

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Marcos César Rafael

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
INTELIGENTE PARA ALINHAMENTO DE UMA ANTENA
PARABÓLICA RECEPTORA**

Taubaté - SP
2011

Marcos César Rafael

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
INTELIGENTE PARA ALINHAMENTO DE UMA ANTENA
PARABÓLICA RECEPTORA**

Dissertação apresentada para obtenção
do Certificado de Título de Mestre
pelo Curso de Engenharia Mecânica
do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de Taubaté,
Área de Concentração: Automação
Orientador: Prof. Dr. João Bosco
Gonçalves
Co-Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo
Leite do Prado

**Taubaté - SP
2011**

Rafael, Marcos César.

Projeto e desenvolvimento de um sistema Inteligente para alinhamento de uma Antena Parabólica Receptora. / Marcos César Rafael. – Taubaté: UNITAU, 2011.

133f. :il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté

Departamento de Engenharia Mecânica. 2011

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Gonçalves, Departamento de Engenharia Elétrica

1. Automação. 2. Lógica *Fuzzy*. 3. Antena Parabólica. 4. Controle. I. Título

MARCOS CÉSAR RAFAEL

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE PARA
ALINHAMENTO DE UMA ANTENA PARABÓLICA RECEPTORA**

Dissertação apresentada para obtenção
do Certificado de Título de Mestre
pelo Curso de Engenharia Mecânica
do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de Taubaté,
Área de Concentração: Automação

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Bosco Gonçalves

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Pedro Paulo Leite do Prado

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo

Universidade Estadual Paulista

Assinatura: _____

Dedico este trabalho a minha família
e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao amado Deus que me inspirou na força e motivação para vencer as dificuldades e os desafios da vida nos dando o Espírito Santo como inspiração Divina.

À minha amada esposa que sempre ao meu lado me acompanha nos maiores momentos de minha vida, meu amor e a minha filha que me trouxe muita alegria com seu dom da vida.

Ao professor João Bosco Gonçalves com sua disponibilidade e paciência me incentivando na execução deste trabalho. Ao meu co-orientador, Prof. Pedro Paulo Leite do Prado por todas as suas contribuições.

Aos meus pais pelo dom da vida.

Aos meus amigos que sonharam comigo vencer mais uma etapa da minha vida.

Agradecer a Canção Nova que deu esta oportunidade de agregar valores aos meus conhecimentos.

Ao Sr. Wellington Silva Jardim pelo seu incentivo em acreditar neste trabalho e pelo investimento empregado. Deus o abençoe.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é projetar e desenvolver um sistema automatizado inteligente para o alinhamento de uma antena receptora com refletor parabólico aplicado a comunicação via satélite. Com base em procedimentos empíricos para o alinhamento manual de uma antena parabólica, foi concebida e desenvolvida uma solução tecnológica empregando *hardware* e *software*. O sistema concebido utiliza um GPS, para prover a localização espacial instantânea da antena receptora e um receptor digital, que fornece a relação portadora / ruído de recepção. A principal contribuição deste trabalho foi o projeto e desenvolvimento de um sistema computacional inteligente, denominado Sistema Inteligente de Alinhamento de Satélite que visa a automatizar o alinhamento de antena receptora. Para um determinado satélite, o sistema utiliza a informação sobre a qualidade do sinal recebido para acionar um servomecanismo responsável pelo alinhamento da antena. Verificou-se que quando a antena estiver na posição desejada, a relação portadora ruído deverá estar acima de 8 dB para uma boa qualidade de recepção. Foi desenvolvido um projeto de um sistema inteligente para uma varredura em torno do valor de referência de posição da antena, o qual se denominou “ajuste fino da posição da antena”. Nossa inédita abordagem para o ajuste fino projetou-se um controlador *fuzzy* do tipo Mandani, cujas regras foram geradas de acordo com o processo de posicionamento manual da antena parabólica. Nossa solução permitiu melhorar a relação portadora / ruído de recepção.

Palavras chave: alinhamento de antena, sistemas inteligentes, lógica *fuzzy*, antena parabólica, servomecanismo.

ABSTRACT

The objective of this work is to design and develop an intelligent automated system for the alignment of a receiving antenna with parabolic reflector applied to satellite communication. Based on empirical procedures manual for the manual alignment of a parabolic antenna, we designed and developed a technological solution using hardware and software. The system uses a GPS to provide the initial spatial location of the receiving antenna and a digital receiver to provide the carrier-to-noise ratio. The main contribution of this work was the design and development of an intelligent computational system which aims at automating the receiving antenna alignment. For a given satellite, through the dynamic handling of relocate the receiving antenna, the system uses information about the quality of the received signal to drive the servo responsible for aligning the antenna. We found that, the antenna is in the desired position, the carrier-to-noise ratio should be above 8 dB for a good reception quality. We developed the project of an intelligent system to scan around the reference antenna position value, which was called “the antenna position fine tuning”. Our new approach consisted in a fuzzy controller type Mandani, generated according to the manual process of maneuvering the dish. Our solution has improved the carrier-to-noise ratio by repositioning the antenna in the desired position

Keywords: antenna of alignment, intelligent systems, fuzzy logic, parabolic antenna, servomechanism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tráfego de informações de um enlace via satélite.....	22
Figura 2 - Menu de status do receptor de satélite.....	38
Figura 3 - Tipos de antena com Refletor Parabólico.....	39
Figura 4 – Antena Parabólica Convencional e suas Distribuições de campo eletromagnético	40
Figura 5 - Disposição canais oferecidos pelos satélites de comunicação.....	41
Figura 6 - Diagrama de irradiação de uma antena com refletor parabólico.....	44
Figura 7 - Temperatura equivalente de ruído da antena em função do ângulo de elevação.....	48
Figura 8 - Analisador de espectro.....	51
Figura 9 - Cabo coaxial RGC11.....	51
Figura 10 - Bússola.....	52
Figura 11 - Inclinômetro.....	52
Figura 12 - Movimentação dos ângulos de elevação e azimute.....	54
Figura 13 - Ausência de portadoras capturadas pelo analisador de espectro.....	54
Figura 14 - Portadoras capturadas pelo analisador de espectro.....	55
Figura 15 - Diagrama básico do sistema de alinhamento manual.....	59
Figura 16 - Diagrama do sistema de alinhamento automático.....	60
Figura 17 - Modelagem do banco de dados.....	62
Figura 18 - Modelagem das comunicações externas.....	63
Figura 19 - Modelagem do sub-bloco das coordenadas da antena.....	64
Figura 20 - Modelagem do sub-bloco alinhamento fino.....	65
Figura 21 - Diagrama do sistema de alinhamento.....	66
Figura 22 – Diagrama do alinhamento fino.....	67
Figura 23 – Modelagem da lógica fuzzy.....	68
Figura 24 – Diagrama de implementação geral.....	70
Figura 25 – Diagrama de execução de software.....	72
Figura 26 – Diagrama de implementação do banco de dados em MySQL.....	73
Figura 27 – Diagrama de implementação da comunicação do sistema com o GPS e o receptor.....	74
Figura 28 – Diagrama de implementação da lógica fuzzy.....	75
Figura 29 – Equipamentos para o alinhamento automático.....	76

Figura 30 - Programa do sistema de alinhamento.	77
Figura 31 - Inicialização do sistema.....	78
Figura 32 - Busca do satélite.....	79
Figura 33 - Finalizando o sistema.	79
Figura 34 - Monitoração do sistema.....	80
Figura 35 - GPS do sistema.....	80
Figura 36 - Cálculo do Alinhamento do sistema.....	81
Figura 37 - Banco de dados do sistema.....	81
Figura 38 - Configuração dos dados de recepção do satélite.....	82
Figura 39 - Diagnóstico dos segmentos do processo de alinhamento.	82
Figura 40 – Função de pertinência da primeira entrada.....	84
Figura 41 – Função de pertinência da segunda entrada.....	86
Figura 42 – Função de pertinência da saída.....	86
Figura 43 - Toolbox Fuzzy do Matlab®.....	91
Figura 44 - Função de pertinência da primeira entrada.....	92
Figura 45 - Função de pertinência da segunda entrada.....	92
Figura 46 - Função de saída.....	93
Figura 47 - Regras de dados.....	93
Figura 48 - Toolbox Fuzzy do Matlab®: Resultados.....	94
Figuras do Anexo I	
Figura I 1. Curva de desempenho da demodulação <i>FM</i>	104
Figura I 2. Forma de onda de um sinal modulado em <i>BPSK</i>	105
Figura I 3. Diagrama de constelação da modulação <i>BPSK</i>	106
Figura I 4. Diagrama de constelação da modulação <i>QPSK</i>	106
Figura I 5. Diagrama de constelação da modulação <i>8PSK</i>	107
Figura I 6. Diagrama de constelação da modulação <i>16QAM</i>	108
Figura I 7. Probabilidade de erro de símbolo em função da relação (<i>E_b/N₀</i>).	109
Figuras do Anexo II	
Figura II 1. Amplificador ideal.....	110
Figura II 2. Associação de amplificadores.	112
Figura II 3. Associação híbrida de amplificadores e atenuadores.	113
Figura II 4. Estação básica de recepção de sinais via satélite.....	115
Figuras do Anexo III	

Figura III 1. Geometria do link, para análise da perda por alinhamento.....	118
Figura III 2. (a) kH em função da frequência; (b) kV em função da frequência.....	122
Figura III 3 (a) αH em função da frequência; (b) αV em função da frequência.	123
Figura III 4. Representação esquemática do enlace entre a estação terrena e a estação orbital.	124
Figura III 5. Altura efetiva da chuva, com relação ao nível do mar em função da taxa pluviométrica.....	125
Figura III 6. Fator de atenuação γR em função da frequência.	127
Figura III 7. Fator de atenuação γR em função da taxa pluviométrica.	128
Figura III 8. (a) Estação utilizada para transmissão; (b) estação para transmissão e recepção.	129
Figura III 9. (a) Estação utilizada para recepção; (b) estação para recepção e transmissão...	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Empresas e modelos de equipamentos para o rastreamento via satélite.....	24
Tabela 2. Faixas de frequência utilizadas pelo receptor.....	36
Tabela 3. Alimentação de tensão do LNB.....	36
Tabela 4. Tipos de oscilador local.....	37
Tabela 5. Tecnologia e modulação.....	37
Tabela 6. Especificações elétricas da antena de 3,7 m de diâmetro da Andrew.....	49
Tabela 7. Matriz de regras do método fuzzy.....	89
Tabela 8. Resultados do experimento #1.....	95
Tabela 9. Primeira tentativa do experimento#1.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 10. Segunda tentativa do experimento#1.....	96
Tabela 11. Terceira tentativa do experimento#1.....	97
Tabela 12. Quarta tentativa do experimento#1.....	97
Tabela 13. Primeira tentativa do segundo experimento.....	98
Tabela do Anexo I	
Tabela I 1. Valores da constante C_{pe}	103
Tabelas do Anexo III	
Tabela III 1. Comportamento da ionosfera ao longo do espectro.....	119
Tabela III 2. Coeficientes empregados nas equações (III.9) e (III.10) para a polarização horizontal.....	122
Tabela III 3. Coeficientes empregados nas equações (III.9) e (III.10) para a polarização vertical.....	122

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{A-RX}	Atenuação de desalinhamento na antena de recepção.
A_{A-TX}	Atenuação de desalinhamento na antena de transmissão.
A_e	Atenuação em espaço livre.
$A_{EFETIVA}$	Área efetiva da antena parabólica.
A_{POL}	Atenuação por erro de polarização da onda eletromagnética ao trafegar pela ionosfera.
$A_{0,01}$	Predição de atenuação excedida para 0,01% na média anual da taxa pluviométrica.
\hat{a}_θ	Vetor unitário ortogonal na coordenada azimute.
\hat{a}_ϕ	Vetor unitário ortogonal na coordenada elevação.
b	Taxa de transmissão em bps.
$\frac{C}{N}$	Relação portadora/ruído.
D	Diâmetro do refletor parabólico principal.
$D(\theta_0, \phi_0)$	Diretividade para um determinado ângulo sólido.
\vec{E}	Vetor campo elétrico.
E_0	Intensidade do campo na origem do sistema.
E_θ	Amplitude da componente do campo elétrico na coordenada azimute.
E_ϕ	Amplitude da componente do campo elétrico na coordenada elevação.
E_b/N_0	Fator de mérito da utilização da potência dos sistemas digitais
f	Distância entre o alimentador e o foco do refletor principal da antena.
$G(\theta)_{dB}$	Ganho de uma antena parabólica na direção θ .

$\frac{G}{T}$	Fator de mérito de uma estação de recepção.
h_R	Altura da chuva.
h_S	Altura da estação terrena.
K	Eficiência de radiação.
k_H	Coefficientes numéricos para determinação do fator de atenuação, para polarização horizontal
k_V	Coefficientes numéricos para determinação do fator de atenuação, para polarização vertical
L_e	Comprimento efetivo percorrido pela onda dentro da condição de chuva.
N_0	Potência do ruído.
P	Intensidade de potência que alimenta o elemento radiante.
P_{TX}	Potência de transmissão.
P_{RX}	Potência de recepção.
R	Taxa de transmissão da rede em bps.
$R_{0,01}$	Taxa pluviométrica da estação para 0,01% na média anual.
r	Distância radial.
$\frac{S}{N}$	Relação sinal/ruído.
T_A	Temperatura equivalente de ruído da antena.
$T_b(\theta, \phi)$	Temperatura de brilho de radiação do corpo localizado na direção (θ, ϕ) em que a antena oferece ganho $G(\theta, \phi)$.
α	Defasagem no tempo entre as componentes ortogonais.
α	Coefficientes numéricos para determinação do fator de atenuação.
β	Eficiência global de um refletor parabólico.
γ	Eficiência de abertura.

γ_R	Fator de atenuação por chuva.
η_a	Eficiência do alimentador.
λ	Comprimento de onda central da antena.
θ_{3dB}	Abertura de feixe de uma antena com refletor parabólico.
τ	Tempo de transmissão do pacote.
ω	Frequência angular do sinal elétrico.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AGC	<i>Automatic Gain Control.</i>
AMT	<i>Acts Mobile Terminal.</i>
API	<i>Application Program Interface.</i>
ASI	<i>Actuator Sensor Interface.</i>
BER	Taxa de erro de bit, do inglês <i>Bit Error Rate.</i>
DER	Diagrama entidade relacionamento.
DBS	<i>Digital Broadcast Satellite.</i>
DVB-S	<i>Digital Video Broadcasting - Satellite.</i>
dB	Decibels.
dBi	Ganho em decibel tendo como referência a antena isotrópica, de 0 dB .
FEC	Correção de erro para a frente, do inglês <i>Forward Error Correction.</i>
EIA	<i>Electronic Industries Alliance.</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i>
FI	Frequência intermediária em sistemas de rádio, <i>Intermediary Frequency.</i>
FM	Frequência modulada, do inglês <i>Frequency Modulation.</i>
FSK	Chavemaento por desvio de frequência, do inglês <i>Frequency Shift Keying.</i>
GEO	Sigla utilizada para representar satélite de órbita geoestacionária.
GPS	<i>Global Positioning System.</i>
G/T	Fator de mérito (ganho da antena receptora / temperatura efetiva de ruído no sistema de recepção).
HPA	Amplificador de alta potência, do inglês <i>High Power Amplifier.</i>
IEEE	Instituto de engenharia elétrica e eletrônica, do inglês <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers.</i>

IA	Inteligência artificial.
IP	Protocolo de rede para descobrir e manter a informação de topologia de rede e encaminhar os pacotes através da rede, do inglês <i>Internet Protocol</i> .
ISDB-S	Padrão japonês para transmissão de vídeo digital via satélite, do inglês <i>integrated service digital broadcasting - satellite</i> .
JAVA	Linguagem de programação orientada a objeto que são compiladas para código nativo e para um <i>bytecode</i> que é executado por uma máquina virtual.
LNA	Amplificador de baixo ruído, do inglês <i>Low Noise Amplifier</i> .
LNB	Bloco de amplificação de baixo ruído, combinado com conversor de frequência, do inglês <i>low noise block</i> .
LNBF	LNB construído de forma conjugada ao alimentador das antenas.
MCPC	Múltiplos canais por portadora, do inglês <i>Multiple Channel Per Carrier</i> .
MPEG-2	Padrão para compressão de vídeo, do inglês <i>motion Picture Expert Group</i> .
MYSQL	Sistema de gerenciamento de banco de dados que utiliza a linguagem SQL (linguagem de consulta estruturada, do inglês <i>Structured Query Language</i>) como interface.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> .
NMEA	<i>North American Maritime Electronic Association</i> .
PI	Proporcional Integral.
PID	Proporcional, Integral Derivativo.
PSK	Chaveamento por desvio de fase, do inglês <i>Phase Shift Keying</i> .
QAM	Modulação de amplitude em quadratura, do inglês <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> .
QPSK	Chaveamento por desvio de fase em quadratura, do inglês <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> .
RF	Radio frequência.
SIASAT	Sistema Inteligente de Alinhamento para Satélite.
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados.

SNMP	<i>Simple Network Management Protocol.</i>
STE	<i>System Test Engineer.</i>
VSWR	Relação de onda estacionária, medida com valores de tensão; do inglês <i>Voltage Standing Wave Ratio.</i>
UML	Linguagem de modelo unificada, do inglês <i>Unified Modeling Language.</i>
USB	Tipo de conexão de periféricos que permite a comunicação de elementos externos ao computador, do inglês <i>Universal Serial Bus.</i>

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	
RESUMOS.....	
ABSTRACT.....	
LISTA DE FIGURAS.....	
LISTA DE TABELAS.....	
LISTA DE SÍMBOLOS.....	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	
SUMÁRIO.....	
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	21
1.1 Aspectos Gerais de um Alinhamento Manual	22
1.2 Revisão Bibliográfica	23
1.3 Objetivo do Trabalho e Principais Características	32
1.4 Composição da Dissertação.....	33
CAPÍTULO 2 - SISTEMA FÍSICO EMPREGADO	35
2.1 Receptor Profissional Digital	35
2.1.1 Configuração do Receptor Digital.....	35
2.2 Antena com Refletor Parabólico	38
2.2.1 Tipos de Antena com Refletor Parabólico	39
2.2.2 Parâmetros Elétricos da Antena	40
2.3 Analisador de Espectro.....	50
2.4 Cabo Coaxial RGC11	51
2.5 Bússola e Inclinaçãometro	52
CAPÍTULO 3 – ALINHAMENTO MANUAL	53
3.1 Cálculos dos Valores dos Ângulos para Alinhamento	56
3.1.1 Cálculo do valor do Ângulo de Azimute da antena (A).....	56
3.2.2 Cálculo do valor do Ângulo de Elevação (E).....	57
CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO SISTEMA	58
4.1. Concepção do Sistema.....	58
4.1.1. Modelagem do Sistema	60

4.1.2. Modelagem do Sub-bloco Bando de Dados	61
4.1.3. Modelagem dos Sub-blocos Recepção e Sensores.....	62
4.1.4. Modelagem do Sub-Bloco Coordenadas da Antena.....	64
4.1.5. Modelagem do Sub-bloco Alinhamento Fino	65
4.1.6. Modelagem do Sub-Bloco Interface com o Usuário e Controle	66
4.1.6. Modelagem do Sub-Bloco Lógica do Alinhamento Fino.....	67
CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	69
5.1 Implementação do Modelo Conceitual.....	69
5.2 Arquitetura Física Proposta	75
5.3 Implementação da Interface Gráfica.....	77
5.4 Implementação da Interface Comunicação Externa com Java	83
5.6 Implementação da Lógica Fuzzy.....	84
CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROJETO	91
6.1 Simulação do Sistema de Alinhamento Fino.....	91
6.2 Resultados Experimentais	94
6.2.1 Experimento 1	95
6.2.2 Experimento 2	98
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO.....	99
7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXO I	Desempenho das
Modulações mais Empregadas em	Enlaces via Satélite em
Condição Geoestacionária	102
ANEXO II	Temperatura
Equivalente de Ruído, Figura de Ruído e	Fator de Mérito
para Estações de Recepção <i>G/T</i>	110
ANEXO III	Atenuações
nos Enlaces via Satélite	116
ANEXO IV	Configuração
da lógica fuzzy implementada em Java®	utilizando a API Fuzzyf.jar
.....	131

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Os sistemas de telecomunicações têm cada vez mais um importante papel na vida moderna, devido à enorme quantidade de informações geradas em diferentes locais. Para exemplificar, informações transitam entre estabelecimentos bancários e comerciais através de sistemas de telecomunicações espalhados pelo mundo; programas de rádio e televisão são transmitidos para centenas de milhões de pessoas em todos os continentes, difundindo notícias, cultura e lazer; sinais oriundos de espaçonaves em regiões distantes do sistema solar chegam à Terra trazendo informações que resultam em novas descobertas científicas, através das telecomunicações via satélite.

Em Junho de 1998 mais de 140.000 canais estavam em operação através do sistema INTELSAT de satélites. As vantagens dos sistemas de satélite, em particular, devem-se à simplicidade e a flexibilidade da infra-estrutura necessária. Pode-se prever que o futuro das comunicações por satélite vai depender cada vez mais do uso eficaz de suas características específicas:

- Capacidade de acesso múltiplo, de conectividade ponto-a-ponto, ponto-a-multiponto ou multiponto-multiponto;
- Capacidade de distribuição;
- Flexibilidade para mudanças no tráfego, na arquitetura de rede, na operação e colocação em serviço.

Atualmente, os sistemas de satélite representam mais de cem bilhões de dólares de investimentos (ROBERT, 1998) criando um ingrediente essencial para muitas empresas e governos em todo o mundo.

Os satélites domésticos têm melhorado muito a qualidade do serviço do sistema de telefonia pública, adaptando-se à evolução de informação multimídia e comunicação pessoal.

1.1 Aspectos Gerais de um Alinhamento Manual

Um enlace de comunicações via satélite em posição orbital geoestacionária conta com vários fatores de degradação relacionados ao meio de transmissão, aos equipamentos utilizados em suas estações terrenas e ao próprio satélite, que funciona como elemento de repetição.

Para que o sistema consiga oferecer desempenhos satisfatórios nos mais diferentes tipos de aplicação e serviço, é de grande importância que as estações de transmissão e recepção sejam devidamente dimensionadas, para que possam atender, às especificações da comunicação via satélite.

Como qualquer outro tipo de comunicação via rádio, o sistema de comunicação via satélite poderá oferecer tráfego de informação em um ou em ambos os sentidos, dependendo do tipo de aplicação oferecida, conforme ilustra a Figura 1.

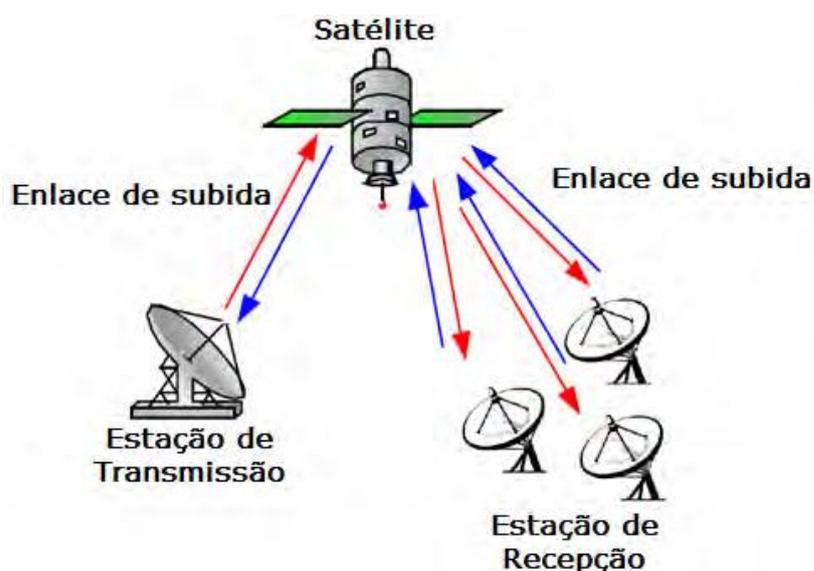


Figura 1 - Tráfego de informações de um enlace via satélite

Fonte: (MARTINS, 2004)

Como a distância dos enlaces via satélite é muito grande, faz-se necessário o uso de potências elevadas, para que seja possível operar com taxas de erro menores do que as máximas exigidas. Por esta razão as modulações empregadas em satélite são as mais robustas, ou melhor, operam com os menores valores de relação de ganho de recepção da antena ($E_b/N_0 = \epsilon$; E_b : energia do sinal de um bit [J]; N_0 : densidade de ruído [J]; ϵ : adimensional) (ROSSY, 2001).

As antenas da estação terrena e do satélite podem sofrer desalinhamentos na posição uma vez que o satélite está sujeito a pequenas variações orbitais.

Um enlace via satélite apresenta atenuações no sinal de recepção que são causadas pela propagação em espaço livre, condições de radiação, desalinhamento da antena, polarização, chuva, perda em componentes empregados, tais como, conectores, cabos, flanges de conexão, guias de onda e outros.

Apesar de efeitos aleatórios do ambiente de propagação ou de falhas de equipamento, um alinhamento adequado da antena contribui para melhorar a recepção do sinal do satélite.

O alinhamento da antena parabólica normalmente é realizado de forma manual, consumindo-se bastante tempo nesse processo. Em campo, para um alinhamento manual leva-se em torno de 40 a 50 min. para o ajuste da antena

1.2 Revisão Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica baseou-se em duas fontes principais: resultados de trabalhos científicos e manuais de equipamentos comerciais. Foram consultados inicialmente os manuais técnicos dos equipamentos de empresas envolvidas no alinhamento automático de antena receptora e em seguida os resultados de pesquisa científica.

Algumas empresas desenvolveram equipamentos que permitem o rastreamento da antena receptora, com o objetivo de realizar o posicionamento automático.

Esses equipamentos utilizam controladores de posição, permitem gerar relatórios de possíveis falhas do sistema, podendo selecionar de 60 a 99 satélites, armazenados em um banco de dados. Algumas dessas propostas utilizam microprocessadores para o controle da antena e apresentam função de alarme com notificação para telefone ou via email, para um computador portátil (VERTEX, 2009). Outros modelos utilizam um sistema computacional que interage com o usuário através de uma interface gráfica, criando um ambiente amigável ao sistema com display de posição analógica e digital, comunicação via fibra óptica e utilização de memória flash (PROBECOM, 2008). Alguns modelos utilizam CPUs para garantir uma resposta mais rápida na aquisição e tratamento de dados, e utilizam interfaces redundantes e remotas facilmente suportadas através de uma interface padrão SNMP (*Simple Network Management Protocol*).

Esse padrão é utilizado para a aquisição de dados, simplificando a implantação de interfaces remotas ou redundantes para o monitoramento do sistema (ORBIT, 2010).

A tabela 1 ilustra as empresas e seus modelos de equipamentos para o rastreamento da antena via satélite.

Tabela 1. Empresas e modelos de equipamentos para o rastreamento via satélite

Empresa	Nacionalidade	Modelo
Viasat	Israel	8860
Probecom	China	AC-3000
CPI	Estados Unidos	P600ACU
Orbit	Israel	AL-4000
Antesky	China	DEV9110
ASCSignal	Estados Unidos	APC400
Antech	Italia	ASC0003D
Satcom Technologies	Estados Unidos	7134
Zodiac Data Systems	França	Comtrack
Vertex	Estados Unidos	133
Advantech	Estados Unidos	Intrac 305
Research	Estados Unidos	RC1500
SVS Telekom	Turquia	AKS200
ID & Associates	Austrália	TS2000

Em termos de resultados científicos, Hawkins et. al. (1988) desenvolveram um sistema de comunicação para o rastreamento de um satélite, com o objetivo de realizar o alinhamento de uma antena utilizando um servomecanismo. Empregaram ferramentas de IA (Inteligência Artificial), através da técnica “autotracking”, para ajustar o desempenho do sistema, através de “*beacon*” (feixe). O sistema realiza o movimento de “autotracking” da antena até encontrar a melhor posição para receber o maior feixe de sinal do “*beacon*”. A detecção do satélite através do sinal de “*beacon*” utiliza a técnica do rastreamento por monopulso, comparando a fase do sinal com sua amplitude. Essa técnica se baseia na detecção da frente de onda recebida e no processamento do sinal para se obter as informações do alinhamento. Os resultados obtidos superaram os problemas associados ao sistema de detecção. Os resultados foram apresentados pelos autores através de uma série de simulações por computador que mostram a convergência necessária nas correções de alinhamento e a sua dependência ao ruído de medição.

Arthur e Vahraz (1993) desenvolveram um sistema de rastreamento de satélite na banda K e Ka através de uma antena veicular móvel. Esse sistema é um projeto chamado AMT (*Acts Mobile Terminal*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). O sistema consiste de uma antena refletora controlada por um servomecanismo para rastrear o satélite. Um sinal de tom piloto é enviado pelo satélite da NASA para a antena informando a localização do satélite. A antena é movida suavemente de um lado para o outro através de ângulos de 1°. Enquanto é medido o sinal de tom piloto monitorado pela antena, o computador controlador da antena determina se a antena foi alinhada na direção correta observando o sinal de intensidade mais forte. O desenvolvimento desta tecnologia é um dos principais objetivos do projeto AMT. Os benefícios de se utilizar a banda K e Ka incluem uma disposição da largura de banda maior, maior ganho da antena e redução substancial do tamanho da antena em comparação com as bandas de frequências mais baixas. Esses benefícios superaram as

desvantagens de maiores perdas dos componentes de RF, atenuação por chuva e a necessidade de uma avaliação na localização do satélite. Os resultados dos testes foram apresentados em gráficos, comprovando a eficiência do sistema. O sistema foi desenvolvido com sucesso e os testes de laboratório mostraram o acompanhamento do desempenho da antena ao rastrear o satélite.

Ali e Brush (1994) desenvolveram e implementaram um controlador digital através do monitoramento de uma antena com o objetivo de rastrear um satélite e receber seus dados através da estação terrestre da Universidade de Dundee. O acompanhamento do rastreamento do satélite foi realizado pelo controle de um sistema computacional dedicado baseado no sistema STE (*System Test Engineer*). O software do sistema STE foi desenvolvido no PC (computador pessoal) usando uma interface para realizar pacotes de emulação, fazendo com que o controlador do rastreamento fosse conectado através do padrão serial RS232 aos codificadores de eixo alocados a cada um dos dois eixos para medir a posição da antena em relação à posição em cada eixo. Codificadores de eixo de diferentes resoluções foram usados para o controle da posição da antena. Neste sistema é utilizado um algoritmo de controle PID (Proporcional, Integral Derivativo) para determinar a posição absoluta da antena e verificar o posicionamento da antena no eixo de azimute, utilizando a técnica chamada *tracking sun*. Essa técnica consiste no cálculo da posição do sol para um tempo específico. Em seguida a antena é posicionada para acompanhar o sol. Quando a antena está alinhada com o sol, a leitura do ruído do receptor aumenta substancialmente. A antena é movimentada até atingir o máximo ruído. O objetivo do controlador de rastreamento da antena foi alcançado com sucesso, executando a complexa tarefa de localizar o satélite de órbita polar.

