



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FÍSICA
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA

Pedro Steinmüller Pimentel

**Instrumentação e caracterização do
radiotelescópio Uirapuru: os sinais captados por
uma corneta do BINGO**

Campina Grande, Paraíba, Brasil

22 de maio de 2023

Pedro Steinmüller Pimentel

**Instrumentação e caracterização do radiotelescópio
Uirapuru: os sinais captados por uma corneta do BINGO**

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Amílcar Rabelo de Queiroz e coorientação do Prof. Dr. Alex de Albuquerque Silva, apresentada à Unidade Acadêmica de Física em complementação aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Dr. Amílcar Rabelo de Queiroz

Coorientador: Dr. Alex de Albuquerque Silva

Campina Grande, Paraíba, Brasil

22 de maio de 2023

P644i

Pimentel, Pedro Steinmüller.

Instrumentação e caracterização do radiotelescópio Uirapuru: os sinais captados por uma corneta do BINGO / Pedro Steinmüller Pimentel. – Campina Grande, 2023.

119 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Amílcar Rabelo de Queiroz, Prof. Dr. Alex de Albuquerque Silva."

Referências.

1. Radiotelescópio Uirapuru – Instrumentação e Caracterização. 2. Projeto BINGO. 3. Radiotelescópio – Receptores. 4. Cosmologia de Rádio. 5. Radioastronomia. I. Queiroz, Amílcar Rabelo de. II. Silva, Alex de Albuquerque. III. Título.

CDU 520.27(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM FISICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

PEDRO STEINMULLER PIMENTEL

Instrumentação e caracterização do radiotelescópio Uirapuru: os sinais captados por uma corneta do BINGO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em: 26/05/2022

Amílcar Rabelo de Queiroz
Presidente da Comissão e Orientador

Alex de Albuquerque Silva
Coorientador

João Rafael Lúcio dos Santos
Examinador Interno

João Maria da Silva
Examinador Externo



Documento assinado eletronicamente por **AMILCAR RABELO DE QUEIROZ, PROFESSOR 3 GRAU**, em 26/05/2022, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALEX DE ALBUQUERQUE SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 26/05/2022, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOAO MARIA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/05/2022, às 16:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOAO RAFAEL LUCIO DOS SANTOS, COORDENADOR(A)**, em 31/05/2022, às 13:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2405355** e o código CRC **8F309A22**.

Agradecimentos

- Aos meus grandes amigos Washington Barros, Lucas Souza, Giusepe Pires, Danilo Flaline, Yuri Souza, Rennan Penaforte e Johnathon Coelho que sempre estiveram ao meu lado, seja de forma direta ou indireta, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho, vocês são importantes para mim. Quero agradecer também pelo incentivo constante que sempre recebia de vocês, o que me confortava a continuar estudando e produzindo diante das dificuldades que eu enfrentava e ainda enfrento durante a minha vida acadêmica.
- Aos Profs. Alex de Albuquerque e Marcelo Vargas pela colaboração que recebi durante a fase de preparação desta dissertação. Ao Prof. Dr. Amílcar Rabelo de Queiroz, pela orientação, sugestão, estímulo, paciência, disposição e oportunidade de estudar sobre radioastronomia e despertar ainda mais a minha vontade de continuar estudando o que gosto, bem como participar do projeto BINGO, um avanço científico relevante para a nossa sociedade, e também agradecer pela correções que pude realizar neste trabalho graças a sua orientação e supervisão, me proporcionando ensinamentos únicos que me permitiram um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.
- A todos os professores desta Unidade Acadêmica que contribuíram com a minha formação.
- As pessoas com quem convivi a longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.
- Aos meus familiares pelo apoio, confiança e incentivo, principalmente aos meus irmãos Guilherme Steinmuller, Maria Isabel Steinmuller, Ana Steinmuller e José da Costa Pimentel Neto, que sempre foram motivos de inspiração para mim, que sempre conseguia me dar bem nos estudos e na vida de conciliar com o trabalho para almejar meus objetivos e me tornar uma pessoa mais dedicada.
- Aos colegas de pós-graduação, que devido á pandemia, não pude conhecê-los, mas que a convivência durante esses dois anos de forma remota me proporcionou uma troca de experiências, permitindo um crescimento não só como pessoa, mas também como formando, e aos funcionários da Unidade Acadêmica de Física pela grata convivência durante a minha permanência nesta Unidade.
- A todos que direta ou indiretamente possibilitaram a conclusão deste trabalho.

"Gostaria de uma sociedade mais justa, menos corrupta, com menos hipocrisia, mais digna, com mais amor ao próximo, menos preconceito, menos rancor e principalmente mais paz na alma." Albert Einstein

Resumo

Com a construção do radiotelescópio BINGO, acrônimo de (Baryon Acoustic Oscillations in Neutral Gas Observations), será possível detectar pela primeira vez as oscilações acústicas de bárion, do inglês Baryon Acoustic Oscillations (BAO), através do seu monitoramento por meio de emissões eletromagnéticas e rádio frequência do hidrogênio atômico. Desse modo, BAO servirá como régua padrão para compreender a distribuição de galáxias após o acontecimento do Big Bang. O BINGO irá trabalhar na banda de 980 MHz a 1260 MHz, realizando medições dos sinais de rádio emitidos pelo radiotelescópio, sendo preciso uma interferência de radiofrequência (RFI) baixa o máximo possível para melhor análise dos sinais captados. O radiotelescópio Uirapuru, que será utilizado como teste para receber os sinais provenientes do espaço na faixa de rádio, empregará uma corneta do BINGO desenvolvida pelo INPE, juntamente com receptores capazes de amplificar sinais muito fracos. Após a amplificação e filtragem desses sinais, eles serão processados e convertidos para serem gravados em sistemas de processamento de dados, permitindo assim a realização de análises. Os radiotelescópios utilizam receptores similares aos rádios AM-FM e as televisões de sinal aberto, que recebem os sinais do espaço e as informações são coletadas por meio das antenas parabólicas. No caso do Uirapuru, os receptores são constituídos por uma cadeia de equipamentos, tais como: amplificadores de baixo ruído, do inglês Low Noise Amplifier (LNA), isoladores e filtros passa banda, com o intuito de captar os sinais, amplificá-los e processá-los. Neste trabalho, foram realizadas medições e testes do receptor e, principalmente, dos LNA's, que serão integrados no radiotelescópio Uirapuru, comparações de dados dos amplificadores por meio das medições feitas no LABMET da UFCG com os valores de fábrica.

Palavras-chave: Radiotelescópio Uirapuru. Receptores. Projeto BINGO.

Abstract

With the construction of the BINGO radio telescope, acronym for (Baryon Acoustic Oscillations from Neutral Gas Observations), it will be possible to detect, for the first time, the baryon acoustic oscillations, the English Baryon Acoustic Oscillations (BAO), through its monitoring through electromagnetic emissions and radio frequency of atomic hydrogen. In this way, BAO will serve as a standard ruler to understand the distribution of galaxies after the Big Bang. BINGO will work in the band from 980 MHz to 1260 MHz, carrying out measurements of the radio signals emitted by the radio telescope, requiring a radio frequency interference (RFI) as low as possible for better analysis of the captured signals. The Uirapuru radio telescope, which will serve as a test to receive the signals in the radio range coming from space, will use a BINGO horn developed by INPE, and receivers that are capable of amplifying very weak signals that, when passing through the amplified and being filtered, the signals are processed and converted to be recorded in data processing systems, making it possible to perform their analysis. Radio telescopes use receivers similar to AM-FM radios and free-to-air televisions, which receive signals from space and information is collected through satellite dishes. In the case of Uirapuru, the receivers are made up of a chain of equipment, such as: Low Noise Amplifiers (LNA), isolators and bandpass filters, with the aim of capturing the signals, amplifying them and process them. In this work, measurements and tests were carried out on the receiver and, mainly, on the LNA's, which will be integrated into the Uirapuru radio telescope, comparisons of data from the amplifiers through measurements made in the UFCG's LABMET with the factory values.

Keywords: Uirapuru RadioTelescope. Receivers. BINGO Project.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Onda de rádio. Fonte: NASA.	22
Figura 2 – Esquema para ilustrar a isotropia e homogeneidade. Fonte:[1]	23
Figura 3 – O Radiotelescópio de Jansky. Fonte: National Radio Astronomy	24
Figura 4 – O Radiotelescópio de Reber. Fonte: NRAO.	25
Figura 5 – Mapa de temperaturas da radiação cósmica de fundo. Fonte: [2].	26
Figura 6 – A onda eletromagnética. Fonte: [3]	27
Figura 7 – O espectro eletromagnético na natureza. Fonte: < http://labcisco.blogspot.com/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html >	28
Figura 8 – Principais características das faixas de frequência. Fonte: < http://labcisco.blogspot.com/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html >	28
Figura 9 – Inclinação do radiotelescópio e medição de I_ν em função do ângulo zenital z . Fonte: [4]	30
Figura 10 – Transmissão da atmosfera terrestre em função do comprimento de onda. Fonte: [5]	32
Figura 11 – Distribuição espectral e direcional da radiação emitida pelo corpo, objeto e/ou superfície. Fonte: [6]	33
Figura 12 – Intensidade específica medida por um detector. Fonte: [4]	34
Figura 13 – Radiação do Corpo negro para $T = 300$ K. Fonte: [7]	35
Figura 14 – Esquema de um radiotelescópio com as principais componentes para funcionamento. Fonte: [8]	39
Figura 15 – Montagem altazimutal. Fonte: [9]	40
Figura 16 – Montagem equatorial. Fonte: [9]	41
Figura 17 – (a) Montagem altazimutal e (b) Montagem equatorial. Fonte: [8]	41
Figura 18 – O observatório de Arecibo. Fonte: [10]	42
Figura 19 – Radiotelescópio de Itapetinga – ROI/INPE – 2000. Fonte: [11]	42
Figura 20 – Região de construção do projeto BINGO na serra do Urubu, localizada no município de Aguiar, no Vale do Piancó, sertão do Estado da Paraíba. Fonte: Comunicação interna da Colaboração BINGO.	44
Figura 21 – Projeto óptico do BINGO, por Bruno Maffei e Ivan Ferreira. Nesse esquema, há dois espelhos que compõe o radiotelescópio, um primário paraboloide de raio 20m e o secundário que é um espelho hiperbólico de raio 17. Fonte: Comunicação Interna da Colaboração BINGO.	45
Figura 22 – Esquema da instalação do BINGO. Fonte: Comunicação interna da Colaboração BINGO.	45

Figura 23 – Etapa de construção e instalação da corneta auxiliar na UFCG. Fonte: [12]	46
Figura 24 – Primeira medição do Uirapuru. Fonte: Produção do autor.	47
Figura 25 – Estrutura básica de um radiotelescópio comum. Fonte: Produção do autor.	48
Figura 26 – Receptor de rádio doméstico (esquerda) e um rádio telescópio (direita). Fonte: [13]	48
Figura 27 – Esquerda: Fase do desenho da corneta e planejamento com seus detalhes na corrugação. Direita: Abertura da corneta vista em perspectiva, em que os anéis verdes são os de suspensão. Fonte: [14]	49
Figura 28 – Transporte da corneta. Fonte: [15]	49
Figura 29 – Corneta do Uirapuru. Produção do autor.	50
Figura 30 – Construção e composição da corneta. Fonte: Comunicação interna da Colaboração BINGO.	50
Figura 31 – Diagrama do modelo de um radiômetro simples do projeto BINGO. Fonte: Comunicação interna da Colaboração BINGO.	51
Figura 32 – Gráfico de um sinal de ruído. No eixo horizontal está a frequência do sinal e no eixo vertical a sua potência. Fonte: [16]	56
Figura 33 – Diferença de ruído com o uso de um amplificador.	57
Figura 34 – Esquematização da figura de ruído. Fonte: [17]	57
Figura 35 – Definições básicas para a relação sinal-ruído. Fonte: [16]	58
Figura 36 – Esquema de uma fonte emitindo um sinal. Fonte: [18]	59
Figura 37 – Etapas da figura de ruído. Fonte: [16]	59
Figura 38 – Método convencional de medição da figura de ruído. Fonte: [19]	61
Figura 39 – Método do ganho. Fonte: [19]	61
Figura 40 – Método do fator Y. Fonte: [19]	63
Figura 41 – (a) calibração e (b) Medição do DUT. Fonte: [20]	64
Figura 42 – Padrão de radiação de uma antena parabólica. Fonte: [21]	66
Figura 43 – A medida que o nível de potência de entrada aumenta, chega-se a um ponto que a potência de saída do amplificador não aumenta mais com o valor do ganho, ou seja, a potência de saída começa a saturar. [22]	67
Figura 44 – Ponto de interceptação de terceira ordem para dispositivos não lineares. [23]	68
Figura 45 – Componentes de frequência vs potência. [23]	68
Figura 46 – Medição Output/Input VSWR. Fonte: [24]	70
Figura 47 – Esquema de montagem para medição da isolação.	71
Figura 48 – Filtro passa baixa. Fonte: [25]	72
Figura 49 – Filtro de passagem alta. Fonte: [25]	72
Figura 50 – Resposta do filtro de parada de banda. Fonte: [26]	73

Figura 51 – Configuração típica do filtro de parada de banda. Fonte: [26]	73
Figura 52 – Filtro passa banda. Fonte: [25]	74
Figura 53 – Uma visão simplificada de um filtro passa banda, mostrando a largura de banda e frequência central. Fonte: [27]	74
Figura 54 – Resposta em frequência de filtros passa banda e de banda parada. Fonte: [27]	75
Figura 55 – Filtro de rejeição de banda. Fonte: [25]	75
Figura 56 – Radiômetro idealizado. Fonte: [28]	77
Figura 57 – Radiômetro Real. Fonte: [15]	78
Figura 58 – Radiômetro de Potência Total. Fonte: [28]	78
Figura 59 – Direita: FieldFox N9912A - Keysight Technologies. Esquerda: VNA – Agilent N5181A (MXG Analog Signal Generator – 100kHz a 6GHz). Fonte: Produção do autor.	79
Figura 60 – Perda do cabo no radiotelescópio Uirapuru. Data: 18 de junho de 2021. Fonte: Produção do autor.	80
Figura 61 – Medição da perda de retorno. Fonte: produção do autor.	81
Figura 62 – Montagem e instalação dos componentes. Fonte: Produção do autor.	81
Figura 63 – Parâmetros de espalhamento. Fonte [29]	82
Figura 64 – Medição dos parâmetros S. Fonte: Produção do autor.	83
Figura 65 – Transmissão e reflexão de potência através de um componente. Fonte: Produção do autor.	84
Figura 66 – Medição do parâmetro S11 entre cabos. Fonte: Produção do autor.	84
Figura 67 – Medição do parâmetro S21 do amplificador ZX60-P162LN+. Fonte: Produção do autor.	85
Figura 68 – Medição de um sinal sem LNA. Fonte: Produção do autor.	86
Figura 69 – Medição do sinal do LNA com voltagem. Fonte: Produção do autor.	86
Figura 70 – 1 LNA desligado, potência de entrada -25dbm. Fonte: Produção do autor.	87
Figura 71 – 1 LNA ligado, potência de entrada -25dbm. Fonte: Produção do autor.	88
Figura 72 – Tela do FieldFox da configuração de 1LNA, sinal de entrada de -25dbm, frequência de 980MHz, LNA ligado e RF do gerador ligado. Fonte: Produção do autor.	88
Figura 73 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -25dbm. Fonte: Produ- ção do autor.	89
Figura 74 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -40dbm. Fonte: Produ- ção do autor.	90
Figura 75 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -50dbm. Fonte: Produ- ção do autor.	90
Figura 76 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -60dbm. Fonte: Produ- ção do autor.	90

Figura 77 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -25dbm, variando a frequência. Fonte: Produção do autor.	91
Figura 78 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -40dbm, variando a frequência. Fonte: Produção do autor.	91
Figura 79 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -50dbm, variando a frequência. Fonte: Produção do autor.	92
Figura 80 – 2 LNA's ligados com potência de entrada -50dbm e frequência de 980MHz. Fonte: Produção do autor.	92
Figura 81 – 2 LNA's ligados com potência de entrada -50dbm e frequência de 1260MHz. Fonte: Produção do autor.	92
Figura 82 – 2 LNA's ligados com potência de entrada -70dbm e frequência de 980MHz. Fonte: Produção do autor.	93
Figura 83 – 2 LNA's ligados com potência de entrada -70dbm e frequência de 1260MHz. Fonte: Produção do autor.	93
Figura 84 – Tela do FieldFox da configuração de 2LNA's, sinal de entrada de -50dbm, frequência de 980MHz, LNA ligado e RF do gerador ligado. Fonte: Produção do autor.	94
Figura 85 – Ganho vs frequência da configuração de 2 LNA's, potência de entrada -50 dbm. Fonte: Produção do autor.	95
Figura 86 – Ganho vs frequência da configuração de 2 LNA's, potência de entrada -60 dbm. Fonte: Produção do autor.	95
Figura 87 – Ganho vs frequência da configuração de 2 LNA's, potência de entrada -70 dbm. Fonte: Produção do autor.	96
Figura 88 – Ganho vs frequência da configuração de 2 LNA's, potência de entrada -80 dbm. Fonte: Produção do autor.	96
Figura 89 – 3 LNA's ligados com potência de entrada -70dbm e frequência de 980MHz. Fonte: Produção do autor.	97
Figura 90 – 3 LNA's ligados com potência de entrada -70dbm e frequência de 1260MHz. Fonte: Produção do autor.	97
Figura 91 – 3 LNA's ligados com potência de entrada -80dbm e frequência de 980MHz. Fonte: Produção do autor.	97
Figura 92 – 3 LNA's ligados com potência de entrada -80dbm e frequência de 1260MHz. Fonte: Produção do autor.	98
Figura 93 – Ganho vs frequência da configuração de 3 LNA's, potência de entrada -70 dbm. Fonte: Produção do autor.	98
Figura 94 – Ganho vs frequência da configuração de 3 LNA's, potência de entrada -80 dbm. Fonte: Produção do autor.	99
Figura 95 – Esquema do receptor. Fonte: Produção do autor.	99
Figura 96 – Receptor montado no LABMET da UFCG. Fonte: Produção do autor.	99

