trecho.xlsx',dpo_trecho)
xlswrite('dpe_gauss_trecho.xlsx',dpe_gauss_trecho)
xlswrite('dpe_rayleigh_trecho.xlsx',dpe_rayleigh_trecho)
xlswrite('dpe_rice_trecho.xlsx',dpe_rice_trecho)
xlswrite('EMQ_gauss_trecho.xlsx',EMQ_gauss_trecho)
xlswrite('EMQ_rayleigh_trecho.xlsx',EMQ_rayleigh_trecho)
xlswrite('EMQ_rice_trecho.xlsx',EMQ_rice_trecho)
xlswrite('REMQ_gauss_trecho.xlsx',REMQ_gauss_trecho)
xlswrite('REMQ_rayleigh_trecho.xlsx',REMQ_rayleigh_trecho)
xlswrite('REMQ_rice_trecho.xlsx',REMQ_rice_trecho)
xlswrite('Elog_gauss_trecho.xlsx',Elog_gauss_trecho)
xlswrite('Elog_rayleigh_trecho.xlsx',Elog_rayleigh_trecho)
xlswrite('Elog_rice_trecho.xlsx',Elog_rice_trecho)
xlswrite('E_gauss_trecho.xlsx',E_gauss_trecho)
xlswrite('El_gauss_trecho.xlsx',El_gauss_trecho)

```

```

xlswrite('E_rayleigh_trecho.xlsx',E_rayleigh_trecho)
xlswrite('E1_rayleigh_trecho.xlsx',E1_rayleigh_trecho)
xlswrite('E_rice_trecho.xlsx',E_rice_trecho)
xlswrite('E1_rice_trecho.xlsx',E1_rice_trecho)

```

## A.11 - Programa “desvanecimento\_grande\_escala.m”: Gera as análises de desvanecimento em grande escala.

```

clear all;
close all;
clc;
%-----
rt=1; %identifica numero da Rota
%-----
load Dados_Largaescala_Rotal
dist_m_seg=MediaMovFinal(:,2); % lê a coluna relativa as distancias em m da matriz
MediaMovFinal

nivel_sinal_rx=MediaMovFinal(:,5); %% lê a coluna relativa a potencia do sinal de
recepção em dBm da matriz MediaMovFinal
Prx=nivel_sinal_rx;
% Distância do segmento em logarítmico
dist_km_seg_log=log10(dist_m_seg/1000); % Distancia de referencia igual a 1000 metros
%-----
X=[ones(size(dist_km_seg_log)) -dist_km_seg_log];
Y=Prx;
X_t=X';
X_t_X=X_t*X;
X_t_Y=X_t*Y;
AS=[X_t_X(1,1) X_t_X(1,2) X_t_Y(1); X_t_X(2,1) X_t_X(2,2) X_t_Y(2)];
resul=rref(AS);
Prx_d_0_est=resul(1,3);
fator_n_prx=resul(2,3)/10;%fator de atenuação em função da distância
intfn=round(fator_n_prx); %aproxima o fator de atenuação para colocar no titulo
fn=int2str(intfn);

Prx_est=Prx_d_0_est-10*fator_n_prx.*dist_km_seg_log;
% Desenha a Reta de melhor ajuste
rota=int2str(rt);
figure(1)
plot(dist_km_seg_log,Y,'*b',dist_km_seg_log,Prx_est,'-r','LineWidth',1);
zoom on,grid on
xlabel('Distância em relação ao Tx [km em logarítimo] ', 'FontSize', 12,'FontWeight',
'bold')
ylabel('Nível de sinal [dBm]', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
titulo=({'Reta de melhor ajuste para a perda no percurso na Rota ',rota,', n = ',fn});
title(titulo, 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');
saveas(figure(1),['RetaMA_Rota',rota], 'jpg');

%% Cálculo do desvanecimento lento
Desv_lento=Prx-Prx_est;
num_div=fix(sqrt(length(Desv_lento)));
%%num_div=20;
varia_lento=Desv_lento; % Variação lente sem ordenar
Desv_lento=sort(Desv_lento); % Ordena os números para melhorar gráfico
% Dados do histograma
[n_hist,xout] = hist(Desv_lento,num_div);
delta_x=xout(2)-xout(1);
area_hist=delta_x.*n_hist;
soma_area_hist=sum(area_hist);
area_pdf=area_hist/soma_area_hist;
n_pdf=area_pdf/delta_x;
% Desenha histograma
figure(2)
bar(xout,n_pdf),zoom on,grid on
hold on;
% Cálculo da PDF de Gauss
media=mean(Desv_lento); % Obs.: media tende a zero
desvio_padrao=std(Desv_lento);
d_p=sqrt(sum(((Desv_lento).^2)/length(Desv_lento))); % Obs.: É o mesmo valor de
sdt(Desv_lento)
p_gauss=(1/(desvio_padrao*sqrt(2*pi)))*...
.*exp(-((Desv_lento-media).^2)/...
./(2*desvio_padrao^2));

```