Kenji (1994) desenvolveu um sistema para o alinhamento de antena para satélite, utilizando um controlador para melhorar o desempenho do alinhamento de satélite em órbita estacionária. O feixe do alinhamento era realizado com um valor de 0,015 graus. Utilizou-se

de um sistema de controle independente, baseado em sensores de frequência de rádio com mono-pulsos que mitigava o erro angular do alinhamento. A frequência do “*beacon*” do satélite era extraída a partir das faixas de frequência de comunicação, convertidas em sinais de erro de tensão no rastreamento dos receptores. Os sinais de erros eram processados pelo sistema de controle do alinhamento da antena, fazendo com que os drives mecânicos movimentassem os dois eixos da antena. Foi desenvolvido um algoritmo para calcular a direção preliminar do feixe a partir dos dados de monitoração AM durante o alinhamento mostrando a exatidão do sistema. Os resultados mostraram que o sistema de alinhamento da antena teve bom desempenho, com uma exatidão suficiente dada a existência prevista dos componentes de ruído.

Ali e Brush (1996) desenvolveram um algoritmo de controle para o rastreamento e monitoração do satélite na captação dos dados de recepção para estabelecer um alto grau de exatidão da verdadeira posição do satélite para o alinhamento da antena. O objetivo desse trabalho foi aplicar essa técnica, utilizada em instalações existentes, para melhorar a exatidão do rastreamento de satélites em órbita polar. O método utilizado baseava-se no acompanhando do desempenho em função do nível de sinal de recepção do satélite. Sucessivas posições na antena eram geradas a partir de um programa em execução em um PC que era usado para extrair as informações dos comandos de controle do satélite. Essas informações eram sobre a velocidade angular, o tempo de travessia equatorial e a altura do satélite obtidos pelo “*beacon*”. A partir dessas informações o PC, baseado em um programa dedicado, armazenava os dados que eram utilizados para calcular os valores de ângulos de azimute e elevação gerados a cada segundo da passagem do satélite. Os ângulos eram calculados com uma exatidão de 0,01 graus. O controlador de rastreio da antena consistia em um hardware e um software para controlar a antena através de um servomecanismo. O sistema de servomecanismo incluía dois codificadores de posição para medir a posição relativa da

antena. Nesse sistema, os autores utilizaram o algoritmo de controle PID, aplicado aos valores de erros da elevação e azimute. Esse sistema utilizava-se um drive de movimento controlado por um sistema de circuito em malha fechada. A vantagem desta técnica era calcular o caminho teórico do satélite independentemente de sua posição real. Para aperfeiçoar o desempenho do sistema, um método de pesquisa espacial fora adotado para melhorar o sinal de recepção, que utiliza uma busca geométrica regular conhecida como “*simplex regular*” para encontrar o melhor valor de monitoração. O controle de rastreamento da antena utilizando o método de pesquisa espacial aperfeiçoou o monitoramento e melhorou o sinal recebido pela recepção.

Kyeong, et. al. (2000) desenvolveram um algoritmo de rastreamento de uma antena em azimute para a recepção móvel DBS (*Digital Broadcast Satellite*). Realizaram o desenvolvimento de um sistema de alinhamento de antena para a localização do satélite usando o método de estabilização ativa na direção mecânica no plano azimutal. O método de estabilização consiste em um controle passivo pela inércia do volante e um controle ativo por condução em um veículo móvel após a detecção de movimento. A direção da antena é controlada mecanicamente apenas no plano azimutal, onde é necessário detectar a amplitude máxima do sinal. O projeto utiliza componentes de hardware no sistema de antena através do AGC (Automatic Gain Control). Através de um algoritmo de rastreamento, o sistema avalia a posição do satélite pela intensidade do sinal recebido. Um motor de passo é utilizado para a movimentação da antena. O algoritmo de rastreamento do sistema utiliza os valores do sinal obtido pelo AGC. Quando o sinal é recebido abaixo do nível limiar, devido ao movimento da antena, é realizada uma compensação para que se encontre o valor AGC máximo. Nesse trabalho foram apresentados resultados que demonstraram a eficiência do sistema.

Yutaka, et. al. (2000) desenvolveram um sistema de rastreamento através de uma antena refletora para comunicações móveis. Esse trabalho propunha um método de decisão

pelo coeficiente de excitação da antena de recepção. A direção do feixe do sinal era destinada para a direção da antena de transmissão. O sinal de radiofrequência irradiado pela antena de transmissão era recebido em cada elemento da antena de recepção. O desempenho do sistema era medido através da potência do sinal sintetizado, em que cada índice de desempenho era medido quando os coeficientes de excitação estavam definidos. Os testes foram realizados em uma câmara anecóica que abrigava o sistema de recepção e transmissão. Os resultados indicaram que o método de decisão desenvolvido podia adequadamente formar um feixe na direção desejada do refletor da antena com a capacidade de compensar as reduções do sinal causadas pelo desalinhamento entre o alimentador da antena e o refletor (processo de erro mecânico).

Chris (2003) desenvolveu um projeto para o rastreamento de uma antena com comunicação via satélite para lidar com a baixa exatidão do sensor e ambiente marítimo altamente ruidoso de uma embarcação. O sistema utiliza um GPS (Sistema de Posicionamento Global) para determinar as orientações de sua localização, instrumentos de sensoriamento inercial para deduzir os ângulos de referencia do nivelamento do navio. O autor projetou um controlador independente para cada sistema de servo motor (controlador para alinhamento na elevação e outro para azimute), embora essa abordagem não leve em consideração a não-linearidade explícita no acoplamento dinâmico da antena. Várias simulações foram realizadas pelo autor para confirmar o algoritmo, demonstrando que as simulações no rastreamento da antena corrigiam os erros sujeitos ao movimento do navio pelo mar. Com este controlador a antena era capaz de se movimentar, acompanhando o satélite, em 0,5 graus em menos de um segundo. O controlador PID levou três vezes mais tempo do que o controlador fuzzy, com menor exatidão. O sistema de controle no rastreamento de antena via satélite a bordo de um navio está sujeito à baixa exatidão dos sensores. O controlador fuzzy foi o que melhor lidou com as incertezas da natureza e a não-linearidade do problema.

Jongwon, Kyeumrae e Cheolsson (2005) desenvolveram um sistema de controle de alinhamento de antena utilizado em uma comunicação móvel, como navios e aeronaves. A antena foi montada especialmente em um veículo em movimento. O sistema necessita estar em regime estacionário. Através de hardware e software, o sistema realiza o processamento de sinais pela detecção de movimento pelos sensores. Projetou-se um controlador fuzzy para controlar e monitorar o movimento da antena através dos sensores de detecção de movimento. O desempenho do sistema de controle dependia principalmente do controle do servo mecanismo na condução da antena. O sistema de servomecanismo estava sujeito a distúrbios de torque significativo, devido às pressões de vento e rajadas sobre as estruturas da antena. Para resolver esse problema foi necessário projetar um sistema de controle integrado em tempo real, para a geração mais precisa do sinal de referência para se ter um desempenho mais robusto. Um controlador fuzzy foi projetado para os dois eixos de estabilização do rastreamento da antena e o desempenho foi verificado por meio de simulações e experimentos. O controlador PID convencional e o controlador fuzzy projetados foram comparados através dos ganhos de controle. O desempenho do controlador fuzzy foi verificado através das simulações computacionais em Matlab® e Simulink®. O controlador fuzzy utilizado apresentou desempenho superior ao controlador convencional PID, satisfazendo o uso desse sistema.

Jongkwon (2006) desenvolveu um método para controlar uma antena montada em um veículo. Projetou-se um controlador fuzzy para controlar a antena de rastreo. O método foi desenvolvido a partir de um algoritmo baseado em regras difusas de rastreamento. Com a estabilização do algoritmo de rastreamento, o controlador PID fuzzy foi determinado. O desempenho do método foi verificado através de simulações com o Matlab® e Simulink®. Os dados obtidos foram comparados com o controlador PID convencional. Os resultados deste

trabalho indicaram que o controlador PID nebuloso tinha desempenho melhor que o controlador PID convencional.

Jium-Ming e Po-Kuang (2008) desenvolveram um projeto para o monitoramento de uma antena móvel para a comunicação via satélite, tanto com os métodos tradicionais como com os de controle fuzzy. Realizaram um projeto adaptativo para os controladores tradicionais e/ou controladores fuzzy para o sistema de rastreamento de antena a fim de melhorar o ganho do sistema. Um modelo simplificado foi aplicado para as análises do sistema de controle da antena para obter os parâmetros de monitoramento da antena e a estabilização. A estabilização foi obtida a partir de compensadores de comparação PI (Proporcional Integral). Esse trabalho propôs uma lei adaptativa utilizando um controlador fuzzy a fim de reduzir o efeito da variação dos parâmetros de monitoramento. Os resultados de desempenho da antena foram analisados por simulação. O resultado da simulação demonstrou o bom desempenho de ganho do laço de rastreamento do sistema.

Xian (2009) desenvolveu um sistema de controle para alinhamento aerotransportado (balão cativo não tripulado), foi realizada uma análise do sistema para resolver o problema da robustez, estabilidade e exatidão do controle de rastreamento na incerteza dos parâmetros obtidos. O sistema de controle consistia em realizar a orientação do sistema, a rejeição dos distúrbios, controlar as atividades de movimento, servo-motor e os ângulos do codificador. Utilizando quatro quadrantes fotodetectores foi possível controlar a antena a partir do sinal de infravermelho. O sistema de rastreamento funcionava de maneira estável e robusta, com exatidão. Os resultados obtidos na simulação indicaram uma alta exatidão e robustez, mesmo com a interferência eletromagnética.

Soltani, Roozbeh e Rafael (2010) desenvolveram um sistema de controle confiável para o rastreamento de uma antena montada em um navio para a comunicação via satélite. Nesse trabalho foi proposto um sistema de controle tolerante a falhas utilizando uma antena para

realizar a localização do satélite. O sistema robusto foi projetado para supervisionar e diagnosticar as falhas oriundas de distúrbios externos. Em comunicação marítima os movimentos do navio e a distância do satélite podem interferir na comunicação. O problema foi abordado através do desenvolvimento de um algoritmo de controle dedicado que recebe periodicamente os sinais do satélite. Um modelo de controlador não-linear foi sugerido para lidar com incertezas nos parâmetros. O sistema utiliza medidas de velocidade angular a partir de três giroscópios posicionados na base da antena. Os resultados obtidos mostraram que o sistema projetado reduziu o efeito das perturbações. O controlador interno garantiu a convergência para zero do erro de rastreamento. Concluiu-se que a proposta do sistema cumpriu as especificações desejadas.

Po-Kuang, Jium-Ming e Kun-Tai (2011) desenvolveram um controlador PID para o rastreamento de uma antena de celular via satélite. Para aumentar o desempenho desse sistema utilizou-se um controlador inteligente fuzzy. O rastreamento da antena e os circuitos de estabilização foram projetados de acordo com o método Ziegler-Nichols. Os resultados obtidos com um controlador PID fuzzy para o monitoramento de uma antena de comunicação móvel via satélite demonstraram o bom desempenho do sistema.

1.3 Objetivo do Trabalho e Principais Características

Este trabalho tem por objetivo conceber, projetar e implementar um sistema de alinhamento automático para antenas de radiodifusão por comunicação via satélite. Neste trabalho, diferente dos demais, desenvolveu-se um procedimento que permite fornecer um sinal de referência para um servomecanismo para realizar o alinhamento da antena; cuidou-se, também, de desenvolver e implementar um sistema inteligente empregando-se a Lógica Fuzzy para um alinhamento fino da antena receptora; um receptor é utilizado para receber o sinal e decodificá-lo, o sistema realiza o alinhamento fino através da relação sinal ruído da recepção

e não pela intensidade dos sinal recebido e nem pelo “*Beacon*” (sistema de comunicação, manutenção e monitoramento do satélite), como nos demais trabalhos.

Desenvolveu-se um sistema inteligente e automatizado de alinhamento de uma antena com refletor parabólico aplicado a uma comunicação via satélite para resolver a problemática do deslocamento da antena em azimute. Esse problema é abordado de forma sistêmica através de um novo enfoque, gerando-se soluções computacionais. Nossa solução incorpora um banco de dados contendo informações sobre os satélites disponíveis para o Brasil, usados para a transmissão de radiodifusão. Após a escolha de um satélite, calcula-se a posição de referência para a antena, cuja movimentação é realizada por um servomecanismo. Oferece ainda ao usuário interfaces gráficas amigáveis que fornecem informações sobre o movimento da antena, a posição espacial da antena e a relação portadora / ruído de recepção. Monitora a qualidade de recepção através da relação C/N obtida pelo receptor de satélite e realiza o ajuste fino da posição da antena através de pequenos movimentos da antena em torno da largura de feixe.

1.4 Composição da Dissertação

Este trabalho está dividido em sete capítulos para abordar, de forma objetiva, a automação do sistema de alinhamento de uma antena com refletor parabólico. O Capítulo 2 aborda o sistema físico empregado, destacando todos os elementos envolvidos em um alinhamento manual de antena. No Capítulo 3 é explanado o procedimento do alinhamento manual e o cálculo dos valores angulares para o posicionamento da antena. O Capítulo 4 aborda a modelagem do sistema proposto, do banco de dados, dos dispositivos externos e do controlador *fuzzy* para o ajuste fino da antena. No Capítulo 5 é abordado a implementação do sistema, da interface gráfica e da comunicação Java. O Capítulo 6 apresenta a validação do

experimento e os principais resultados e sugere novas linhas de trabalho nesta área de pesquisa. O capítulo 7 apresenta a conclusão do trabalho.

No Anexo I são apresentadas os desempenhos das modulações mais empregadas em enlaces via satélite e o seu desempenho. O Anexo II apresenta-se os cálculos de temperatura equivalente de ruído, figura de ruído, fator de mérito (G/T - ganho equivalente/temperatura equivalente).

No Anexo III é apresentada a base teórica para as perdas provocadas na propagação, com destaque para a atenuação por chuva que foi abordada segundo as especificações da União Internacional de Telecomunicações, bem como as perdas nos componentes passivos e linhas de transmissão. O Anexo IV apresenta a configuração da Lógica Fuzzy implementada em Java utilizando a API Fuzzi.jar, utilizada na realização do alinhamento fino descrito no capítulo 4.

CAPÍTULO 2 - SISTEMA FÍSICO EMPREGADO

Neste capítulo são apresentados os elementos que foram utilizados no sistema de telecomunicações para aquisição de um sinal de radiodifusão via satélite.

- Receptor profissional digital;
- Antena com refletor parabólico;
- Analisador de espectro;
- Cabo coaxial;
- Bússola e inclinômetro (utilizados para o alinhamento manual).

2.1 Receptor Profissional Digital

Pela experiência obtida no Departamento de Engenharia de Radiodifusão da TV Canção Nova, escolheu-se o receptor digital IRD-2900 da empresa Scopus por apresentar melhores resultados na recepção.

O receptor e decodificador integrado IRD-2900 apresenta uma plataforma de processamento de sinais que oferece diversas aplicações de fácil uso, tais como, processamento digital de vídeo e áudio, comunicação via IP, feixe de transporte, transporte via ASI (*Actuator Sensor Interface*) e suporte de gerenciamento baseado na Web.

2.1.1 Configuração do Receptor Digital

Os principais parâmetros de configuração do receptor digital são: faixa de frequência, frequência de operação, taxa de sinalização, taxa de FEC (Forward Error Correction), modulação, polarização, etc.

- Faixas de frequência

As faixas de frequência de operação estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Faixas de frequência utilizadas pelo receptor

Banda	Frequência Mínima	Frequência Máxima
Banda - Ku	10.700 MHz	12.750 MHz
Banda - C	3.200 MHz	4.200 MHz
Banda - L	0.950 MHz	2.150 GHz

- Taxa de símbolos

A taxa de símbolos (*Symbol Rate*) varia entre 1 a 45 Mbaud.

- Taxa de FEC

A taxa de FEC (*Forward Error Correction*) deve ser ajustado de acordo com a taxa do sinal transmitido. Geralmente esse parâmetro pode ser configurado automaticamente.

- Polarização

A fonte de alimentação do LNB (*Low Noise Block*) indica o tipo de polarização de recepção da antena, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Alimentação de tensão do LNB

Voltagem do LNB	Polarização
13 V	Vertical
18 V	Horizontal
OFF	-

- Osciladores locais

Os tipos de osciladores locais dependem da faixa de frequência de operação conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Tipos de oscilador local

Oscilador local	Faixa de frequência
Universal	9.750 a 10.600 MHz
Wide Band	9.750 a 10.750 MHz
Banda Ku	ajustado manualmente
Banda C	ajustado manualmente
DiSeqc	9.750 a 10.750 MHz

- Tecnologias e modulação

Cada tecnologia utiliza um tipo de modulação dependendo da sua aplicabilidade, conforme ilustra a Tabela 5.

O desempenho destas modulações está abordado no anexo I.

Tabela 5. Tecnologia e modulação

Tecnologia	Modulação
DVBS - N	QPSK 8PSK
DSNG	8PSK 16QAM
DVBS2 - N	8PSK 16APSK
DVBS2 - S	QPSK 8PSK 16APSK

A Figura 2 ilustra as informações de configuração do receptor através do menu de status.

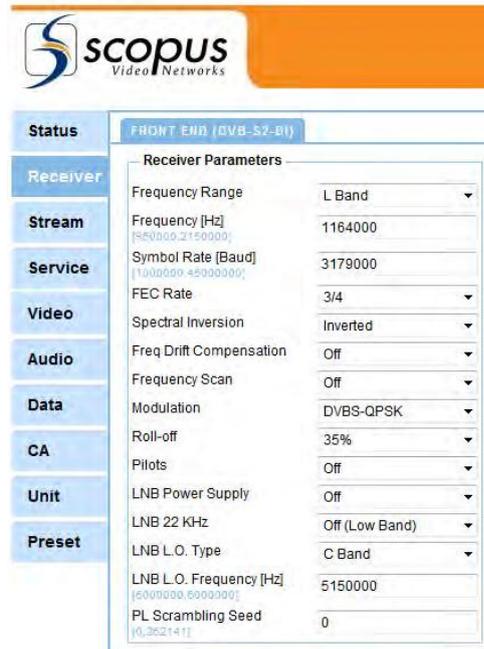


Figura 2 - Menu de status do receptor de satélite

2.2 Antena com Refletor Parabólico

Antena é um dispositivo cuja função é transformar energia eletromagnética, guiada pela linha de transmissão, em energia eletromagnética irradiada e vice-versa.

Por sua natureza, deduz-se que a antena ocupa sempre o último lugar na cadeia de transmissão e o primeiro lugar na cadeia de recepção, daí a importância de seu estudo e entendimento para as telecomunicações.

No projeto de antenas são abordados os princípios matemáticos, físicos e práticos da teoria eletromagnética.

Quanto maior a frequência utilizada nas antenas, maior deve ser a exatidão dos dispositivos, equipamentos e medições.

2.2.1 Tipos de Antena com Refletor Parabólico

Existem 4 tipos de antenas com refletor parabólico *Focalpoint*, *Offset*, *Cassegrain* e Gregoriana, conforme mostra a Figura 3.

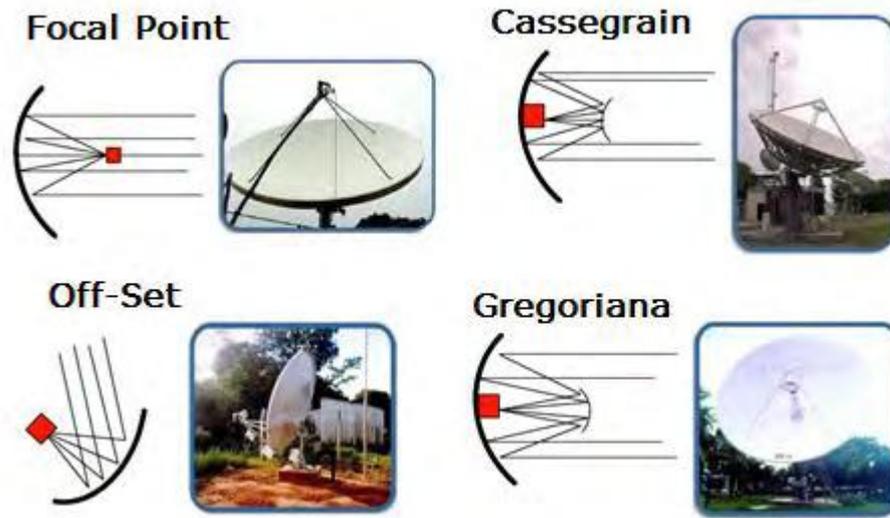


Figura 3 - Tipos de antena com Refletor Parabólico

Fonte: (BALANIS, 1997)

O funcionamento de uma antena refletora baseia-se na conversão de uma distribuição de energia, usualmente esférica e produzida por algum tipo de irradiador posicionado no foco primário da antena, numa distribuição planar na sua abertura, por meio de sucessivas reflexões ocorridas nas superfícies constituintes do sistema, de acordo com os princípios da Óptica Geométrica (BALANIS, 1997).

Com isso, torna-se possível a obtenção de uma antena capaz de alcançar um desempenho superior a muitos outros modelos, através de dispositivos mecânicos e eletrônicos não muito complexos. Os níveis de eficiência atingidos com o uso de modelos adequados tornam as antenas com refletor aptas à recepção e transmissão de sinais em enlaces de longa distância, como no caso de comunicação via-satélite.

Basicamente, um sistema refletor pode ser descrito como a composição de um elemento irradiador (ou captador de energia eletromagnética), um conjunto de superfícies refletoras metálicas e a própria estrutura de sustentação do sistema. A presença dessas superfícies refletoras permite a colimação de energia, desde o elemento irradiador até a abertura da antena, quando esta opera como transmissora (BALANIS, 1997).

As antenas mais comuns utilizadas na maioria dos sistemas de recepção são as parabólicas convencionais e simétricas, mostrada pela Figura 4.

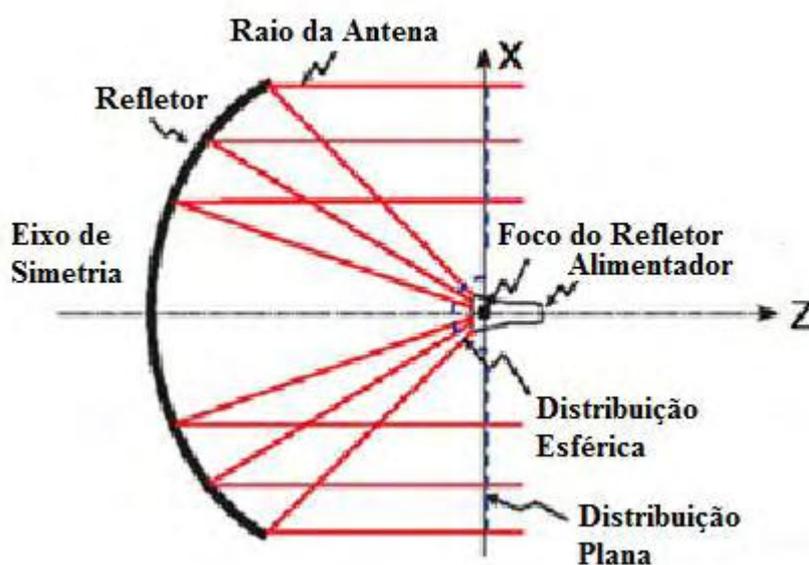


Figura 4 – Antena Parabólica Convencional e suas Distribuições de campo eletromagnético

Fonte: (MARTINS, 2004)

2.2.2 Parâmetros Elétricos da Antena

2.2.2.1 Polarização

A polarização da antena é a orientação com que se apresenta o campo elétrico da onda irradiada. A polarização da antena é determinada na direção de máxima irradiação ou na direção do chamado lóbulo principal.

Como o campo elétrico da onda é composto por componentes ortogonais, pode ser representado pela Eq. (1).

$$\vec{E} = E_{\theta} \cos \omega t \cdot \hat{a}_{\theta} + E_{\phi} \cos(\omega t + \alpha) \cdot \hat{a}_{\phi} \quad (1)$$

Onde: \vec{E} é o vetor campo elétrico, \hat{a}_{θ} (em azimute) e \hat{a}_{ϕ} (elevação) são os vetores unitários e ortogonais;

E_{θ} (em azimute) e E_{ϕ} (em elevação) são amplitudes dos componentes do campo no domínio da frequência;

α é a defasagem no tempo entre estas duas componentes.

Analisando a Eq.(1), verifica-se que a polarização é linear, se $\alpha = 0$ ou $\alpha = \pi$. No entanto, se $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ou $\alpha = \frac{3\pi}{2}$ a polarização é circular com sentido de giro anti-horário e horário, respectivamente. As condições intermediárias geram a polarização elíptica, com sentido anti-horário para $\alpha < \pi$ e sentido horário para $\alpha > \pi$ (ESTEVEES, 1980).

Esta característica permite que, em comunicação via satélite, exista a reutilização da frequência, ou seja, a utilização de dois sinais de mesma frequência, mas operando com polarizações opostas em uma mesma antena tanto para transmissão como para recepção. Com isso, uma mesma banda pode ter sua quantidade de canais duplicada. A Figura 5 apresenta a disposição típica de canais para satélites.

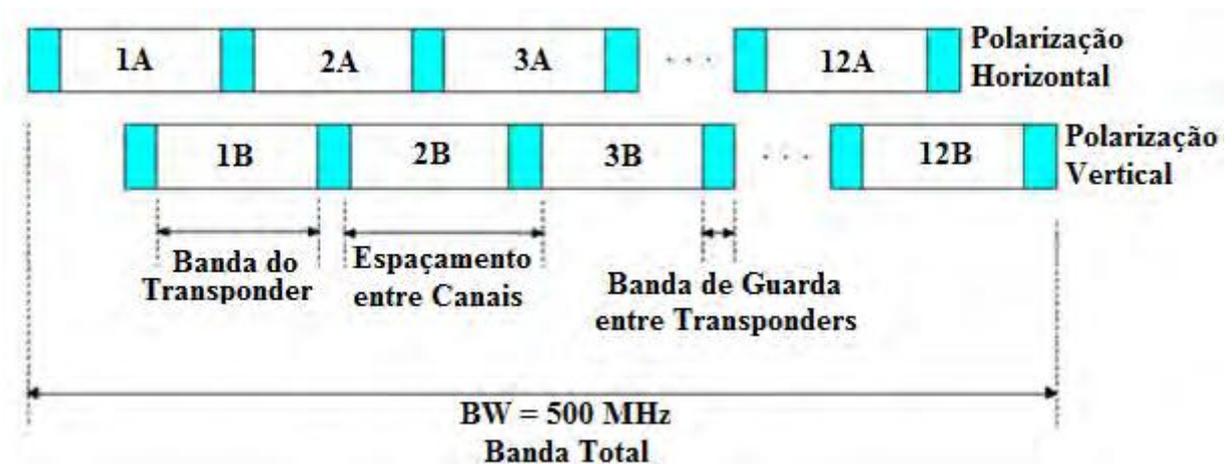


Figura 5 - Canais oferecidos pelos satélites de comunicação

Fonte: (MARTINS, 2004)

A discriminação de polarização é a diferença de nível entre o sinal recebido com polarização definida pela onda e o sinal recebido com a polarização ortogonal à da onda.

Teoricamente, esta relação deve atender a valor infinito, mas, na prática, o seu valor é mensurável e deve atingir grandezas que poderão variar entre 30 dB e 45 dB.

Nos enlaces via satélite, recomenda-se que a discriminação entre polarizações seja superior à relação C/N (portadora/ruído) nominal do enlace, para que os canais de uma polarização não interfiram na outra.

Quando a onda eletromagnética se propaga na atmosfera, ocorre uma alteração na posição espacial do vetor campo elétrico, fazendo com que a sua polarização se altere.

Para solucionar esse problema, os primeiros satélites foram concebidos com polarizações circulares, para que esta condição externa não afetasse o desempenho do sistema.

Com a experiência adquirida ao longo dos anos, percebeu-se que a rotação de fase é praticamente constante ao longo do tempo, podendo sofrer pequenas alterações de uma região para outra, mas mantendo-se praticamente inalterada para uma dada região (NUNES, 1986).

Por esse motivo, atualmente, os novos satélites operam com polarização linear, pois a polarização circular oferece como desvantagem a perda de, aproximadamente, 6 dB no processo de recepção do sinal (ROSSY, 2001).

Essa atenuação ocorre pela utilização de polarizadores construídos com materiais anisotrópicos, que convertem as polarizações circulares à direita e à esquerda em polarizações lineares na vertical e horizontal, respectivamente (KEYONG, 2000).

2.2.2.2 Diagrama de Irradiação

A intensidade do sinal irradiado pelas antenas em cada direção varia de acordo com a estrutura física das mesmas. Na maioria dos casos, os projetos de antenas ou de redes de antenas são realizados para que um determinado diagrama de irradiação seja atendido.

De forma generalizada, a intensidade do campo medido varia em função da distância e da concepção do protótipo, o que permite o uso da Eq. (2)

$$|\vec{E}| = \frac{E_0}{r} f(\theta, \phi) \quad (2)$$

Onde: E_0 é a intensidade do campo na origem do sistema;

r é a distância radial, do ponto onde está sendo realizada a medida para origem;

$f(\theta, \phi)$ estabelece a função de irradiação do protótipo singular.

Neste modelo de representação do campo elétrico, conclui-se que, para uma determinada esfera de raio r , a forma da distribuição do campo sobre a esfera será dada pelo fator $f(\theta, \phi)$ que descreve o diagrama de irradiação.

Respeitando-se a condição de campo distante, pode-se afirmar que a forma do diagrama de irradiação será sempre a mesma, independentemente da distância utilizada para se fazer à medição. Por esse motivo, trabalha-se de forma normalizada para que o máximo valor radiado seja representado por 1 e os demais valores oferecidos de forma proporcional em escala linear ou logarítmica (KRAUS, 1983).

O diagrama de irradiação pode ser representado na forma tridimensional ou por plano vertical e horizontal com uso de coordenadas retangulares ou polares.

A Figura 6 mostra o diagrama de irradiação de uma antena com refletor parabólico, em notação retangular e polar (ESTEVEZ, 1980).