Figura 97 – Receptor de 3 LNA's ligados com potência de entrada -80dbm e frequência de 980MHz. Fonte: Produção do autor.	100
Figura 98 – Receptor de 3 LNA's ligados com potência de entrada -80dbm e frequência de 1260MHz. Fonte: Produção do autor.	100
Figura 99 – Receptor de 3 LNA's ligados com potência de entrada -110dbm e frequência de 980MHz. Fonte: Produção do autor.	101
Figura 100 – Receptor de 3 LNA's ligados com potência de entrada -110dbm e frequência de 1260MHz. Fonte: Produção do autor.	101
Figura 101 – Ganho vs frequência do receptor de 3 LNA's, potência de entrada -80 dbm. Fonte: Produção do autor.	102
Figura 102 – Ganho vs frequência do receptor de 3 LNA's, potência de entrada -110 dbm. Fonte: Produção do autor.	102
Figura 103 – Representação de um corpo negro ou ideal. Qualquer radiação que entra pelo orifício é totalmente absorvida devido às sucessivas reflexões no interior da cavidade.	105
Figura 104 – Distribuição da intensidade luminosa em relação à temperaturas. . . .	105
Figura 105 – Redshift Cosmológico.	110
Figura 106 – Configurações comuns de antenas refletoras.	111

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação das ondas eletromagnéticas em função das suas frequências. Fonte: Produção do autor	29
Tabela 2 – Temperaturas de brilho de fontes astronômicas. Fonte: [30] Produção do autor.	37
Tabela 3 – Relação dos países e instituições que estão participando e sendo res- ponsáveis pelo projeto do radiotelescópio BINGO. Fonte: Produção do autor.	44
Tabela 4 – Especificações elétricas do LNA ZX60-P162LN+ a 25°C e 4V. Fonte: [31]	54
Tabela 5 – Comparação dos métodos de medição da figura de ruído. Fonte: [19]	64
Tabela 6 – Condições de teste: $V_d = 4V$, $I_d = 50,99mA$, Temperatura = 25°C. Fonte: [32]	83
Tabela 7 – Condições de teste: $V_d = 4V$, $I_d = 51,96mA$, Temperatura = -45°C. Fonte: [32]	83
Tabela 8 – Condições de teste: $V_d = 4V$, $I_d = 52,33mA$, Temperatura = 85°C. Fonte: [32]	83

Lista de abreviaturas e siglas

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
CMB	Cosmic Microwave Background
BINGO	BAO from Integrated Neutral Gas Observations
BAO	Baryon Acoustic Oscillations
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SNR	Signal to Noise Ratio
RF	Radio Frequency
S/R	Razão Sinal-Ruído
RFI	Radio Frequency Interference
ADC	Analogic Digital Converter
ROI	Rádio Observatório de Itapetinga
WG5	Tipo de Guia de Onda
CAT	Cable and Antenna Test
CSV	Comma Separated Values
LNA	Low-Noise Amplifier
CN	Chinese
VNA	Vector Network Analyzer
LABMET	Laboratório de Metrologia

Lista de símbolos

Γ	Letra grega Gama
θ	Ângulo theta
dE	Energia fluindo em uma área projetada
ν	Frequência
σ	Sigma
I_ν	Brilho espectral ou intensidade específica
Ω	Ângulo sólido
λ	Comprimento de onda
S_ν	Densidade de fluxo espectral
ϕ	Ângulo phi
τ	Tau
h	Constante de Planck
k	Constante de Boltzmann ou número de onda
c	Velocidade da luz no vácuo
T_B	Temperatura de brilho
T	Temperatura
S	Fluxo de energia
B_ν	Brilho específico
S_i	Sinal de entrada
S_o	Sinal de saída
B	Largura de banda
G	Ganho
N_i	Ruído de entrada

N_o	Ruído de saída
N_a	Ruído de saída adicional
F	Fator de ruído na escala linear
N	Figura de ruído na escala logarítmica
D	Diretividade
P	Potência média
T_A	Temperatura da antena
T_R	Temperatura de ruído do radiômetro
$P(V)$	Densidade de probabilidade

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
2	CONCEITOS DA RADIOASTRONOMIA	21
2.1	O que são ondas de rádio?	21
2.2	Cosmologia	22
2.3	Uma breve história da Radioastronomia	23
2.3.1	Um breve relato sobre a história da Radiação Cósmica de Fundo	26
2.4	As ondas eletromagnéticas	27
2.5	O espectro eletromagnético	28
2.6	Emissão e Absorção de ondas de rádio na atmosfera terrestre	29
2.7	Fundamentos da Radiação	32
2.7.1	Temperatura de brilho e densidade de fluxo	32
3	RADIOTELESCÓPIOS	39
3.1	O Radiotelescópio BINGO	43
3.2	O Radiotelescópio Uirapuru	46
4	CONCEITOS	53
4.1	Amplificadores	53
4.2	Amplificador Coaxial de Baixo Ruído ZX60-P16LN+	53
4.2.1	Ganho - (Gain)	54
4.2.1.1	Sinal	55
4.2.2	Ruído, figura de ruído e fator de ruído.	55
4.2.3	Métodos de medição da figura de ruído	60
4.3	Ganho e Diretividade em Antenas	64
4.3.1	Potência de saída em compressão de 1dB - (Output Power At 1 DB Compression)	66
4.3.2	Ponto de Interceptação de 3º ordem - (3rd Order Intercept Point - Output IP3)	67
4.3.3	Relação de Onda Estacionária de Tensão - (Voltage Standing Wave Ratio - VSWR)	69
4.3.3.1	Output/Input VSWR	69
4.3.4	Isolação - (Isolation)	70
4.4	Filtro Passa Banda	70
4.4.1	Tipos básicos de filtros RF	71

5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E DADOS	77
5.1	Radiômetros	77
5.1.1	Conceitos e Funcionamento de um Radiômetro	77
5.1.2	Radiômetro do tipo Potência Total	78
5.2	Instrumentação	78
5.2.1	Perda de cabos	79
5.2.2	Perda de retorno	80
5.2.3	Parâmetro S	82
5.2.3.1	Análise vetorial de rede - parâmetro S11	84
5.2.3.2	Parâmetro S21	85
5.2.4	Amplificadores LNA	85
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS MEDIÇÕES DE GANHO DOS LNA'S ZX60-P162LN+ E RECEPTOR.	87
6.1	Dados de ganho para 1 LNA	87
6.2	Dados de ganho para 2 LNA's	91
6.3	Dados de ganho para 3 LNA's	94
6.4	Dados de ganho para o receptor	98
	APÊNDICES	103
	APÊNDICE A – RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO	105
A.1	Radiação do Corpo Negro	105
A.2	Leis associadas à Radiação de um Corpo Negro	106
A.2.1	Lei de Stefan-Boltzmann e Lei do Deslocamento de Wien	106
A.2.2	Lei de Rayleigh - Jeans	106
A.2.3	Lei de Planck	107
	APÊNDICE B – O DESVIO PARA O VERMELHO - REDSHIFT	109
	APÊNDICE C – ANTENAS REFLETORAS	111
C.1	Antenas Refletoras	111
	APÊNDICE D – RUÍDO ALEATÓRIO GAUSSIANO	113
	REFERÊNCIAS	115

1 Introdução

A cosmologia e a astronomia estão interligadas entre si com o intuito de estudar e entender fenômenos do universo como um todo. Desde a antiguidade, o universo era visto na tentativa de explicar e entender o seu comportamento. Enquanto a cosmologia estuda o cosmos, ou seja, a origem do universo em seu passado, presente, futuro, composição e evolução, a astronomia estuda os comportamentos dos corpos celestes do cosmos, bem como galáxias, buracos negros e os astros.

No decorrer das últimas cinco décadas, as observações astronômicas em comprimentos de onda de rádio criaram um novo ramo da astronomia, modernamente chamado de astronomia, cujo objetivo é estudar objetos celestes, tais como: planetas, buracos negros, asteroides, galáxias, todos os tipos de estrelas, matéria escura e nebulosas, por meio de telescópios e radiotelescópios que auxiliam na fomentação da ciência [33]. A descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas, considerada como uma evidência da teoria do Big Bang, foi feita por meio da radioastronomia, utilizando grandes antenas de rádio chamadas de radiotelescópios, os quais podem ser utilizados tanto de forma isolada quanto em forma de matriz e que estão conectados entre si com o uso das técnicas de interferometria de rádio. O uso da interferometria permite que a radioastronomia alcance alta resolução angular, uma vez que a resolução de um interferômetro é definido pela distância entre seus componentes.

Um radiotelescópio é formado por uma antena e um receptor, usados para detectar ondas de rádio de fontes astronômicas, sendo o principal instrumento de observação no ramo da radioastronomia, estudando radiofrequência do espectro eletromagnético na faixa que vai de poucos megahertz ($\lambda = 100m$) até 950 MHz ($\lambda = 0,3mm$) emitido por objetos astronômicos.

O radiotelescópio está em fase de construção no sertão do estado da Paraíba, localizado no município de Aguiar, o projeto BINGO, acrônimo para (**B**aryon **A**coustic **O**scillations **I**n **N**eutral **G**as **O**bservations, ou em português, Oscilações Acústicas de Bárions em Observações de Gases Neutros) tem entre seus objetivos, mapear as oscilações acústicas bariônicas na emissão de hidrogênio neutro, desenvolver tecnologia de instrumentação para cosmologia observacional e astrofísica e estudar os Fast Radio Bursts - FRBs (rajadas rápidas de rádio), bem como os fenômenos de rádio periódicos (pulsares). O BINGO será um projeto que trará um grande avanço astronômico para toda a ciência, fomentando e estimulando novas pesquisas, além de ajudar a entender a matéria escura e energia escura. O projeto é uma colaboração internacional e nacional, liderada pela Universidade de São Paulo - USP, com participação do INPE, UFCG, instituições da China, Inglaterra, França,

Itália, Espanha, Alemanha, África do Sul e Suíça.

O radiotelescópio Uirapuru, instalado na UFCG, foi construído com uma antena corneta que é um protótipo do que será feito no BINGO, sendo um telescópio auxiliar em fase de testes e com o objetivo de detectar ondas de rádio já conhecidas e também realizar testes para o desenvolvimento de alguns sensores remotos e softwares para serem usados no radiotelescópio BINGO. A corneta do BINGO ou o radiotelescópio Uirapuru está otimizado para funcionar na faixa de frequência entre 960 MHz e 1280 MHz.

A banda de rádio é utilizada para observar a galáxia e o universo exterior devido à baixíssima absorção que sofre durante seu trajeto desde a fonte emissora até nossos telescópios na terra. O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo, sua densidade e comportamento pode ajudar os astrônomos a rastrear a evolução da matéria ao longo da história do universo [14]. Com o avanço dos testes do radiotelescópio auxiliar Uirapuru e o estudo futuro do BINGO, será possível compreender vários fenômenos do universo ainda não explicáveis, proporcionando e estimulando novos estudos futuros a partir das ondas de rádio e aprimorando o conhecimento já existente.

Este trabalho tem como objetivo definir conceitos que estão relacionados aos componentes inseridos no receptor do radiotelescópio Uirapuru, medições dos amplificadores de baixo ruído realizadas no laboratório da UFCG (LABMET) e fazer comparações das medições de ganho dos LNA's com o seu datasheet, que é um documento do amplificador contendo informações de talhadas do produto e valores de fábrica de vários tipos de medidas. Com o uso de um sistema de componentes como amplificadores, filtros e digitalizadores instalados nos receptores, gráficos são gerados por meio de um software junto com o computador que permite receber os sinais analógicos e convertê-los em sinais digitais para análise dos dados. Esta dissertação fica estruturada da seguinte forma: no capítulo 2 descreve alguns dos principais conceitos relevantes para o estudo da radioastronomia e uma breve história dos CMB. Logo em seguida, o capítulo 3 trata-se sobre o radiotelescópio BINGO e o Uirapuru, seu funcionamento e alguns exemplos de sua utilização, descrição sobre receptores, antenas e cornetas. O procedimento experimental e dados coletados estão no capítulo 5.

2 Conceitos da Radioastronomia

A astronomia é provavelmente a mais antiga de todas as ciências, consequência da prática de observações dos céus desde milhares de anos atrás até os dias de hoje com o intuito de estudar os fenômenos astronômicos, os planetas, estrelas e as teorias elaboradas sobre relações com o cotidiano.

No universo, os objetos transmitem ondas e partículas eletromagnéticas que viajam na velocidade da luz. Nesse sentido, definimos astronomia observacional como um modelo de estudo dessas emissões eletromagnéticas dos objetos existentes no nosso espaço por intermédio do telescópio. A radiação é uma energia que é transmitida através de um espaço de um ponto qualquer a outro sem haver a necessidade de uma conexão física entre os locais, e o termo eletromagnético significa que essa energia é transportada na forma de campos elétricos e magnéticos [34]

A astronomia observacional é uma divisão da astronomia que estuda os registros de dados sobre o universo observável, observação dos objetos celestes com o uso de telescópios, interferômetros e outros instrumentos óticos. Uma das primeiras grandes conquistas da astronomia observacional foi uma série de observações de Vênus feitas por Galileu que mostrava o sol no centro do sistema solar, e não a Terra, provando o sistema do heliocentrismo que temos hoje. Também, outras contribuições de Galileu Galilei para a astronomia observacional incluem a confirmação visual das fases de Vênus, a observação dos quatro maiores satélites de Júpiter, a observação dos anéis de Saturno e a análise das manchas solares. Para auxiliar nessas observações e comprovações de teorias astronômicas, Galileu Galilei criou o primeiro telescópio entre os anos de 1609 e 1610, revolucionando a ciência daquela época [35].

Alguns anos depois, percebeu-se que ao analisar e estudar as frequências emitidas pelos corpos celestes, poderia ajudar na compreensão da natureza dos objetos astronômicos, como por exemplo a densidade, massa e temperatura. Para isso, alguns instrumentos são usados para a observação do espaço, tais como: telescópios refratores e refletores modernos, telescópios espaciais, telescópio espacial Hubble, radiotelescópios, e dentre outros.

2.1 O que são ondas de rádio?

Nossos olhos conseguem captar apenas cosmos na luz visível, no entanto, os objetos do universo irradiam vários outros tipos de luz, através do espectro eletromagnético. A luz viaja pelo espaço em forma de ondas, e cada ondulação apresenta um pico e uma depressão, o que chamamos de ciclo. Um objeto que emite ondas de rádio emite muitos

ciclos em um período de tempo pequeno e durante cada ciclo a onda se move por uma curta distância, que é denominada de comprimento de onda.

Para ondas eletromagnéticas de vários tipos, o número de ciclos por segundo é chamado de frequência e um ciclo por segundo é a definição de hertz. Os radio astrônomos estão mais interessados em objetos que emitem e irradiem na faixa de frequência entre 3KHz (3 mil ciclos por segundo) até 900 GHz (900 bilhões de ciclos por segundo).

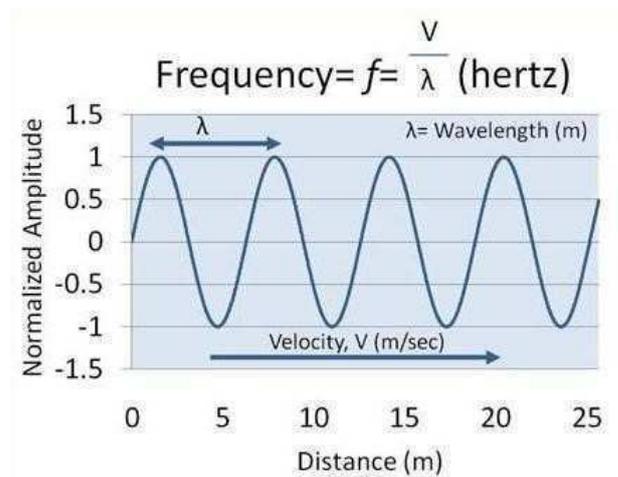


Figura 1 – Onda de rádio. Fonte: NASA.

Na figura 1 observa-se a representação de uma onda de rádio possuindo uma série de picos e vales repetidos. Quanto maior a frequência da onda eletromagnética maior será sua intensidade da energia emitida e menor será o comprimento de onda. Uma antena permite que um transmissor de rádio envie energia para o espaço e um receptor de sinal capte energia do espaço. Geralmente os transmissores e receptores são operados em uma faixa limitada de frequências.

2.2 Cosmologia

A cosmologia é vista como uma área de física que estuda o universo ou cosmos, seu tamanho, sua geometria, idade, origem e evolução de estrutura em largas escalas, planetas que orbitam estrelas, galáxias e seus aglomerados e outros objetos astronômicos, ou seja, uma ciência que considera galáxias inteiras como pequenos objetos para realizar estudos e pesquisas. Essa ciência apresentou fatores que contribuíram para o seu grande fomento nos últimos tempos: teorias e modelos elaborados para explicar fenômenos astronômicos e observações do céu mais numerosas e precisas, destacando a radioastronomia, bem como o uso de telescópios no espaço [1].

O modelo padrão atual para o universo é o “Big Bang”, onde afirma que o universo se expandiu do estado de quente e denso para o atual estado de frio e tênue, e que hoje a expansão ainda está acontecendo.