```

%
% Desenha gráfico de Gauss

plot(Desv_lento,p_gauss,'-g','LineWidth',2);
h = legend('PDF Empírica','Lognormal',2,'Location','NorthEast');
set(h,'Interpreter','none');
xlabel('Nível de sinal [dBm]', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
ylabel('PDF', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
titulo=({'Comparação PDF Lognormal para a Rota ', rota});
title(titulo, 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');
hold off;
saveas(figure(2),['Desv_Larga_Escala_Rota ',rota], 'jpg');
%% Teste QUI quadrado
% -----
bins=0:(length(xout)-1); % Número de pontos para uso no teste <<<===
% -----
% PDF Gaussiana *****
p_gauss_qui=(1/(desvio_padrao*sqrt(2*pi)))...
.*exp(-((xout-media).^2))...
./(2*desvio_padrao^2));
% Teste Qui-quadrado PDF Gaussiana
[h_gauss,prob_gauss,st_gauss] = chi2gof(bins,'ctrs',bins,...
'frequency',n_pdf,'expected',p_gauss_qui,'emin',0,'nparams',2);
st_gauss_df=st_gauss.df;
qui_teste_gauss=st_gauss.chi2stat; % Estatística Q-quad, O menor valor indica o melhor
ajuste
x_qui_teste_gauss = chi2inv(prob_gauss,st_gauss.df); % O MAIOR valor indica o melhor
ajuste
save('Qui_teste_gauss_Rotal.mat','qui_teste_gauss');
%qui_gauss(rt)=qui_teste_gauss;
%x_qui_gauss(rt)=x_qui_teste_gauss;

%% Desenha gráfico da Variação lenta já descontando a perda no percurso
figure(3)
plot(varia_lento);
zoom on,grid on;
xlabel('Setores', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
ylabel('Nível de sinal [dBm]', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
titulo=(['Variação de grande escala no domínio do tempo para a Rota ', rota]);
title(titulo, 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');
saveas(figure(3),['Variacao_Lenta_dt_Rota ',rota], 'jpg');