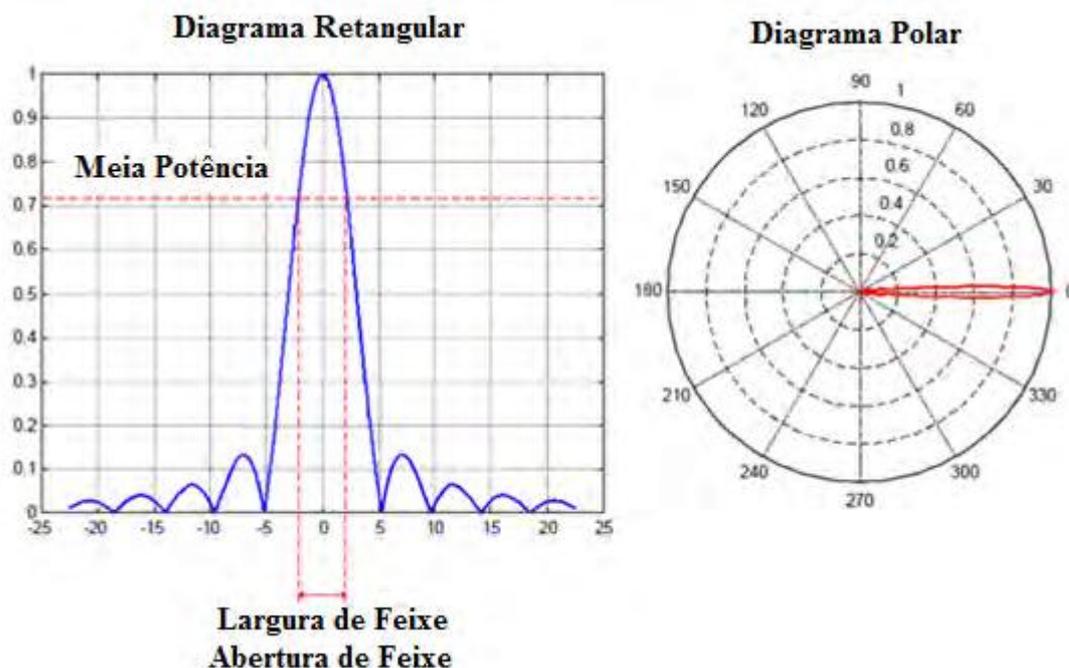


Figura 6 - Diagrama de irradiação de uma antena com refletor parabólico

Fonte: (ESTEVES, 1980)

No diagrama de irradiação da figura pode-se verificar a presença dos lóbulos laterais. A abertura de feixe é definida como sendo a distância em graus entre os pontos de meia potência, tomando como referência o valor irradiado na direção de máximo.

2.2.2.3 Diretividade e Ganho

A diretividade de uma antena é a sua capacidade de concentrar o sinal em uma determinada direção, segundo um ângulo sólido limitado. Quanto menor este ângulo, maior é a diretividade (ESTEVES, 1980).

Devido à reciprocidade oferecida pelas antenas, a diretividade também pode ser definida como sendo a maior capacidade de recepção do sinal em uma determinada direção.

Analicamente, a diretividade pode ser traduzida como a razão entre a densidade de potência em uma determinada direção da antena, sob estudo, pela densidade de potência da antena de referência que, na maior parte dos casos, é a antena isotrópica.

$$D(\theta_0, \phi_0) = (S_{\theta_0, \phi_0}) \cdot \left(\frac{P}{4\pi r^2} \right) \quad (3)$$

Onde $D(\theta_0, \phi_0)$ é a diretividade para um determinado ângulo sólido;

$S(\theta_0, \phi_0)$ é a densidade de potência na direção (θ_0, ϕ_0) ;

$\frac{P}{4\pi r^2}$ é a densidade de potência a uma distância r de uma antena isotrópica.

Quando as antenas são diretivas o cálculo da diretividade pode ser aproximado, levando-se em consideração o ângulo sólido obtido pela região contemplada entre os pontos de queda de 3dB (abertura de feixe) nos planos ortogonais θ e ϕ .

Em condições reais, nem toda potência que alimenta a antena é realmente irradiada. Portanto, criou-se o conceito de ganho de potência, em que são consideradas as perdas, através da sua eficiência, como mostra a Eq.(5).

Para as antenas com refletor parabólico a diretividade e o ganho podem ser calculados em função da frequência de operação e do diâmetro do refletor principal, como apresentado nas Eq.(4) e Eq.(5) (KRAUS, 1983).

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

$$G = \eta \cdot D \quad \therefore G = \eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

Onde η é a eficiência global, dada por $\eta = K \cdot \gamma$;

D densidade de potência;

K a eficiência de irradiação;

γ a eficiência de abertura;

d é o diâmetro do refletor principal.

Na recepção do sinal trabalha-se com o conceito de área efetiva, que também pode ser utilizada para cálculo de diretividade e ganho e vice-versa. A área efetiva para antenas com refletores parabólicos pode ser obtida através da Eq. (6).

$$A_{EFETIVA} = \gamma \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (6)$$

Onde γ a eficiência de abertura;

d é o diâmetro do refletor principal.

No dimensionamento de enlaces via satélite é importante saber a variação de ganho em direções distintas daquela de valor máximo, pois através desse dado é possível calcular as perdas por alinhamento e as possíveis interferências.

Para cálculo da largura de feixe de 3 dB, são utilizadas as Eq.(7) e Eq.(8), para iluminações uniformes e não uniformes, respectivamente (MARAL e BOUSQUET, 2002).

Iluminação uniforme:

$$\theta_{3dB} = 58,5 \cdot \left(\frac{\lambda}{D}\right) \quad (7)$$

Iluminação não-uniforme:

$$\theta_{3dB} = 70 \cdot \left(\frac{\lambda}{D}\right) \quad (8)$$

O ganho de uma antena para uma dada direção θ , com relação ao ponto máximo, pode ser calculado em função da direção desejada θ , da abertura de feixe θ_{3dB} e do valor de ganho máximo G , conforme Eq.(9), que é válida somente para ângulos pequenos $\left(0 \leq \theta \leq \frac{\theta_{3dB}}{2}\right)$.

$$G(\theta)_{dB} = G - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2 \quad (9)$$

Onde: G é o valor do ganho;

θ é a abertura do feixe.

Pelas Eq.(5), Eq.(7) e Eq.(8) pode-se obter os resultados apresentados nas Eq. (10) e Eq.(11) para as antenas com iluminação uniforme e nas Eq.(12) e Eq.(13) para as antenas com iluminação não-uniforme.

$$G = \eta \left(\frac{58,5\pi}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (10)$$

$$\theta_{3dB} = 58,5\pi \sqrt{\frac{\eta}{G}} \quad (11)$$

$$G = \eta \left(\frac{70\pi}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (12)$$

$$\theta_{3dB} = 70\pi \sqrt{\frac{\eta}{G}} \quad (13)$$

2.2.2.4 Temperatura de Ruído

Em comunicações via satélite os níveis envolvidos na recepção de sinais são muito baixos, exigindo que a temperatura de ruído das antenas seja bem reduzida, para que um bom desempenho do sistema seja alcançado.

No caso das antenas com refletores parabólicos, a temperatura de ruído é afetada pelos lóbulos secundários do diagrama de irradiação e pelo ângulo de elevação da antena, com relação à superfície terrestre.

Outros fatores ligados ao ambiente em que está instalada a antena podem influenciar nesta grandeza. De forma generalizada, a temperatura da antena pode ser traduzida, matematicamente pela Eq.(14).

$$T_A = \left(\frac{1}{4\pi} \right) \iint T_b(\theta, \phi) G(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (14)$$

Onde: T_A é a temperatura equivalente da antena (kelvin);

$T_b(\theta, \phi)$ é a temperatura de brilho de radiação do corpo localizado na direção (θ, ϕ) em que a antena oferece ganho $G(\theta, \phi)$.

Em comunicação via satélite a influência do sol é mais intensa na ocorrência de eclipse solar.

Esses eventos são previstos e amplamente divulgados pelos operadores de satélite, pois geram grandes degenerações na qualidade de transmissão, em pequenos intervalos de tempo.

Na condição de eclipse solar a temperatura de ruído das antenas aumenta consideravelmente, pois o lóbulo principal fica alinhado com o satélite e o Sol, fazendo com que o nível de ruído supere aquele do sinal em vários momentos.

A temperatura equivalente de ruído, figuras de ruído e fator de mérito (G/T) para as estações de recepção estão abordadas no anexo II. Ilustrado na Figura 7.

$N = \text{Potência de ruído térmico} = KTB$.

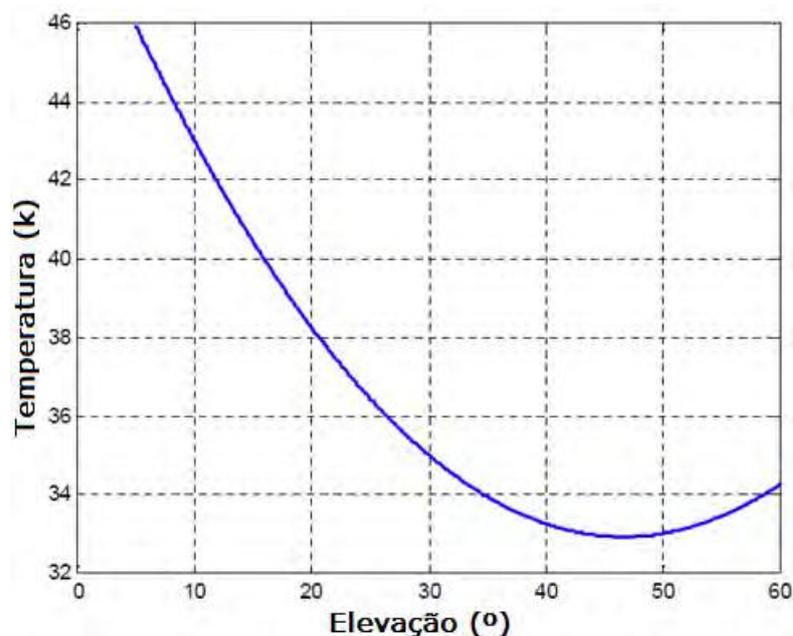


Figura 7 - Temperatura equivalente de ruído da antena em função do ângulo de elevação.

Fonte: (MARTINS, 2004)

2.2.2.5 Banda de Operação e Impedância

Para antenas utilizadas em comunicações via satélite a banda de operação pode ser influenciada pelo tipo de refletor e pelo alimentador. Quando o refletor parabólico é maciço e com baixa rugosidade, a banda pode ser alterada apenas com a mudança do alimentador. O mesmo não ocorre com os refletores construídos com tela.

Nesse caso, à medida que a frequência aumenta agravam-se os problemas com rugosidade e tamanho do furo de tela, não permitindo a mudança de uma banda mais baixa para outra mais alta, na maioria dos casos.

A impedância da antena é definida em função do iluminador e, normalmente, sua leitura é realizada através dos parâmetros VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), coeficiente de reflexão e da perda por retorno. A Tabela 6 apresenta os parâmetros mais importantes da antena de 3,7m de diâmetro com uso de dois refletores nas bandas C e Ku (MARTINS, 2004).

Tabela 6. Especificações elétricas da antena de 3,7 m de diâmetro da Andrew

			Recepção	Transmissão
Frequência de Operação	C		3,40 - 4,20 GHz	5,850 - 6,725 GHz
	Ku		10,70 - 13,25 GHz	13,75 - 14,80 GHz
Ganho			3,400 GHz - 41,0 dB	5,850 GHz - 45,9 dB
			3,625 GHz - 41,6 dB	6,175 GHz - 46,4 dB
			4,000 GHz - 42,7 dB	6,425 GHz - 46,6 dB
			4,200 GHz - 43,1 dB	6,725 GHz - 46,9 dB
			10,950 GHz - 50,8 dB	14,00 GHz - 52,7 dB
			11,950 GHz - 51,6 dB	14,25 GHz - 52,8 dB
			12,750 GHz - 52,1 dB	14,50 GHz - 53,0 dB
Largura de Feixe	3 dB	C	1,20°	0,80°
		Ku	0,65°	0,42°
	15 dB	C	2,0°	1,40°
		Ku	1,19°	1,09°
Temperatura de Ruído da Antena	10°	C	43 K	-
		Ku	52 K	-
	50°	C	52 K	-
		Ku	37 K	-

2.2.2.6 Elementos das Antenas Parabólicas Refletoras

Os elementos que compõem a antena refletora parabólica são:

- Refletor – Superfície que reflete e direciona todo o sinal recebido para o foco da antena (pétalas da antena);
- Corneta de alimentação (feed horn) corrugada – Possui dentro uma antena dipolo que recebe o sinal de RF.
- Polomotor (para sinais analógicos) – Motor de passo para mudança da orientação do guia de onda que determina a polarização horizontal ou vertical.
- Elemento amplificador (LNA, LNB, LNC) – Elemento para amplificar o sinal recebido e convertê-lo para uma frequência mais baixa (banda L).

Tipos de elementos amplificadores:

- LNA (*Low Noise Amplifier* - Amplificador de Baixo Ruído) – Amplifica o sinal na faixa de 3,7 a 4,2 GHz (banda C).
- LNB (*Low Noise Blockconverter* – Conversor de Baixo Ruído) – Amplifica o sinal recebido na faixa de 3,7 a 4,2 GHz (banda C) e o converte para a faixa de 950 MHz a 1450 MHz (banda L).
- LNC (*Low Noise Block Downconverter* – Conversor “abaixador” de Baixo Ruído) – Amplifica o sinal recebido e o converte para a frequência de 70 MHz (utilizado em recepção de dados via satélite).

2.3 Analisador de Espectro

Os analisadores de espectro são utilizados para mostrar o espectro de frequência dos sinais. Os analisadores de espectro digitais realizam a amostragem dos sinais e empregam os algoritmos de FFT (*Fast Fourier Transform*) para decompor o sinal nas suas componentes espectrais. São instrumentos indispensáveis no dia a dia do profissional das telecomunicações.

A análise de sinais através de um analisador de espectro envolve fatores, tais como, faixa dinâmica, exatidão e velocidade de apresentação. Há sempre um compromisso com esses fatores. A Figura 8 ilustra um analisador de espectro.

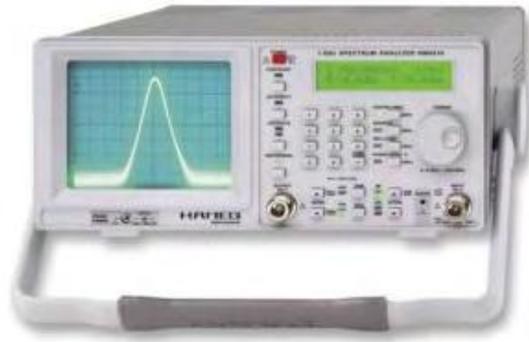


Figura 8 - Analisador de espectro

2.4 Cabo Coaxial RGC11

O cabo coaxial RGC11 (Figura 9) é um tipo de cabo condutor para transmitir sinais de radiofrequência, constituído por um condutor central de fios de cobre, uma camada isolante, uma blindagem de malha metálica e uma capa externa.

Permite a transmissão de frequências muito elevadas por longas distâncias. A blindagem o protege contra o fenómeno da interferência eletromagnética.

O cabo coaxial RGC11 é o mais indicado para melhor transmitir o sinal captado pela antena parabólica ao receptor com baixa perda com um alto grau de maleabilidade. Devido às suas características de baixa atenuação pode alcançar distâncias máximas de 450 a 600 m.

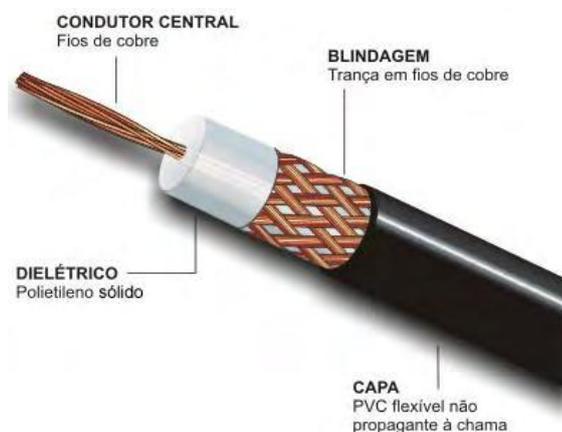


Figura 9 - Cabo coaxial RGC11

2.5 Bússola e Inclinômetro

Os equipamentos bússola e inclinômetro são muito utilizados no processo de alinhamento manual de antenas.

As bússolas são geralmente compostas por uma agulha magnetizada colocada num plano horizontal e suspensa pelo seu centro de gravidade.

Apontam sempre para o eixo norte-sul, na direção do norte magnético da Terra (Figura 10).



Figura 10 - Bússola

O inclinômetro, também conhecido como clinômetro, é um instrumento utilizado para medir ângulos de inclinação e elevação. Está mostrado na Figura 11.



Figura 11 - Inclinômetro

CAPÍTULO 3 – ALINHAMENTO MANUAL

Para iniciar um alinhamento manual a antena parabólica deve estar instalada e o receptor e o analisador de espectro devem estar conectados à antena através de um divisor de sinal utilizando o cabo coaxial RGC11. Deve-se, evidentemente, saber para qual satélite a antena deverá ser alinhada e para qual canal o receptor deverá decodificar o sinal correspondente. Sabendo-se da localização geográfica da antena e definido a localização espacial do satélite de interesse, os valores dos ângulos de elevação e de azimute para o posicionamento da antena podem ser calculados.

Em seguida, movimenta-se a antena de acordo com os valores de ângulos calculados, utilizando-se a orientação de uma bússola para o movimento de azimute e um inclinômetro para o ângulo de elevação (Figura 12). Em azimute, por exemplo, desloca-se a antena parabólica para a direita verificando no receptor se há um aumento ou a diminuição da intensidade do sinal obtido. Se o nível de intensidade do sinal estiver aumentando, continua-se o movimento da antena para a direita até atingir o máximo valor de ganho; caso contrário, movimenta-se a antena para a esquerda.

Esse procedimento é executado por repetidas vezes até encontrar o melhor ponto. Após o procedimento de movimentação da antena em azimute, executa-se um procedimento similar de posicionamento em elevação da antena. A Figura 12 ilustra a movimentação dos ângulos de elevação e azimute de uma antena.

Ângulo de Elevação da Antena Parabólica

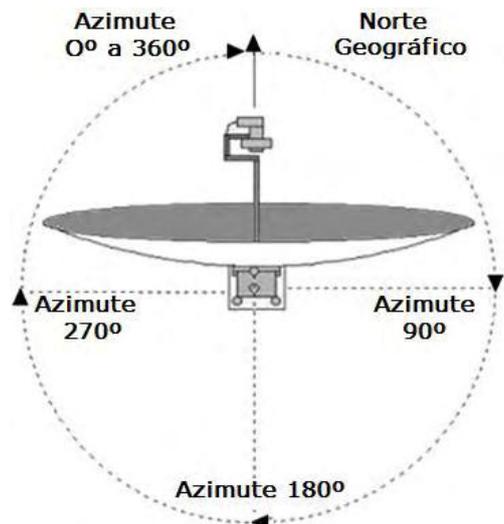
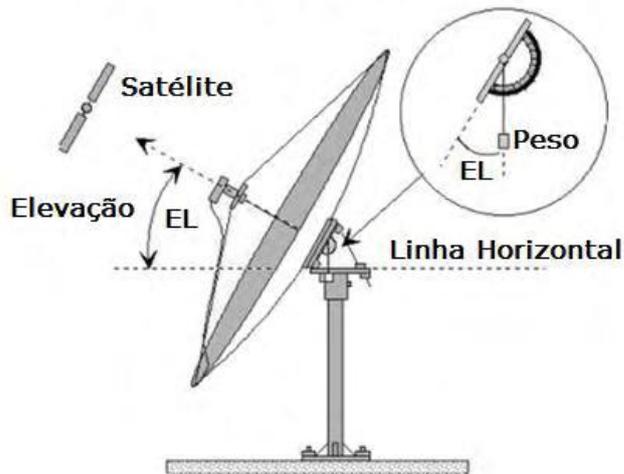


Figura 12 - Movimentação dos ângulos de elevação e azimute

Fonte: (ESTEVES, 1980)

Movimenta-se a antena e observa-se o sinal no analisador de espectro até que a portadora seja visualizada.

Na Figura 13 o sinal no analisador de espectro mostra a ausência das portadoras de satélite, indicando que a antena não foi ainda devidamente apontada.

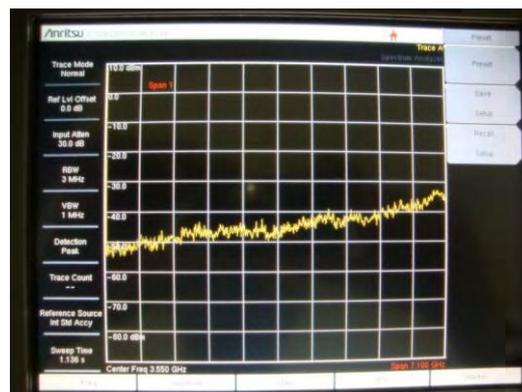


Figura 13 - Ausência de portadoras capturadas pelo analisador de espectro

A Figura 14 ilustra uma portadora de *broadcasting* capturada pelo analisador de espectro após a realização, com sucesso, do alinhamento manual.

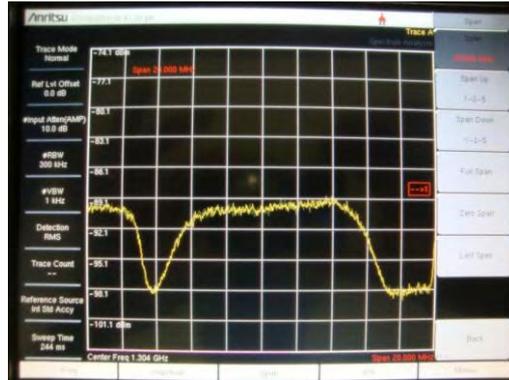


Figura 14 - Portadoras capturadas pelo analisador de espectro.

O sinal obtido pelo analisador de espectro pode não ser do satélite desejado, porque existem muitos satélites próximos uns dos outros, originando dúvida sobre o sinal encontrado. O sinal captado pela antena é enviado para o receptor de satélite, capaz de decodificar todos os canais de *broadcasting*. Cada canal é diferenciado pela sua frequência, taxa de símbolos, polarização e largura de banda.

O receptor de satélite deve ser configurado com os dados (frequência, taxa de símbolos, polarização e largura de banda) do canal do satélite escolhido para que se possa decodificá-lo. O receptor de satélite ao receber o sinal gera um valor de monitoração do nível da relação portadora/ruído (C/N).

Para identificar o satélite desejado, observa-se no receptor utilizado para decodificar o sinal recebido, o nível da relação portadora/ruído (C/N). Mesmo que a antena esteja na posição desejada, poderá ocorrer uma recepção de baixa qualidade. Neste caso, inicia-se um alinhamento fino, reposicionando a antena, em azimute e elevação.

O alinhamento fino é realizado de forma manual. Depende fortemente da experiência do especialista e é encerrado quando $C/N \geq 8 \text{ dB}$.

Em campo observam-se todas as atenuações e perdas que possam influenciar no desempenho do sinal de recepção (abordadas no Anexo III).

3.1 Cálculos dos Valores dos Ângulos para Alinhamento

Para se realizar o alinhamento manual é necessário conhecer o valor do ângulo de azimute, o valor do ângulo de elevação e a distância do satélite.

3.1.1 Cálculo do valor do Ângulo de Azimute da antena (A)

O ângulo de azimute pode ser definido como a distância angular medida sobre o horizonte, a partir de um ponto de origem, no sentido horário, até o círculo vertical que passa por um dado astro (MARAL e BOUSQUET, 2002).

Com as coordenadas geográficas do satélite e da estação terrena, pode-se determinar o ângulo de azimute da antena, denominado por A, conforme Eq. (15).

$$\hat{A} = \arctg (\tan(|\phi_S + \phi_T|)/\sin(\theta_T)) \quad (15)$$

Onde: θ_T latitude da estação terrena;

ϕ_T longitude da estação terrena;

ϕ_S longitude do satélite.

Para o hemisfério sul, com a estação terrena a oeste do satélite:

$$A = \hat{A} \quad (16)$$

Para o hemisfério sul, com a estação terrena a leste do satélite:

$$A = 360^\circ - \hat{A} \quad (17)$$

Para o hemisfério norte, com a estação terrena a oeste do satélite:

$$A = 180 - \hat{A} \quad (18)$$

Para o hemisfério norte, com a estação terrena a leste do satélite:

$$A = 180 + \hat{A} \quad (19)$$

3.2.2 Cálculo do valor do Ângulo de Elevação (E)

O ângulo de elevação, denominado por E, é o que existe no plano vertical entre o satélite e a antena da estação terrena. O valor é calculado por (HA, 1986):

$$E = \arctg\left\{ \frac{r - (R_E \cdot \cos \theta_T \cdot \cos |\phi_S - \phi_T|)}{R_E \cdot \sin[\arccos(\cos \theta_T \cdot \cos |\phi_S - \phi_T|)]} \right\} - \arccos(\cos \theta_T \cdot \cos |\phi_S + \phi_T|) \quad (20)$$

Onde:

$r = 42.164$ km - raio da órbita geoestacionária;

$R_E = 6378$ km - raio da terra.

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO SISTEMA

O objetivo deste capítulo é modelar o sistema que permite automatizar o alinhamento de uma antena parabólica.

Para a confecção da modelagem utiliza-se o método UML (*Unified Modeling Language*) é uma linguagem padrão para a elaboração da estrutura de projetos de software. (GRADY , 2005). Ela foi empregada para a visualização, a especificação e a construção das funções necessárias ao desenvolvimento e implantação da automação do sistema de alinhamento de antenas.

4.1. Concepção do Sistema

Para a automação do sistema de alinhamento de antenas, foram consideradas as seguintes atividades:

- Localizar a antena parabólica;
- Localizar o satélite;
- Realizar os cálculos dos ângulos de elevação e azimute;
- Realizar a movimentação da antena;
- Configurar o Receptor de satélite;
- Verificar a qualidade de recepção do sinal;
- Realizar o alinhamento fino, se necessário;
- Validar o processo de alinhamento da antena.

A Figura 15 ilustra as etapas propostas para a automação do sistema de alinhamento de antenas, através de dois sistemas: “Tarefa do Sistema” e “Agentes Externos”.

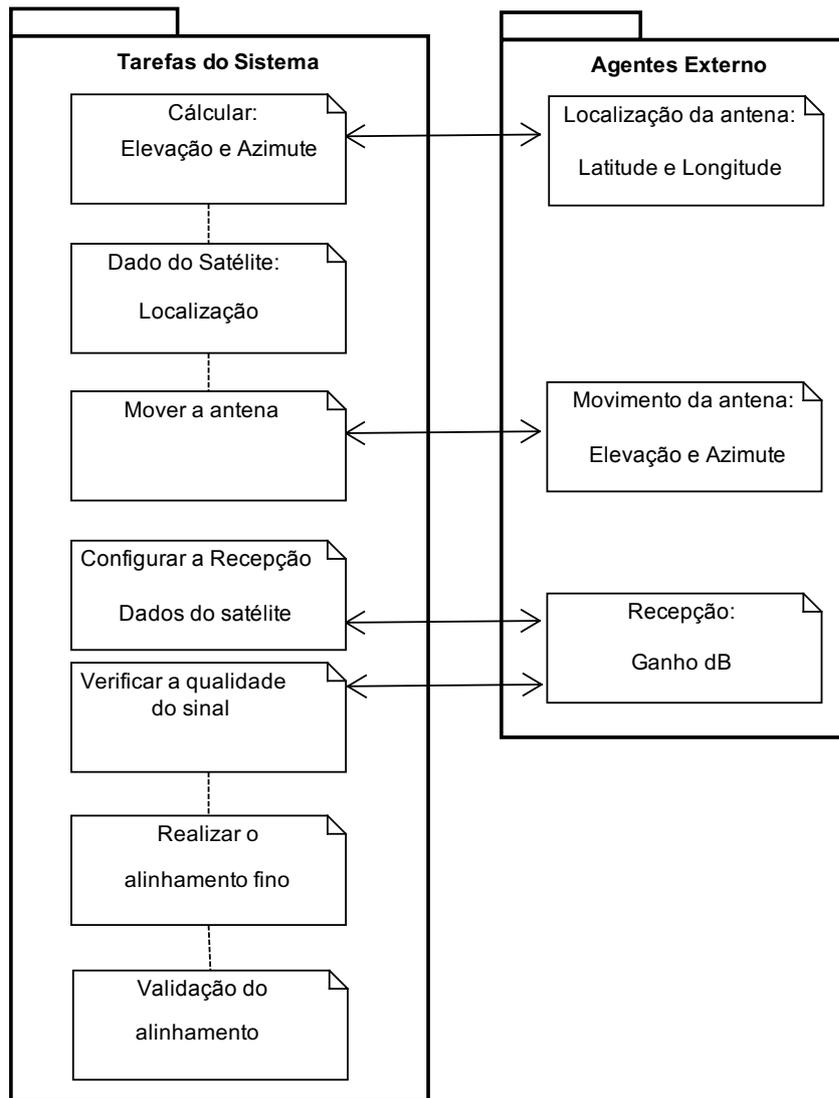


Figura 15 - Diagrama básico do sistema de alinhamento manual

O bloco Tarefas do Sistema deverá realizar o cálculo dos ângulos de elevação e azimute através das variáveis obtidas pelo Dado do Satélite e pela Localização da Antena obtida pelo bloco Agentes Externos.

O bloco Tarefas do Sistema deverá analisar o resultado obtido pelo cálculo e movimentar a antena através do bloco Agentes Externos.

Como no alinhamento manual, o Bloco “Tarefas do sistema” deverá configurar a recepção para que se possa monitorar os dados recebidos do satélite, para isso deverá receber os dados de recepção através do bloco Agentes Externos.

O bloco Tarefas do Sistema deverá analisar os dados de recepção verificando a qualidade do sinal, realizando ou não o Alinhamento Fino e validando o Alinhamento do sistema.

4.1.1. Modelagem do Sistema

A modelagem do bloco Tarefas do Sistema está ilustrada na Figura 16.

Este bloco foi dividido nos seguintes sub-blocos: Controle, Interface com Usuário, Comunicação com o Banco de Dados, Comunicação com Elementos Externos e Alinhamento Fino. Adicionalmente, foram criados blocos separados; Banco de Dados, Comunicação Externa Recepção, Comunicação Externa Sensores e Servomecanismo.