As teorias cosmológicas existentes partem do princípio cosmológico, que em grandes escalas de aproximadamente 100 Mpc (megaparsecs) ou mais, o universo é isotrópico e homogêneo. Um parsec é uma unidade de medida utilizada na astronomia para expressar distâncias astronômicas. Simplificadamente, um parsec equivale a cerca de 3,26 anos-luz, ou seja, a distância que a luz percorre em aproximadamente 3,26 anos no vácuo. Dessa forma, quando mencionamos uma escala de 100 Mpc, estamos falando de distâncias extremamente grandes, abrangendo vastas regiões do cosmos. O universo é isotrópico pelo fato de que não há direções preferidas, não importando onde aponta-se o telescópio para o céu, a matéria parece a mesma, ou seja, a aparência do universo é a mesma em qualquer direção. A homogeneidade implica a densidade média do universo ser igual como um todo, não havendo locais preferidos. Os dois conceitos de isotropia e homogeneidade implica no universo uniforme, resultando a não existência de direção e lugar especial no universo.



Figura 2 – Esquema para ilustrar a isotropia e homogeneidade. Fonte:[1]

Dizer que algo é homogêneo não implica necessariamente isotropia. Na imagem acima, no lado esquerdo, uma folha de papel com listras é homogêneo em escalas maiores do que a faixa de largura, mas não é isotrópica, sua direção fornece uma preferência pela qual pode-se orientar. A isotropia em torno de um único ponto não implica homogeneidade, no lado direito da figura acima, o esquema é isotrópico em torno do centro, mas não homogêneo.

2.3 Uma breve história da Radioastronomia

Durante séculos, dificuldades, interesses e limitações na observação e compreensão do universo era comum na sociedade científica da época. O nascimento de uma nova ciência sobre as visões do universo deu origem à radioastronomia com a descoberta de Karl Guthe Jansky (1905-1950), um engenheiro norte-americano, que notou a emissão de rádio da Via Láctea. Jansky trabalhava nos laboratórios da Bell Telephone e ficou encarregado de estudar os ruídos de fundo que perturbavam a recepção radiofônica [33]. Nessa tentativa de detectar os ruídos que perturbavam as comunicações, Jansky começou a realizar medições da amplitude e o comprimento de onda com a tarefa adicional de determinar de onde vinham estas radiações.

Na sua investigação da origem dos ruídos, Jansky verificou que parte do ruído provinha de tempestades, e que outra possuía uma origem desconhecida, cuja máxima intensidade variava num período semelhante ao dia solar. Ele estava fazendo observações na frequência de 20,5 MHz, que em comprimentos de onda corresponde à $\lambda = 14,6$ m. Jansky não entendia muito sobre astronomia, e começou a estudá-la, descobrindo ser este período de 24h o dia sideral, segundo o qual as estrelas nascem e se põem quatro minutos mais cedo do que no dia anterior [30].

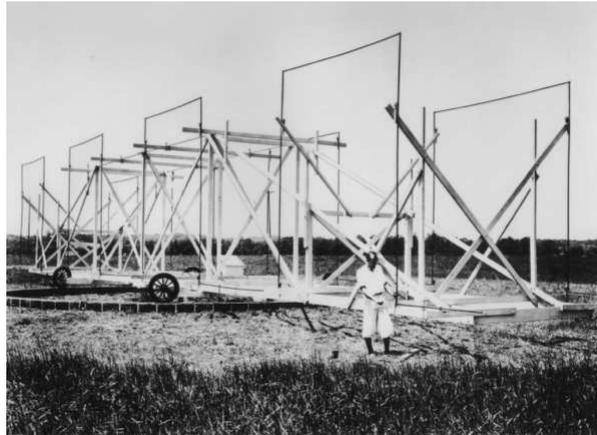


Figura 3 – O Radiotelescópio de Jansky. Fonte: National Radio Astronomy Observatory (NRAO).

Na figura 3 temos Jansky e a sua antena tipo carrossel que captou sinais da Via Láctea. As rodas eram utilizadas para girar a estrutura e apontá-la para diferentes direções. A antena foi projetada para receber ondas de frequência de 20,5 MHz (1 MHz = 10⁶ Hz) e comprimento de onda de aproximadamente 14,6m, localizada na faixa das ondas curtas. Então, com a utilização da antena que ele mesmo projetou, Jansky começou a captar ondas de rádio criadas por fontes naturais como tempestades elétricas e raios.

A descoberta de Jansky foi publicada em 1932, mas teve pouco impacto e relevância para os astrônomos da época. No entanto, um engenheiro americano Grote Reber (1911-2002) tomou conhecimento dos estudos de Jansky e percebeu a importância da sua descoberta. Em 1940, Reber havia feito mapas detalhados do céu por rádio e detectou o Sol. Ele percebeu que uma nova astronomia estava sendo construída e deu-se conta de que a intensidade dos sinais eram baixas e que precisaria de um sistema de antenas que pudessem receber esses sinais em uma grande área. O estudo dessas emissões/radiações eletromagnéticas e usando seus conhecimentos em ótica geométrica, levaram a construção do primeiro radiotelescópio de antena parabólica [36].

A radioastronomia proporcionou uma percepção significativa do universo nunca vista antes, sendo uma das principais ferramentas de observação disponíveis para os astrônomos. É importante destacar algumas das principais aplicações após essa grande descoberta feita que revolucionou o estudo do universo por meio das ondas de rádio, são



Figura 4 – O Radiotelescópio de Reber. Fonte: NRAO.

elas: a radiação cósmica de fundo, processo de alta energia em galáxias e quasares, campos magnéticos cósmicos, formação de estrelas e planetas, e dentre outros.

A radioastronomia estuda os fenômenos astronômicos, para os quais utiliza a observação de ondas de rádio contidas na faixa de frequência que varia desde KHz até giga-hertz, ou seja, é um estudo dos corpos celestes no universo e das suas medidas através das ondas de rádio que emitem. Astrônomos ao redor do mundo usam radiotelescópios para observar as ondas de rádio que vêm de estrelas, galáxias, planetas e nuvens de gás, etc.

A história da radioastronomia é repleta de importantes descobertas. Uma delas ocorreu em 1965, quando Arno Penzias e Robert Wilson detectaram a radiação cósmica de fundo em micro-ondas, que possui origem cosmológica. Essa descoberta foi essencial para o nosso entendimento sobre a origem e a evolução do Universo. Outro marco significativo ocorreu em 1968, quando os primeiros pulsares foram identificados. Os pulsares são estrelas de nêutrons altamente magnetizadas que emitem pulsos regulares de ondas de rádio. Ambas as descobertas foram fundamentais para avanços significativos na radioastronomia e levaram Penzias e Wilson a receberem o prestigioso Prêmio Nobel [37].

A interferência de radiofrequência (*Radio Frequency Interference – RFI*) tem um impacto prejudicial nas observações astronômicas. Fontes artificiais de sinais de rádio, emissores como aparelhos celulares, redes sem fio e satélites podem interferir e dominar os sinais cósmicos muito fracos. A presença de RFI compromete a utilidade e estudo dos dados e na eficiência da aquisição dos dados.

2.3.1 Um breve relato sobre a história da Radiação Cósmica de Fundo

A Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCFM), do inglês *Cosmic Microwave Background (CMB)*, é uma radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas que remonta dos primórdios do universo e o permeia como um todo. A RCFM é um dos principais pilares da teoria cosmológica do “Big Bang” que hoje é o modelo mais aceito na comunidade científica.

A radiação cósmica de fundo em micro-ondas foi prevista por George Gamov, Ralph Alpher e Robert Herman em 1948, onde demonstraram na teoria que se o universo teve uma origem, deveria estar imersa em uma radiação térmica caracterizada por um espectro de corpo negro, e foram capazes de estimar a temperatura dessa radiação na faixa de 5K. Como existiam várias estimativas e estudos acerca da temperatura do espaço antigamente, alguns inconvenientes eram presentes na compreensão e medição dessa radiação. As medições eram feitas com referência da temperatura do espaço, e não sugeriam que o espaço fosse repleto com um espectro de Planck térmico, depois, elas eram dependentes da posição específica na beira da Via Láctea, não levando em conta que a radiação fosse isotrópica [38].

Medidas precisas feitas pelo satélite Cosmic Background Explorer (COBE) lançado em 1989 determinou que o espectro é exatamente característico de um corpo negro a 2,735 K.

Na figura 5, podemos observar o mapa do CMB que nos fornece algumas informações de valores dos parâmetros cosmológicos e as pequenas variações de temperatura existentes na radiação cósmica de fundo. Neste mapa, zonas em vermelho denotam uma densidade maior e uma temperatura maior, enquanto que na zonas em azul correspondem a uma densidade menor e temperatura baixa.

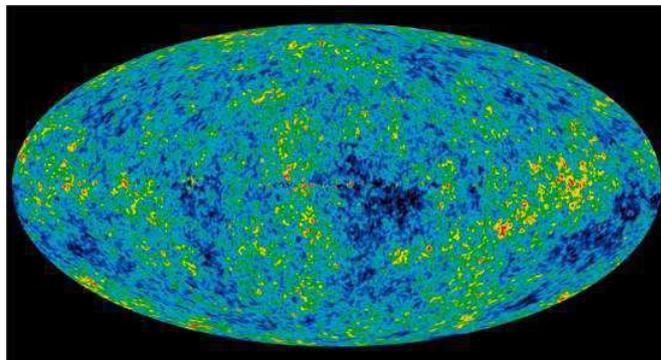


Figura 5 – Mapa de temperaturas da radiação cósmica de fundo. Fonte: [2].

A teoria do Big Bang, mais conhecido como o modelo cósmico padrão, é o que melhor explica a história do universo atualmente. No entanto, sem possuir alguma evidência observacional que pudesse comprovar as teorias, George Lemaître, um astrônomo, cosmólogo e físico belga, já previa a possibilidade da medição de um sinal proveniente do

início do universo, que deveria ter sido quente e denso no seu começo. Em 1920, não se acreditava que o universo tinha um início, acreditava-se em um universo estacionário, que necessitava de uma comprovação observacional [2].

Hoje, o modelo do Big Bang ainda é o único modelo capaz de explicar de forma convincente a existência do CMB. De acordo com este modelo, o Universo começou com uma fase muito densa e quente que se expandiu e esfriou. O CMB é a luz mais distante e mais antiga que qualquer telescópio pode detectar. O CMB aproxima os astrônomos o mais próximo possível do Big Bang, e atualmente é uma das formas mais promissoras que temos de entender o nascimento e a evolução do Universo em que vivemos.

2.4 As ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são ondas não mecânicas e transversais que se movem com velocidade igual à velocidade da luz (no vácuo). A propagação das ondas eletromagnéticas envolve o campo elétrico e campo magnético com suas respectivas componentes e coordenadas no eixo, esses dois campos são perpendiculares entre si [39].

Os radioastrônomos utilizam bastante da observação estudo dessas ondas eletromagnéticas provindas do Universo, sendo uma das principais informações a radiação emitida pelos objetos distantes da Terra. Na figura 6, vemos o comportamento de uma onda eletromagnética, sendo uma perturbação física composta por um campo elétrico e um campo magnético perpendiculares entre si que variam ao longo do tempo.

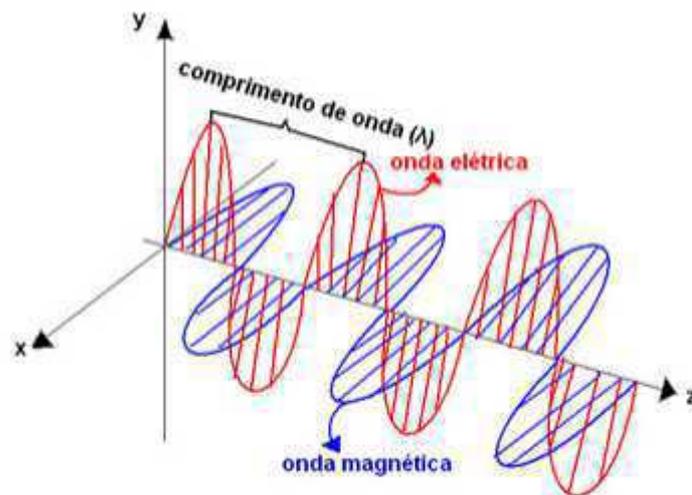


Figura 6 – A onda eletromagnética. Fonte: [3]

2.5 O espectro eletromagnético

Um espectro eletromagnético pode ser definido como um conjunto de todos os comprimentos de onda possíveis para as radiações eletromagnéticas, este espectro pode ser observado melhor nas figuras 7 e 8 para compreensão e assimilação significativa de suas características e divisões. Pela presença de elétrons, todos os corpos existentes na natureza emitem energia eletromagnética devido ao seu constante movimento, produzindo campo magnético ao seu redor [40].

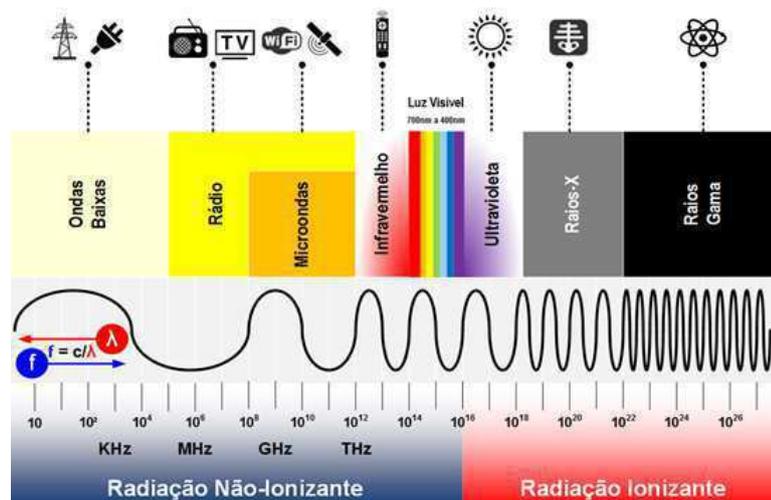


Figura 7 – O espectro eletromagnético na natureza. Fonte: <<http://labcisco.blogspot.com/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html>>

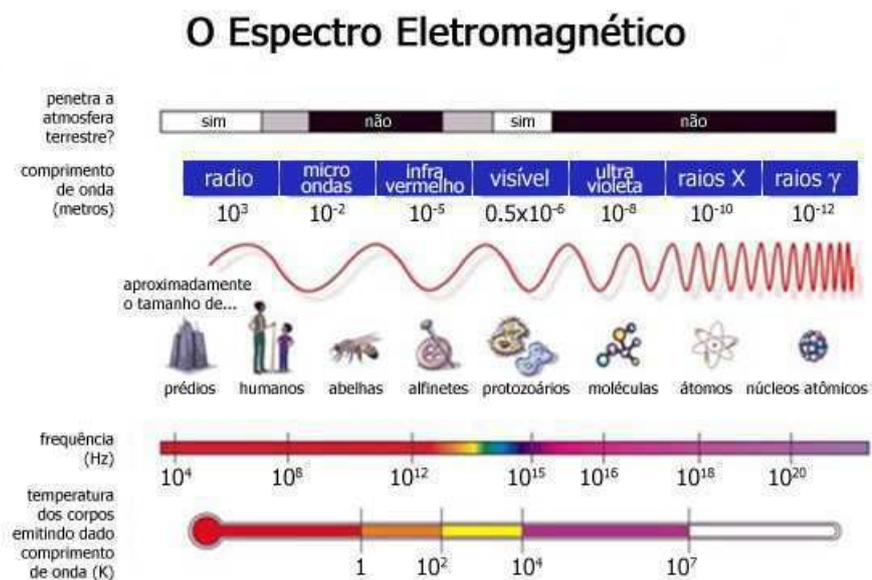


Figura 8 – Principais características das faixas de frequência. Fonte: <<http://labcisco.blogspot.com/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html>>

Na figura 7 cada faixa de onda apresenta algumas das principais aplicações do

nosso cotidiano, e entre 700nm a 400nm está a luz visível. Já na figura 8, pode-se notar os comprimentos de onda do maior para o menor com suas respectivas faixas de frequência. Nesse espectro de frequência, a radiação térmica está relacionada com a temperatura em que o corpo se encontra, emitindo radiações eletromagnéticas em qualquer temperatura que esteja. Com isso, ao elevar a temperatura de um corpo, ele começa a emitir luz visível que começa na cor vermelha e, em altas temperaturas, chega na cor branca, chegando na região do ultravioleta no espectro eletromagnético. Ondas de rádio apresentam o maior comprimento do espectro e possui a capacidade de alcançar grandes distâncias, com aplicações na transmissão de sinais de televisão, aparelhos de rádio e celulares.

Algumas denominações de faixas e frequências são representadas na tabela 1.

Região do espectro eletromagnético	Faixa de frequência (Hz)
Ondas de rádio	$< 3,0 \times 10^9$
Micro-ondas	$3,0 \times 10^9$ a $3,0 \times 10^{12}$
Infravermelho	$3,0 \times 10^{12}$ a $4,3 \times 10^{14}$
Visível	$4,3 \times 10^{14}$ a $7,5 \times 10^{14}$
Ultravioleta	$7,5 \times 10^{14}$ a $3,0 \times 10^{17}$
Raios X	$3,0 \times 10^{17}$ a $3,0 \times 10^{19}$
Raios gama	$> 3,0 \times 10^{19}$

Tabela 1 – Classificação das ondas eletromagnéticas em função das suas frequências. Fonte: Produção do autor

2.6 Emissão e Absorção de ondas de rádio na atmosfera terrestre

Em frequências de rádio superiores a 1 GHz, a absorção pela atmosfera da Terra pode ser grande o suficiente para afetar a precisão das medições de densidade de fluxo e a emissão atmosférica pode aumentar os erros de ruído. A maior parte da emissão e absorção atmosférica ocorre em uma camada cuja altura h é apenas alguns km, muito menor que o raio da terra. A intensidade específica ou brilho espectral I_ν é a radiância de uma superfície que pode ser definida por unidade de frequência ou em comprimento de onda [4].