%% Desenha gráfico do Nível de sinal em dBm
figure(4)
plot(Prx);
zoom on,grid on;
xlabel('Setores', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
ylabel('Nível de sinal [dBm]', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold')
titulo=(['Média movente por setor no domínio do tempo Rota ', rota]);
title(titulo, 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');
saveas(figure(4),['Media_Movente_Rota ',rota], 'jpg');

```

## B - Data Sheet

### B.1 - Amplificador de Baixo Ruído

Coaxial

# Low Noise Amplifier

## ZEL-0812LN

50Ω 800 to 1200 MHz

#### Features

- very low noise figure, 1.5 dB max.
- wideband, 800 to 1200 MHz
- rugged, shielded case

#### Applications

- UHF
- cellular
- PCS/GSM



Case Style: EEE132

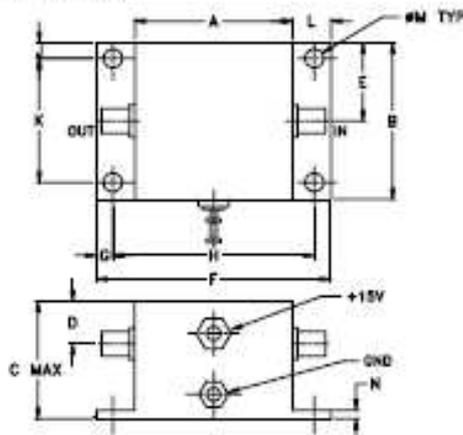
Connectors	Model	Price	Qty.
SMA	ZEL-0812LN	\$274.05 ea.	(1-9)

#### Electrical Specifications

Parameter	Frequency (MHz)	Min.	Typ.	Max.	Units
Frequency Range		800		1200	MHz
Noise Figure	800-1200	—	—	1.5	dB
Gain	800-1200	20	—	—	dB
Gain Flatness	800-1200	—	—	±1.0	dB
Output Power at 1dB compression	800-1200	—	+8	—	dBm
Output third order intercept point	800-1200	—	+16	—	dBm
Input VSWR	800-1200	—	—	2.5	:1
Output VSWR	800-1200	—	—	2.5	:1
DC Supply Voltage		—	15	—	V
Supply Current		—	—	70	mA

Noise Figure specified at room temperature, increases to 2 dB typical at +85°C  
 Open load is not recommended, potentially can cause damage.  
 With no load derive max input power by 20 dB.

#### Outline Drawing



#### Maximum Ratings

Parameter	Rating
Operating Temperature	-54°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	17V
Input RF Power (no damage)	+13 dBm

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

#### Outline Dimensions (inches)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	wt
.90	.90	.675	.245	.45	1.34	.09	1.152	.09	.712	.22	.106	.05	grams
22.86	22.86	17.15	6.22	11.43	34.04	2.29	29.26	2.29	18.08	5.69	2.69	1.27	50.0



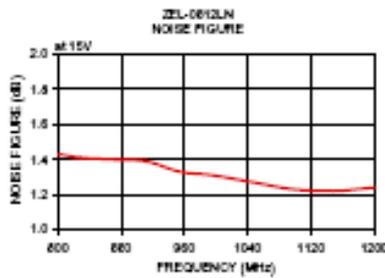
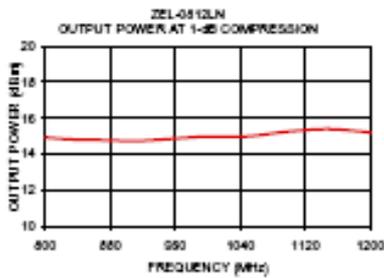
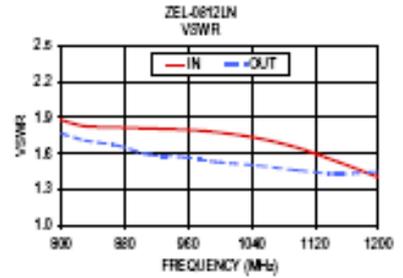
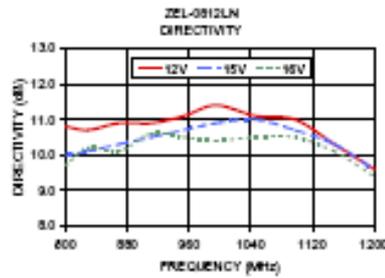
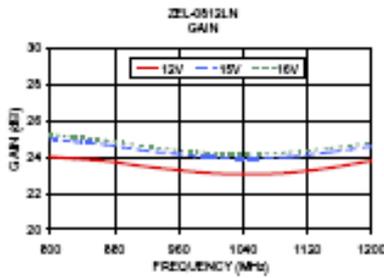
For detailed performance specs & shipping info see web site

P.O. Box 350458, Gardiner, New York 11925-0458 (716) 934-4528 Fax (716) 933-4621 The Gauge Progress Search Engine Provides ACTUAL Data Instantly at [minicircuits.com](http://minicircuits.com)

Notes: 1. Performance and quality software and conditions not expressly stated in this specification shall be intended to be exclusive and to conform a part of this specification sheet. 2. Selection specifications and performance data contained herein are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement methodologies. 3. The parts covered by this specification sheet are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (posted at: "Standard Terms"). Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and conditions of sale and related thereto, please refer to Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp).

REV. 08  
 16/08/06  
 ZEL-0812LN  
 10/1/08  
 Page 1 of 2

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (:1)		NOISE FIGURE (dB)	P <sub>OUT</sub> at 1 dB COMP <sub>R</sub> . (dBm)	
	12V	15V	16V	12V	15V	16V	IN	OUT		15V	15V
800.00	24.02	25.00	25.24	10.80	10.00	9.70	1.85	1.77	1.43	14.93	
829.00	23.91	24.86	25.11	10.70	10.10	10.20	1.83	1.71	1.41	14.82	
859.20	23.78	24.69	24.92	10.60	10.30	10.10	1.82	1.67	1.40	14.78	
911.50	23.52	24.40	24.54	10.50	10.50	10.60	1.81	1.59	1.39	14.73	
953.80	23.31	24.19	24.41	11.10	10.70	10.50	1.80	1.57	1.33	14.65	
994.90	23.13	24.01	24.24	11.40	10.90	10.40	1.78	1.53	1.31	14.57	
1046.20	23.05	23.93	24.15	11.10	11.00	10.50	1.73	1.50	1.27	14.58	
1097.40	23.14	24.02	24.27	11.00	10.70	10.50	1.65	1.46	1.23	15.25	
1148.70	23.41	24.28	24.50	10.30	10.30	10.10	1.53	1.43	1.22	15.39	
1200.00	23.81	24.61	24.80	9.60	9.60	9.40	1.40	1.45	1.24	15.20	



ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED

P.O. Box 35046, Brooklyn, New York 11235-0263 (718) 694-4500 Fax (718) 312-4501 The Center for Design Search Engine [www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com) Provide ACTUAL Data Instantly at [minicircuits.com](http://minicircuits.com)

Notes: 1. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification sheet are intended to be excluded and do not form a part of this specification sheet. 2. Electrical specifications and performance data contained herein are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions. 3. The parts covered by this specification sheet are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please refer to Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MINIWEBTerms.jsp](http://www.minicircuits.com/MINIWEBTerms.jsp).

For detailed performance specs & shopping online see web site