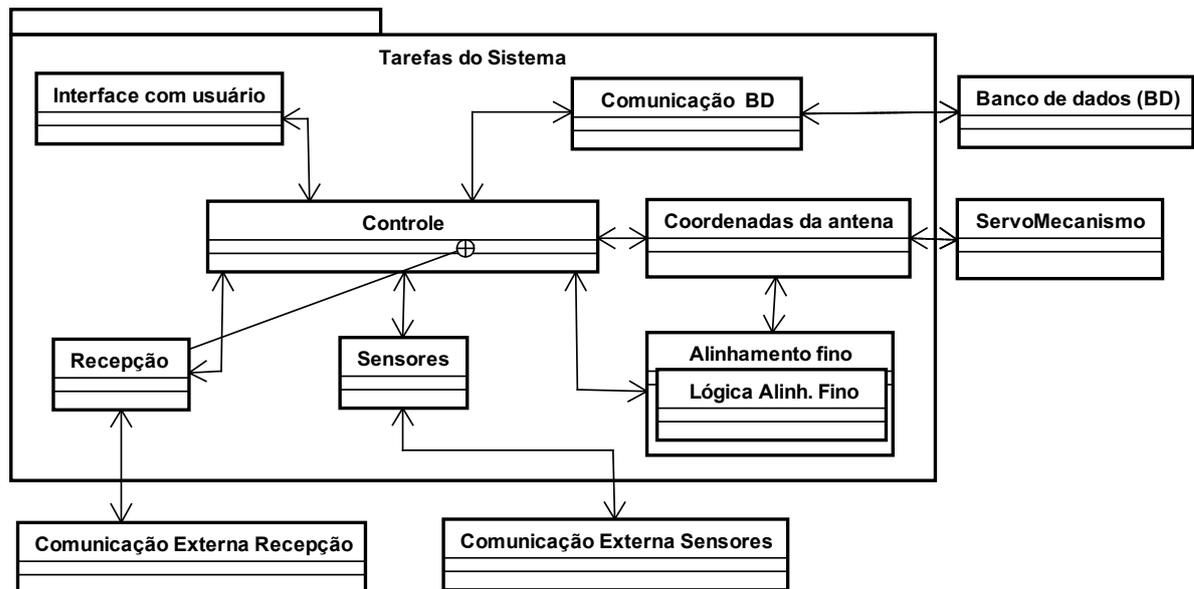


Figura 16 - Diagrama do sistema de alinhamento automático

O sub-bloco “Interface com Usuário” está interligado com o sub-bloco “Controle”, que por sua vez controla e gerencia os sub-blocos, Comunicação BD, Coordenadas da Antena, Comunicação Externa Recepção, Comunicação Externa Sensores e Alinhamento Fino.

O bloco “Tarefas do Sistema” obtém os dados do satélite através da comunicação do sub-bloco “Comunicação BD” que realiza a comunicação com o sub-bloco “Banco de Dados”, onde estão guardadas as informações do satélite.

O sub-bloco “Coordenadas da Antena” realiza a monitoração, movimento e comunicação com o sub-bloco Servomecanismo.

O sub-bloco “Servomecanismo” representa os dispositivos mecânicos e sistema de controle para a movimentação da antena.

Para receber os dados do sinal de recepção o sub-bloco “Recepção” gerencia e configura o dispositivo de recepção.

O sub-bloco “Sensores” recebe os dados da localização da antena (latitude, longitude e altitude).

4.1.2. Modelagem do Sub-bloco Banco de Dados

O objetivo da modelagem do Banco de dados (Figura 17) é construir um modelo para visualizar, comunicar e controlar o banco de dados.

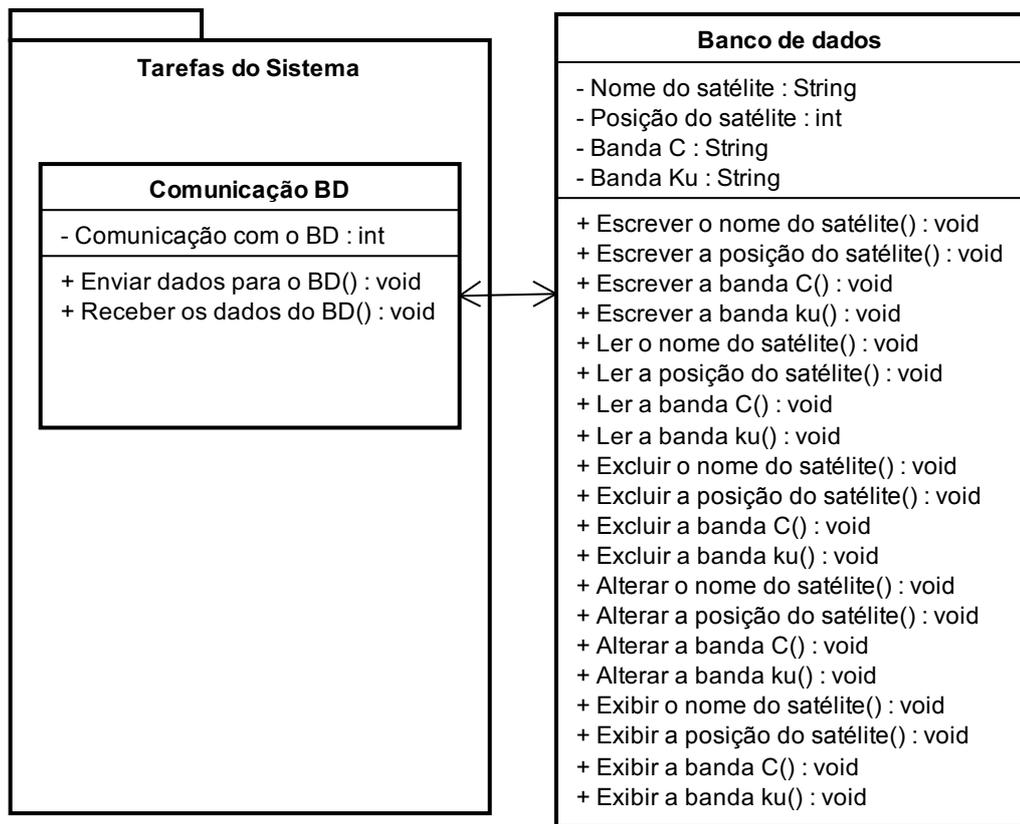


Figura 17 - Modelagem do banco de dados

A classe “Banco de Dados” tem os seguintes atributos: Nome do Satélite, Posição do satélite, Banda C e Banda Ku.

Cada atributo representa um dado essencial para o cálculo efetuado para a realização do alinhamento da antena, conforme Eqs. (15) e (20).

O Banco de Dados deverá permitir inserir novos dados do satélite, alterar e/ou excluir os dados do satélite já existentes.

4.1.3. Modelagem dos Sub-blocos Recepção e Sensores

A Figura 18 ilustra a modelagem dos Sub-blocos Recepção e Sensores, que têm o objetivo de gerenciar os elementos envolvidos para a comunicação com os dispositivos externos.

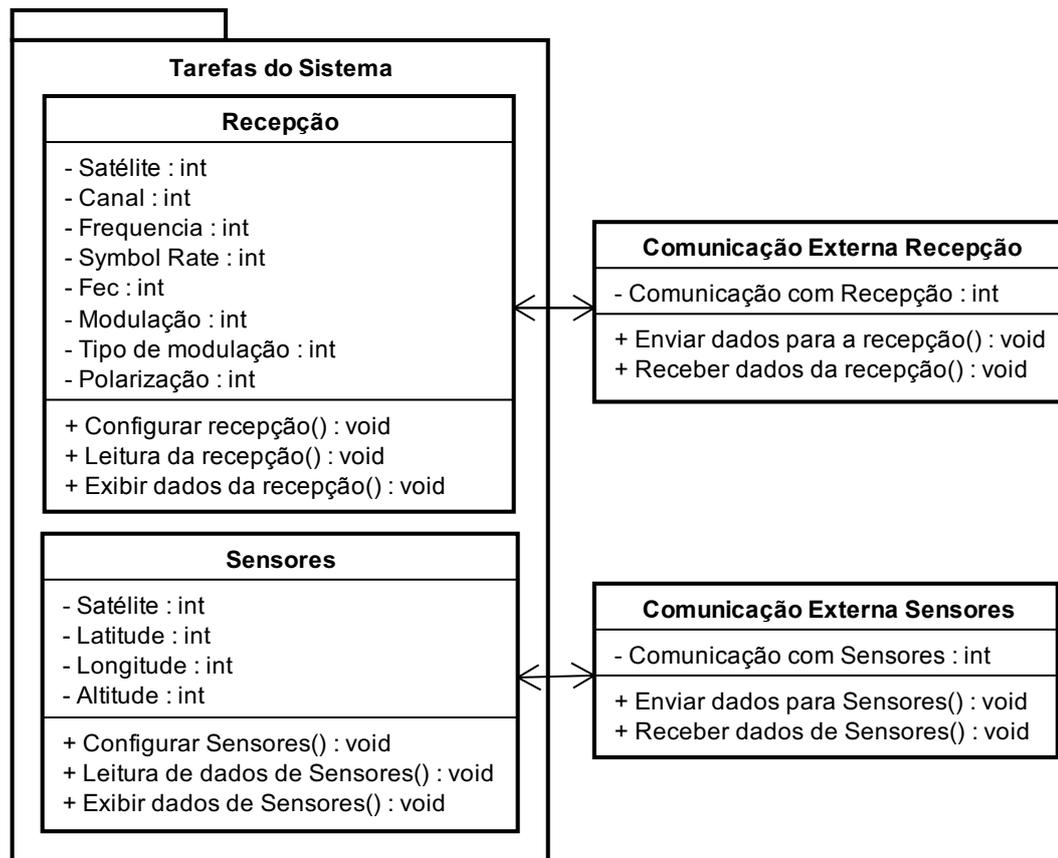


Figura 18 - Modelagem das comunicações externas

A classe “Recepção” permite realizar a configuração dos elementos necessários para a recepção de satélite: canal, frequência, taxa de símbolos, taxa de FEC, tipo de modulação e polarização.

A classe “Sensores” permite a configuração do dispositivo para o envio das informações da localização da antena: latitude, longitude e altitudes, que são necessários para o cálculo do alinhamento da antena.

A classe “Comunicação Externa Recepção” permite o envio de dados do dispositivo de recepção para o dispositivo externo.

A classe “Comunicação Externa Sensores” permite a comunicação de dados com os sensores.

4.1.4. Modelagem do Sub-Bloco Coordenadas da Antena

A classe “Coordenadas da Antena” permite enviar informações de elevação e azimute para o servomecanismo movimentar a antena, conforme ilustra a Figura 19.

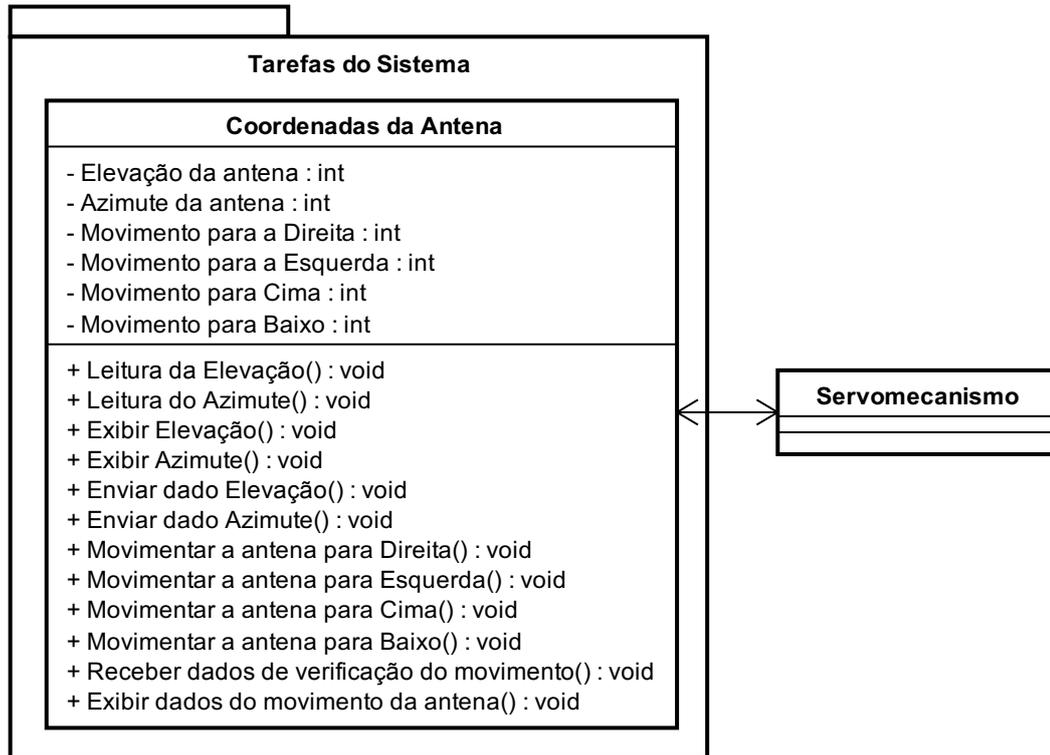


Figura 19 - Modelagem do sub-bloco das coordenadas da antena

4.1.5. Modelagem do Sub-bloco Alinhamento Fino

De forma inovadora, foi concebida uma classe “Alinhamento Fino” com a finalidade de melhorar a qualidade de recepção.

A classe “Alinhamento Fino” realiza sucessivas tentativas de posicionamento da antena, em torno dos valores de referência para azimute e elevação, para atingir a qualidade de recepção estabelecida.

A classe “Coordenadas da Antena” será controlada pela classe “Lógica do Alinhamento Fino”.

A Figura 20 ilustra os atributos pertinentes à classe Alinhamento Fino.

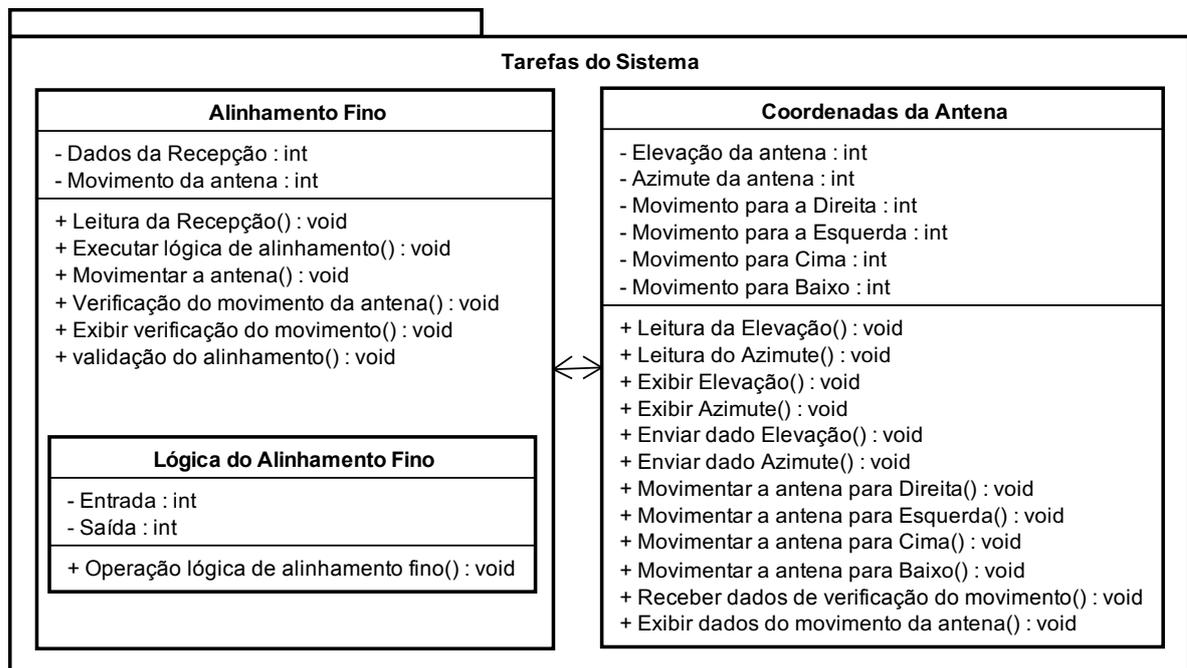


Figura 20 - Modelagem do sub-bloco alinhamento fino

4.1.6. Modelagem do Sub-Bloco Interface com o Usuário e Controle

A classe Controle gerência o acesso às outras classes, executa o cálculo para a realização do alinhamento e executa o alinhamento propriamente dito.

A classe Controle verifica o alinhamento da antena através da relação portadora/ruído do sinal de recepção da antena, caso a relação portadora/ruído não esteja no valor desejado é necessário fazer o alinhamento fino através da classe “Alinhamento Fino”.

A classe Interface com Usuário permite ao usuário escolher o satélite, observar o movimento da antena e o nível de recepção.

A Figura 21 apresenta a modelagem da classe “Interface com Usuário” e da classe “Controle” e suas relações com as demais classes.

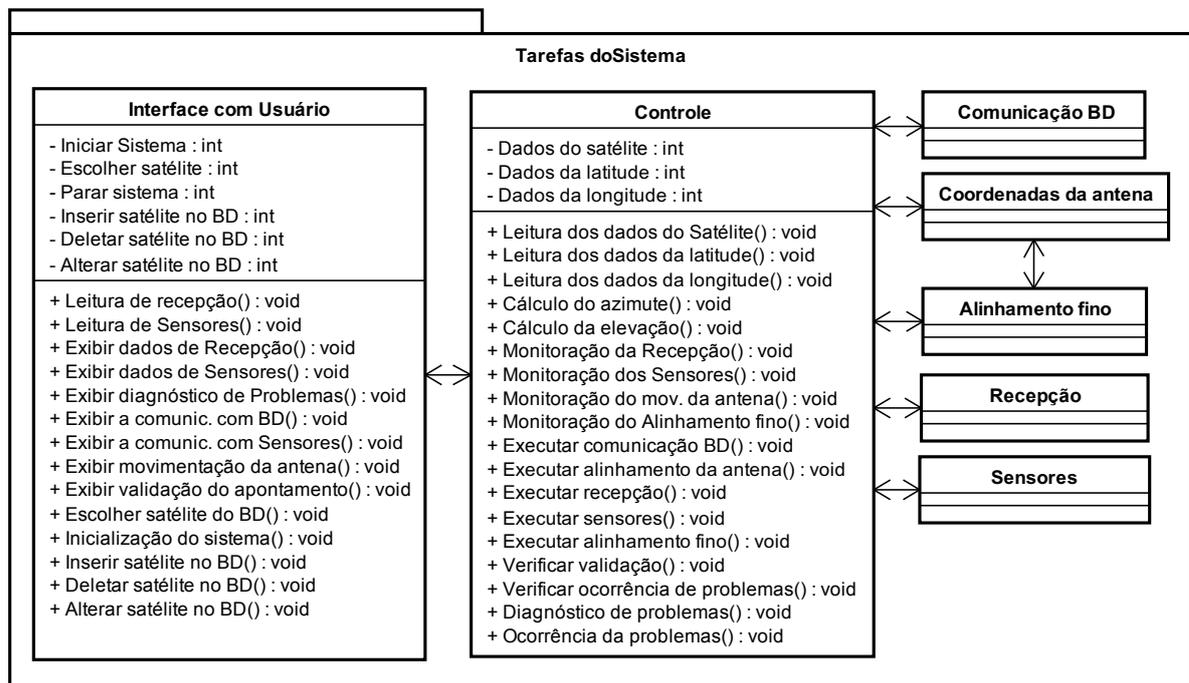


Figura 21 - Diagrama do sistema de alinhamento

4.1.6. Modelagem do Sub-Bloco Lógica do Alinhamento Fino

A modelagem do Alinhamento Fino, tomando como parâmetros de referência os do procedimento de um alinhamento manual, realiza o ajuste da posição da antena através da análise dos dados da recepção.

Nessa análise, deve-se movimentar a antena em torno de valores de referência calculados pelas Eqs. (15) e (20), até se atingir o melhor ponto de recepção.

A classe “Alinhamento Fino” executa uma lógica de alinhamento para posicionar a antena. Após a realização do movimento é feito uma verificação para avaliar se o sistema conseguiu o sinal de recepção desejado. A Figura 22 ilustra a classe de Alinhamento Fino.



Figura 22 – Diagrama do alinhamento fino

De forma inovadora, propõe-se neste trabalho a utilização da Lógica *Fuzzy* para implementar a classe “Alinhamento Fino”.

Foram criadas duas variáveis de entrada e uma de saída. A primeira variável de entrada (Entrada 1), obtida diretamente pelo receptor de satélite, é a relação C/N. A segunda (Entrada 2) corresponde a diferença entre o primeiro e o segundo valor da relação C/N obtido no receptor. A variável de saída (Saída) gerado pela lógica *Fuzzy* indica o movimento em azimute e elevação da antena.

Todos os elementos que regem a operação lógica do alinhamento fino da Figura 22 estão ilustrados na Figura 23.

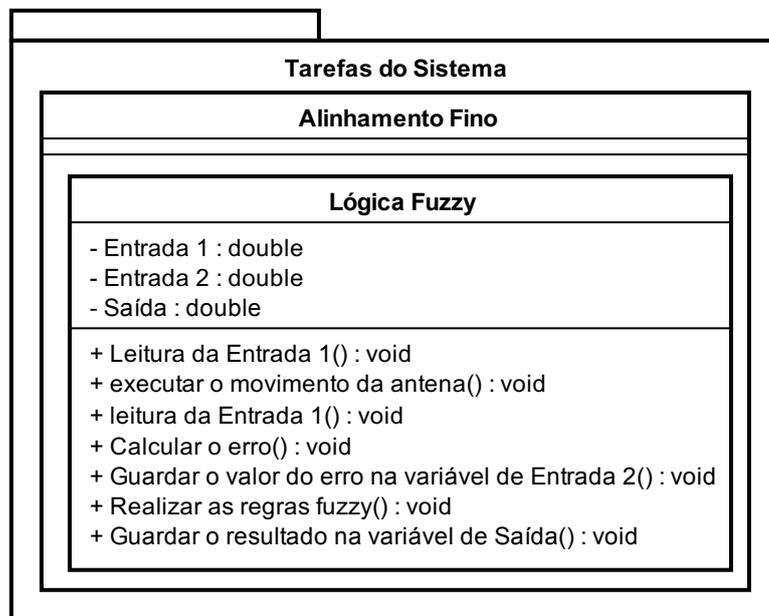


Figura 23 – Modelagem da lógica fuzzy

CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo é proposto uma solução de implementação do sistema modelado no Capítulo 4, que compõem o sistema para a automatização do alinhamento manual.

5.1 Implementação do Modelo Conceitual

Os elementos que foram implementados são os sub-blocos do diagrama da Figura 16.

Os sub-blocos Interface Usuário, Controle, Coordenadas da Antena, Alinhamento Fino, Recepção, Sensores, Comunicação BD foram implementado na plataforma Java®.

O sub-bloco BD foi implementado em plataforma MySQL, utilizando uma API (Application Program Interface) para a interface de comunicação Java®.

O sub-bloco Servomecanismo representa a comunicação com os servomotores (não sendo abordado neste trabalho).

O sub-bloco de Sensores utiliza um GPS para a captura dos dados de localização da antena.

O sub-bloco Receptor de Satélite realiza a comunicação, a configuração e a leitura dos dados do receptor de satélite. Para o sub-bloco Alinhamento Fino foi projetado e implementado um controlador fuzzy capaz de realizar o alinhamento fino da antena.

O Gerenciamento do Sistema é realizado através do sub-bloco Controle, interagindo com:

- O sub-bloco Interface Usuário solicita e exibe os dados do satélite armazenados no sub-bloco BD;
- O sub-bloco Comunicação BD é a interface do sub-bloco Controle com o sub-bloco BD;
- O sub-bloco BD envia e recebe os dados do satélite;

- O sub-bloco Coordenadas da Antena é a interface do sub-bloco Controle com o sub-bloco servomecanismo;
- O sub-bloco Servomecanismo recebe a solicitação do bloco Coordenadas da Antena e a executa enviando a confirmação do movimento;
- O sub-bloco Alinhamento fino é executado quando solicitado pelo bloco Controle realizando comunicação com o sub-bloco Coordenadas da Antena;
- O sub-bloco Sensores é a interface do sub-bloco Controle com o GPS;
- O sub-bloco Sensores envia a configuração para o GPS orientada pelo sub-bloco Controle para enviar os dados da localização da antena;
- O sub-bloco Recepção realiza a interface do sub-bloco Controle com o Receptor de Satélite;
- O sub-bloco Receptor de Satélite recebe a configuração da recepção pelo sub-bloco Controle para enviar os dados da relação C/N da recepção.

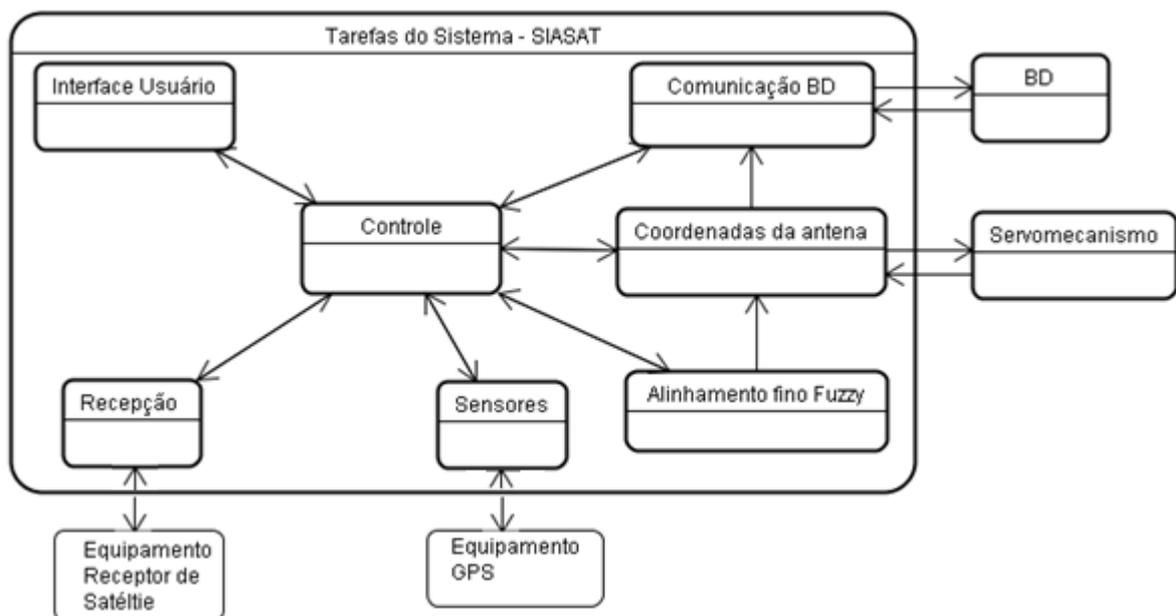


Figura 24 – Diagrama de implementação geral

Em resumo, o sistema proposto segue os seguintes passos:

Após a inicialização do sistema o sub-bloco Interface Usuário aguarda a escolha do satélite pelo usuário.

Escolhido o satélite, o sub-bloco Controle executa as seguintes funções: solicita a localização do satélite armazenada no sub-bloco BD, recebe os dados da localização do satélite, envia a configuração do receptor de satélite para o sub-bloco Recepção, recebe os dados da relação C/N pelo sub-bloco Recepção, envia a configuração do equipamento GPS pelo sub-bloco Sensores, recebe a localização da antena, executa o sub-bloco Coordenadas da Antena, executa (se necessário) o sub-bloco Alinhamento fino.

Com os dados obtidos pelo bloco GPS e pelo bloco Recepção (latitude, longitude, altura, C/N) o sistema calcula os valores de ângulos de elevação e azimute utilizando a (Eq. (1) e Eq. (6) do Capítulo 2.

O sistema envia o resultado dos valores calculados dos ângulos de elevação e azimute para os Servomecanismos.

Após a movimentação da antena, é realizada a verificação da qualidade do sinal recebido, através da relação C/N fornecido pelo receptor digital.

Para valores de C/N maior ou igual a 8 dB é validado o alinhamento e finaliza-se o processo. Caso a relação C/N seja inferior a 8 dB, o sistema aciona o Alinhamento Fino com o objetivo de ajustar a posição da antena e aumentar o nível de sinal de recepção.

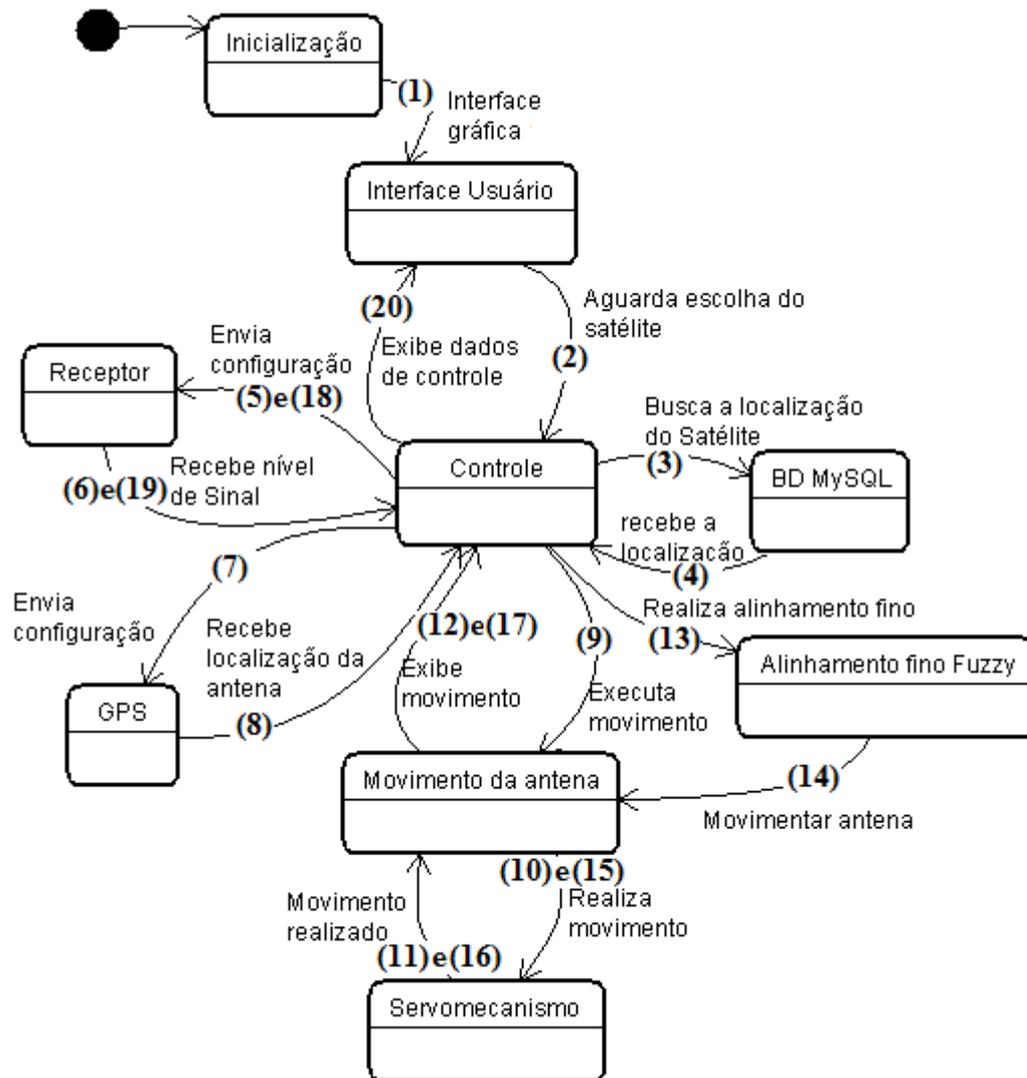


Figura 25 – Diagrama de execução de software

Na implementação do banco de dados foi criado a classe Database definindo-se os seguintes dados de entrada: id, nome, posição, banda C e banda Ku.