Logo, a definição do brilho espectral em função da frequência é:

$$I_\nu \equiv \frac{dP}{(\cos \theta d\sigma) d\nu d\Omega} \quad (2.1)$$

e, em função do comprimento de onda, temos:

$$I_\lambda \equiv \frac{dP}{(\cos \theta d\sigma) d\lambda d\Omega} \quad (2.2)$$

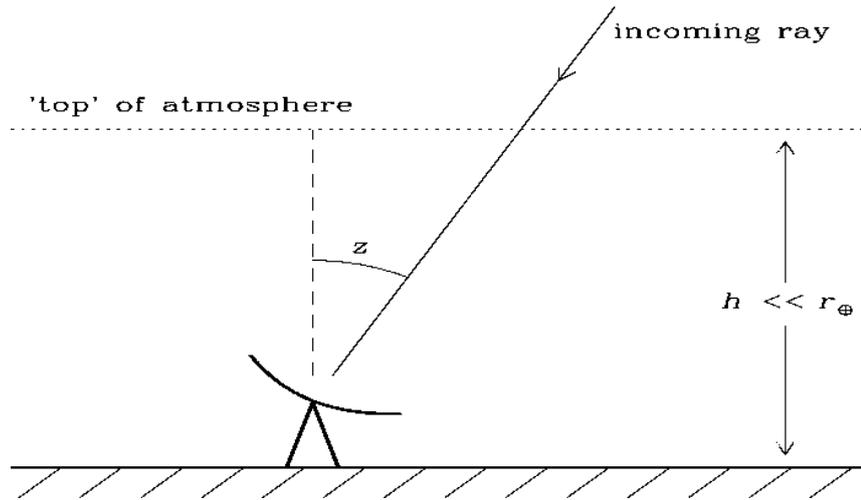


Figura 9 – Inclinação do radiotelescópio e medição de I_ν em função do ângulo zenital z .
Fonte: [4]

A temperatura de brilho é uma medida da radiância da radiação de micro-ondas viajando para cima a partir do topo da atmosfera da Terra. Os radioastrônomos frequentemente descrevem as fontes de emissão de rádio como se fossem radiadores de corpo negro, mesmo que não sejam, eles especificam a emissão de uma fonte em termos de temperatura, chamada de temperatura de brilho. Se a fonte de rádio for um realmente radiador de corpo negro (por exemplo, a lua, a terra, etc), então a temperatura de brilho é igual à real temperatura da fonte. Se a fonte não for um corpo negro, a temperatura de brilho é ainda usado e é igual à temperatura de um corpo negro que emitiria a mesma intensidade de radiação que a fonte, na frequência de rádio observada.

A temperatura de brilho é definida por:

$$T_b(\nu) \equiv \frac{I_\nu c^2}{2k\nu^2}. \quad (2.3)$$

T_b pode variar com a frequência. Como mencionamos anteriormente, a temperatura de brilho é uma maneira de especificar a potência por unidade de ângulo sólido por unidade de largura de banda em termos da aproximação de Rayleigh-Jeans.

Considerando a aproximação Rayleigh-Jeans, na maioria dos comprimentos de onda de rádio, a função de Planck pode ser aproximada e a frequência ν é tão pequena que $h\nu/kT \ll 1$ para qualquer valor de temperatura. A exponencial no denominador da função de Planck pode ser aproximada por uma expansão em série de Taylor [41], produzindo a seguinte expressão:

$$\frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \approx \frac{kT}{h\nu} \quad (2.4)$$

se

$$\frac{h}{K_b T} \ll 1, \text{ de modo que} \quad (2.5)$$

$$B_\nu(T) \approx \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \frac{kT}{h\nu} = \left(\frac{2k\nu^2}{c^2} \right) T \quad (2.6)$$

ou, equivalentemente,

$$B_\nu(T) \approx \frac{2kT}{\lambda^2}, \quad (2.7)$$

que é conhecida popularmente como aproximação de Rayleigh-Jeans.

Diante do que foi mencionado anteriormente, vamos considerar a aproximação Rayleigh-Jeans. Esta aproximação fornece aos rádios astrônomos como uma maneira extremamente conveniente e alternativa de descrever a intensidade de radiação. Além disso, a intensidade é uma medida da radiação emitida, enquanto a temperatura se refere a uma condição física da fonte. Na aproximação de Rayleigh-Jeans, definimos a temperatura de brilho [41], T_B , como:

$$T_B = \left(\frac{\lambda^2}{2k} \right) I_\nu \quad (2.8)$$

É importante destacar que a T_B é uma propriedade da radiação, não do objeto emissor. Para uma fonte de radiação térmica opaca, T_B é um parâmetro muito útil porque a conversão de intensidade à temperatura não é necessário. Em resumo, a temperatura de brilho é uma medida de intensidade, e é igual à temperatura que a fonte teria se fosse opaca e uma fonte térmica. Em baixas frequências, onde a aproximação Rayleigh-Jeans se aplica, a temperatura de brilho é diretamente proporcional à intensidade [41].

A atmosfera da terra limita as transmissões na faixa de $1 \mu m$ de comprimento de onda (visível e infravermelho) e entre 1cm a 10cm de comprimento de onda (rádio). Isso implica na precisão das partes óticas dos telescópios e na detecção de radiação no plano focal.

Por que observar o universo em comprimentos de ondas de rádio? É uma pergunta interessante que discutiremos a seguir.

Há muitas razões pelas quais é vantajoso observar em comprimentos de onda de rádio, sejam elas: o fato das ondas de rádio chegarem ao solo, poder observar objetos ou fenômenos difíceis ou impossíveis de detectar em outras faixas de comprimento de onda e poder usar a emissão de rádio para diagnóstico físico quantitativo de parâmetros de objetos.

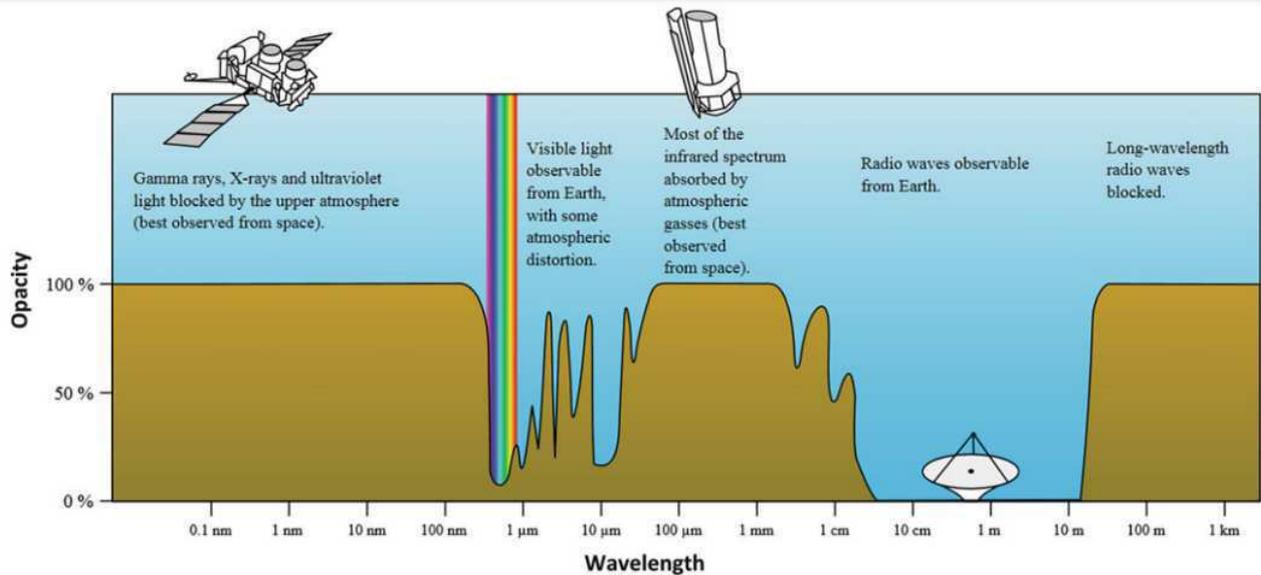


Figura 10 – Transmissão da atmosfera terrestre em função do comprimento de onda. Fonte: [5]

Na figura 10 pode-se notar que uma boa transmissão é possível em torno de $1 \mu m$ de comprimento de onda e na faixa de rádio entre 1cm a 10m. Também, conforme mostrado na figura, as naves espaciais são necessárias para observar objetos astronômicos em raios gama, raios X, ultravioleta e infravermelho, enquanto observações terrestres são possíveis no visível, algumas partes do infravermelho próximo e no rádio. Podemos observar que a janela se fecha na extremidade de comprimento de onda longo do espectro - não por causa da atmosfera, que permanece transparente para ondas de rádio de comprimento de onda longo - mas sim devido à ionosfera, que reflete a radiação.

2.7 Fundamentos da Radiação

Entende-se radiação como uma energia liberada de um resultado de oscilação ou transição de elétrons na matéria [42]. Na figura 11, observemos melhor sobre a intensidade dessa radiação que se propaga em diversas direções.

2.7.1 Temperatura de brilho e densidade de fluxo

Uma fonte astronômica pode ser medida através da força de sua radiação em função da direção no céu (por mapeamento ou imagem) e frequência (espectroscopia), além de outras variáveis como tempo e polarização. Analisando um caso simples de radiação viajando de uma fonte através do espaço vazio, de maneira que não haja absorção (destruição de fótons), espalhamento (mudança da direção dos fótons) ou emissão (criação de novos fótons) ao longo do caminho para um observador [4].

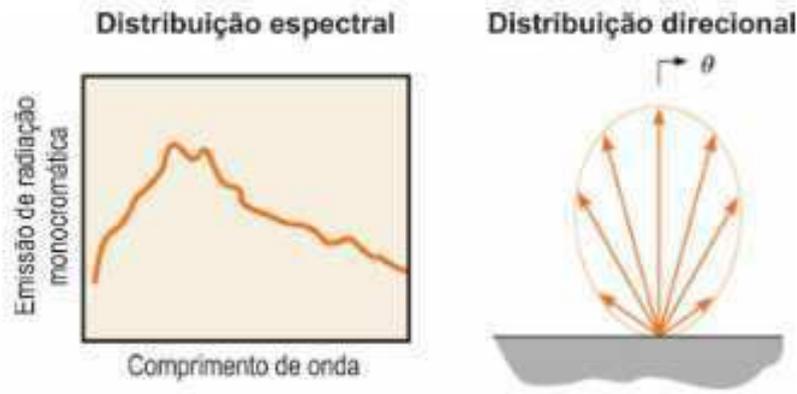


Figura 11 – Distribuição espectral e direcional da radiação emitida pelo corpo, objeto e/ou superfície. Fonte: [6]

Brilho ou intensidade da radiação é a potência por unidade de área por unidade de ângulo sólido emitida na fonte [4] que não depende da distância, já o fluxo aparente é a quantidade de luz que vem de uma determinada área em um determinado período de tempo, ou seja, é a potência que passa por uma unidade de área, sendo útil para medir a energia proveniente de um objeto distante e relativamente compacto, como o Sol, e o fluxo depende da distância, dado em unidades de energia por unidade de tempo por unidade de área. A intensidade específica é definida como potência da radiação por unidade de área por unidade de ângulo sólido ao longo do caminho até o detector. Os dois são parecidos em termos de definição se não houver absorção ou emissão entre a fonte e detector [33]. O brilho por unidade de frequência é chamado de intensidade específica ou brilho espectral.

Na equação 2.9 temos dE como energia que flui através da área projetada $\cos\theta d\sigma$ no tempo dt em uma banda de frequência estreita de largura $d\nu$. Também, brilho espectral I_ν dada em $Wm^{-2}Hz^{-1}sr^{-1}$ [33], a área de superfície infinitesimal (detector), θ o ângulo entre o raio de radiação e a normal da superfície e $d\Omega$ como sendo ângulo sólido infinitesimal medido a partir da localização do observador. Na figura (12) temos um esquema simples para compreensão.

Uma outra forma de representar a temperatura de brilho é definirmos I_ν como sendo a intensidade específica de uma fonte qualquer, dada também em $Wm^{-2}Hz^{-1}sr^{-1}$, a energia dE medida por um radiotelescópio por unidade de área dA por banda de frequência $d\nu$ por unidade de ângulo sólido $d\Omega$:

$$dE = I_\nu dA dt d\nu d\Omega. \quad (2.9)$$

A potência é definida como fluxo de energia por unidade de tempo:

$$dP = \frac{dE}{dt} = I_\nu (\cos\theta d\sigma d\Omega d\nu). \quad (2.10)$$

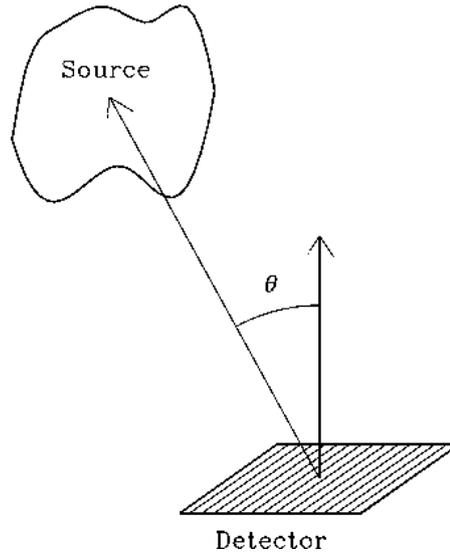


Figura 12 – Intensidade específica medida por um detector. Fonte: [4]

$$\text{(watts)} \quad (m^2 \text{ sr Hz})$$

Especificando o brilho em uma faixa de frequência $d\nu$ ou faixa de comprimento de onda $d\lambda$: os espectros das fontes carregam informações astrofísicas importantes; as diferentes frequências de radiação emitidas pela fonte, dependem das propriedades da mesma e os teoremas sobre radiação são verdadeiros para todas as faixas de frequência, como por exemplo, a intensidade específica que é conservada ao longo de um caminho de raio r no espaço vazio.

Se uma fonte é discreta que possui um ângulo sólido bem definido, a potência espectral recebida por um detector de área projetada é chamada de densidade de fluxo S_ν em $W m^{-2} Hz^{-1}$:

$$\frac{dP}{d\sigma d\nu} = I_\nu \cos \theta d\Omega. \quad (2.11)$$

Aplicando a integral em ambos os lados e definindo a densidade de fluxo S_ν no lado esquerdo da equação 2.11, temos:

$$S_\nu \equiv \int_{\text{fonte}} I_\nu(\theta, \phi) \cos \theta d\Omega. \quad (2.12)$$

Se o tamanho angular da fonte é $\ll 1 \text{ rad}$, $\cos \theta \approx 1$, então:

$$S_\nu \approx \int_{\text{fonte}} I_\nu(\theta, \phi) d\Omega. \quad (2.13)$$

Podemos calcular o fluxo S_ν produzido pela fonte integrando ao longo de uma

banda de frequência $\Delta\nu$ para que o fluxo incidente no telescópio seja:

$$S = \int_{\nu} \int_{\Omega_{fonte}} I_{\nu} d\Omega d\nu \quad (2.14)$$

De acordo com a definição da intensidade específica I_{ν} , é possível associá-la a uma temperatura para ondas de rádio, já que os comprimentos de onda são da forma $h\nu \ll kT$ no caso do domínio de Rayleigh-Jeans na distribuição do corpo negro, como podemos observar na figura (104). A Lei de Planck que descreve um corpo negro é:

$$I_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.15)$$

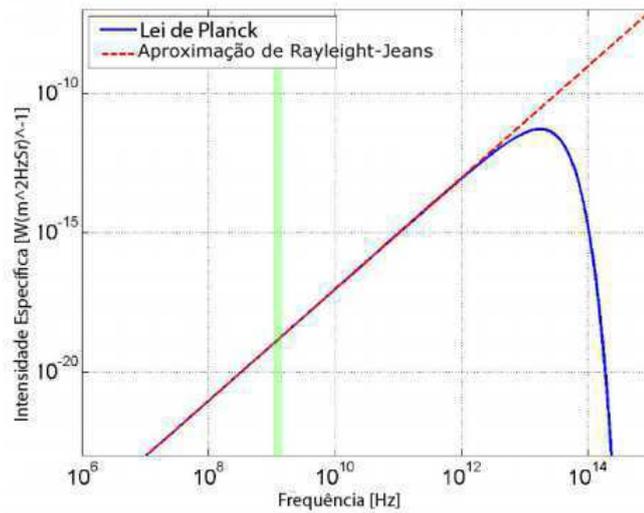


Figura 13 – Radiação do Corpo negro para $T = 300$ K. Fonte: [7]

Na figura (13) está representada a distribuição de Planck para um corpo negro, explicado no apêndice (A), na temperatura de 300 K, e na faixa verde tem-se a banda entre 900 a 1300 MHz.

Na equação (2.15), o que nos interessa é a temperatura T , então vamos expandir o termo exponencial em série e utilizar os dois primeiros termos para o cálculo:

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{h\nu}{kT} \right)^n \frac{1}{n!} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT} \quad (2.16)$$

Logo, a intensidade específica é:

$$I_{\nu} = \frac{2\nu^2 kT_B}{c^2} \quad (2.17)$$

T_B é a temperatura que um corpo negro deve possuir para emissão de intensidade específica I_ν , que é a temperatura de brilho e utilizada como parâmetro de intensidade nos estudos de rádio. Podemos demonstrar a temperatura de brilho como:

$$T_B = \frac{S\lambda^2}{2k\Omega}, \quad (2.18)$$

onde Ω é o ângulo sólido, λ o comprimento de onda e k a constante de Boltzmann.