Para a confecção do banco de dados foram elaboradas as atribuições das ações da classe: Sat(), getID(), setID(), getNome(), setNome(), getPosicao(), setPosicao(), getBanda(), setBanda(), getBandaku() e setBandaku().

A classe Database Communication realiza a comunicação do programa com o banco de dados.

A Figura 26 ilustra o diagrama da implementação do banco de dados em MySQL.

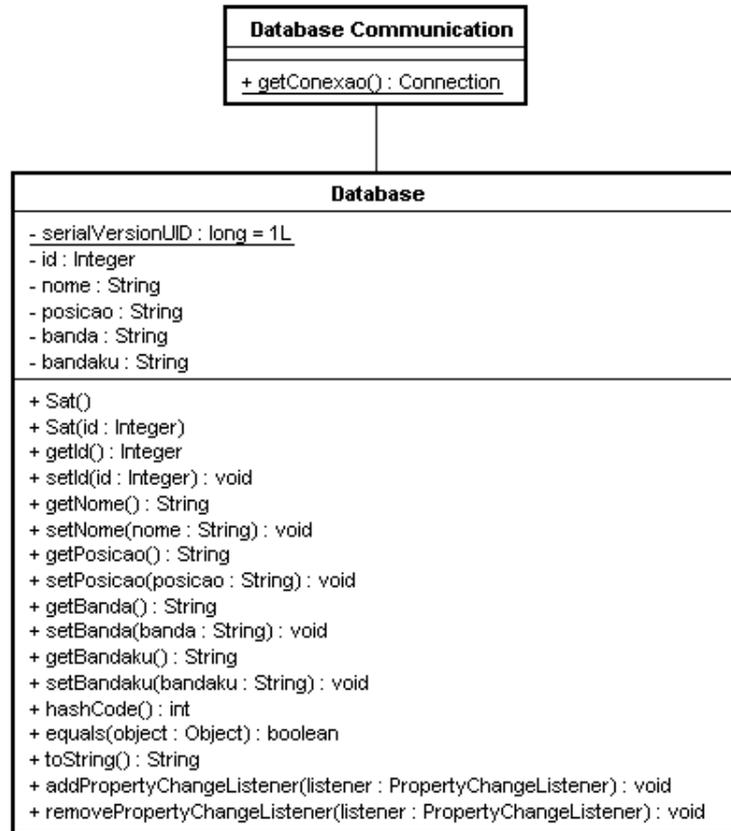


Figura 26 – Diagrama de implementação do banco de dados em MySQL

Na implementação do Receptor de satélite foi criada a classe Receiver, definindo-se os seguintes dados de entrada, necessários para a configuração automática do receptor: id, sat, canal, frequencia, symbolrate, fec, modulacao, tipodemodulacao, polarização e pilot.

Para a confecção da configuração do receptor de satélite foram elaboradas as atribuições das ações da classe: Config(), getID(), setID(), getSat(), setSat(), getCanal(), setCanal(), getFrequencia(), setFrequencia(), getSymbolrate(), setSymbolrate(), getFec(), setFec(), getModulacao(), setModulacao(), getTipodemodulacao(), setTipodemodulacao(), getPolarização(), setPolarização(), getPilot() e setPilot().

A classe Database Communication realiza a comunicação do programa com o banco de dados.

Na implementação do GPS foi criada a classe GPS, definindo-se os seguintes dados de entrada necessários para a configuração automática do GPS: nome, latitude, longitude e altitude.

Para a confecção da configuração do GPS foram elaboradas as atribuições das ações da classe: `getLatitude()`, `setLatitude()`, `getLongitude()`, `setLongitude()`, `getAltitude()`, `setAltitude()`, `getBusca()`, `setBusca()`.

A Figura 27 ilustra o diagrama de implementação do sistema com o GPS e o Receptor de satélite.

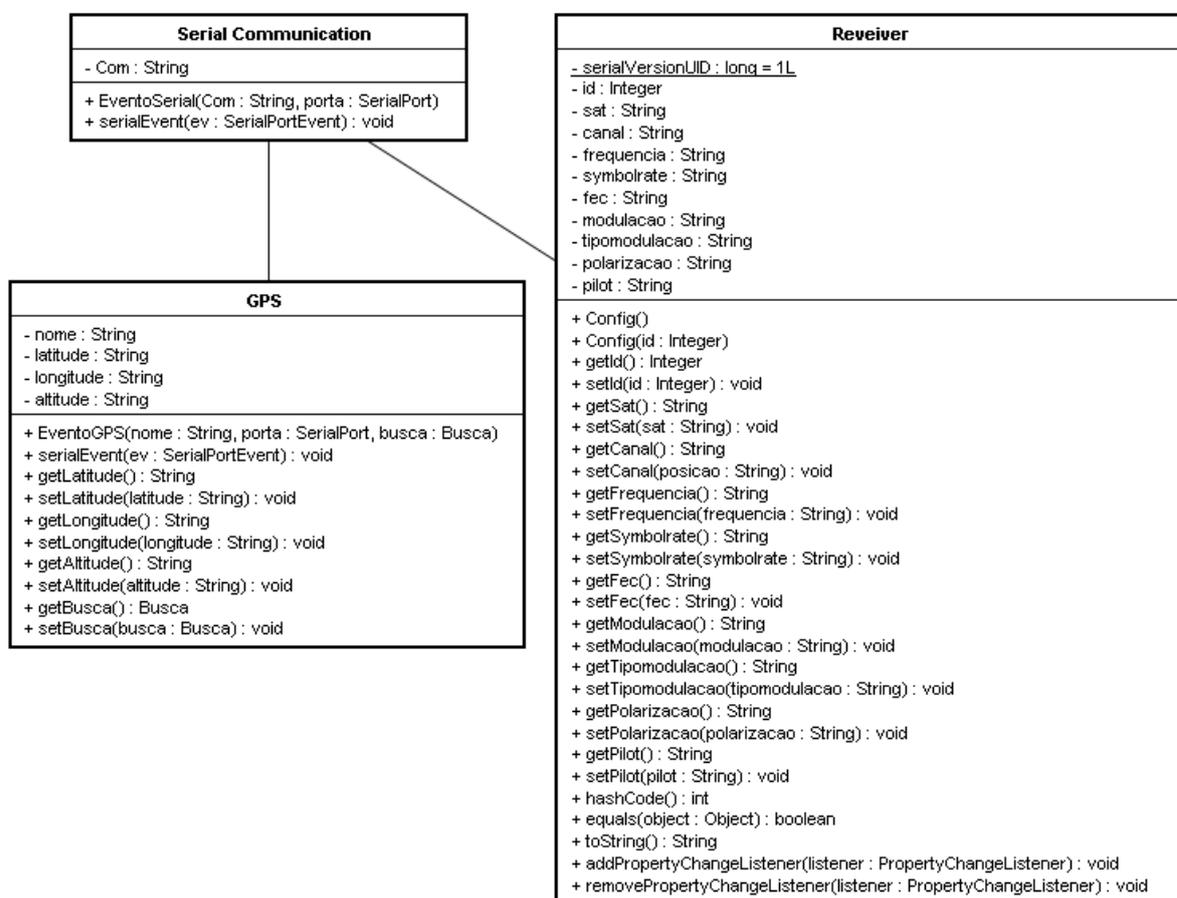


Figura 27 – Diagrama de implementação da comunicação do sistema com o GPS e o receptor

Na implementação computacional da lógica Fuzzy foram necessárias as seguintes classes: Classe MandaniModel, Classe InputMandaniVariable, Classe Defuzzifier, Classe FuzzyInferenceEngine, Classe FuzzyF, Classe MembershipFunction, Classe

OutMandaniVariable e Classe LinguisticVariable. Todas estas classes com seus dados de entrada e suas ações estão ilustradas na Figura 28.

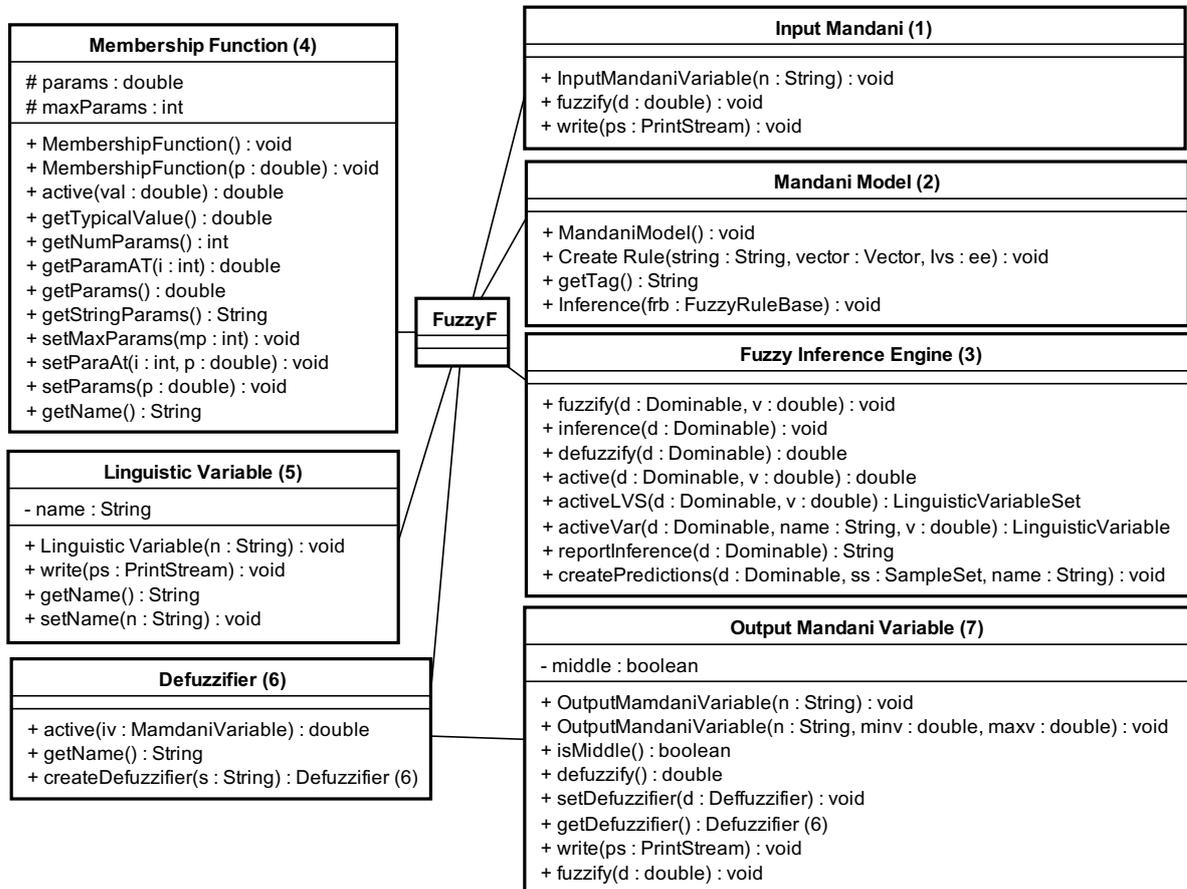


Figura 28 – Diagrama de implementação da lógica fuzzy

5.2 Arquitetura Física Proposta

Um computador portátil gerencia o alinhamento automático da antena através do sistema SIASAT implementado em plataforma Java.

O sistema SIASAT configura e realiza as leituras de recepção do receptor de satélite e a comunicação com o GPS. Indica para qual direção o satélite deverá ser apontado. O sistema deverá identificar se há necessidade ou não do alinhamento fino e após todos os passos o sistema deverá validar ou não o alinhamento da antena.

A Figura 29 ilustra a arquitetura proposta.



Figura 29 – Arquitetura proposta

Para o funcionamento dessa arquitetura foi projetado e desenvolvido um sistema de gerenciamento, denominado SIASAT (Sistema Inteligente de Alinhamento para Satélite), implementado em linguagem Java®. Foram desenvolvidas interfaces gráficas amigáveis que permitem ao usuário interagir com o sistema SIASAT e acompanhar a evolução do processo de alinhamento.

O sistema SIASAT interage com o GPS e com o receptor digital utilizando portas USB do computador. Em termos gerais, SIASAT realiza as seguintes etapas para o alinhamento:

- Escolher um satélite para a realização do alinhamento. O satélite deverá enviar o sinal de cobertura para a região do Brasil e preferencialmente trabalhar em banda C, que é a faixa de frequência mais utilizada pelos canais de “*broadcasting*” no Brasil. A escolha do satélite é determinado pelo canal que se quer receber, com toda a informação desejada de broadcasting;
- Extrair de um banco de dados as informações de localização espacial do satélite e as características do sinal, com as quais se configura automaticamente o receptor;

- Obter informações da localização espacial da antena a partir do GPS;
- Calcular os valores angulares de azimute e elevação para o alinhamento da antena;
- Verificar a qualidade do sinal recebido através da relação portadora/ruído C/N, utilizando-se o equipamento de recepção digital.
- Ativar um procedimento para o alinhamento fino (Capítulo 6), movimentando a antena para valores angulares em torno dos valores de referências (azimute e elevação), com o objetivo de atingir níveis de relação portadora/ruído acima ou igual a 8 dB, aferido pelo receptor digital.

5.3 Implementação da Interface Gráfica

O programa do SIASAT utiliza uma interface gráfica amigável que permite ao usuário acompanhar todas as etapas do processo de alinhamento da antena.

O SIASAT realiza toda a comunicação externa realizando a interação, identificando as falhas, sugerindo possíveis soluções automaticamente.

A interface gráfica é composta por uma janela de inicialização e um *menu* principal que contém 8 abas de controle e monitoração.

O programa aguarda a inicialização do sistema pelo acionamento pelo usuário no “botão” “INICIAR”, conforme ilustra a Figura 30.



Figura 30 - Programa do sistema de alinhamento.

O sistema SIASAT, após ser inicializado pelo usuário, sinaliza todo o procedimento de inicialização para abertura das interfaces gráficas, ilustrada pela Figura 31.



Figura 31 - Inicialização do sistema

O sistema SIASAT, fornece uma interface amigável que direciona o usuário na escolha de um satélite.

O sistema realiza uma verificação da comunicação com os equipamentos externos, informado ao usuário sobre o funcionamento do sistema.

É possível escolher o satélite através da listagem de satélites ou realizar a pesquisa digitando o nome do satélite.

Feito a escolha do satélite, o usuário poderá acompanhar o monitoramento da movimentação da antena e do nível de recepção, conforme ilustra a Figura 32.



Figura 32 - Busca do satélite

Em qualquer momento o usuário poderá parar o processo e escolher outro satélite, conforme ilustra a Figura 33.

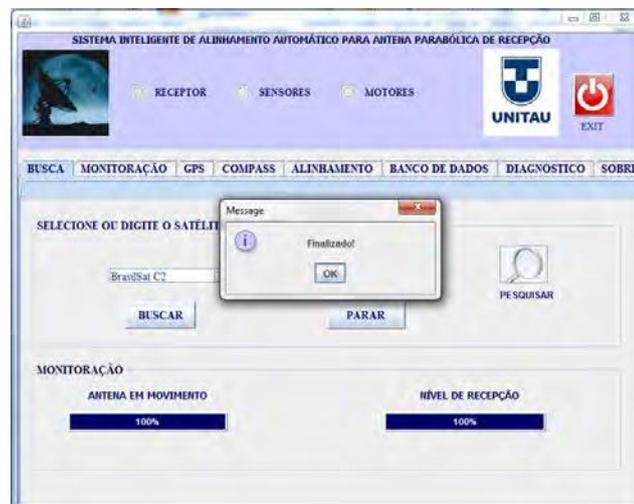


Figura 33 - Finalizando o sistema.

A aba “Monitoração do Sistema” mostra os dados recebidos pela plataforma de sensores e os dados recebidos pelo receptor digital.

Poderá ainda acessar a lista de configuração do equipamento de recepção digital através do ícone configuração. Assim, o usuário poderá verificar o status do receptor, como mostra a Figura 34.

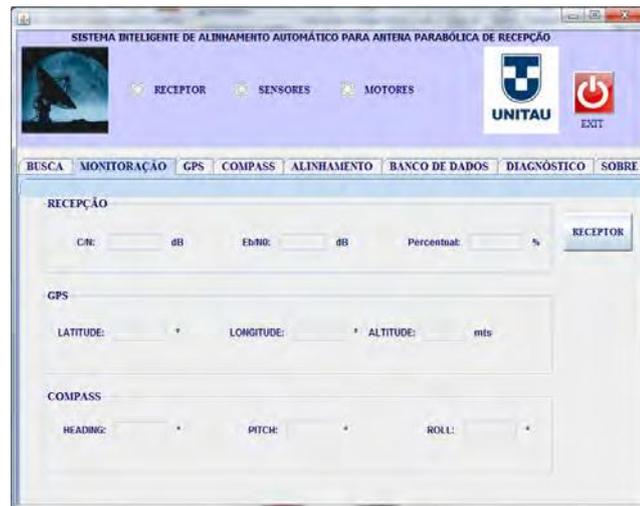


Figura 34 - Monitoração do sistema.

A aba “GPS” mostra os dados recebidos pelo GPS, conforme ilustra a Figura 35. O usuário poderá reconectar e atualizar o sistema, caso haja uma falha na comunicação do sistema com os equipamentos externos.



Figura 35 - GPS do sistema

A aba “Alinhamento” mostra e a atualiza o cálculo de alinhamento em elevação e azimute para a antena (Figura 36).



Figura 36 - Cálculo do Alinhamento do sistema

A aba “Banco de Dados” mostra a lista de satélites cadastrados (Figura 37). O usuário poderá atualizar o banco de dados, alterar um dado e excluir um satélite através das informações do cadastro de satélite.

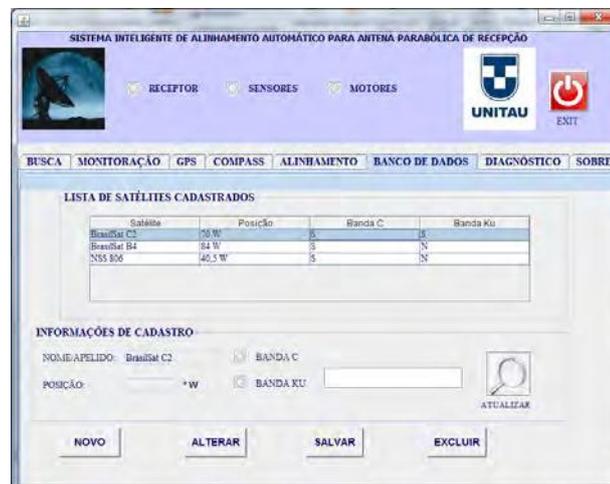


Figura 37 - Banco de dados do sistema

O usuário pode visualizar o conteúdo do banco de dados através da Lista de Configuração de Recepção (Figura 38), onde para cada satélite, existem duas configurações: polarização vertical e horizontal.

O usuário faz a escolha do satélite, uma configuração na polarização vertical é enviada para o receptor automaticamente para que ele possa receber o sinal nesta polarização.

Caso não se tenha sinal algum, uma segunda configuração de recepção será enviada para receber o sinal na polarização horizontal.



Figura 38 - Configuração dos dados de recepção do satélite

A aba “Diagnóstico” permite que o usuário acompanhe o processo de alinhamento. Permite, também, gerar um relatório caso o alinhamento não seja efetuado com sucesso, listando possíveis erros e indicativos para a solução do problema (Figura 39).

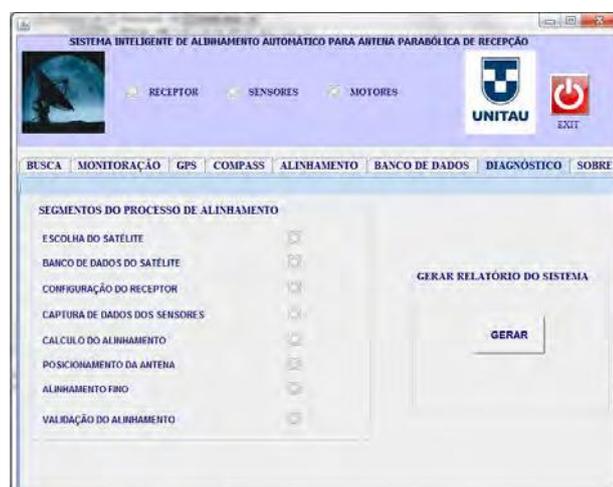


Figura 39 - Diagnóstico dos segmentos do processo de alinhamento.

5.4 Implementação da Interface Comunicação Externa com Java

Para a comunicação entre o sistema de alinhamento e os equipamentos que fazem parte da Plataforma de Sensores é necessário realizar uma conexão física entre eles. Para isso utiliza-se API RXTX para a comunicação da porta serial, conectado a um cabo serial com uma conexão USB (Universal Serial Bus).

Embora o USB seja parte integrante de muitos computadores, a linguagem Java não oferece (oficialmente) suporte ao protocolo USB.

Para fazer o programa SIASAT em Java interagir com o dispositivo USB, é necessário usar a API JAVA/USB (STAHL, 2003).

A API é baseada na API Javacomm, distribuída gratuitamente pela empresa Sun, com a vantagem de suportar qualquer sistema operacional (API-RXTX, 2008).

A API de comunicação simplifica o processo de interação, com o objetivo de automatizar o processo de localização de um transporte de dados, criando uma conexão segura.(STAHL, 2003)

Recursos da API:

- Enumeração de portas (administrador e usuário de mapeamento de porta configurável);
- Porto de configuração (taxa de transmissão, bits de parada, paridade);
- Acesso à EIA-232;
- Transferência de dados através de portas RS-232;
- Opção de hardware e software de controle de fluxo;
- Buffer de recepção de controle de limite.

5.6 Implementação da Lógica Fuzzy

Para a implementação do algoritmo do Alinhamento Fino foi utilizada a lógica fuzzy do tipo Mandani. Para desenvolver a lógica fuzzy, para este sistema, são necessários dois valores de entrada, um valor de saída e gerar as regras fuzzy para indicar para onde a antena deverá ser apontada

A primeira variável de entrada é obtida diretamente pelo receptor de satélite que corresponde a relação C/N de recepção. A função de pertinência para a primeira entrada foi dividida em setes funções em um intervalo de 2 a 10, que são os níveis de C/N do receptor de satélite. As possíveis variáveis de entrada são representadas entre os intervalos de S1 a S7. O nível 2 é o valor mínimo perceptível pelo equipamento e o nível de 10 o valor máximo, conforme ilustra a Figura 40.

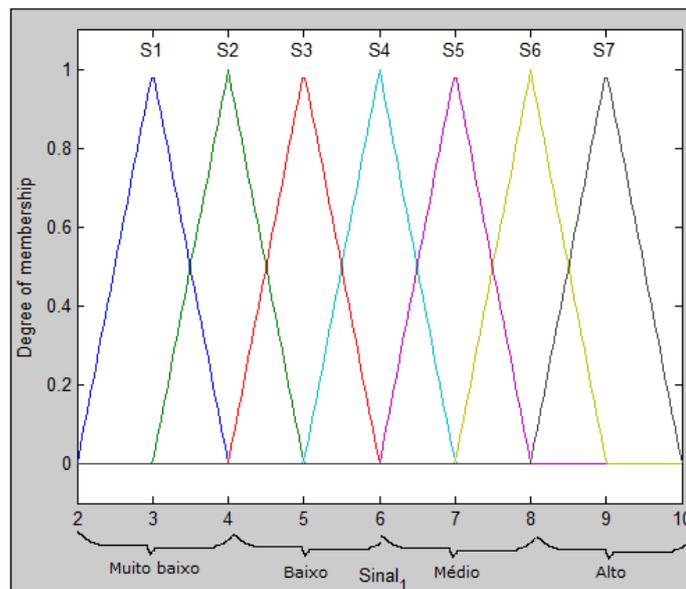


Figura 40 – Função de pertinência da primeira entrada

No caso, as variáveis lingüísticas da primeira entrada (relação C/N) podem ser “muito baixo” (2 a 4), “baixo” (4 a 6), “médio” (6 a 8), e “alto” (8 a 10),. Valores da relação C/N

“muito baixo” significam que a recepção está ruim, e valores “altos” que a recepção atingiu o valor desejado.

A segunda entrada D_{K+1} corresponde à subtração entre a medida de C/N de ordem $K + 1$ (E_{K+1}) e a ordem K (E_K). A segunda entrada corresponde a Eq. (21).

$$D_{K+1} = E_{K+1} - E_K \quad (21)$$

O valor da segunda variável de entrada deverá assumir as seguintes variáveis lingüísticas da diferença: “grande”, “médio”, “pequeno” e “muito pequeno”.

As variáveis lingüísticas foram codificadas da forma a seguir:

- – DG (negativo) diferença grande;
- – DM (negativo) diferença média;
- – DP (negativo) diferença pequena;
- – D (negativo) diferença muito pequena;
- D diferença desejada;
- + D diferença muito pequena;
- + DP diferença pequena;
- + DM diferença média;
- + DG diferença grande.

A Figura 41 ilustra a função de pertinência, utilizando-se e empregando-se as variáveis lingüísticas das funções de pertinência do tipo triangular (–DG –DM –DP –D D +D +DP +DM + DG).

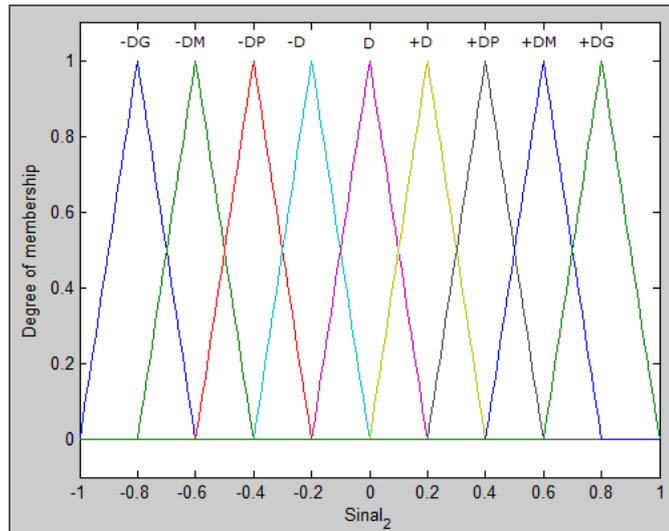


Figura 41 – Função de pertinência da segunda entrada

A saída do sistema corresponderá à movimentação da antena, para valores positivos o sentido da antena será horário e negativo, o oposto.

A saída é dada em graus, ou seja, quanto que a antena deverá ser movimentada. A Figura 42 ilustra a saída indicando como deverá ser o comportamento da antena (quanto mais próximo do zero melhor o sinal). As possíveis variáveis de saída são representadas entre os intervalos de -R6 a +R6.

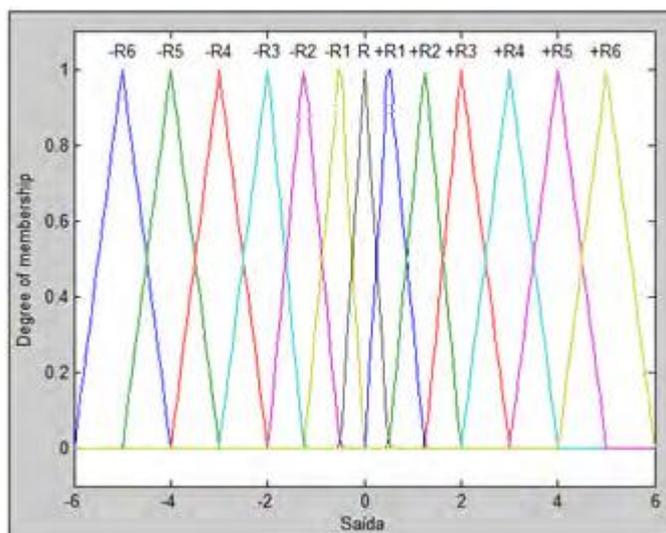


Figura 42 – Função de pertinência da saída

Nesse método é necessário construir as regras da lógica fuzzy para encontrar o valor de recepção de melhor C/N.

Para implementar essas regras fuzzy foi empregado um conjunto de variáveis lingüísticas (modificadores lingüísticos).

Os modificadores são termos ou operações que modificam a forma dos conjuntos fuzzy (ou seja, a intensidade dos valores fuzzy). Eles podem ser classificados em aumentadores quando aumentam a área de pertinência de um conjunto fuzzy e em diminuidores quando diminuem a área de pertinência de um conjunto fuzzy. A saída corresponde ao resultado final e indica somente o movimento em azimute da antena. O movimento em elevação não foi necessário ser utilizado.

As variáveis lingüísticas de saída (movimento da antena) podem ser “baixíssima” (R6), “muito baixa” (R5), “baixa” (R4), “pequena média” (R3), “média” (R2), “alta” (R1) e “altíssima” (R).

Para valores da variável lingüística “baixíssima” o nível de recepção para o alinhamento está muito fora do esperado, para valores de “altíssima” o nível de recepção para o alinhamento está na posição esperada.

A partir dos modificadores lingüísticos é possível estabelecer um conjunto de relações ou operações, que consistem em combinar um ou mais conjuntos fuzzy, visando à obtenção de um único conjunto fuzzy (conjunto solução).

Na definição das regras foi estabelecido que o sistema atingisse o melhor nível de sinal possível através do posicionamento da antena.

Um valor C/N “muito baixo” e uma diferença “grande” indicam que a antena será reposicionada de uma variação menor de ângulo (R).