Temos, na radioastronomia, a unidade *Jy* que é utilizada para densidades de fluxo específico, o Jansky:

$$1Jy = 10^{-26}Wm^{-2}Hz^{-1} \quad (2.19)$$

Um rádio telescópio intercepta um fluxo de energia S que é a taxa na qual a energia dE cruza uma unidade de área dA perpendicular à direção de propagação:

$$S \equiv \frac{dE}{dAdt} \quad (2.20)$$

Quando integramos sobre a área efetiva A_{eff} do telescópio, obtemos a potência de entrada P_{ent} em unidades Wm^{-2} . A área efetiva A_{eff} é uma função da direção medida com relação ao eixo da antena e da potência (em watts), que é dada por:

$$P_{ent} = A_{eff}S \quad (2.21)$$

O fluxo de energia de entrada é distribuído por uma banda de recepção finita, sendo uma função da frequência ν . Com isso, o espectro é descrito pela potência por unidade de largura de banda P_ν , derivada do fluxo específico S_ν ou densidade de fluxo que possui unidades de $Wm^{-2}Hz^{-1}$. Logo:

$$S_\nu \equiv \frac{dE}{dAdtd\nu} \quad (2.22)$$

A maioria das fontes astronômicas não são corpos negros, mas é conveniente utilizar um corpo negro como referência fundamental. Nesse sentido, definimos uma fonte com temperatura de brilho T_B de modo que um corpo negro hipotético em uma temperatura física T_B produzisse a mesma intensidade específica I_ν , que em alguns casos pode ser igualada ao brilho específico B_ν .

O brilho específico é expresso como uma temperatura de brilho usando a aproximação de Rayleigh-Jeans, com unidades $Wm^{-2}Hz^{-1}sterad^{-1}$.

$$B_\nu = \frac{2KT_B}{\lambda^2} \quad (2.23)$$

O brilho específico e a densidade de fluxo são relacionados da seguinte forma:

$$B_\nu = \frac{S_\nu}{\Omega_{fonte}} \quad (2.24)$$

Alternativamente, a densidade de fluxo é a integral do brilho específico sobre o ângulo sólido da fonte [33], com unidades $Wm^{-2}Hz^{-1}$:

$$S_\nu = \int \int_{fonte} B_\nu(\theta, \varphi) d\Omega \quad (2.25)$$

Portanto, obtemos uma equação que fornece a temperatura de brilho para uma fonte de um determinado fluxo de densidade:

$$S_\nu = \frac{2KT_B\Omega_{fonte}}{\lambda^2} \quad (2.26)$$

Quando a região emissora é maior do que o feixe, o brilho da região coberta pelo feixe pode ser medido. O receptor detecta a potência de entrada, a frequência, largura de banda das observações, a área de coleta da antena e o ângulo sólido interceptado. No entanto, quando a fonte é muito menor que o feixe do telescópio, seu ângulo sólido não pode ser determinado, resultando a falta de medição do seu brilho [7].

Os diversos tipos de fontes de rádio cósmicas existentes exibem uma ampla gama de temperatura de brilho. O termo “*Cold*” é associado ao corpo negro real ou radiação térmica de regiões com temperatura T_B de alguns K até 100K. “*Warm*” está associado à emissão livre difusa de plasmas astrofísicas em ambientes de energia superior, em que T_B normalmente de 5000K a 15.000K e é semelhante à temperatura física. “*Hot*” associa-se à radiação síncrotron não térmica. Se $T_B > 105K$, pode-se supor que a radiação não é térmica, mesmo se o espectro não for conhecido. Conforme ilustrado na tabela abaixo alguns exemplos.

T_B de alguns K até 100K.	T_B de 5000k até 15000.	$T_B > 105K$.
Radiação Cósmica de Fundo em Microondas, $T_B = 2.726K$;	Fotosfera Estelares;	Supernovas;
Poeira Interestelar, $T_B=10K$ até 30K;	Atmosferas tênues em torno das estrelas (ventos estelares);	Pulsares;
Nuvens de Hidrogênio Atômico, $T_B=50K$ até 100K.	Nebulosas planetárias.	Núcleos galácticos ativos.

Tabela 2 – Temperaturas de brilho de fontes astronômicas. Fonte: [30]
Produção do autor.

3 Radiotelescópios

Devido ao fato de que as energias provenientes das radiofontes serem pequenas para nossa percepção, faz com que os radiotelescópios sejam instrumentos necessários de sensibilidade alta para captação. Nesse sentido, um radiotelescópio é constituído por uma antena refletora que capta as ondas provenientes do espaço, juntamente com uma estrutura de sustentação e mecanismos de apontamento para os objetos de estudo. [8]. Também, é um dispositivo que possui um “prato” parabólico de material metálico e no foco desta parábola que é para onde os sinais convergem, é posto uma antena com uma determinada frequência que se deseja estudar.

Na figura 14, podemos observar uma ilustração da composição de um radiotelescópio do tipo parabólico com seus principais componentes.

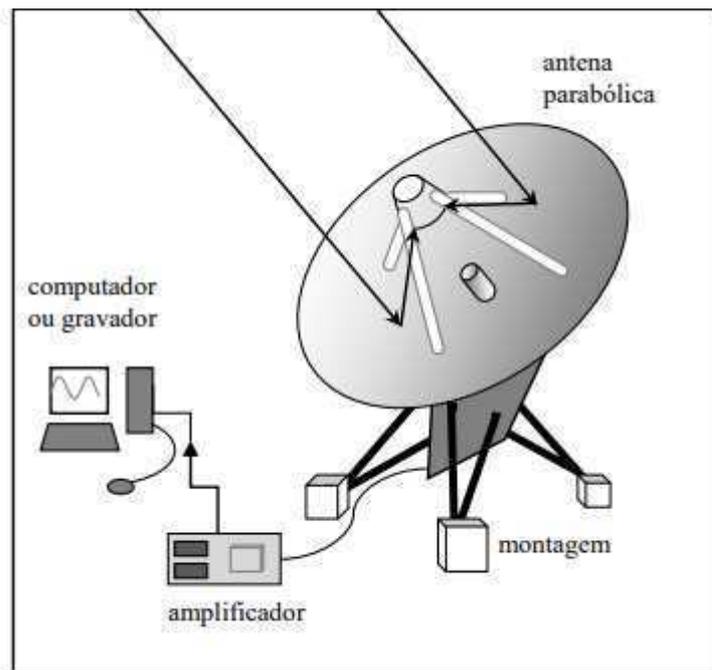


Figura 14 – Esquema de um radiotelescópio com as principais componentes para funcionamento. Fonte: [8]

A antena é um equipamento encarregado de receber os sinais eletromagnéticos que são captados pelo “prato” metálico de formato parabólico. O amplificador tem como objetivo amplificar o sinal baixo que é recebido pela antena e posteriormente amplificar para níveis adequados ao ADC (*Analogic Digital Converter*), convertendo os sinais analógicos em sinais digitais para serem interpretados pelo computador em forma de dados gráficos.

A respeito da montagem de um radiotelescópio, há três opções: altazimutal, equatorial e de trânsito.

Na montagem altazimutal (15), o telescópio pode se movimentar tanto em um eixo vertical que permite o movimento em azimute quanto em um eixo horizontal, que permite o movimento em altura. O eixo principal permite movimentação no sentido do azimute, que é o ângulo horizontal, partindo do Norte no sentido do Leste, Sul, Oeste e chegando novamente ao Norte, ou seja, gira 360° . Para realizar este movimento, o eixo é montado na vertical, perfeitamente a prumo, e a origem deve estar posicionada rigorosamente no Norte Verdadeiro. Já o eixo secundário permite movimentos no sentido da altura, verticalmente entre o horizonte e o zênite, ou seja, de 0 à 90° [9].



Figura 15 – Montagem altazimutal. Fonte: [9]

Na montagem equatorial (16), o eixo polar que é responsável pelo movimento do radiotelescópio, aponta na direção do polo celeste visível no hemisfério da Terra em que o radiotelescópio está instalado. Quando está apontado para um determinado objeto, é preciso apenas movimentar ao redor do eixo polar para compensar o movimento aparente do astro. O radiotelescópio movimenta-se em dois eixos que faz permitir o movimento em ascensão reta (eixo polar) e declinação. O eixo primário é montado paralelamente ao eixo terrestre, de modo que sempre apontará para o polo celeste (eixo de ascensão reta ou polar). Já o eixo secundário (eixo de declinação), que se encontra perpendicularmente ao eixo primário, permite a movimentação no sentido da declinação, de 0° no equador até $+90^\circ$ no polo Norte, e -90° no polo Sul. Este tipo de montagem é de fácil utilização, pois a partir da primeira regulagem, permite que se acompanhe um astro no céu movendo-se o telescópio em apenas um sentido [9].

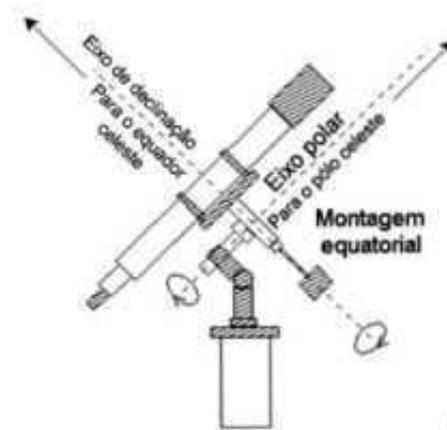


Figura 16 – Montagem equatorial. Fonte: [9]

Na montagem de trânsito a radiofonte pode ser observada em um pequeno intervalo de tempo durante a passagem meridiana (plano imaginário que divide a abóbada celeste observada nos dois hemisférios: ocidental e oriental). A montagem de trânsito lembra a montagem equatorial, com a diferença que só há movimento em declinação [8]. Em outras palavras, um radiotelescópio é uma antena de rádio equipada por um receptor que capta sinais sensíveis provindas do universo. É capaz de mapear a distribuição de rádio vindo de diversas fontes cósmicas, como por exemplo, as estrelas. É utilizado para estudar os astros, seus fenômenos de formação, energia escura e até mesmo a origem do universo.

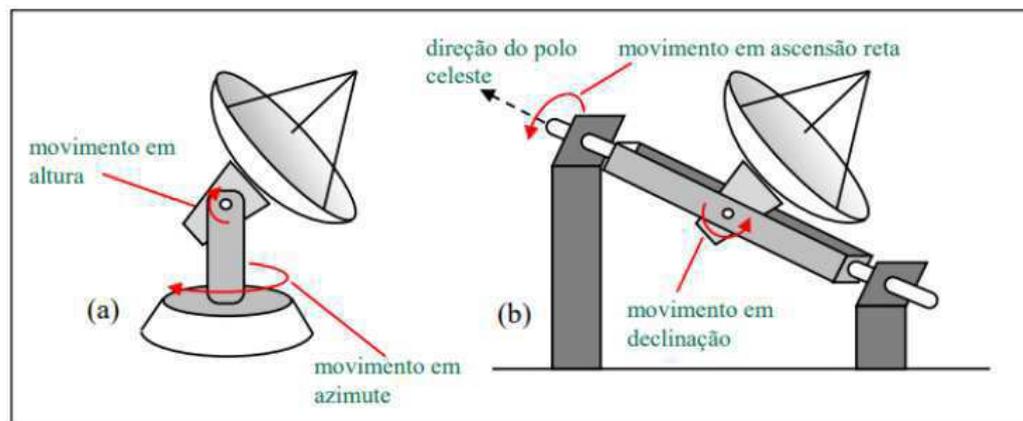


Figura 17 – (a) Montagem altazimutal e (b) Montagem equatorial. Fonte: [8]

Esse equipamento pode ser encontrado em várias partes do mundo e muitas vezes trabalham em conjunto com outros países, desde a parte de planejamento, estudos, confecções e elaboração de gráficos, análise de dados e estudos futuros que cooperam para um aumento do avanço tecnológico científico.

A constituição de um radiotelescópio é por meio de uma antena de rádio, radiômetro, receptores sensíveis à radiação que são amplificados e armazenados na memória de um registrador ou computador, para os quais se fazem análises dos dados e fornecem os

resultados em forma de gráficos e imagens. Em alguns casos, é possível ter um sintonizador para selecionar uma determinada frequência que deseja captar os sinais.

Na figura 18 um dos maiores e mais conhecidos radiotelescópios do mundo.



Figura 18 – O observatório de Arecibo. Fonte: [10]

Logo a seguir, temos o maior radiotelescópio do Brasil, o ROI (Rádio Observatório de Itapetinga). Geralmente estão situados em locais desertos para evitarem interferências eletromagnéticas vindas de centros urbanos.



Figura 19 – Radiotelescópio de Itapetinga – ROI/INPE – 2000. Fonte: [11]

3.1 O Radiotelescópio BINGO

O projeto BINGO (Baryon Acoustic Oscillation In Neutral Gas Observations) tem como objetivo pioneiro detectar as oscilações acústicas de bárions (BAO - Baryonic Acoustic Oscillation) por meio de um telescópio operando na faixa de rádio, especificamente na faixa de 960 a 1260 MHz. Essa faixa de frequência é capaz de detectar o gás neutro, como o hidrogênio atômico. O telescópio será direcionado para o estudo de objetos cósmicos com um desvio para o vermelho (redshift) entre 0,13 e 0,48.

As oscilações acústicas de bárions são uma importante ferramenta para medir a expansão do Universo e restringir as propriedades da energia escura. Ao estudar essas oscilações, o projeto BINGO tem o potencial de fornecer insights valiosos sobre a evolução do Universo e ajudar a desvendar os mistérios da energia escura, uma forma de energia ainda pouco compreendida. Essa pesquisa pode levar a uma compreensão mais profunda da natureza e do destino do nosso cosmos.

Com o uso do telescópio BINGO e sua capacidade de detectar as oscilações acústicas de bárions na faixa de rádio, abre-se a possibilidade de realizar estudos detalhados e precisos sobre as características e propriedades fundamentais do Universo. Essas descobertas podem ter implicações significativas para a cosmologia e nos ajudar a avançar em nossa compreensão sobre a estrutura e a evolução do Universo em grande escala [43].

Podemos definir o *Redshift* z , explicado no apêndice B, através da expressão:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (3.1)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz observada e λ_0 é o comprimento de onda da luz se o objeto estiver em repouso.

As BAOs são ondas geradas pela interação dos átomos com a radiação no início do Universo e por meio delas será possível medir a distribuição do hidrogênio neutro em distâncias cosmológicas. Vale ressaltar, também, o propósito que o BINGO tem de investigar as oscilações acústicas bariônicas por meio da detecção de hidrogênio atômico, que é um elemento abundante no nosso Universo, na faixa de comprimento de onda 21cm (1,4 GHz). O BINGO é um instrumento de mapeamento significativo de grande escala, telescópio exploratório sendo de grande importância para a compreensão dos sinais cosmológicos [44].

O nosso universo é composto de, aproximadamente, 26,8% de matéria escura e 68,3% de energia escura, porém a ciência não possui ainda informações suficientes sobre grande parte da composição do Universo. Com isso, apenas 5% é constituído por matéria bariônica que podemos observar, detectar e estudar mais diretamente. O BINGO pretende contribuir de maneira significativa para a compreensão e os desenvolvimentos futuros

acerca do setor escuro do universo, assim como também pretende lançar luz em outras questões fundamentais do universo.



Figura 20 – Região de construção do projeto BINGO na serra do Urubu, localizada no município de Aguiar, no Vale do Piancó, sertão do Estado da Paraíba. Fonte: Comunicação interna da Colaboração BINGO.

A construção do BINGO teve seu local escolhido no interior Estado da Paraíba – Brasil, pelo fato das interferências em rádio (RFI, do inglês *Radio Frequency Interference*) na banda de operação do radiotelescópio serem baixas, evitando ruídos que possam atrapalhar nas captações dos sinais eletromagnéticos.

O BINGO é um consórcio formado por várias instituições de países diferentes pelo mundo, conforme a tabela 3.

Países	Instituições
Brasil	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela Universidade de São Paulo (USP) e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).
Inglaterra	University of Manchester e a University College London.
Suíça	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich).
França	Institut d'astrophysique de Paris.
China	YangZhou University.
África do Sul	University of KwaZulu-Natal.

Tabela 3 – Relação dos países e instituições que estão participando e sendo responsáveis pelo projeto do radiotelescópio BINGO. Fonte: Produção do autor.

A respeito do sistema óptico do BINGO, será do tipo Crossed-Dragone (figura 21),

e terá refletores que coletam sinais fixos, atuando como um telescópio em trânsito numa faixa de declinação cerca de 15° .

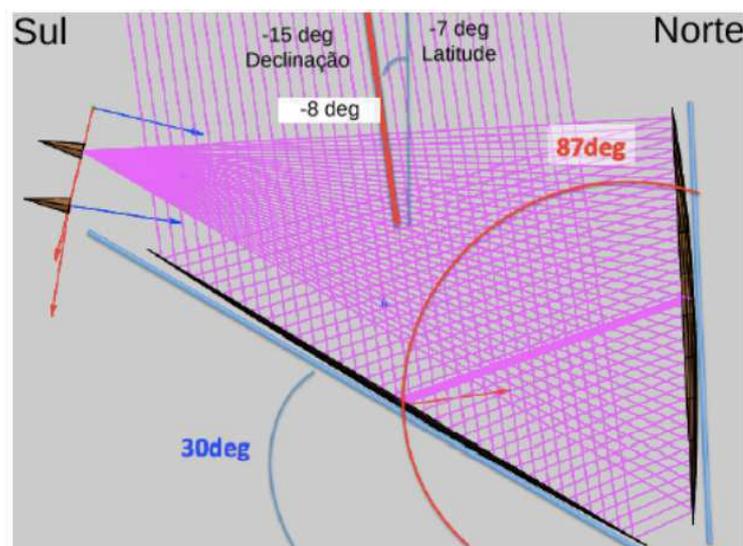
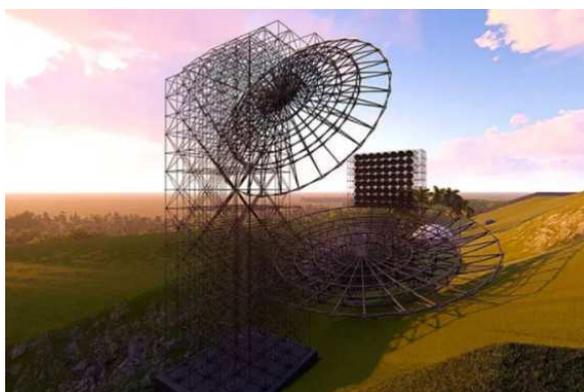
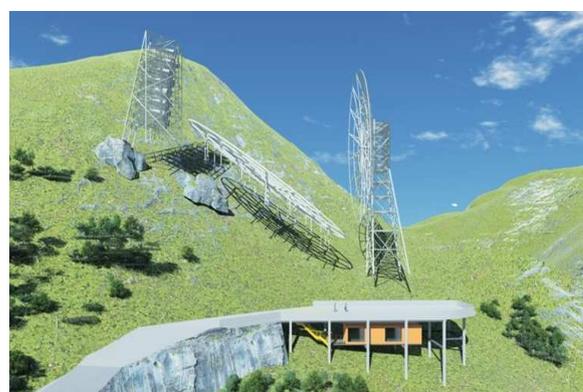


Figura 21 – Projeto óptico do BINGO, por Bruno Maffei e Ivan Ferreira. Nesse esquema, há dois espelhos que compõe o radiotelescópio, um primário paraboloide de raio 20m e o secundário que é um espelho hiperbólico de raio 17. Fonte: Comunicação Interna da Colaboração BINGO.

O sistema óptico consiste em um grande refletor iluminando um plano focal possuindo 28 cornetas para realizar medições do céu com duas polarizações circulares em modo de varredura de deriva, com o intuito de produzir medidas da intensidade da radiação.



(a) Projeto esquematizado.



(b) Protótipo das instalações do BINGO.

Figura 22 – Esquema da instalação do BINGO. Fonte: Comunicação interna da Colaboração BINGO.

3.2 O Radiotelescópio Uirapuru

O Radiotelescópio Uirapuru foi instalado na Universidade Federal de Campina Grande no dia 19/03/2021 e permitirá observar pulsares, estrelas de nêutrons rápidas e resquícios de supernovas. Considerado um dos mais avançados equipamentos de radioastronomia do mundo, o nome Uirapuru vem da inspiração de um tipo de pássaro que vive na Amazônia, que comumente é chamado de pássaro corneta, nesse sentido, vem a associação e a designação desta nomenclatura.

O principal objetivo do BINGO é realizar observações cosmológicas e estudar o Universo como um todo. Nesse contexto, o radiotelescópio Uirapuru desempenhará um papel crucial, direcionando sua corneta para o céu e medindo as radiofrequências do universo na faixa de comprimento de onda de rádio.

A construção e instalação da corneta no campus de Campina Grande são etapas fundamentais que foram concluídas com sucesso. Além disso, um dos radiotelescópios auxiliares, conhecidos como "outriggers", será construído no município de Aguiar, situado no Sertão da Paraíba.

Essa expansão da infraestrutura do radiotelescópio Uirapuru possibilitará uma cobertura mais ampla do céu, permitindo observações mais abrangentes e precisas. A localização estratégica em Aguiar contribuirá para reduzir as interferências e melhorar a qualidade dos dados coletados. Com essa configuração, o Uirapuru estará pronto para realizar estudos avançados da radiofrequência do universo, trazendo insights valiosos sobre a cosmologia e a compreensão do Universo em grande escala.

Essas iniciativas de expansão e aprimoramento do radiotelescópio Uirapuru demonstram o compromisso contínuo da equipe de pesquisa em buscar novas fronteiras da ciência, impulsionando a exploração do cosmos e desvendando os segredos do Universo.



Figura 23 – Etapa de construção e instalação da corneta auxiliar na UFCG. Fonte: [12]

A figura 24 trata-se da primeira medição do Radiotelescópio Uirapuru, mostrando

os sinais e ruídos captados pela corneta em diferentes faixas de frequência.

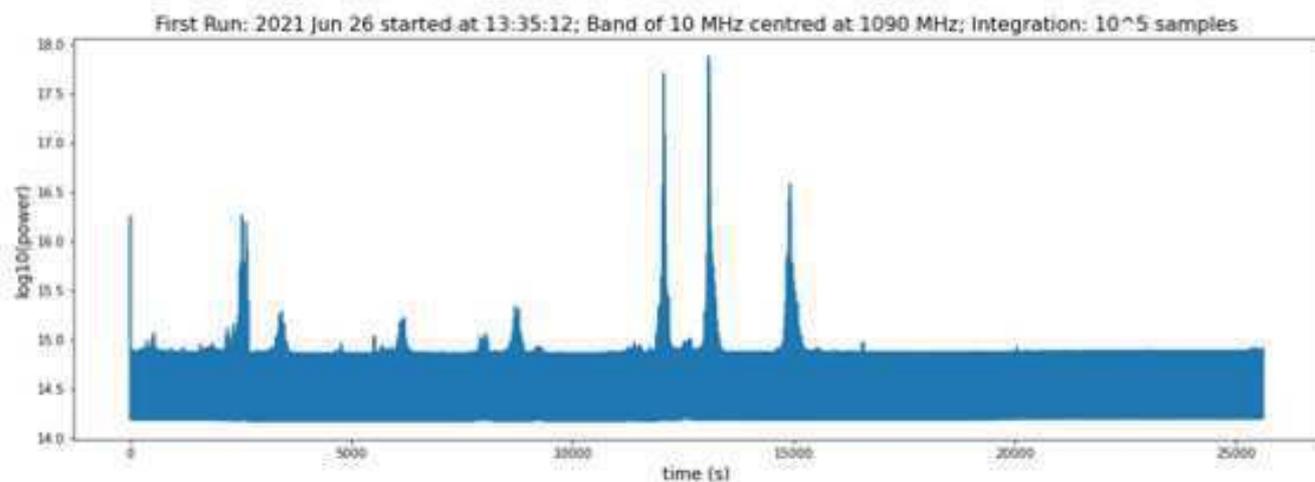


Figura 24 – Primeira medição do Uirapuru. Fonte: Produção do autor.

Tendo em vista a necessidade de se analisar e observar objetos de brilho mais baixos, explorando detalhes das fontes de radiação, é necessário aumentar a área de coleta dos radiotelescópios com melhoria no desenvolvimento de novas tecnologias, como por exemplo, receptores de baixos ruído e altos ganhos.

Um receptor de rádio converte sinais de uma antena de rádio para uma forma mais utilizável, ou seja, capturar o sinal refletido da antena e amplificar. A antena intercepta as ondas eletromagnéticas provenientes das ondas de rádio e as converte para corrente alternada aplicadas ao receptor e o mesmo extrai essas informações. O receptor possui um filtro eletrônico que separa o sinal que deseja estudar dos demais que são captados pela antena. A principal função de um receptor de rádio é decodificar os sinais eletromagnéticos recebidos do espaço, com o auxílio da antena, que pode ser transformado em ondas sonoras, sinais digitais ou analógicos para posteriormente ser processado em informações [45].

As tecnologias de rádio frequência são essenciais para a operação de muitas aplicações do dia a dia, como rádios, telefones celulares, roteadores Wi-Fi, e dentre outros dispositivos baseados na banda de rádio perceptíveis.

Na figura 25, está representado a estrutura básica de um radiotelescópio típico.

Na figura 26 temos uma comparação de uma unidade de rádio simples com um radiotelescópio.



Figura 25 – Estrutura básica de um radiotelescópio comum. Fonte: Produção do autor.



Figura 26 – Receptor de rádio doméstico (esquerda) e um rádio telescópio (direita). Fonte: [13]

A corneta é um elemento da antena que é responsável por acoplar o sinal de radiofrequência aos receptores de rádio na faixa de micro-ondas. As cornetas que serão construídas para o projeto BINGO são corrugadas para atender os objetivos do equipamento, que são: minimizar os lóbulos laterais e adquirir uma performance significativa de polarização. As cornetas que estão sendo desenvolvidas para o projeto BINGO tem a finalidade, também, de obter boa performance de polarização. O equipamento eletromagnético foi desenvolvido na *University of Manchester* e o projeto mecânico desenvolvido na Divisão de Astrofísica do INPE. Na figura a seguir, temos um esquema para entendermos sua estrutura.

Sobre o projeto e o processo de fabricação das cornetas do BINGO, elas estão sendo construídas no Brasil com grandes dimensões para cobrir um amplo campo de

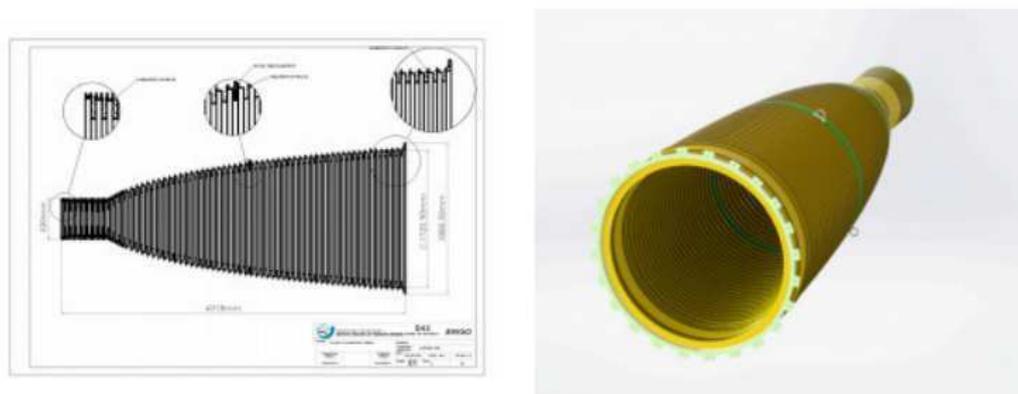


Figura 27 – Esquerda: Fase do desenho da corneta e planejamento com seus detalhes na corrugação. Direita: Abertura da corneta vista em perspectiva, em que os anéis verdes são os de suspensão. Fonte: [14]

visão. Também, estão sendo realizadas no Brasil a montagem, desenvolvimento, testes dos protótipos e produções dos receptores. Cada corneta terá 1,9m de diâmetro, 4,3m de comprimento e seu tamanho de feixe com 25° . A corrugação é dada através da integração de 127 anéis coaxiais que são feitos de liga de alumínio cobertas por uma camada que protege contra corrosões.



Figura 28 – Transporte da corneta. Fonte: [15]

Na figura 28 temos na esquerda a corneta que está sendo transportada para dentro de uma câmara sem eco para conter reflexões de ondas sonoras e eletromagnéticas. Na direita a corneta dentro da câmara do Laboratório de Integração e Testes no INPE [46].

Na corneta há um polarímetro ou polarizador, um filtro ótico que permite a passagem de ondas de luz de uma polarização específica, enquanto a mesma bloqueia as ondas de luz de outras polarizações. Ele pode filtrar um feixe de luz de polarização indefinida ou mista em um feixe de polarização bem definida, que é a luz polarizada. Os polarizadores ou polarímetros podem ser feitos para outros tipos de ondas eletromagnéticas além da luz visível, como ondas de rádio, micro-ondas e raios-X.

A figura a seguir está a corneta do Uirapuru e o suporte na UFCG.



Figura 29 – Corneta do Uirapuru. Produção do autor.

Também, na corneta teremos mixers do tipo magic tees e guias de onda do tipo WG5, em que na parte superior é mostrado o projeto mecânico do polarímetro e magic tees. Na figura inferior temos o polarímetro, magic tees e as guias de onda integrado a uma corneta no laboratório de cosmologia na Divisão de Astrofísica do INPE. mostrado na figura 30.

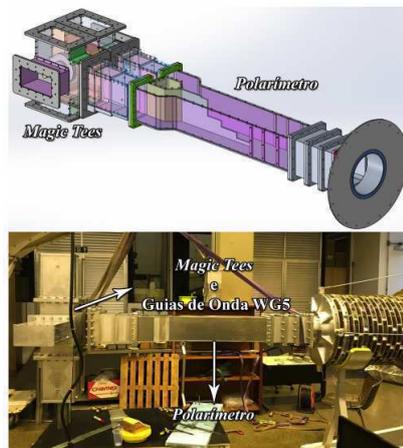


Figura 30 – Construção e composição da corneta. Fonte: Comunicação interna da Colaboração BINGO.

Após cada guia de onda WG5, haverá um sistema correlacionador operando com amplificadores à temperatura controlada em 290 K, o que acarretará em uma temperatura de ruído total para cada receptor de cerca de 70 K [15]. Uma das principais propostas do receptor para o projeto BINGO é do tipo *front-end* composto por transições, polarímetros e magic tees que são conectados a dois receptores correlacionadores, que é constituído por um radiômetro simples mostrado na figura 31.

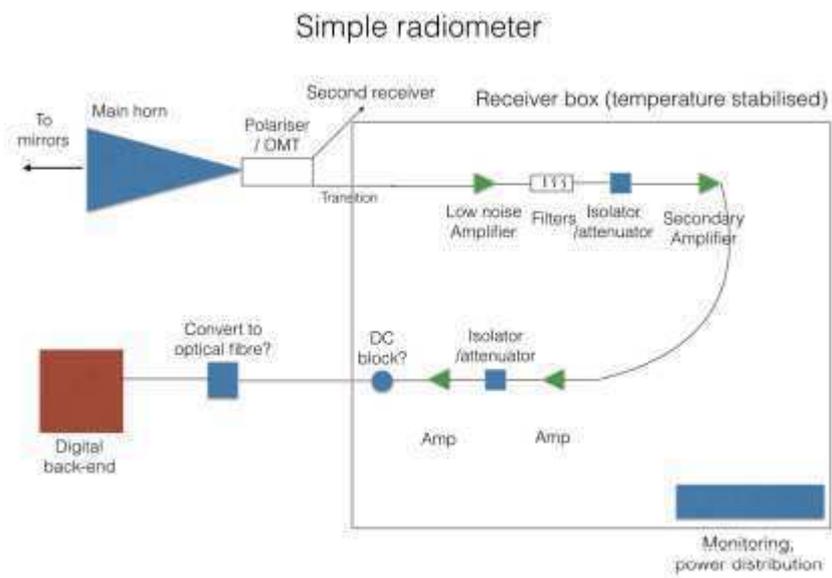


Figura 31 – Diagrama do modelo de um radiômetro simples do projeto BINGO. Fonte: Comunicação interna da Colaboração BINGO.

4 Conceitos

Neste capítulo, iremos tratar sobre os conceitos que estão inseridos dentro dos componentes envolventes do receptor do BINGO, como por exemplo, o LNA ZX60-P162LN+, o filtro passa banda, radiômetros, antenas, etc.

4.1 Amplificadores

Amplificador é um equipamento eletrônico capaz de aumentar os sinais elétricos de um sinal de entrada, por exemplo, expandindo a potência e proporcionando uma análise mais significativa nos dados obtidos. O amplificador mais comum é o do tipo eletrônico, utilizado em transmissores e receptores de televisão e rádio.

A escolha de um amplificador envolve vários fatores, além do máximo de ganho na banda 980 – 1260 MHz e uma menor figura de ruído possível para melhor captação de sinais e seus estudos. Um amplificador comercial da *Mini-Circuits* importante durante os estudos e testes da corneta e radiotelescópio Uirapuru foi o modelo ZX60-P162LN+ que apresenta uma figura de ruído de 0.5 dB e ganho de 22.5 dB. A escolha seguiu a ideia de quanto menor fator de ruído e maior ganho na faixa entre 700 a 1600 MHz, por exemplo, melhor para as medições. As tabelas na seção 5.2.3 mostram mais detalhes sobre um dos amplificadores selecionados na fase de testes para o projeto BINGO e para o radiotelescópio Uirapuru na faixa de 1000 a 1260 MHz.

4.2 Amplificador Coaxial de Baixo Ruído ZX60-P16LN+

O amplificador coaxial de baixo ruído (LNA) é um componente eletrônico que oferece uma figura de ruído extremamente baixa (máximo de 0.98 dB) em uma ampla faixa de frequência (0.7MHz a 1.7GHz). Ele amplifica sinais de potência muito baixa sem comprometer a relação sinal-ruído, sendo ideal para aplicações sensíveis que exigem amplificação precisa e com mínimo ruído adicional. O LNA é amplamente utilizado em comunicações, radioastronomia e instrumentação de alta precisão.

A maioria dos componentes eletrônicos que são utilizados na radioastronomia estão disponíveis no site da Mini Circuits, onde é possível encontrar uma infinidade de componentes eletrônicos de diversos tipos, como por exemplo, amplificadores, filtros, atenuadores, cabos e guias de ondas. Cada componente possui uma ficha de dados, mostrando detalhadamente as informações do produto, testes, gráficos e especificações.

Na tabela 4 está representada a ficha de dados (*Datasheet*) com algumas medições

Parameter	Frequency	Min	Max	Units
Frequency Range	-	0.7	1.6	GHz
Gain	0.7	20.9	24.5	dB
	0.8			
	1.0			
	1.3			
	1.6			
Noise Figure	0.7	-	0.95	dB
	0.8			
	1.0			
	1.3			
	1.6			
Output Power at 1 dB compression	0.7	17.5	-	dBm
	0.8			
	1.0			
	1.3			
	1.6			
Output IP3	0.7	28	-	dBm
	0.8			
	1.0			
	1.3			
	1.6			
Input VSWR	0.7	-	-	:1
	0.8			
	1.0			
	1.3			
	1.6			
Output VSWR	0.7	-	-	:1
	0.8			
	1.0			
	1.3			
	1.6			
Directivity	0.7 ~1.6	-	-	dB
DC Supply Voltage	-	3.8	4.2	V

Tabela 4 – Especificações elétricas do LNA ZX60-P162LN+ a 25°C e 4V. Fonte: [31]

feitas pelo fabricante do produto de acordo com as especificações elétricas, como a temperatura e a voltagem.