Um valor de C/N “muito baixo” e uma diferença “muito pequena” indicam que a antena continua com uma recepção ruim e será reposicionada de uma variação maior de ângulo (R6).

Um nível de C/N “alto” e uma diferença “grande” indicam que a antena está com uma recepção boa e será reposicionada de uma variação menor de ângulo.

Um nível de C/N “alto” e uma diferença “muito pequena” indica que a antena está com uma recepção excelente e que atingiu a posição ideal.

Alguns modificadores lingüísticos estão relacionados a seguir:

- Se a relação C/N é “muito baixa” (S2 a S4) e a diferença é “grande” (DG) então a saída é “baixíssima” (R6);
- Se a relação C/N é “baixa” (S4 a S6) e a diferença é “grande” (DG) então a saída é “muito baixa” (R5);
- Se a relação C/N é “baixa” (S4 a S6) e a diferença é “média” (DM) então a saída é “baixa” (R4);
- Se a relação C/N é “média” (S6 a S8) e a diferença é “média” (DM) então a saída é “pequena média” (R3);
- Se a relação C/N é “média” (S6 a S8) e a diferença é “pequena” (DP) então a saída é “média” (R2);
- Se a relação C/N é “alta” (S8 a S10) e a diferença é “pequena” (DP) então a saída é “alta” (R1);
- Se a relação C/N é “alta” (S8 a S10) e a diferença é “muito pequena” (D) então a saída é “Altíssima” (R);

Na Tabela 7 é mostrada a matriz de regras, com duas entradas e uma única saída. Essa tabela representa as regras para o comportamento da lógica fuzzy para o movimento da antena.

Tabela 7. Matriz de regras do método fuzzy

	- DG	- DM	- DP	- D	D	+ D	+ DP	+ DM	+ DG
S1	- R6	- R6	- R6	- R5	+ R5	+ R5	+ R6	+ R6	+ R6
S2	- R5	- R5	- R5	- R4	+ R4	+ R4	+ R5	+ R5	+ R5
S3	- R4	- R4	- R4	- R3	+ R3	+ R3	+ R4	+ R4	+ R4
S4	- R3	- R3	- R3	- R2	+ R2	+ R2	+ R3	+ R3	+ R3
S5	- R2	- R2	- R2	- R1	+ R1	+ R1	+ R2	+ R2	+ R2
S6	- R1	- R1	- R1	R	R	R	+ R1	+ R1	+ R1
S7	R	R	R	R	R	R	R	R	R

São ilustradas a seguir, como exemplo, 7 das 63 regras do sistema.

1. If (Sinal_1 is S1) and (Sinal_2 is -DG) then (Saída is -R6)
2. If (Sinal_1 is S2) and (Sinal_2 is -DG) then (Saída is -R5)
3. If (Sinal_1 is S3) and (Sinal_2 is -DG) then (Saída is -R4)
4. If (Sinal_1 is S4) and (Sinal_2 is -DG) then (Saída is -R3)
5. If (Sinal_1 is S5) and (Sinal_2 is -DG) then (Saída is -R2)
6. If (Sinal_1 is S6) and (Sinal_2 is -DM) then (Saída is -R1)
7. If (Sinal_1 is S7) and (Sinal_2 is -DG) then (Saída is R)

Os valores de entrada fornecem a saída que indica para qual sentido a antena deverá ser movimentada e qual o valor da variação de ângulo.

As variáveis de S1 a S7 são os valores possíveis para a primeira entrada (C/N).

As variáveis de -DG, -DM, -DP, -D, D, +D, +DP, +DM e +DG são os valores possíveis para a segunda entrada (Diferença).

As variáveis de -R6, -R5, -R4, -R3, -R2, -R1, R, +R1,+R2, +R3, +R4, +R5 e +R6 são os valores possíveis para as saídas da lógica fuzzy, correspondentes a movimentação da antena.

O valor de S1 da primeira entrada corresponde ao valor mínimo de nível sinal C/N, o valor de S7 corresponde a um nível de sinal desejado, para o final o resultado de saída deverá ser R.

Os valores de -DG e +DG da segunda entrada correspondem ao valor de variação máxima. O valor D indica uma pequena diferença.

Os valores negativos e positivos são para indicar qual o sentido do movimento da antena, positivo para o sentido horário e negativo para o sentido anti-horário.

O Anexo IV traz a implementação em Java da lógica *fuzzy*.

CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROJETO

Foram realizados alguns experimentos empregando-se uma antena parabólica de recepção para validar o projeto proposto.

6.1 Simulação do Sistema de Alinhamento Fino

Através do Toolbox Fuzzy, incorporado ao software Matlab®, foi validada a modelagem do sistema.

A Figura 43 ilustra a primeira interface gráfica do Toolbox Fuzzy do Matlab®. Através dela foi possível configurar o tipo Mandani, atribuir duas entradas e uma saída, escolher os nomes das variáveis (entrada e saída) e a sua configuração.

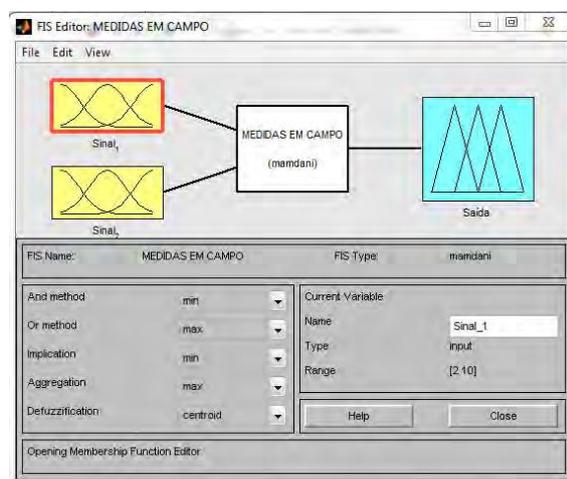


Figura 43 - Toolbox Fuzzy do Matlab®

A Figura 44 mostra a configuração da primeira entrada. Nela foi possível escolher as sete funções de pertinência, nomear e configurar seus intervalos da função triangular e o intervalo do parâmetro principal de 2 a 10.

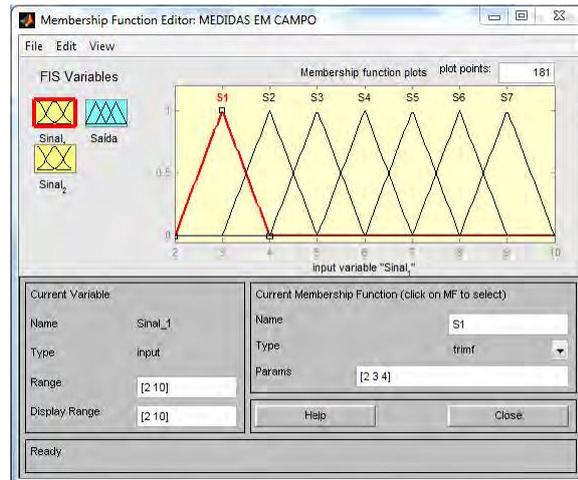


Figura 44 - Função de pertinência da primeira entrada

A Figura 45 ilustra a configuração da segunda entrada. Nela foi possível escolher as novas funções de pertinência, nomear e configurar os intervalos da função triangular e o intervalo do parâmetro principal de -1 a 1.

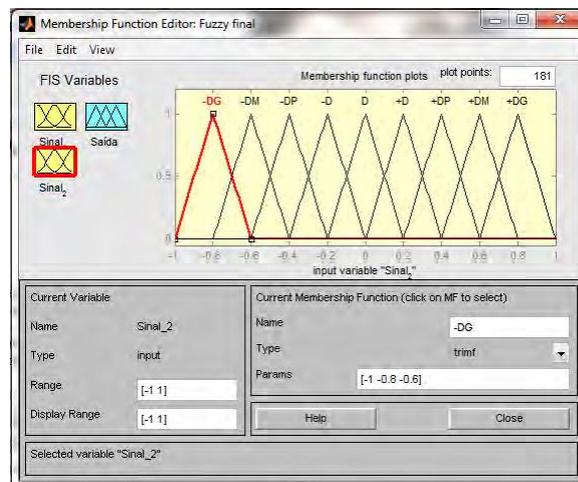


Figura 45 - Função de pertinência da segunda entrada

A Figura 46 mostra a configuração de saída. Nela foi possível escolher as treze funções de pertinência, nomear e configurar os intervalos da função triangular e o intervalo do parâmetro principal de -6 a 6.

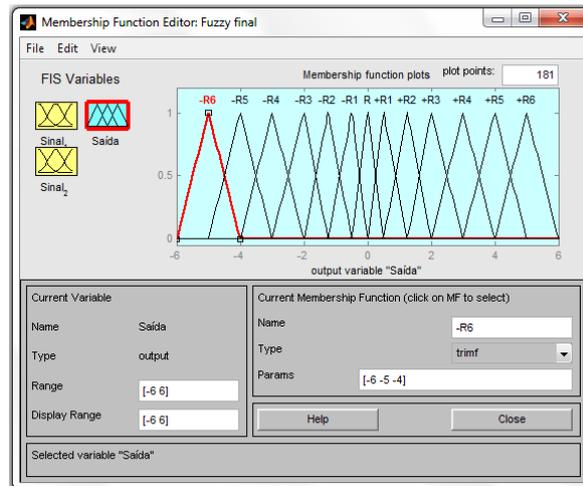


Figura 46 - Função de saída

A Figura 47 ilustra a configuração das regras de dados. Após a inserção dos dados de entrada e de saída a interface gráfica mostra todos os dados obtidos.

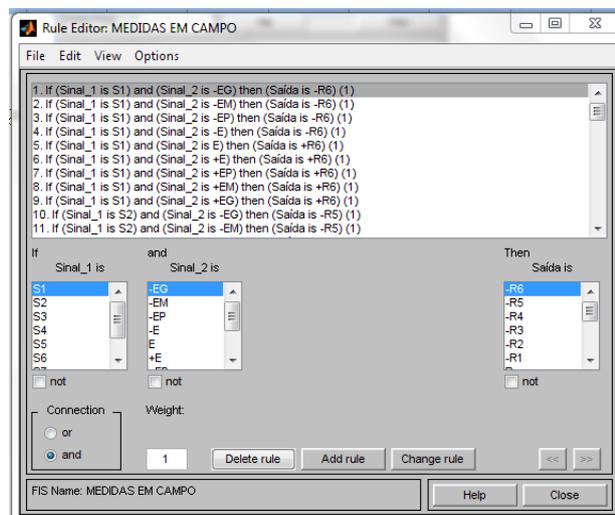


Figura 47 - Regras de dados

Depois de realizado a configuração de regras, foi possível realizar a simulação através da interface gráfica. São inseridos os dois valores de entrada e o software simula automaticamente a saída, através da lógica fuzzy incorporada, conforme ilustra a Figura 48.

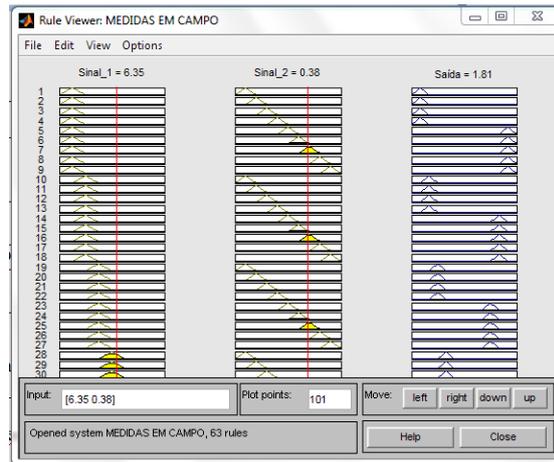


Figura 48 - Toolbox Fuzzy do Matlab®: Resultados

Os resultados obtidos demonstraram a capacidade do sistema de controle *Fuzzy* de posicionar adequadamente a antena, melhorando a recepção do sinal.

6.2 Resultados Experimentais

A validação do SIASAT foi realizada em campo na Chácara Santa Cruz em Cachoeira Paulista-SP, utilizando-se uma antena de recepção com refletor parabólico de 3,2 m, conectado ao receptor de satélite. Operando com a ajuda de um laptop, o sistema foi conectado via um cabo serial ao receptor e ao GPS.

A partir das informações geradas pelo SIASAT a antena foi movimentada manualmente usando uma bússola e um inclinômetro para simular o servomecanismo (não abordado neste trabalho).

Em campo, para um alinhamento manual leva-se em torno de 40 a 50 min. para o ajuste da antena. Utilizando-se o sistema SIASAT observou-se um tempo entre 2 a 5 min., para se realizar o alinhamento.

Os testes foram realizados através de 2 experimentos descritos a seguir.

6.2.1 Experimento 1

O primeiro experimento foi executado quatro vezes verificando-se a sua validação.

Primeiramente, foi escolhido um determinado satélite e o SIASAT forneceu a localização espacial para o posicionamento da antena. A antena foi direcionada manualmente para a posição indicada. O SIASAT, a partir da qualidade da recepção, acionou o Ajuste Fino indicando inicialmente, que a antena deverá ser movimentada a 1° no sentido horário.

A sequência de operações foi sistematizada na Tabela 8, admitindo-se que:

$$D_{k+1} = E_{k+1} - E_k \quad (26)$$

Descreve a diferença entre $(k + 1)$ -ésima e a k -ésima amostra.

Os experimentos estão polarizados, pois os movimentos estão sempre para o mesmo lado (1° para à direita).

Tabela 8. Resultados do experimento #1

K	Movimento da Antena	E_K, dB	D_{K+1}, dB
0	-	5,95	-
1	1° para direita	6,33	0,38
2	1,81° para direita	6,94	0,61
3	1,34° para direita	7, 58	0,64
4	0,93° para direita	7,50	- 0,08
5	0,90° para esquerda	8,44	0,90

No instante k o receptor de satélite indicou um valor de 5,95 dB de sinal. Após movimentar a antena de 1° no sentido horário, obteve-se um valor de 6,33 dB, gerando uma diferença de 0,38.

A partir desses valores, o SIASAT utilizando o alinhamento fino indicou o valor de $1,81^\circ$ para a direita para o movimento da antena.

Conforme demonstrado na Tabela 8, os valores foram variando e a antena foi sendo movimentada ao longo do tempo chegando a um valor final de 8,44 dB validando o experimento.

Seguindo o mesmo procedimento, com o intuito de verificar a robustez do SIASAT, foram realizadas mais quatro tentativas com as mesmas características do experimento #1, cujos resultados foram sistematizados nas Tabelas 8, 9, 10 e 11.

Pode-se observar que houve convergência para os valores de C/N maiores que 8 dB.

Quando o receptor profissional de satélite digital estando com a antena travada (antena sem movimento), a relação C/N varia em torno de 0,30 dB, devido à inexatidão do equipamento.

Tabela 9. Segunda tentativa do experimento#1

K	Movimento da Antena	E_K, dB	D_{K+1}, dB
0	-	5,37	-
1	1° para direita	5,90	0,53
2	$2,24^\circ$ para direita	6,56	0,66
3	$1,68^\circ$ para direita	6,88	0,32
4	$1,49^\circ$ para direita	7,51	0,63
5	$0,96^\circ$ para direita	8,24	0,73

Tabela 10. Terceira tentativa do experimento#1

K	Movimento da Antena	E_K, dB	D_{K+1}, dB
0	-	4,80	-
1	1° para direita	5,13	0,33
2	2,86° para direita	5,58	0,45
3	2,53° para direita	6,38	0,80
4	1,79° para direita	7,18	0,80
5	1,14° para direita	7,69	0,51
6	0,88° para direita	8,40	0,71

Tabela 11. Quarta tentativa do experimento#1

K	Movimento da Antena	E_K, dB	D_{K+1}, dB
0	-	5,54	-
1	1° para direita	6,11	0,57
2	1,98° para direita	7,08	0,97
3	1,09° para direita	7,57	0,49
4	0,93 ° para direita	8,16	0,59

Observa-se, através dos resultados obtidos pelo experimento, a relação C/N varia do dia para a noite devido à variação da temperatura, que afeta a potência do ruído N (Anexo II).

Em receptores amadores a escala de recepção tem uma inexatidão na ordem de 10%.

6.2.2 Experimento 2

No segundo experimento mantiveram-se as mesmas condições de alinhamento que o primeiro, entretanto foi propositadamente forçado uma diferença no início do apontamento ($S_1 = 4,42 \text{ dB}$ em vez de um valor maior que S_0).

Esse valor gerou uma diferença negativa ($4,42 - 5,32 = -0,9$), causando o movimento da antena para a esquerda (em $k = 2$).

Verificou-se, porém, que o sistema foi capaz de corrigir o erro e atingiu uma relação $C/N > 8 \text{ dB}$ em $k = 6$, ilustrado na Tabela 12.

Tabela 122. Primeira tentativa do segundo experimento

K	Movimento da Antena	E_K, dB	D_{K+1}, dB
0	-	5,32	-
1	1° para direita	4,42	- 0,90
2	2,59° para Esquerda	5,18	0,76
3	2,83° para Esquerda	6,16	0,98
4	1,74° para Esquerda	6,62	0,46
5	1,64° para Esquerda	7,54	0,92
6	0,97° para Esquerda	8,05	0,51

O valor final de $C/N = 8,05$ validou o segundo experimento.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi projetar e desenvolver um sistema inteligente para o alinhamento de antena com refletor parabólico aplicado a uma comunicação via satélite.

Os problemas encontrados no alinhamento manual foram abordados de forma sistêmica, através de um novo enfoque, gerando-se soluções computacionais.

Com base nas técnicas de alinhamento manual e com o auxílio de um especialista em alinhamento de antenas, foi possível gerar toda a arquitetura de hardware e software para o sistema inteligente de alinhamento automático.

Empregou-se a Lógica Fuzzy para realizar o alinhamento fino da antena receptora, diferentemente dos demais trabalhos apresentados na revisão bibliográfica. Não há na literatura trabalhos que envolvam uma preocupação com o alinhamento fino.

Os experimentos realizados, ilustrados nas tabelas 8 a 12 do capítulo 6, mostram que foram efetuadas poucas tentativas para se atingir o valor desejado e observa-se um tempo entre 2 a 5 min para realizar o alinhamento. Os resultados foram satisfatórios permitindo validar o sistema SIASAT.

7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Desenvolver e implementar o sistema de servomecanismo para que o sistema esteja completo;
- Desenvolver o sistema de comando remoto utilizando a internet como interface para a realização do alinhamento.
- Implementar o sistema para a realização do alinhamento da antena parabólica em elevação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI J., R. B. An optimised tracking antenna controller. **IEEE**, Dundee, v. 2, n. 5, p. 388-393, Setembro 1996.
- ARTHUR C., V. J. A satellite tracking k and ka band mobile vehicle antenna system. **IEEE**, California, v. 42, n. 4, p. 502-513, Novembro 1993.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory: analysis and designer**. John Wiley & Sons, 1997.
- BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON. **The Unified Modeling Language**. Addison Wesley, 2004.
- CRIS T. Antenna control system using step tracking algorithm with h controller. **International Journal of control automation and system**, v. 1, p. 1, 2003.
- ESTEVEES, L. C. **Antenas: teoria e aplicações**. Mac Graw Hill do Brasil, 1980.
- HA, T. T. **Digital Satellite Communications**. 1ª. ed. Macmillan Publishing Comp, 1986.
- HAWKINS et al. Tracking systems for satellite communications, Bristol, 135, n. 5ª, Outubro 1988.
- JJUM, B. Programando banco de dados em java 1ª. ed. São Paulo: Afiliada, 2008
- JONGKWON et al. Data link antenna control system design using a fuzzy controller, v. 48, p. 279-287, 2005.
- JONGKWON et al. Simplified fuzzy PID controller of data link antenna system for moving vehicles. **Lecture Notes in Computer Science**, Berlin, v. 4099, p. 1083-1088, 2006.
- KENJI. A study on a satellite antenna pointing measurement system. **IEEE**, Toquio, v. 238, n. 3, p. 285-282, fevereiro 1994.
- KRAUS, J. D. **Antenas**. Rio de Janeiro, 1983.
- KYEONG et al. A basic sudy on the azimuth tracking algorithm for mobile DBS reception antenna system. **Proceedings of ISAP2000**, Fukuoka, v. 21, n. 2, p. 1-4, Abril 2000.
- MARAL, G.; BOUSQUET, M. **Satellite Communication Systems: Systems, Techniques an Technology**. 4ª edição. ed. John Wiley & Sons Inc, 2002.
- MARTINS, C. N. M. Estudo analítico e numérico de um enlace digital de comunicações via satélite em condição orbita geoestacionária. INATEL. Santa Rita do Sapucaí, p. 208. 2004.
- NUNES, M. A. S. **Telecomunicações IV**. CDT - INATEL, v. 2º, 1986.
- ORBIT. www.orbit-cs.com/indoor-tracking-controller. **www.orbit-cs.com**, 2010. Acesso em: 29 Mar 2011.

- P.618-8. Propagation data prediction methods for the design of Earth-space telecommunication system, 2003.
- P.837-4. Characteristics of precipitation for propagation modeling, 2003.
- P.839-3. Rain height model for prediction methods, 2001.
- PO-KUANG; L., J.; C., K.-T. Ziegler-Nichols based intelligent fuzzy PID controller design for antenna tracking system. **Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists**, Hong Kong, v. 2, p. 1-6, Mar 2011.
- PROBECOM. www.probecom.cn/up_files/Probecom%20AC3000E%20control%20system%20.pdf. **www.probecom.cn**, 2008. Acesso em: 25 Mar 2012.
- REESE, G. **Database Programming with JDBC and Java**. 1ª edição. ed. Georgia: O`Reilly Media, 2000.
- RIBEIRO, J. A. J. Propagação de ondas eletromagnéticas - Princípios e aplicações. Santa Rita do Sapucaí: INATEL, 2003.
- ROBERT Ship mounted satellite tracking antenna with fuzzy logic control. **IEEE**, San Antonio, v.34, n.2, p. 639-645, Abr 1990
- ROSSY, D. **Satellite Communications**. Mc Graw Hill, 2001.
- SABINO, M. **Medidas radiométricas da atenuação por chuva em regiões tropicais e equatoriais**. Rio de Janeiro: CETUC-PUC, 1994.
- SOLTANI, N.; ROOZBEHI.; RAFAEL W. Reliable control of ship-mounted satellite tracking antenna. **IEEE**, 2010 v.8, May 2010
- STAHL, M. **Java USB API for Windows**. Zurich: Institute for Information Systems, 2003.
- VERTEX. <http://www.gdsatcom.com/Controls/Data%20Sheets/Model-133T.pdf>, 2009. Acesso em: Mar. 2011.
- XIAN. Research on Design of antenna tracking pointing control system for airborne platform. **IEEE**, Beijing, v. 16, p. 978-988, Abr.2009.
- YUTAKA et al. Beam steering control using the excitation coefficient decision method for an onboard phased-array-fed reflector antenna. **Proceedings of ISAP2000**, Fukuoka, v. 2, n. 3, p. 29-33, Abr. 2000.

ANEXO I

Desempenho das Modulações mais Empregadas em Enlaces via Satélite em Condição Geoestacionária

I.1. Introdução

Como a distância do enlace via satélite é muito grande, faz-se necessário o uso de potências elevadas, para que seja possível operar com taxas de erro de bit menores do que as máximas permitidas.

Além disso, a não linearidade dos transponders torna mais apropriada a utilização de modulações de envelope constante, ou seja, as baseadas em variação de fase ou frequência. Esta característica justifica o fato de não se utilizar em larga escala modulações *AM* e da família *M-QAM*. Nos enlaces via satélite as modulações mais comuns são *FM* e da família *M-PSK*.

I.2. Modulação em frequência

As aplicações voltadas para o mercado de dados e voz via satélite estão todas fundamentadas em tecnologia digital. A única aplicação analógica é a de transmissão de sinais de TV, que é mantida no Brasil em função do grande número de estações de recepção para uso residencial. Esta condição permite às emissoras nacionais suprir algumas deficiências de cobertura das redes terrestres.

A equação (I.1) oferece a relação sinal/ruído do sinal de vídeo demodulado, para um enlace via satélite com modulação FM.

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{RX}}{N} \cdot \frac{B}{f_V} \cdot \left(\frac{\Delta_f}{f_V}\right)^2 \cdot C \quad (I.1)$$

onde P_{RX} é a potência de recepção [W], N é a potência do ruído térmico [W], B é a largura de faixa do canal em frequência intermediária (FI), f_V é a máxima frequência do sinal modulante [Hz], Δf é o desvio máximo de frequência provocado pelo sinal modulante [Hz] e C_{pe} é a constante que depende da ponderação e da de-ênfase, conforme mostra a Tabela I1.

Tabela I 1. Valores da constante C_{pe}

C_{pe}	C_{pe} [dB]	Recurso empregado na demodulação
1	0	Sem rede de ponderação e de-ênfase
14,125	11,5	Com apenas rede de ponderação
1,413	1,5	Com apenas de-ênfase
19,953	13	Com rede de ponderação e de-ênfase

Para sinais de TV, a relação (S/N) deve ser expressa em função da potência do sinal de luminância (com amplitude de pico a pico) em relação a potência eficaz de ruído.

Esta condição é demonstrada na equação (I.2)

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{TV} = [2 \cdot \sqrt{2}]^2 \cdot \left(\frac{S}{N}\right) = 8 \cdot \left(\frac{S}{N}\right) \quad (I.2)$$

Trabalhando com as equações (I.1) e (I.2), tem-se:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{TV} = 12 \cdot \frac{P_{RX}}{N} \cdot \frac{B}{f_V} \cdot \left(\frac{\Delta f}{f_V}\right)^2 \cdot C_{pe} \quad (I.3)$$

Deve-se levar em consideração a resolução CCIR 405-1 que recomenda que o desvio de pico a pico provocado por um sinal padrão de vídeo com $1V_{pp}$, deve satisfazer $\Delta f_{pp} = 8$ MHz.

Deve-se ainda considerar que a excursão do sinal de luminância, corresponde a 71,4% do sinal de vídeo. Sendo assim a equação (I.3) pode ser expressa em função do desvio de pico a pico, como apresentado na equação (I.4).

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{TV} = 12 \cdot \frac{P_{RX}}{N} \cdot \frac{B}{f_V} \cdot \left(0,714 \cdot \frac{\Delta f_{pp}}{2} \cdot \frac{1}{f_V}\right)^2 \cdot C_{pe} \quad (I.4a)$$

Na escala logarítmica, resulta:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{TV} [dB] = -58,8 + \left(\frac{C}{N}\right) + 10 \cdot \log(B) + C_{pe} \quad (I.4b)$$

Onde (C/N) é a relação portadora/ruído, igual à relação (P_{RX}/N) .

O gráfico da Figura I 1 apresenta o comportamento da relação (S/N) em função da relação (C/N) , considerando $B = 20$ MHz e $C_{pe} = 13$ dB.

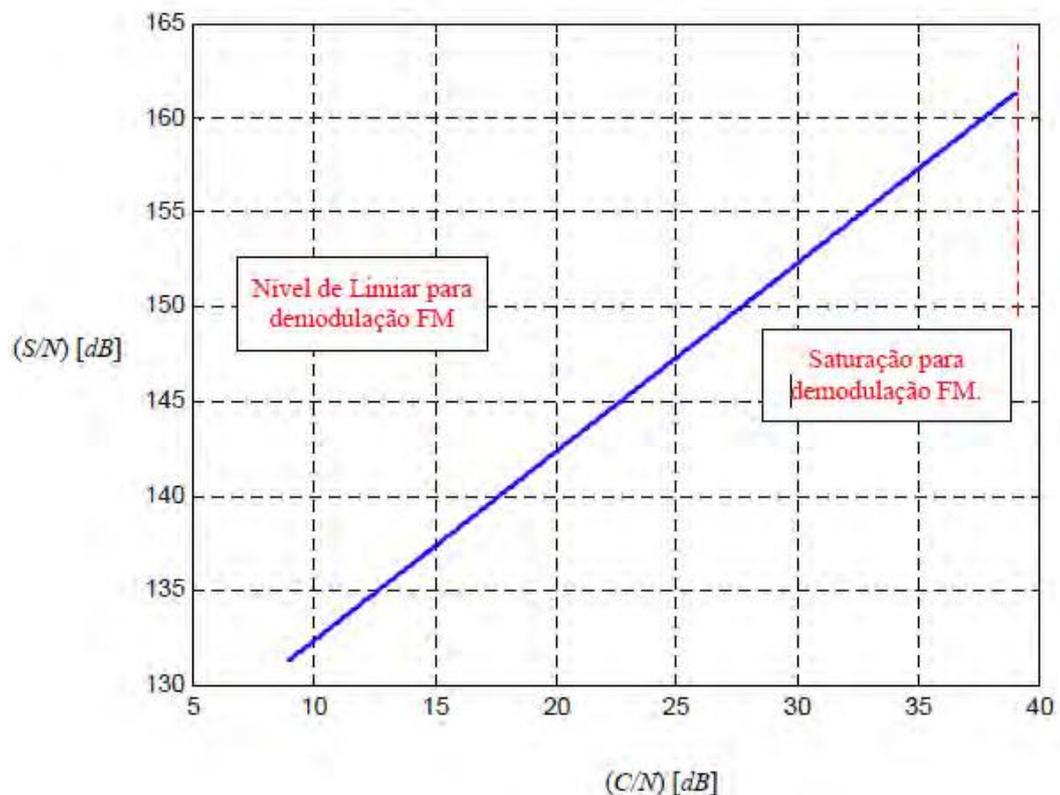


Figura I 1. Curva de desempenho da demodulação FM.

Fonte: (MARTINS, 2004)

I.3. Modulação PSK

As modulações PSK (Phase Shift Keying) se baseiam na alteração de fase da portadora em função da amplitude do sinal digital modulante. Para o sistema BPSK (binário), cada bit de entrada provoca uma variação de fase, como apresentado na Figura I 2.

Através da forma de onda no domínio do tempo é possível perceber que existem duas fases atreladas aos símbolos binários. Para o nível lógico alto a fase é 0° e para o nível lógico baixo a fase é 180° . Esta condição é visualizada de forma direta através do diagrama de constelação apresentado na Figura I 3.

A modulação BPSK trabalha com duas posições no diagrama de constelação e cada posição de fase representa um símbolo. Desta forma pode-se concluir que neste caso é transmitido um bit por símbolo.

Nas modulações de ordens M-ária, sendo M a ordem da modulação mais elevada, existe um aumento no número de símbolos e conseqüentemente o aumento do número de bits por símbolo.