4.2.1 Ganho - (Gain)

Na seção 4.3 falaremos um pouco sobre o ganho e como determinarmos. Aqui, falaremos um pouco mais sobre a sua definição, as equações para acharmos o valor em casos distintos e entendermos sobre o que é sinal.

O ganho é uma medida da capacidade de um componente ou circuito de aumentar a potência ou amplitude de um sinal, expresso usando as unidades de decibéis logarítmicos (dB), no caso da expressão 4.1. Por exemplo, o ganho de um amplificador é definido como a medida

da capacidade de amplificar um sinal e é a razão entre a potência de saída em relação à potência de entrada [15], geralmente medida em decibéis:

$$Ganho = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) dB \quad (4.1)$$

Em uma antena de transmissão, o ganho descreve o quão bem a antena converte a potência de entrada em ondas de rádio dirigidas em uma direção especificada. Em uma antena receptora o ganho descreve o quão bem a antena converte ondas de rádio que chegam de uma direção especificada em energia elétrica [47].

Já na relação 4.2, aplicando a propriedade logarítmica da divisão da equação 4.1, obtemos a potencia em dB, e o cálculo do ganho será:

$$Ganho = P_{saída} - P_{entrada} \quad (4.2)$$

Neste caso, aplicando os valores da potência de saída e a potência de entrada, teremos o valor do ganho em dB, na escala linear.

4.2.1.1 Sinal

O sinal é uma potência que é detectada pelo telescópio/radiotelescópio, por exemplo. Em linhas gerais, o sinal é definido como um conjunto de informações ou dados, como telefone ou sinal de televisão.

No processamento de sinais, um sinal é uma função que transmite informações sobre um fenômeno. Em eletrônica e telecomunicações, refere-se a qualquer variação temporal de tensão, corrente ou onda eletromagnética que transporta as informações.

A intensidade do sinal das radiações eletromagnéticas provindas da Terra chega a nós com uma intensidade baixa, com excessão das emissões solares. Nesse sentido, é importante a captação de energia da fonte eletromagnética em uma área maior possível e concentrá-las no receptor da antena. Por isso é sempre mais viável, na radioastronomia, utilizarmos os radiotelescópios com o "prato" das antenas parabólicas, a sua direcionalidade e reflexão.

4.2.2 Ruído, figura de ruído e fator de ruído.

No senso comum, a palavra ruído significa barulho, som ou poluição sonora não desejada. Na eletrônica o ruído pode ser associado à percepção acústica, por exemplo, de um "chiado" característico (ruído branco) ou aos "chuviscos" na recepção fraca de um sinal de televisão. No processamento de sinais o ruído pode ser entendido como um sinal aleatório, sendo importante a relação Sinal/Ruído na comunicação. O ruído no ramo da radioastronomia é um sinal qualquer aleatório que não temos a inteção de medir ou até mesmo detectar, mas que sempre está presente devido aos objetos que transmitem radiação eletromagnéticas, como celulares, aviões e satélites.

Na classificação dos ruídos [33], temos o seguinte:

Ruído natural - refere-se aquelas de causas naturais, tais como a radiação cósmica de fundo em micro-ondas, ruídos atmosféricos, ruídos inerentes a dispositivos passivos e ativos da eletrônica;

Ruído artificial - refere-se a ruídos de causas artificiais, como por exemplo, ruídos de interferência;

Ruído exógeno - refere-se às interferências externas ao processo de comunicação, como outra mensagem;

Ruído endógeno - refere-se às interferências internas do processo de comunicação, como perda de mensagem durante seu transporte ou má utilização do código;

Ruído de repertório - refere-se às interferências ocorridas diretamente na produção ou interpretação da mensagem, provocadas pelo repertório dos emissores e receptores;

Existem várias maneiras de especificar o desempenho de um ruído de um receptor de rádio. Podemos especificar a relação sinal/ruído, que junto a isso está presente o sinal para ruído e distorção. Também, é possível observar este desempenho através da taxa de erro de bits.

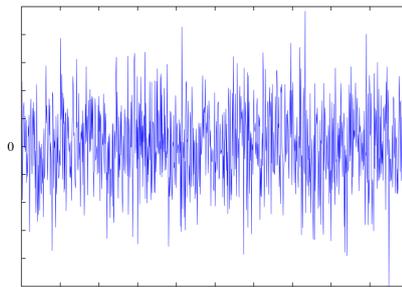


Figura 32 – Gráfico de um sinal de ruído. No eixo horizontal está a frequência do sinal e no eixo vertical a sua potência. Fonte: [16]

O ruído se estende por todas as frequências, introduzido por elementos do circuito, como por exemplo, os componentes eletrônicos, e essa escolha de componentes tem um grande impacto no desempenho de ruído do circuito.

A maior parte do ruído nos circuitos do receptor de rádio é o ruído térmico. Algumas aplicações, como por exemplo a radioastronomia, os níveis de ruído extremamente baixos são necessários para detectar sinais. Os circuitos de entrada podem ser resfriados à temperaturas baixas para reduzir o ruído térmico.

A medição avalia a quantidade de ruído que cada parte do sistema apresenta, podendo ser um receptor de rádio ou amplificador de RF, por exemplo. Se o sistema fosse perfeito, nenhum ruído seria adicionado ao sinal quando ele passasse pelo sistema, e a relação sinal/ruído seria a mesma na saída e entrada.

Acima da temperatura de 0K, devido à energia térmica, os elétrons movem-se de forma aleatória. Assim, são geradas flutuações espontâneas de corrente ou tensão, chamadas de ruído no sinal processado. Por esta razão, a figura de ruído pode ser definida como a quantificação do ruído adicionado por um dispositivo, ou seja, a razão sinal do ruído na entrada $(SNR)_i$ dividida

pela razão sinal do ruído na saída $(SNR)_o$ de um dispositivo, circuito ou sistema. Os índices "i" e "o" correspondem à entrada e saída, respectivamente.

Em outras palavras, a figura de ruído é uma medida da relação sinal-ruído e pode ser usada em associação com a sensibilidade do receptor de rádio, sendo um elemento principal de um projeto de circuito RF (*Radio Frequency*) de qualquer receptor de rádio, por exemplo. A figura de ruído é um número pelo qual o desempenho de um receptor de rádio, amplificador ou *mixer* pode ser especificado. Quanto mais baixo for o valor da figura de ruído, melhor será o desempenho.

A figura de ruído é um parâmetro importante para uma ampla variedade de sistema de comunicações de rádio e comunicação. O número de ruído ou figura de ruído é um parâmetro frequentemente usado em projetos de circuito de RF em receptores de rádio para entender o desempenho do ruído de qualquer rádio.

Em sistemas de comunicação sem fio, a figura de ruído (Noise Figure – NF) é um número usado para especificar o desempenho de um receptor de rádio [48]. Quanto mais baixo for o valor da figura de ruído, melhor será o seu desempenho. A figura de ruído contém informações importantes sobre o desempenho de ruído de um sistema RF e está relacionada com o fator de ruído, expresso em decibéis (dB).

Nas figuras 33 e 34, estão representadas a esquematização do funcionamento da figura de ruído, onde na entrada o ruído apresenta um valor alto, comparado ao de saída, com valor baixo devido ao uso do amplificador.

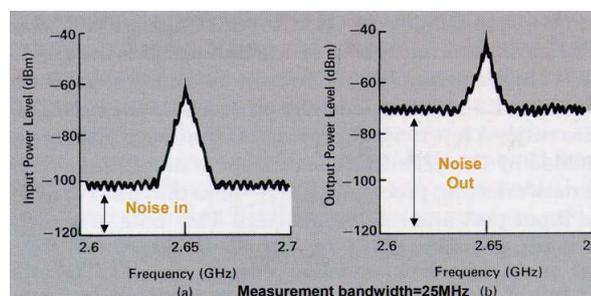


Figura 33 – Diferença de ruído com o uso de um amplificador.

Fonte: [17]

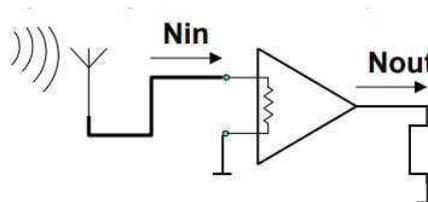


Figura 34 – Esquematização da figura de ruído. Fonte: [17]

O fator de ruído e a figura de ruído são medidas de degradação da relação sinal-ruído (SNR) causada por componentes em uma cadeia de sinal [18].

A figura de ruído é a comparação/relação do SNR (*Signal to Noise Ratio*, do português: relação sinal ruído) na entrada e na saída do circuito/sistema [16]. Existem duas figuras de ruído básicas que podem ser usadas:

Fator de ruído: pode ser feito pela relação do SNR na entrada e dividindo pelo SNR da saída. Como o SNR de saída será menor, significa que o fator de ruído é maior que o outro. O fator de ruído raramente é visto nas especificações [16].

Figura de ruído: é visto nas especificações e usa uma escala logarítmica que expressa o fator de ruído em decibéis [16].

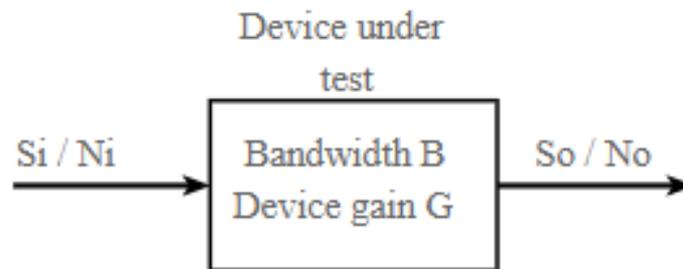


Figura 35 – Definições básicas para a relação sinal-ruído. Fonte: [16]

Onde *Bandwidth B* é a largura de banda e *Device Gain G* o ganho do dispositivo ou componente. S_i definido como o sinal de entrada, N_i o ruído de entrada, S_o sinal de saída e N_o ruído de saída.

A partir dos conceitos apresentados anteriormente e da figura 35, podemos obter uma equação para o fator de ruído F na escala linear [49].

$$F = \frac{\left(\frac{S}{R}\right)_e}{\left(\frac{S}{R}\right)_s} \quad (4.3)$$

Em que: $\left(\frac{S}{R}\right)_e$ é a razão sinal-ruído na entrada do componente e $\left(\frac{S}{R}\right)_s$ é a razão sinal-ruído na saída do componente.

Também, podemos encontrar a equação da figura de ruído N na escala logarítmica:

$$N = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_o}{N_o}} \right) \quad (4.4)$$

Na figura 36 a fonte emite um sinal de potência S_i e um ruído de potência N_i e ambos são amplificados. O amplificador adiciona ruído adicional à sua saída e o SNR na saída é menor do que foi denotado na entrada [18].

O fator de ruído pode ser expresso como uma função da potência de ruído de saída adicional N_a e o ganho de potência G de um amplificador.

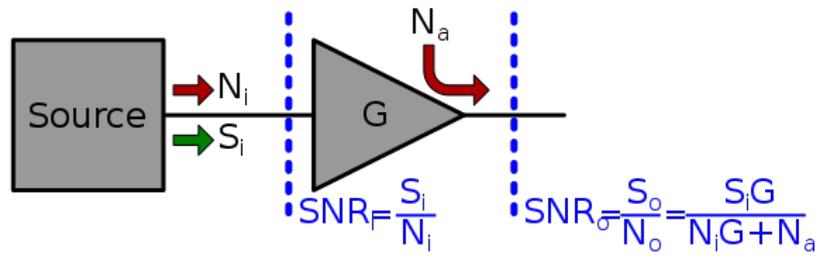


Figura 36 – Esquema de uma fonte emitindo um sinal. Fonte: [18]

E assumindo um sistema que possui um amplificador que gera ruído, a relação sinal-ruído deste amplificador inclui seu próprio ruído de saída N_a o sinal amplificado $S_i G$ e o ruído de entrada amplificado $N_i G$, temos:

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{S_i G}{N_a + N_i G} \quad (4.5)$$

Substituindo a saída SNR na definição do fator de ruído, obtemos a expressão final do fator de ruído em função do ruído adicional:

$$F = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_i G}{N_a + N_i G}} = \frac{N_a + N_i G}{N_i G} = 1 + \frac{N_a}{N_i G} \quad (4.6)$$

Na figura 37, é demonstrado alguns estágios para a figura de ruído:

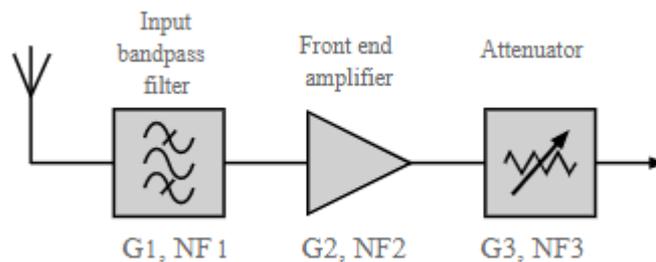


Figura 37 – Etapas da figura de ruído. Fonte: [16]

Onde:

G = Gain (Ganho);

NF = Noise Figure (Figura de Ruído);

Input bandpass filter = Filtro passa banda de entrada;

Front End Amplifier = Amplificador do tipo Front End;

Attenuator = Atenuador.

Na radioastronomia, as fontes de ruído são normalmente representadas em termos de temperatura. A temperatura de ruído do sistema é a potência total de ruído de todas as fontes. É

a soma de muitas contribuições.

$$T_{sistema} = T_{cmb} + T_{fonte} + T_{atmosfera} + T_{receptor} + \dots \quad (4.7)$$

O fator de ruído de um dispositivo está relacionado à sua temperatura de ruído T_e (Temperatura Efetiva), dada pela relação, em escala linear:

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} \text{ ou } F = \frac{N_o}{GkTB} \quad (4.8)$$

Onde,

N_o = saída de potência de ruído; G = ganho do dispositivo; k = constante de Boltzmann: $1,374 \cdot 10^{-23} J/K$; T = temperatura (do dispositivo) em °Kelvin, ou seja, $290^\circ K$ é a temperatura ambiente; B = largura de banda em Hz; F = Fator de ruído; T_0 é a temperatura ambiente, em $290K$.

Se vários dispositivos estiverem em cascata, o fator de ruído total pode ser encontrado com a fórmula de Friis[18]:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \dots G_{n-1}} \quad (4.9)$$

Onde F_n é o fator de ruído para o n -ésimo dispositivo e o G_n é o ganho de potência (linear, não em dB) do n -ésimo dispositivo.

A Medição da figura de ruído pode ser por meio do analisador de espectro, método de ganho e método Y [49].

4.2.3 Métodos de medição da figura de ruído

Um dos conceitos mais importantes quando se trata da escolha de um amplificador que apresente o melhor desempenho em seu funcionamento é a figura de ruído. Neste tópico iremos discutir três dos principais métodos de medição da figura de ruído.

Analisador de figura de ruído (convencional)

Neste método [38], o analisador de figura de ruído (N8) gera um sinal de pulso para acionar a fonte de ruído (HP), gerando tal ruído para acionar o DUT e a saída do DUT é medida pelo analisador. Alguns parâmetros precisam ser configurados no medidor de figura de ruído antes da medição, como faixa de frequência, por exemplo.

Tudo que precisamos para caracterizar a figura de ruído de um dispositivo é um analisador de sinal, uma fonte de ruído para calibrar e o próprio dispositivo (DUT).

O passo a passo para realizar a medição por meio deste método se dá por algumas etapas:

- Calibrar o sistema de teste. Para isto, precisamos ir ao menu de configuração de medição, pressionar o botão de configuração do DUT e em seguida o botão de calibração;

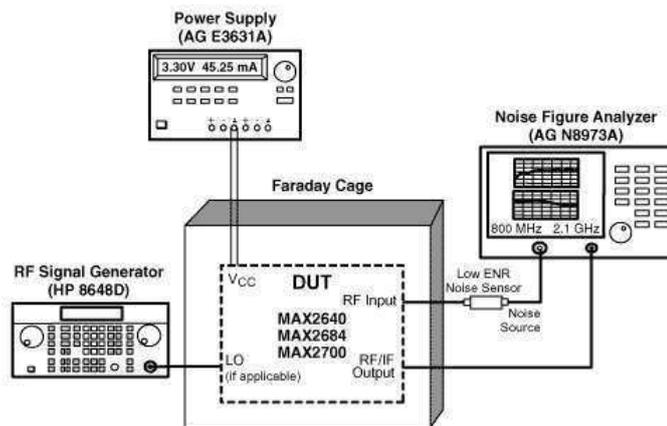


Figura 38 – Método convencional de medição da figura de ruído. Fonte: [19]

- Medir a figura de ruído do DUT. Nesta etapa, precisamos remover a fonte de ruído da parte frontal do analisador e em seu lugar conectar o DUT, com a fonte de ruído na entrada do DUT;
- Selecionar a faixa de frequência desejada, ou seja, usar o gerador de sinal e o analisador de espectro definido para a frequência que você deseja medir a figura de ruído para medir o ganho do dispositivo;
- Definir a largura de banda de vídeo do analisador de espectro.

Método do ganho

Esse método, baseado na definição do fator de ruído, envolve mais medições, bem como cálculos, mas sob certas condições, tornam-se mais convenientes e mais precisos.

Para usar o método de ganho 39 para medir a figura do ruído, o ganho do DUT precisa ser pré-determinado. Em seguida, a entrada do DUT termina com a impedância característica (50 para a maioria das aplicações de RF). Depois, a densidade de potência do ruído de saída é medida com um analisador de espectro.