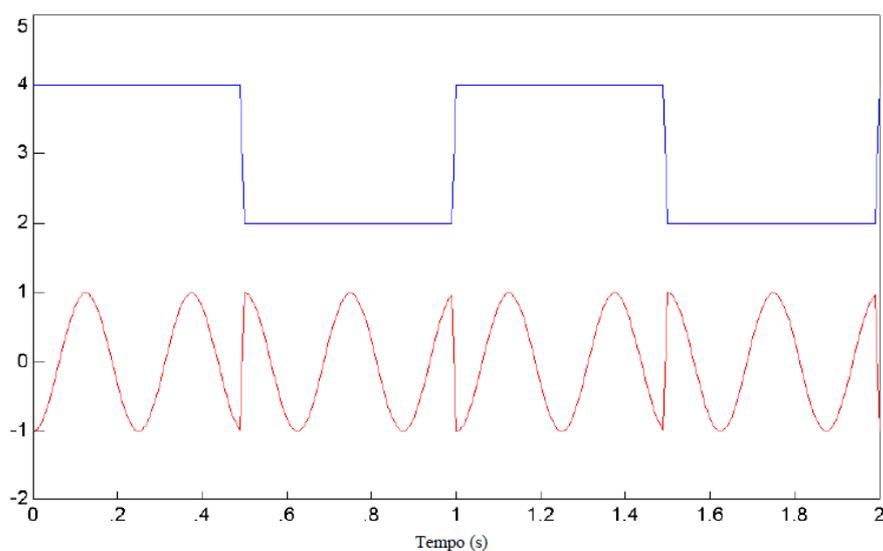


Figura I 2. Forma de onda de um sinal modulado em BPSK.

Fonte: (MARTINS, 2004)

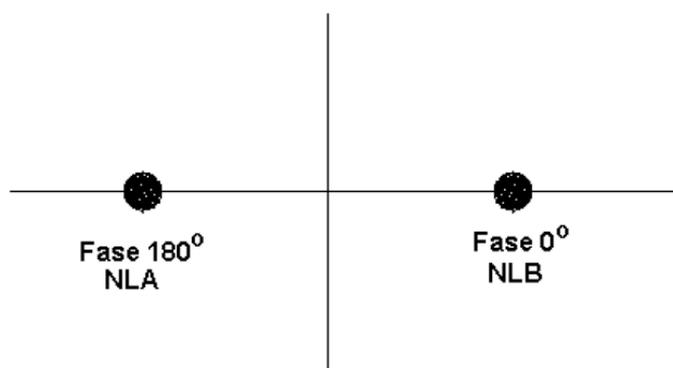


Figura I 3. Diagrama de constelação da modulação *BPSK*.

Para modulação *QPSK* existem quatro símbolos com quatro posições de fase em quadratura, como pode ser visualizado na Figura I 4. Cada símbolo é codificado por dois bits, fazendo com que esta modulação ofereça maior capacidade de transmissão do que a *BPSK*, ocupando a mesma largura de faixa.

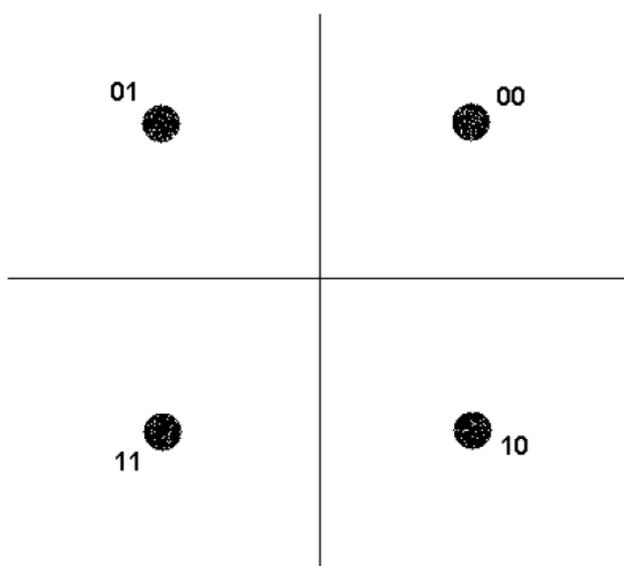


Figura I 4. Diagrama de constelação da modulação *QPSK*.

Para modulação *8PSK* têm-se três bits por símbolo e conseqüentemente oito posições de fase no diagrama de constelação, como pode ser visualizado na Figura I 5.

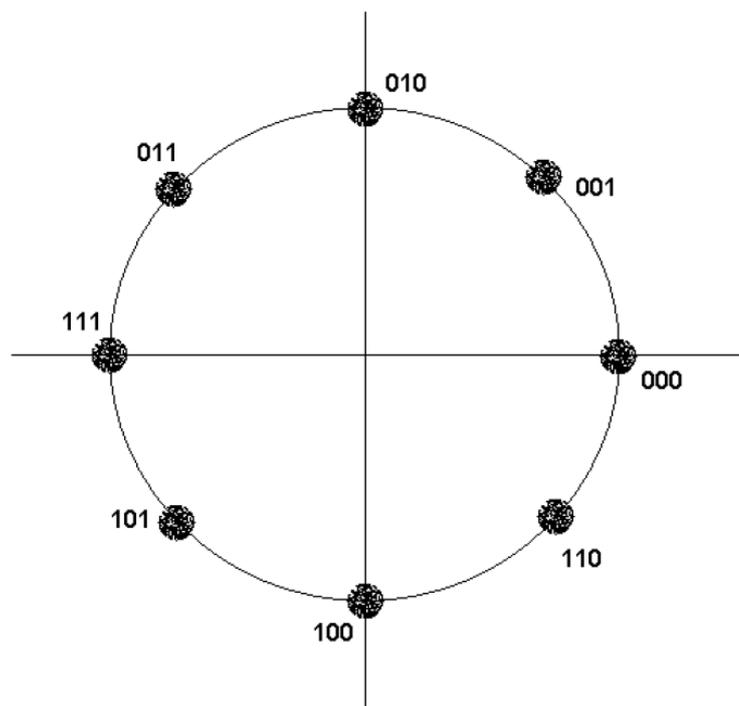


Figura I 5. Diagrama de constelação da modulação 8PSK.

Nos canais com a presença de ruído e distorções, existe a possibilidade de um símbolo ser interpretado como outro, gerando erro. Quanto maior a ordem da modulação, maior será a probabilidade de um bit ser confundido com outro, pois o espaçamento entre os mesmos diminui. Conseqüentemente, a taxa de erro de bit aumenta com o aumento da ordem da modulação M , mantida a mesma relação E_b/N_0 (energia de um bit / densidade de potência do ruído), como mostra a Figura I 7.

I.4. Modulação 16QAM

Na modulação QAM , além da variação de fase existe a variação de amplitude em função do símbolo que será transmitido. O diagrama de constelação do sinal 16 QAM , apresentado na Figura I.6, mostra que cada símbolo possui uma fase e uma amplitude.

A variação conjunta de fase e amplitude faz a modulação QAM exigir menos potência para oferecer a mesma taxa de erro de bit das modulações PSK de mesma ordem. Por este

motivo, para modulações com ordem superior a 16, é usual trabalhar-se com *QAM* em vez de *PSK*, como mostra a Figura I 6.

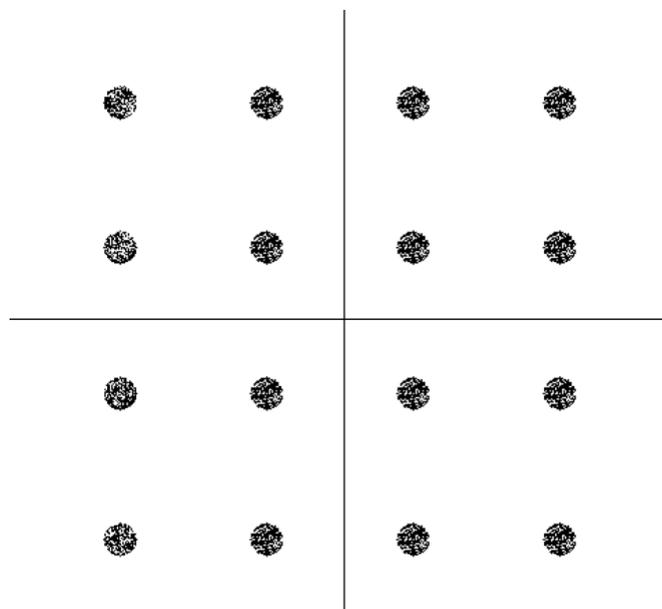


Figura I 6. Diagrama de constelação da modulação *16QAM*.

Com o aumento da ordem de modulação, há a redução da largura de faixa do canal, como indica a equação (I.5), mas em contrapartida existirá a necessidade de aumento no nível do sinal da portadora, para manter a mesma taxa de erro, como apresentado na Figura I 7:

$$B = \frac{R}{\log_2 M} \cdot (1 + \alpha) \quad (\text{I.5})$$

onde B é a largura de faixa do canal [Hz], R é taxa de transmissão [bps], M é a ordem da modulação e α é o fator de "roll-off" dos filtros utilizados no sistema.

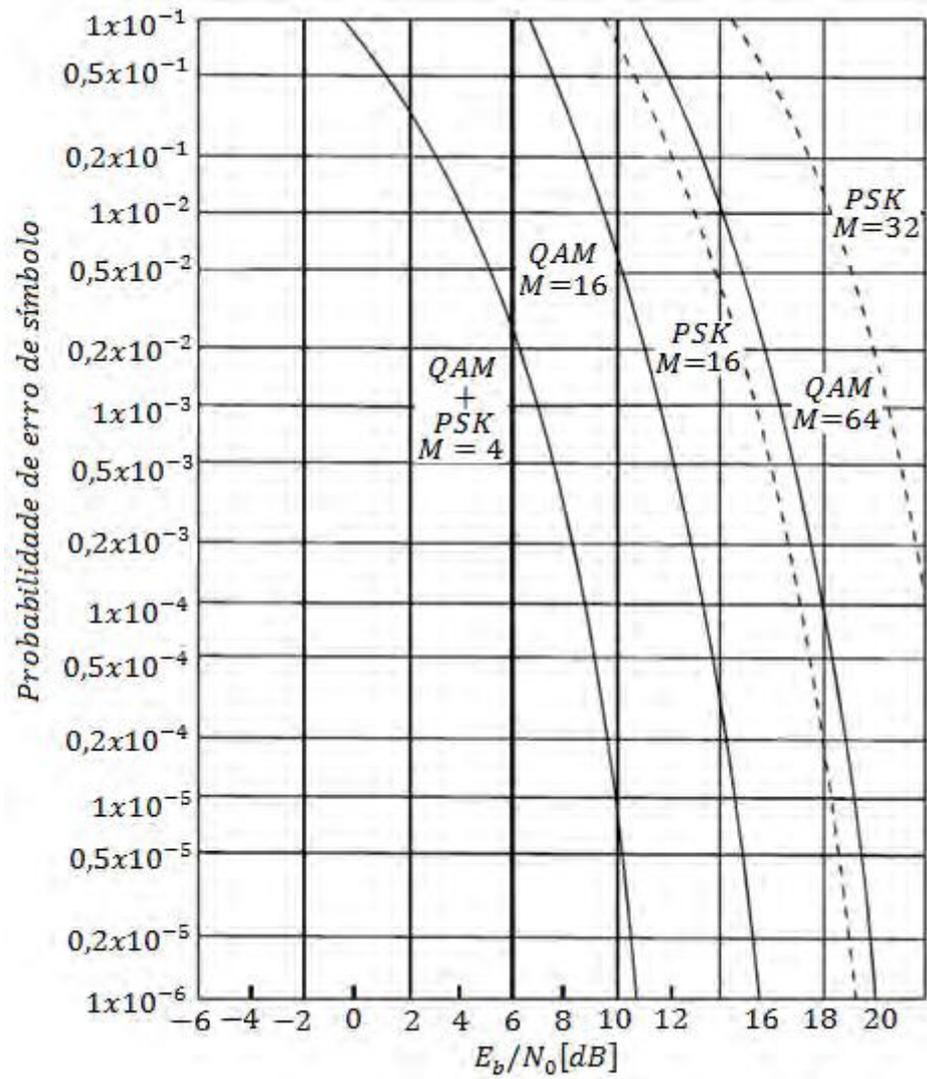


Figura I 7. Probabilidade de erro de símbolo em função da relação (E_b/N_0).

ANEXO II

Temperatura Equivalente de Ruído, Figura de Ruído e Fator de Mérito para Estações de Recepção G/T

II.1. Temperatura Equivalente de Ruído

A temperatura equivalente de ruído de um componente pode ser definida como sendo o valor de temperatura em que um resistor padrão gera ruído com nível equivalente ao gerado pelo componente em questão, na temperatura de operação.

Quanto menor for este parâmetro, melhor será o desempenho do componente. É um parâmetro baseado em uma grandeza física, definido de forma matemática. Para um amplificador ideal tem-se (HA, 1986):

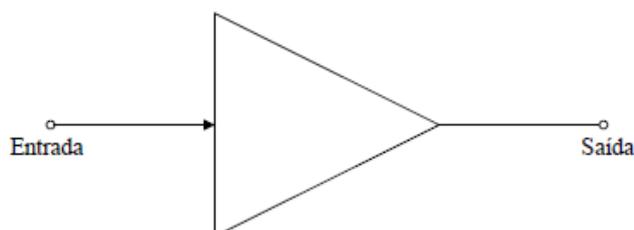


Figura II 1. Amplificador ideal.

$$N_{I-in} = K \cdot T_0 \cdot B \quad (\text{II.1})$$

$$N_{I-out} = (K \cdot T_0 \cdot B) \cdot G \quad (\text{II.2})$$

Onde N_{I-in} é o nível do ruído de entrada no amplificador ideal [W], N_{I-out} é o nível do ruído de saída no amplificador ideal [W], K é a constante de Boltzman ($K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K]), T_0 é a temperatura que se encontra submetido o amplificador [K] e B é a largura de faixa do canal [Hz].

No caso de um amplificador real, além da parcela de ruído térmico amplificada, existirá em sua saída outra parcela referente a própria constituição física do componente. Esta parcela pode ser representada em função da temperatura equivalente de ruído, como apresentada na equação (II.3).

$$N_{I-out} = (K.T_0.B).G + (K.T_e.B).G \quad (II.3)$$

II.2. Figura de Ruído.

Por definição a figura de ruído é a razão entre a relação sinal/ruído de entrada e a relação sinal/ruído de saída, como apresentada na equação (II.4).

$$F = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} \quad (II.4)$$

Para um amplificador ideal, a figura de ruído pode ser calculada como apresentado abaixo:

$$F = \frac{\left(\frac{S}{K.T_0.B}\right)_{in}}{\left(\frac{S.G}{(K.T_0.B).G}\right)_{out}} = 1 \quad (II.5)$$

Onde G é o ganho oferecido pelo amplificador.

No amplificador ideal a relação portadora/ruído de saída se mantém igual a de entrada, pois o amplificador em nada contribui com o aumento do ruído. O mesmo não ocorre com o amplificador real, como apresentado na equação (II.6).

$$F = \frac{\left(\frac{S}{K.T_0.B}\right)_{in}}{\left(\frac{S.G}{(K.(T_0+T_e).B).G}\right)_{out}} = \frac{T_0+T_e}{T_0} = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (II.6)$$

Conseqüentemente, tem-se:

$$T_e = (F - 1) \cdot T_e \quad (\text{II.7})$$

II.3. Amplificadores em cascata

O comportamento final de uma cascata de amplificadores pode ser analisado com a ajuda da Figura II 2.

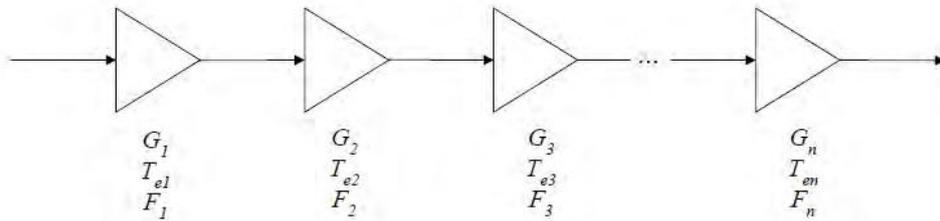


Figura II 2. Associação de amplificadores.

A figura de ruído de todo o conjunto pode ser obtida através da relação entre as grandezas (S/N) de entrada e saída. Para determinar a relação sinal/ruído de saída, tem-se os níveis da portadora e do ruído apresentados nas equações (II.8) e (II.9).

$$S_{out} = S \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \dots \cdot G_n \quad (\text{II.8})$$

$$N_{out} = K \cdot B \{ (T_0 + T_{e1}) \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \dots \cdot G_n + T_{e2} \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \dots \cdot G_n + \dots + T_{en} \cdot G_n \} \quad (\text{II.9})$$

Conseqüentemente a figura de ruído do conjunto será dada pela equação apresentada a seguir:

$$F = \frac{\left(\frac{S}{K \cdot T_0 \cdot B} \right)_{in}}{\left(\frac{S \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \dots \cdot G_n}{K \cdot B \{ (T_0 + T_{e1}) \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \dots \cdot G_n + T_{e2} \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \dots \cdot G_n + \dots + T_{en} \cdot G_n \}} \right)_{out}} \quad (\text{II.10a})$$

$$F = \frac{1}{T_0} \left[(T_0 + T_{e1}) + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 \cdot \dots \cdot G_{n-1}} \right] \quad (\text{II.10b})$$

Com as equações (II.6), (II.7) e (II.10b) é possível obter as equações (II.11) e (II.12), que apresentam os valores da figura de ruído e da temperatura equivalente de ruído para todo conjunto.

$$F = F_1 + \frac{(F_2-1)}{G_1} + \frac{(F_3-1)}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{(F_n-1)}{G_1 \cdot \dots \cdot G_{n-1}} \quad (\text{II.11})$$

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 \cdot \dots \cdot G_{n-1}} \quad (\text{II.12})$$

Como por definição a atenuação é o inverso do ganho, pode-se analisar estruturas híbridas com amplificadores e atenuadores, como apresentado na Figura II 3 e nas equações (II.13) e (II.14).

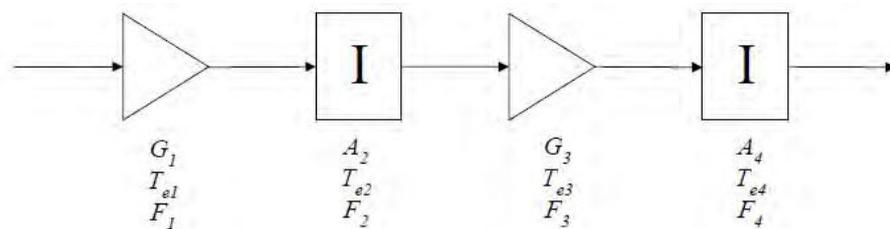


Figura II 3. Associação híbrida de amplificadores e atenuadores.

$$F = F_1 + \frac{(F_2-1)}{G_1} + \frac{(F_3-1)}{G_1} \cdot A_2 + \dots + \frac{(F_n-1)}{G_1 \cdot G_3} \cdot A_2 \quad (\text{II.13})$$

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1} \cdot A_2 + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 \cdot G_3} \cdot A_2 \quad (\text{II.14})$$

II.4. Fator de mérito para estações de recepção (G/T)

Para as estações de recepção via satélite, a relação G/T (ganho da antena receptora/temperatura de ruído) mostra o quanto é eficiente a estrutura de recepção, pois

quanto mais elevados forem os valores desta relação, melhores serão os resultados de desempenho dos enlaces de descida.

Para encontrar esta relação, leva-se em consideração a temperatura equivalente de ruído de toda a estrutura e o ganho da antena. A Figura II 4 apresenta uma estação de recepção, através da qual se pode visualizar como obter a relação G/T(HA, 1986).

A temperatura equivalente da estação terrena deverá levar em consideração os seguintes valores parciais:

- Temperatura de Ruído da Antena;
- Temperatura de Ruído do Iluminador;
- Temperatura de Ruído do *LNA* ou *LNB*;
- Temperatura de Ruído do Cabo entre o *LNA* ou *LNB* e os equipamentos de Recepção.

$$T_e = T_{e-ANT} + T_{e-ILUM} + T_{e-AMP} \cdot A_{ILUM} + \dots + \frac{T_{e-CABO\ 1}}{G_{AMP}} \cdot A_{ILUM} \quad (II.15)$$

Onde T_{e-ANT} é a temperatura equivalente de ruído da antena [K], T_{e-ILUM} é a temperatura equivalente de ruído do iluminador [K], T_{e-AMP} é a temperatura equivalente de ruído do *LNA* ou *LNB* [K], $T_{e-CABO\ 1}$ é a temperatura equivalente de ruído do Cabo 1 [K], A_{ILUM} atenuação oferecida pelo iluminador e G_{AMP} é o ganho do *LNA* ou *LNB*.

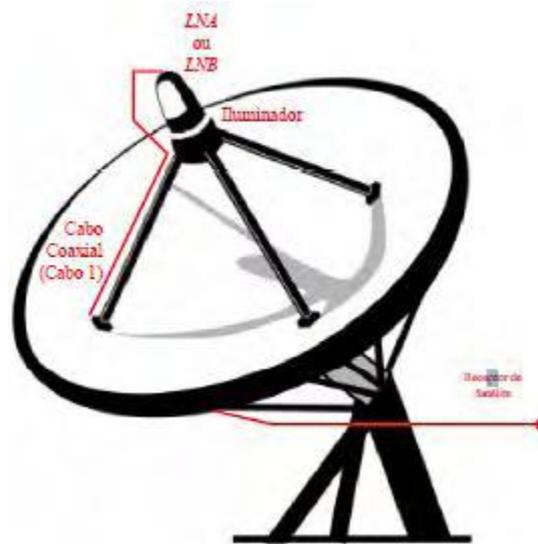


Figura II 4. Estação básica de recepção de sinais via satélite.

ANEXO III

Atenuações nos Enlaces via Satélite

As atenuações presentes em um enlace via satélite podem ser divididas em dois grupos básicos. O primeiro grupo está relacionado com o meio de propagação e as condições de radiação, resultando no cálculo das atenuações por espaço livre, por desalinhamento, por erro de polarização e por chuva.

O segundo grupo leva em consideração as atenuações em componentes passivos empregados nas estações de transmissão e recepção, tais como: conectores, cabos, flanges de conexão, guias de onda e outros. É importante ressaltar que, nestes enlaces, não existe obstrução por obstáculos, contando sempre com visada direta entre os pontos de transmissão e recepção.

III.1. Atenuação por espaço livre

A atenuação por espaço livre deve-se ao fato de o sinal sofrer dispersão ao longo do percurso de propagação, pela própria natureza de radiação dos elementos utilizados na transmissão. Além disso, na recepção, a área efetiva das antenas é finita, captando apenas parte da energia da frente de onda. Sendo assim, o nível de recepção será muito menor que o de transmissão e a relação entre os mesmos caracterizará a atenuação em espaço livre, como apresentado na equação (III.1)(RIBEIRO, 2003):

$$A_e = 10 \cdot \log \frac{P_{TX}}{P_{RX}} \cong 10 \cdot \log \frac{f^2 \cdot d^2}{1754,6} \quad (\text{III.1})$$

Na escala logarítmica tem-se:

$$A_e \cong 32,44 + 20 \cdot \log f + 20 \cdot \log d \quad (\text{III.2})$$

Onde: A_e é a atenuação por espaço livre [dB];

P_{TX} é a potência de transmissão [W];

P_{RX} é a potência na recepção [W];

f é a frequência de operação do enlace [MHz]

d é a distância do enlace [Km].

III.2. Atenuação por desalinhamento de antenas

Nos enlaces de subida e descida, existem duas antenas, sendo uma delas da estação terrena e a outra da estação orbital. Estas antenas podem ficar desalinhadas, pois o satélite está sujeito a pequenas variações orbitais.

Todo e qualquer desalinhamento é acompanhado de atenuação devido à redução de ganho da antena, na radial deslocada da direção de máximo.

Quando as antenas terrestres são de pequeno porte, a variação da posição orbital do satélite não resulta em variações tão elevadas de ganho.

No entanto, quando se trabalha com antenas de grande porte, é extremamente importante a utilização de sistemas de rastreamento, para que a comunicação seja mantida em toda e qualquer condição de operação.

Com auxílio da Figura III 1 as perdas por alinhamento nos dois extremos do enlace podem ser calculadas através das equações (III.3) e (III.4) (MARAL e BOUSQUET, 2002):

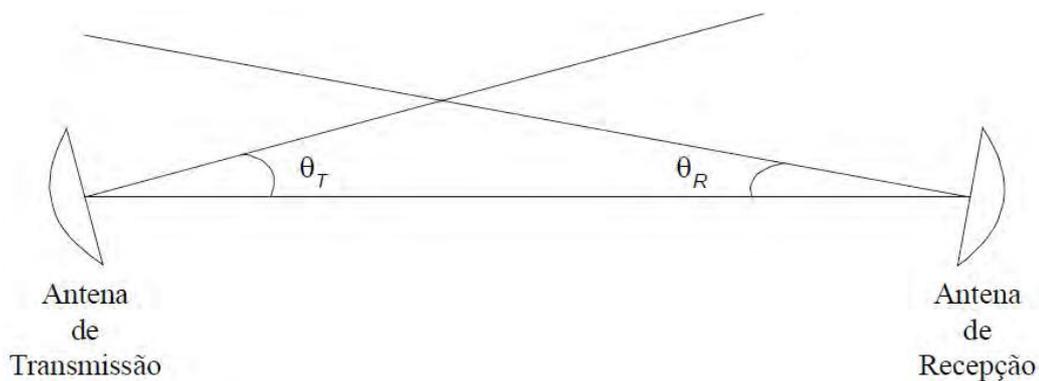


Figura III 1. Geometria do link, para análise da perda por alinhamento

$$A_{A-TX} = 12 \cdot \left(\frac{\theta_T}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (III.3)$$

$$A_{A-RX} = 12 \cdot \left(\frac{\theta_R}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (III.4)$$

Onde: A_{A-TX} é a atenuação por alinhamento na antena de transmissão [dB];

A_{A-RX} é a atenuação por alinhamento na antena de recepção [dB];

θ_T é o ângulo entre a reta que liga os dois extremos do enlace e a radial de máximo do diagrama de radiação da antena de transmissão ($^{\circ}$);

θ_R é o ângulo entre a reta que interliga os dois extremos do enlace e a radial de máximo do diagrama de radiação da antena de recepção ($^{\circ}$).

As variações orbitais dos satélites são acompanhadas e corrigidas pelas estações de controle das operadoras de terra, que são responsáveis em manter estas variações na posição orbital, dentro de limites impostos por normas internacionais.

A recomendação ITU-R (P.839-3, 2001) determina que um enlace com satélite geoestacionário admita variações máximas na condição de operação do satélite que não ultrapasse $0,2^{\circ}$ o de desvio em suas coordenadas. A recomendação permite que durante os procedimentos de correção da posição orbital este valor atinja, no máximo, $0,3^{\circ}$. Com estes

valores pode-se calcular as perdas por desalinhamento, levando em consideração o ganho e as características das antenas envolvidas no enlace.

III.3. Atenuação por erros de polarização

A perda por erro entre a polarização da onda e o posicionamento da antena, deve ser levada em consideração, pois afeta, principalmente, as estações que trabalham com transmissão e recepção simultâneas.

Ao trafegar pela ionosfera, a onda eletromagnética sofre uma rotação nos vetores de campo elétrico e magnético, chamada de Rotação de Faraday, alterando a polarização da onda. O ângulo de rotação é inversamente proporcional ao quadrado da frequência de operação, como pode ser visualizado na Tabela III.1. Além disso, o sentido de giro é o mesmo para enlaces de subida ou descida.

Tabela III 1. Comportamento da ionosfera ao longo do espectro

Efeito	Dependência	Frequência					
		0,1 GHz	0,25 GHz	0,5 GHz	1 Ghz	3 GHz	10 GHz
Rotação de Faraday	$1/f^2$	30 rotações	4,8 rotações	1,2 rotações	108°	12°	1,1°

Para estações que trabalham em apenas um sentido, ou seja, somente como transmissora ou como receptora, este erro pode ser solucionado com a rotação do sistema de iluminação da antena. No entanto, para sistemas que operam com transmissão e recepção de forma simultânea, esta solução não se aplica, pois, se for solucionado o problema para transmissão, a diferença se agrava para recepção e vice-versa.

Com a equação (III.5) e com os valores da Tabela III.1, percebe-se que, para frequências em Banda C e Banda Ku, as perdas por polarização devido à Rotação de Faraday,

irão variar de 0,2 dB a 0,0016 dB. Para as bandas mais elevadas este efeito pode ser desconsiderado. Estas perdas são estimadas por:

$$A_{POL} = -20 \cdot \log(\cos \xi) \quad (\text{III.5})$$

Onde: A_{POL} é a atenuação por polarização [dB] e ξ é o erro de polarização devido a Rotação de Faraday [°].

Nos casos onde a onda eletromagnética possui polarização circular e é recebida por uma antena de polarização linear, ou vice-versa, a perda por erro de polarização deve ser considerada igual a 3 dB.

III.4. Atenuação por chuva

Para comunicação via satélite, um dos fatores de grande importância é o cálculo de atenuação por chuva, para bandas de frequência que ultrapassam 10 GHz. A atenuação por chuva é influenciada por vários fatores e, dentre eles, cabe destacar:

- A frequência de operação do enlace;
- A taxa pluviométrica da localidade onde está instalada a estação;
- A polarização da onda eletromagnética;
- A posição geográfica da estação terrena;
- A posição geográfica do satélite.

III.4.1. Cálculo do fator de atenuação

A atenuação por chuva tem seu cálculo iniciado através do fator de atenuação para o enlace, como apresentado na equação (III.6):

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha \quad (\text{III.6})$$

Onde: $R_{0,01}$ é a taxa pluviométrica da estação para 0,01% da média anual e k e α são coeficientes numéricos dados pelas equações (III.7) e (III.8).

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau] / 2 \quad (\text{III.7})$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V] / 2k + [(k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau] / 2k \quad (\text{III.8})$$

Onde: θ é o ângulo de elevação da antena da estação terrena e τ é o ângulo de polarização da onda com relação à direção horizontal.

Sabe-se que o ângulo $\tau = 45^\circ$ quando a polarização é circular. Para encontrar os valores de k e α , através das equações (III.7) e (III.8), deve-se obter inicialmente as componentes vertical e horizontal, como proposto nas equações (III.9) e (III.10).

$$\log k = \sum_{j=1}^3 \left(a_j \cdot \exp \left[- \left(\frac{\log f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \cdot \log f + c_k \quad (\text{III.9})$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^4 \left(a_i \cdot \exp \left[- \left(\frac{\log f - b_i}{c_i} \right)^2 \right] \right) + m_\alpha \cdot \log f + m_\alpha \quad (\text{III.10})$$

Onde f é a frequência de operação em (GHz) e os parâmetros a , b , c , m_k , c_k e m_α são apresentados através das Tabelas (III.2) e (III.3) como coeficientes empíricos para obtenção dos valores de k e α nas polarizações vertical e horizontal, aqui representados por: k_H (ou k_V) e α_H (ou α_V), respectivamente.

Tabela III 2. Coeficientes empregados nas equações (III.9) e (III.10) para a polarização horizontal

	a	b	c		m_k	c_k	m_α	m_α
$j = 1$	0.3364	1.1274	0.2916	$j = 1$				
2	0.7520	1.6644	0.5175	2	1.9925	-4.4123	0	0
3	-0.9466	2.8496	0.4315	3				
$i = 1$	0.5564	0.7741	0.4011	$i = 1$				
2	0.2237	1.4023	0.3475	2	0	0	-0.08016	0.8993
3	-0.1961	0.5769	0.2372	3				
4	-0.02219	2.2959	0.2801	4				

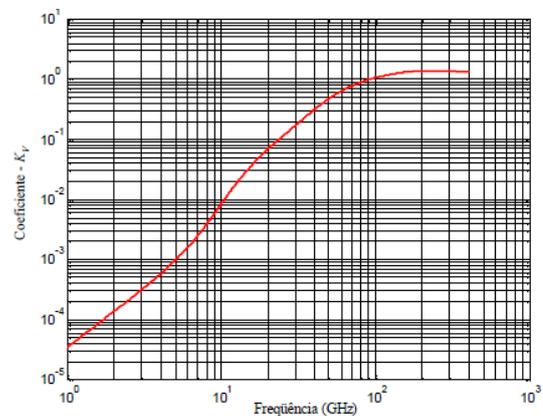
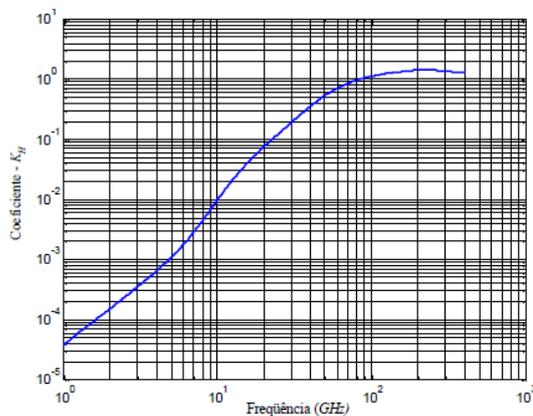
k_H α_H

As Figura III 2 (a), III 2 (b), III 3 (a) e III 3 (b) apresentam os gráficos de k_H , k_V , α_H e α_V em função da frequência, respectivamente, Através destes gráficos, visualiza-se o comportamento de cada fator e obtém-se informações aproximadas com uma maior rapidez.

Tabela III 3. Coeficientes empregados nas equações (III.9) e (III.10) para a polarização vertical

	a	b	c		m_k	c_k	m_α	m_α
$j = 1$	0.3023	1.1402	0.2826	$j = 1$				
2	0.7790	1.6723	0.5694	2	1.9710	-4.4535	0	0
3	-1.0022	2.9400	0.4823	3				
$i = 1$	0.5463	0.8017	0.3657	$i = 1$				
2	0.2158	1.4080	0.3636	2	0	0	-0.07059	0.8756
3	-0.1693	0.6353	0.2155	3				
4	-0.01895	2.3105	0.2938	4				

k_V α_V

Figura III 2. (a) k_H em função da frequência; (b) k_V em função da frequência

É importante ressaltar que as equações (III.9) e (III.10) consideram apenas os dados de grande abrangência no estudo do enlace, enquanto as equações (III.7) e (III.8) trabalham com variáveis ligadas a particularidades da estação terrena e da forma de propagação do sinal.

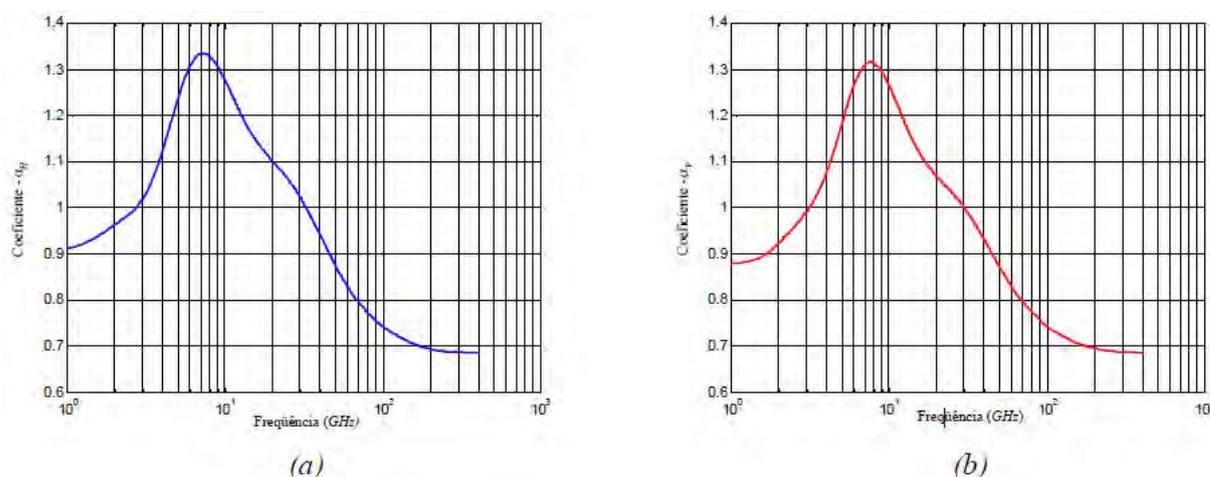


Figura III 3 (a) α_H em função da frequência; (b) α_V em função da frequência.

III.4.2. Cálculo de atenuação por chuva no enlace via satélite

Com o fator de atenuação apresentado na equação (III.6), pode-se calcular a atenuação oferecida por um dado enlace, se a distância percorrida pela onda, sob a célula de chuva, for devidamente estimada. Esta condição é apresentada na equação (III.11):

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot L_E \quad (\text{III.11})$$

Onde $A_{0,01}$ é a previsão de atenuação excedida para 0,01% da média anual da taxa pluviométrica e L_E é o comprimento efetivo percorrido pela onda, dentro da condição de chuva.

A análise do percurso da onda dentro da célula de chuva pode ser visualizada através da Figura III.4, que apresenta as principais dimensões a serem analisadas no enlace.

A altura da chuva h_R com relação ao nível do mar pode ser calculada através da recomendação ITU-R(P.839-3, 2001). Esta norma é acompanhada de um mapa internacional que apresenta a altura inicial da chuva para todas as localidades em diversas partes do globo terrestre. Estes dados também podem ser obtidos de forma tabelada pela ITU(P.839-3, 2001).

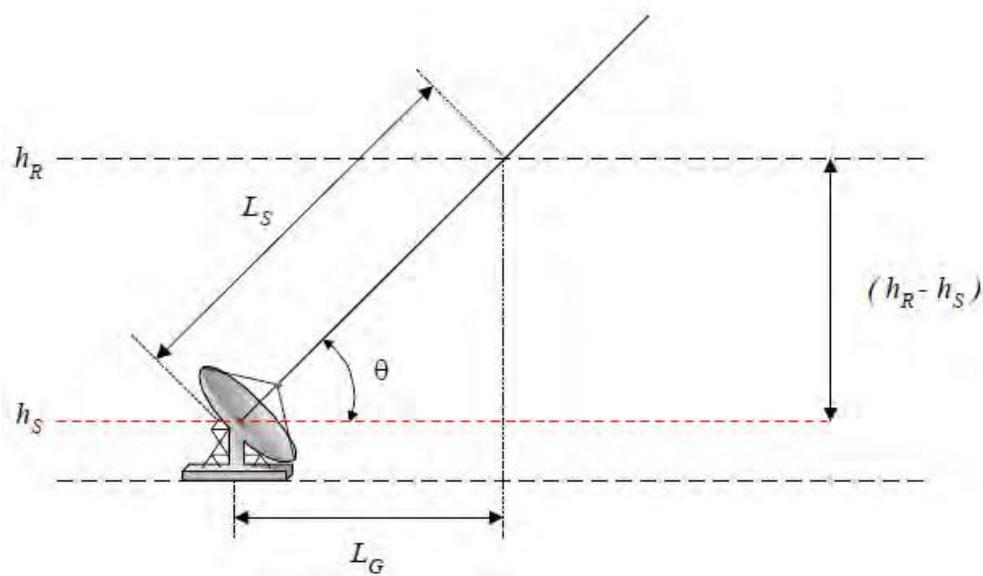


Figura III 4. Representação esquemática do enlace entre a estação terrestre e a estação orbital.

No entanto, para o Brasil existe um estudo mais detalhado desta medida, realizado pelo Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (SABINO, 1994), que permite a determinação da altura da chuva, conforme equação (III.12):

$$h_R = 3,8. [1 + e^{(-0,1.R_{0,01})}] \quad (\text{III.12})$$

Pode-se visualizar através do gráfico da Figura III.5, que a altura da chuva tende a se manter constante a partir de taxas pluviométricas superiores a 80 mm/h.

Os resultados do CETUC(SABINO, 1994) foram obtidos considerando-se várias localidades no Brasil.

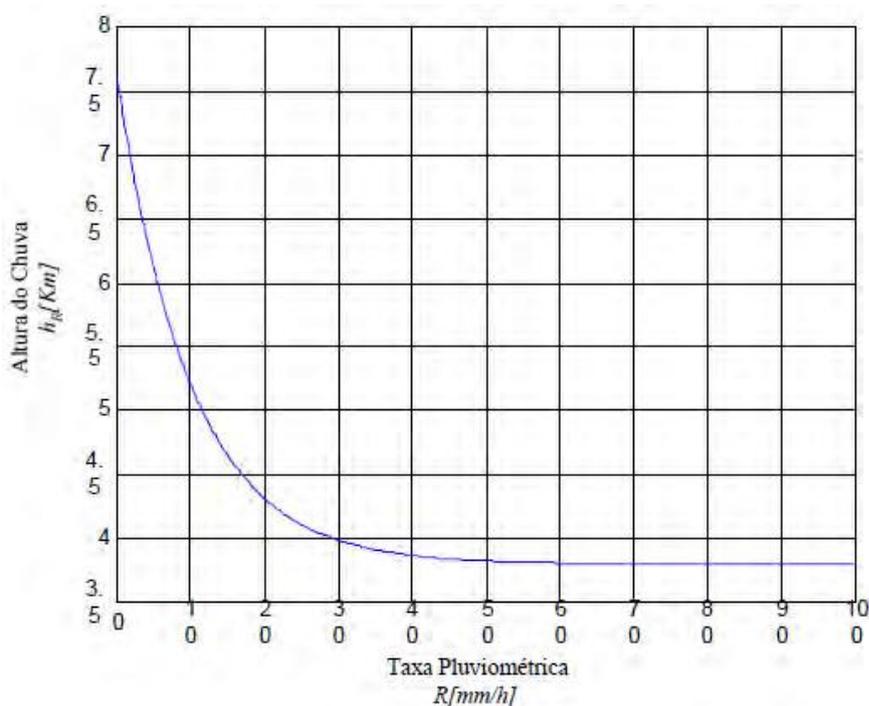


Figura III 5. Altura efetiva da chuva, com relação ao nível do mar em função da taxa pluviométrica.

A recomendação ITU-R (P.618-8, 2003) possibilita a determinação da dimensão L_S , considerando o ângulo de elevação $\theta < 5^\circ$ ou $\theta > 5^\circ$. No entanto, neste trabalho a equação (III.13) destaca apenas os valores de L_S para $\theta > 5^\circ$, pois esta é a condição típica de operação dos enlaces via satélite na concepção geoestacionária, ou seja,

$$L_S = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad (\text{III.13})$$

Onde h_s é a altura da estação terrena com relação ao nível do mar. Cabe salientar que, se $(h_R - h_s)$ for menor ou igual a zero, a atenuação por chuva, para qualquer porcentagem de tempo, é igual a zero.

Na Figura III.4, tem-se a projeção de L_S , chamada de dimensão L_G , que pode ser calculada através da equação (III.14).

$$L_G = L_S \cdot \cos \theta \quad (\text{III.14})$$

Devido ao caráter aleatório do deslocamento da célula de chuva ao longo do trajeto do sinal e a variação da dimensão da célula de chuva em função da intensidade, deve-se calcular o valor do fator de redução horizontal, para 0,01% do tempo, como demonstrado na equação (III.15):

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \cdot \gamma_R}{f}} - 0,38(1 - e^{-2 \cdot L_G})} \quad (\text{III.15})$$

O fator de ajuste vertical/temporal para 0,01% pode ser obtido através da equação (III.16):

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \cdot \left(31(1 - e^{-(\theta/(1+x))}) \sqrt{\frac{L_R \cdot \gamma_R}{f^2}} - 0,45 \right)} \quad (\text{III.16})$$

O valor de L_R é calculado em função do parâmetro através da equação (III.17):

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G \cdot r_{0,01}} \right) \quad (\text{III.17})$$

$$\text{Se } \zeta > \theta, \text{ temos que } L_R = \frac{L_G \cdot r_{0,01}}{\cos \theta} \quad (\text{III.18})$$

$$\text{Se } \zeta < \theta, \text{ temos que } L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \quad (\text{III.19})$$

- Para latitude da estação terrena φ tem-se:

$$|\varphi| < 36^\circ \rightarrow x = 36 - |\varphi|(^{\circ}) \quad (\text{III.20})$$

$$|\varphi| > 36^\circ \rightarrow x = 0 (^\circ) \quad (\text{III.21})$$

Finalmente, o comprimento efetivo percorrido pela onda, sob a célula de chuva, é dado pela equação (III.22):

$$L_E = L_R \cdot v_{0,01} \quad (\text{III.22})$$

Os cálculos das atenuações por chuva nas bandas Ku e Ka são de grande importância para os enlaces de comunicação via satélite. No entanto, em banda C as atenuações em função da chuva não assumem valores significativos. Por este motivo, é bastante comum os feixes dos satélites que cobrem as regiões tropicais e equatoriais operarem, preferencialmente, em banda C, principalmente quando o diagrama de cobertura é por zona ou global.

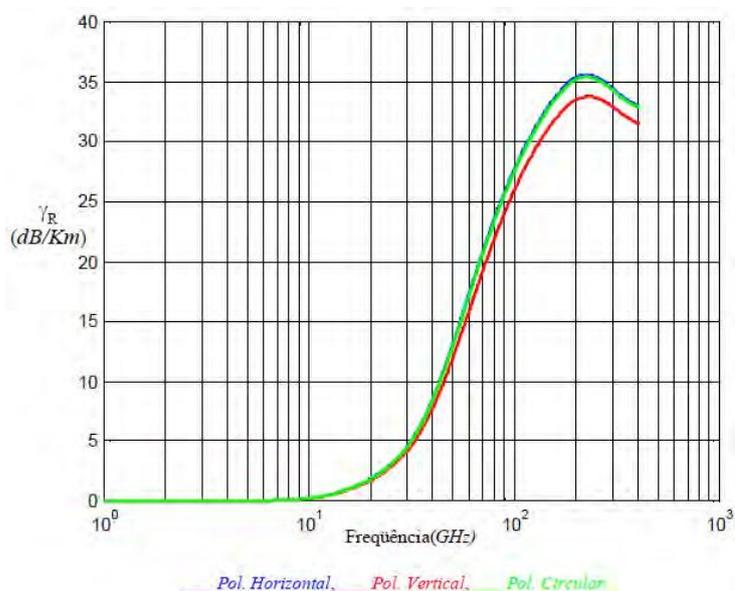


Figura III 6. Fator de atenuação (γ_R) em função da frequência.

A Figura III 6 apresenta a variação do fator de atenuação em função da frequência, considerando a taxa pluviométrica fixa em 100 [mm/h] e o ângulo de elevação da estação

terrena igual à 50° . Pode-se verificar que o valor aumenta, consideravelmente, a partir de 10 GHz.

Nas regiões tropicais e equatoriais os valores da taxa pluviométrica variam entre 95 e 145 mm/h, enquanto em regiões de clima temperado, os valores se encontram entre 19 e 42 mm/h, de acordo com a recomendação ITU-R (P.837-4, 2003).

Esta condição confirma a dificuldade de operação em banda K_u utilizando-se coberturas globais em regiões com maiores índices de precipitação. A Figura III 7 apresenta a variação do fator de atenuação em função da taxa pluviométrica, considerando que a frequência se mantém constante em 12 GHz, o ângulo de elevação da estação terrena é igual a 50° com a polarização horizontal.

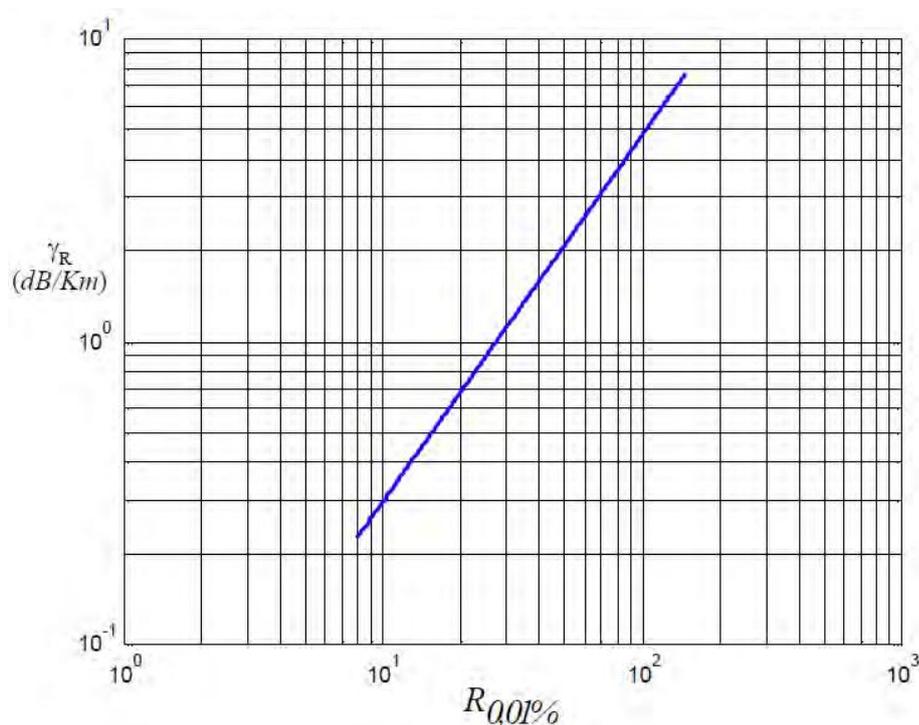


Figura III 7. Fator de atenuação γ_R em função da taxa pluviométrica.

III.5. Atenuação de componentes passivos da estação terrena de transmissão

As atenuações oferecidas pelos componentes passivos nas estações transmissoras devem ser consideradas para determinação da potência de transmissão.

Os componentes envolvidos são aqueles utilizados entre a saída do HPA e a entrada da antena. Quando a estação trabalha apenas como transmissora, existirão seções de guia de onda e conexões. No entanto, quando o sistema opera com transmissão e recepção na mesma estação, deve-se levar em consideração as perdas por guias de ondas, conexões e pelo uso do circulador de microondas, que possibilita a utilização de uma só antena para transmissão e recepção. Nas Figura III 8 (a) e (b) é possível verificar estas condições.

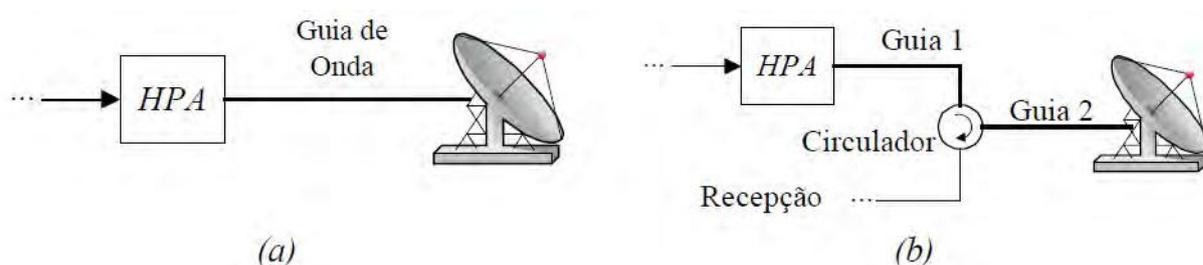


Figura III 8. (a) Estação utilizada para transmissão; (b) estação para transmissão e recepção.

III.6. Atenuação de componentes passivos da estação terrena de recepção

Na estação receptora repetem-se as condições comentadas para a estação de transmissão. Quando a estação funciona apenas para recepção dos sinais, deve-se considerar a perda oferecida por qualquer elemento da linha de transmissão que se encontre entre a antena e o primeiro amplificador de baixo ruído da estrutura. Em estações que apenas recebem o sinal, é bastante comum a instalação direta do LNA no iluminador, para evitar perdas com guias ou cabos coaxiais.

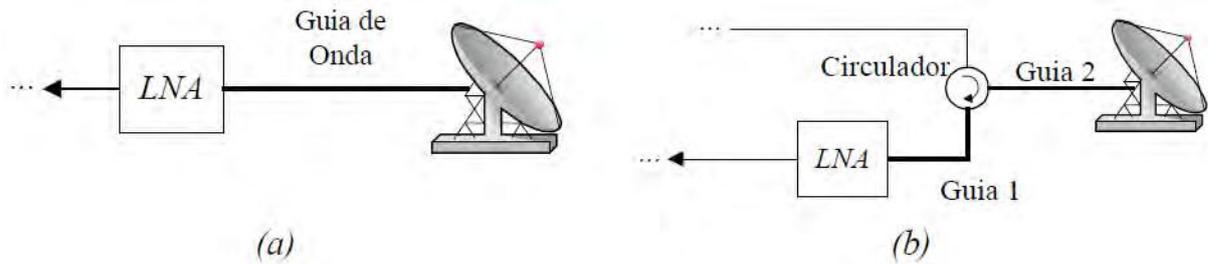


Figura III 9. (a) Estação utilizada para recepção; (b) estação para recepção e transmissão.

No entanto, quando a estação trabalha transmitindo e recebendo sinais com a mesma antena, devem ser levadas em consideração as perdas entre o alimentador da antena e o LNA.

Nesta condição, existirão seções de guia e o circunador de microondas, como apresentado na Figura III 9 (b).

ANEXO IV

Configuração da lógica fuzzy implementada em Java®

```

#General definitions
DEFINITIONS

#Domain name
DOMAIN_NAME=Controle das antenas

#Short description
DESCRIPTION=Uma descricao

#Author name
AUTHOR_NAME=Joao Ricardo Bittencourt

#Inferency model
MAMDANI_RULE_MODEL

#Method for aggregation rules
AGGREGATION_MIN

#Finish definitions
END_DEF

#Variable definitions
INPUT_VAR = Sinal_1
TERM = S1 TriangularFunction 2 3 4
TERM = S2 TriangularFunction 3 4 5
TERM = S3 TriangularFunction 4 5 6
TERM = S4 TriangularFunction 5 6 7
TERM = S5 TriangularFunction 6 7 8
TERM = S6 TriangularFunction 7 8 9
TERM = S7 TriangularFunction 8 9 10
END_VAR

INPUT_VAR = Sinal_2
TERM = -EG TriangularFunction -1.0 -0.8 -0.6
TERM = -EM TriangularFunction -0.8 -0.6 -0.4
TERM = -EP TriangularFunction -0.6 -0.4 -0.2
TERM = -E TriangularFunction -0.4 -0.2 0.0
TERM = E TriangularFunction -0.2 0.0 0.2
TERM = +E TriangularFunction 0.0 0.2 0.4
TERM = +EP TriangularFunction 0.2 0.4 0.6
TERM = +EM TriangularFunction 0.4 0.6 0.8
TERM = +EG TriangularFunction 0.6 0.8 1.0
END_VAR

OUTPUT_VAR = Saida

```

```

DEFUZZ = MeanOfMaxima
TERM = -R6 TriangularFunction -6.0 -5.0 -4.0
TERM = -R5 TriangularFunction -5.0 -4.0 -3.0
TERM = -R4 TriangularFunction -4.0 -3.0 -2.0
TERM = -R3 TriangularFunction -3.0 -2.0 -1.25
TERM = -R2 TriangularFunction -2.0 -1.25 -0.5
TERM = -R1 TriangularFunction -1.25 -0.5 0.0
TERM = R TriangularFunction -0.5 0.0 0.5
TERM = R1 TriangularFunction 0.0 0.5 1.25
TERM = R2 TriangularFunction 0.5 1.25 2.0
TERM = R3 TriangularFunction 1.25 2.0 3.0
TERM = R4 TriangularFunction 2.0 3.0 4.0
TERM = R5 TriangularFunction 3.0 4.0 5.0
TERM = R6 TriangularFunction 4.0 5.0 6.0
END_VAR

```

```
#Rules defintions
```

```
BLOCK_RULES
```

```

RL = If Sinal_1 is S1 and Sinal_2 is -EG then Saída IS -R6
RL = If Sinal_1 is S1 and Sinal_2 is -EM then Saída IS -R6
RL = If Sinal_1 is S1 and Sinal_2 is -EP then Saída IS -R6
RL = If Sinal_1 is S1 and Sinal_2 is -E then Saída IS -R6
RL = If Sinal_1 is S1 and Sinal_2 is E then Saída IS R6
RL = If Sinal_1 is S1 and Sinal_2 is +E then Saída IS R6
RL = If Sinal_1 is S1 and Sinal_2 is +EP then Saída IS R6
RL = If Sinal_1 is S1 and Sinal_2 is +EM then Saída IS R6
RL = If Sinal_1 is S1 and Sinal_2 is +EG then Saída IS R6
RL = If Sinal_1 is S2 and Sinal_2 is -EG then Saída is -R5
RL = If Sinal_1 is S2 and Sinal_2 is -EM then Saída is -R5
RL = If Sinal_1 is S2 and Sinal_2 is -EP then Saída is -R5
RL = If Sinal_1 is S2 and Sinal_2 is -E then Saída is -R5
RL = If Sinal_1 is S2 and Sinal_2 is E then Saída is +R5
RL = If Sinal_1 is S2 and Sinal_2 is +E then Saída is +R5
RL = If Sinal_1 is S2 and Sinal_2 is +EP then Saída is +R5
RL = If Sinal_1 is S2 and Sinal_2 is +EM then Saída is +R5
RL = If Sinal_1 is S2 and Sinal_2 is +EG then Saída is +R5
RL = If Sinal_1 is S3 and Sinal_2 is -EG then Saída is -R4
RL = If Sinal_1 is S3 and Sinal_2 is -EM then Saída is -R4
RL = If Sinal_1 is S3 and Sinal_2 is -EP then Saída is -R4
RL = If Sinal_1 is S3 and Sinal_2 is -E then Saída is -R4
RL = If Sinal_1 is S3 and Sinal_2 is E then Saída is +R4
RL = If Sinal_1 is S3 and Sinal_2 is +E then Saída is +R4
RL = If Sinal_1 is S3 and Sinal_2 is +EP then Saída is +R4
RL = If Sinal_1 is S3 and Sinal_2 is +EM then Saída is +R4
RL = If Sinal_1 is S3 and Sinal_2 is +EG then Saída is +R4
RL = If Sinal_1 is S4 and Sinal_2 is -EG then Saída is -R3
RL = If Sinal_1 is S4 and Sinal_2 is -EM then Saída is -R3
RL = If Sinal_1 is S4 and Sinal_2 is -EP then Saída is -R3
RL = If Sinal_1 is S4 and Sinal_2 is -E then Saída is -R3
RL = If Sinal_1 is S4 and Sinal_2 is E then Saída is +R3

```

```
RL = If Sinal_1 is S4 and Sinal_2 is +E then Saída is +R3
RL = If Sinal_1 is S4 and Sinal_2 is +EP then Saída is +R3
RL = If Sinal_1 is S4 and Sinal_2 is +EM then Saída is +R3
RL = If Sinal_1 is S4 and Sinal_2 is +EG then Saída is +R3
RL = If Sinal_1 is S5 and Sinal_2 is -EG then Saída is -R2
RL = If Sinal_1 is S5 and Sinal_2 is -EM then Saída is -R2
RL = If Sinal_1 is S5 and Sinal_2 is -EP then Saída is -R2
RL = If Sinal_1 is S5 and Sinal_2 is -E then Saída is -R2
RL = If Sinal_1 is S5 and Sinal_2 is E then Saída is +R2
RL = If Sinal_1 is S5 and Sinal_2 is +E then Saída is +R2
RL = If Sinal_1 is S5 and Sinal_2 is +EP then Saída is +R2
RL = If Sinal_1 is S5 and Sinal_2 is +EM then Saída is +R2
RL = If Sinal_1 is S5 and Sinal_2 is +EG) then Saída is +R2
RL = If Sinal_1 is S6 and Sinal_2 is -EG then Saída is -R1
RL = If Sinal_1 is S6 and Sinal_2 is -EM then Saída is -R1
RL = If Sinal_1 is S6 and Sinal_2 is -EP then Saída is -R1
RL = If Sinal_1 is S6 and Sinal_2 is -E then Saída is -R1
RL = If Sinal_1 is S6 and Sinal_2 is E then Saída is +R1
RL = If Sinal_1 is S6 and Sinal_2 is +E then Saída is +R1
RL = If Sinal_1 is S6 and Sinal_2 is +EP then Saída is +R1
RL = If Sinal_1 is S6 and Sinal_2 is +EM then Saída is +R1
RL = If Sinal_1 is S6 and Sinal_2 is +EG then Saída is +R1
RL = If Sinal_1 is S7 and Sinal_2 is -EG then Saída is R
RL = If Sinal_1 is S7 and Sinal_2 is -EM then Saída is R
RL = If Sinal_1 is S7 and Sinal_2 is -EP then Saída is R
RL = If Sinal_1 is S7 and Sinal_2 is -E then Saída is R
RL = If Sinal_1 is S7 and Sinal_2 is E then Saída is R
RL = If Sinal_1 is S7 and Sinal_2 is +E then Saída is R
RL = If Sinal_1 is S7 and Sinal_2 is +EP then Saída is R
RL = If Sinal_1 is S7 and Sinal_2 is +EM then Saída is R
RL = If Sinal_1 is S7 and Sinal_2 is +EG then Saída is R
END_RULES
#Finish domain
```