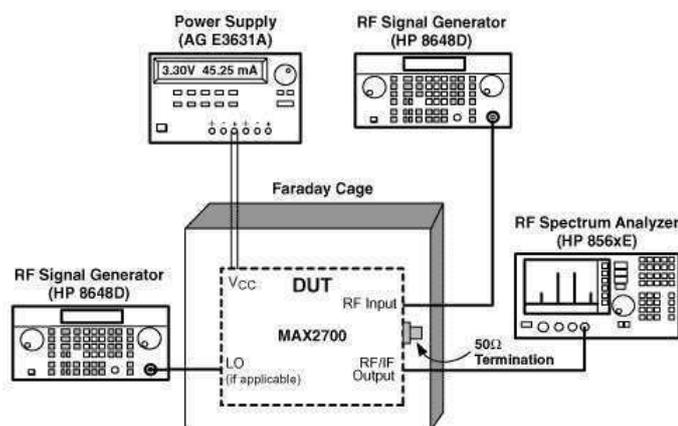


Figura 39 – Método do ganho. Fonte: [19]

Onde,

A potência de ruído (Noise Power) do dispositivo é:

$$NP = kT\Delta F \quad (4.10)$$

k = constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Joules}/\Delta k$), T = temperatura em Kelvin, ΔF = Largura de banda de ruído, BW (Bandwidth (Hz)) = Largura de banda.

Em temperatura ambiente ($\Delta k = 290K$) a densidade de potência de ruído é: $NP = -174 \text{ dBm}/\text{Hz}$.

No método de ganho, podemos calcular a figura de ruído pela seguinte expressão [50], em escala logarítmica:

$$NF = NP_{saída} - \left(-174 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} + 10 \log_{10}(BW) + Ganho\right) \quad (4.11)$$

Medir diretamente a densidade de potência de ruído de saída (com o analisador de espectro) em dBm/Hz, a equação toma uma forma mais simples:

$$NF = NP_{saída} + 174 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} - Ganho \quad (4.12)$$

O passo a passo deste método é dado a seguir:

Definir alguns parâmetros:

- Largura de banda de resolução;
- Largura de banda do vídeo;
- Frequência central;
- Span.

O processo:

- Achar o N_p ;
- Encontrar o ganho;
- Calcular o N_f utilizando a equação dada anteriormente.

Primeiro, precisamos medir o nível de ruído que sai do dispositivo quando ele é ligado, este é o parâmetro N_p , em seguida, ajustar o analisador de espectro para as configurações fornecidas e, em sequência, conectar o DUT à entrada do analisador de espectro e ligue-o, certificando de que a entrada DUT seja encerrada em 50Ω . Por fim, aplicar o sinal RF de 1 GHz, por exemplo,

na entrada e na saída de energia. Com base nisso, pode-se calcular o ganho do dispositivo através da equação 4.2.

Método do fator Y

Para esse método, é necessária uma fonte de ENR (Excess Noise Ratio), que é a mesma coisa de uma fonte de ruído.

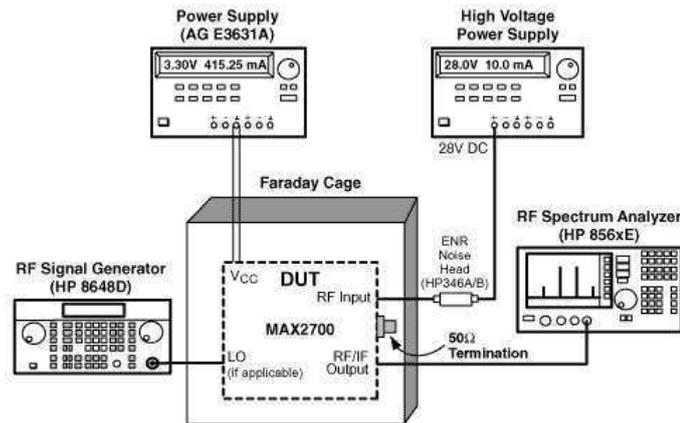


Figura 40 – Método do fator Y. Fonte: [19]

Para calcularmos a figura de ruído neste método, utilizamos a seguinte relação [19]:

$$\text{Noise Figure (NF)} = 10 \log_{10} \left(\frac{10 \frac{ENR}{10}}{10 \frac{Y}{10} - 1} \right) \quad (4.13)$$

Onde,

$$\text{Excess Ratio Noiss, ENR} = \frac{T_h - T_c}{T_0} \quad (4.14)$$

T_h é a temperatura "quente - hot" (fonte de ruído ligada), T_c é a temperatura "fria - cold" (fonte de ruído desligada) e $T_c = T_0$ (em temperatura ambiente).

ENR em temperatura ambiente, temos:

$$ENR = \frac{T_h - T_0}{T_0} \quad (4.15)$$

O que torna:

$$ENR = \frac{T_h - 290}{290} \quad (4.16)$$

O método do fator Y é a proporção das potências de ruído "quente" e "fria" (em watts),

$$Y = \frac{N_h}{N_c} \quad (4.17)$$

Se a fonte de ruído estiver em temperatura ambiente, então $N_c = N_0$.

Logo,

$$NF = 10 \log_{10} \left[\frac{ENR}{(Y - 1)} \right] \quad (4.18)$$

A imagem 41 demonstra como é feita a calibração e a medição por meio do fator Y.

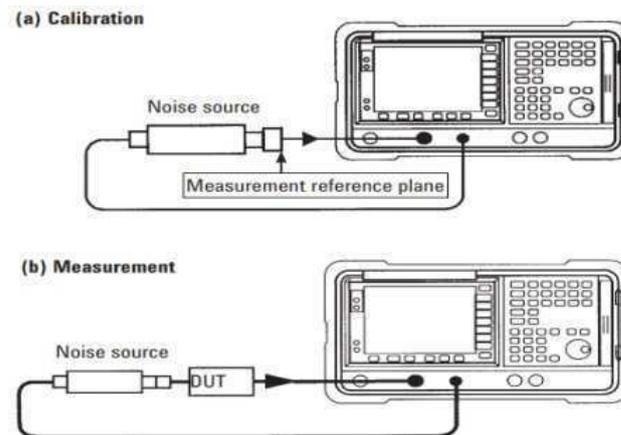


Figura 41 – (a) calibração e (b) Medição do DUT. Fonte: [20]

A tabela a seguir mostra a comparação de cada método de medição da figura de ruído, mostrando as vantagens, desvantagens e aplicações.

	Aplicações Adequadas	Vantagem	Desvantagem
Medidor de figura de ruído (convencional).	Figura de ruído super baixas.	Conveniente, muito preciso ao medir figura de ruído super baixo (0-2dB).	Equipamento caro, faixa de frequência limitada
Método de Ganho.	Ganho ou figura de ruído muito alto.	Configuração fácil, muito precisana medição de figura de ruído alta, adequadapara qualquer faixa de frequência.	Limitada pelo nível de ruído do analisador de espectro. Não é possível lidar com sistemas com baixo ganho e baixo figura de ruído.
Método do Fator Y.	Vasta gama de figura de ruído.	Podem medir uma ampla faixa de figura de ruído em qualquer frequência, independentemente do ganho.	Ao medir NF muito alto, o erro pode ser grande.

Tabela 5 – Comparação dos métodos de medição da figura de ruído. Fonte: [19]

4.3 Ganho e Diretividade em Antenas

O ganho G de um componente é a razão entre a potência de saída em relação à potência de entrada e é geralmente medida em decibéis. O ganho é uma característica de componentes ativos, ou seja, que precisam ser alimentados por uma tensão. Um exemplo de componente ativo que apresenta ganho é o amplificador. Partindo da definição de decibel, pode-se encontrar o valor linear da amplificação de sinal através da equação na escala linear abaixo:

$$G = 10^{\frac{G[dB]}{10}} \quad (4.19)$$

Como exemplo, um amplificador de ganho 20 dB aumenta em 100 vezes o nível de sinal de entrada [15].

Antena é um dispositivo passivo que possui a função de converter a radiação eletromagnética recebida em correntes elétricas. São utilizadas para estações terrestres, satélites, radares, radioastronomia e comunicações espaciais. Uma grande característica deste tipo de antena é que elas fornecem grandes valores de ganho usando uma abertura passiva que reflete os sinais de rádio frequência da alimentação sem precisar de uma amplificação ativa, além de possuir menor custo [51].

O ganho de potência de uma antena ou ganho é um número de desempenho que combina a diretividade, que explicaremos em seguida, da antena e a eficiência elétrica. Em uma antena de transmissão, o ganho descreve o desempenho que a antena converte a energia de entrada em ondas de rádio em uma direção especificada. Já em uma antena receptora, o ganho vai descrever o quão bem a antena converterá as ondas de rádio que chegam de uma direção especificada em energia elétrica. Nos casos em que a direção não é explícita, o ganho será o seu valor de pico na direção do lóbulo principal da antena.

A diretividade é uma medida que quantifica a diferença entre o isolamento e o ganho direto, expressa em decibéis (dB). Ela indica o grau de isolamento entre a fonte de carga, ou seja, o quão a impedância da carga afeta a impedância de entrada, e a impedância da fonte afeta a impedância de saída. Em termos simples, quanto maior a diretividade (em dB), melhor será o isolamento obtido [24].

O isolamento é a relação entre a potência aplicada à saída do amplificador e a potência resultante medida na entrada do amplificador

O ganho de diretiva ou simplesmente diretividade é uma medida que não considera a eficiência elétrica da antena. Nesse caso, é mais interessante utilizar este termo em situações que envolvem antenas receptoras, onde o foco é a capacidade de uma antena receber sinais de uma direção enquanto rejeita sinais interferentes vindos de uma direção distinta.

As antenas são projetadas para operar em uma faixa específica de frequência e são caracterizadas como filtros passa-banda. Elas desempenham um papel fundamental em sistemas de comunicação sem fio, atuando como o componente principal responsável pela transmissão e recepção de sinais.

Em outras palavras, o ganho em antenas é definida como a medição associada a diretividade sem perdas, considerando a sua eficiência e a diretividade descreve propriedades direcionais da antena. Ou seja, é a relação entre o campo radiado pela antena na direção de máxima radiação e o campo que seria gerado por uma antena isotrópica que recebesse a mesma potência. A diretividade de uma antena define sua capacidade de concentrar a energia numa determinada direção [52]. Matematicamente, podemos expressar da seguinte forma:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{E_{m\acute{a}x}(\theta, \varphi)}{E_{iso}(\theta, \varphi)}, \quad (4.20)$$

em que $E_{m\acute{a}x}(\theta, \varphi)$ é considerada a energia distribuída pela antena em estudo e $E_{iso}(\theta, \varphi)$ a energia distribuída de forma igual em todas as direções por uma fonte isotrópica.

Cada antena possui seu próprio padrão de radiação. Para um mesmo comprimento de onda, o lóbulos principal é diretamente proporcional ao tamanho da antena, ou seja, quanto maior a antena maior será o lóbulos principal. As antenas para radiotelescópios vêm em diferentes formas e tamanhos, e na radioastronomia, uma característica essencial da antena é sua capacidade de distinguir sinais vindos de diferentes direções.

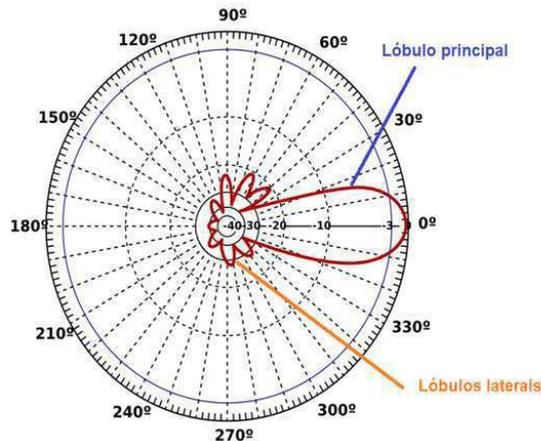


Figura 42 – Padrão de radiação de uma antena parabólica. Fonte: [21]

Uma antena pode ser tratada como um dispositivo receptor, obtendo a potência de ruído de um campo de radiação de entrada e conduzindo os sinais elétricos para os terminais de saída, ou como um sistema de transmissão, lançando ondas eletromagnéticas para fora [7]. Como transmissor, a antena produz um feixe de radiação cujo ângulo sólido é determinado pelo tamanho da abertura: quanto maior a abertura, mais estreito é o feixe e maior é o fluxo de potência, sendo máximo no centro do feixe. O conceito do ganho de potência de uma antena, que surge na transmissão, está, portanto, intimamente relacionado àquela de sua área efetiva, que se aplica à recepção.

4.3.1 Potência de saída em compressão de 1dB - (Output Power At 1 DB Compression)

Um amplificador mantém um ganho constante para sinais de entrada de baixo nível. No entanto, em níveis de entrada mais altos, o amplificador entra em saturação e seu ganho diminui. Então, a potência de saída em compressão de 1dB indica o nível de potência que faz com que o ganho caia em 1 dB de seu valor de sinal pequeno.

Um amplificador geralmente fornece um ganho constante em uma faixa de frequência específica. Se representarmos a potência de entrada vs potência de saída de um amplificador em um gráfico 43, obtemos uma linha reta, ou seja:

$$\text{Potência de saída} = \text{Potência de entrada} + \text{Ganho} \quad (4.21)$$

Por exemplo, se o ganho de um amplificador é 10dBm, então um sinal de entrada de 1dBm resultará em um sinal de saída de 11 dbm. Em outras palavras, o ponto de compressão de 1 dB é o nível de potência de saída no qual o ganho diminui 1 dBm de seu valor constante. Quando o amplificador atinge este ponto, ele entra em compressão e se torna um dispositivo não linear, produzindo distorção harmônicos, e os amplificadores devem sempre ser operados abaixo do ponto de compressão [22].

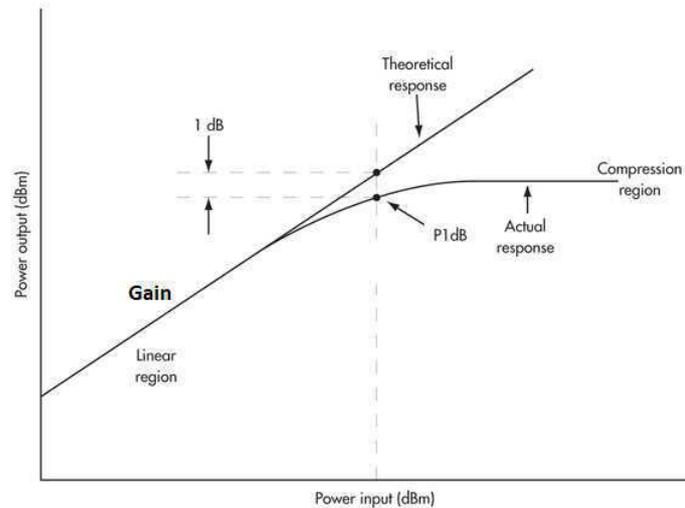


Figura 43 – A medida que o nível de potência de entrada aumenta, chega-se a um ponto que a potência de saída do amplificador não aumenta mais com o valor do ganho, ou seja, a potência de saída começa a saturar. [22]

4.3.2 Ponto de Interceptação de 3º ordem - (3rd Order Intercept Point - Output IP3)

IP3 é um parâmetro conhecido que mede a linearidade em funções e componentes de radiofrequência. O ponto de interceptação de terceira ordem é considerado como um ponto hipotético onde a potência dos componentes de terceira ordem alcançará o mesmo nível da potência do componente fundamental. Em outras palavras, este ponto é ideal, pois quando o dispositivo atinge o ponto de compressão de 1 dB, as duas curvas se tornam paralelas e nunca se cruzam, o que mostra que a energia para o componente fundamental e de terceira ordem não será o mesmo. Este parâmetro é muito importante em termos de caracterização de um dispositivo.

Se os resultados forem analisados no analisador de espectro, os componentes de frequência serão exibidos na figura 45.

Por exemplo: se um tiver os seguintes dois sinais de frequência: $f_1 = 100 \text{ MHz}$ / $f_2 = 110 \text{ MHz}$, então, os dois componentes de terceira ordem que estarão próximos dos componentes fundamentais são:

$$\begin{aligned} 2(f_1 - f_2) &= 90 \text{ MHz} \\ 2(f_2 - f_1) &= 120 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (4.22)$$

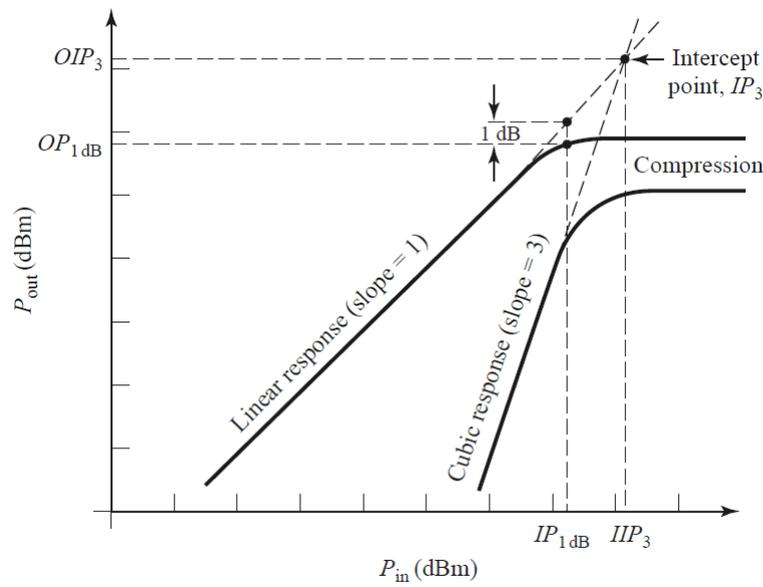


Figura 44 – Ponto de interceptação de terceira ordem para dispositivos não lineares. [23]

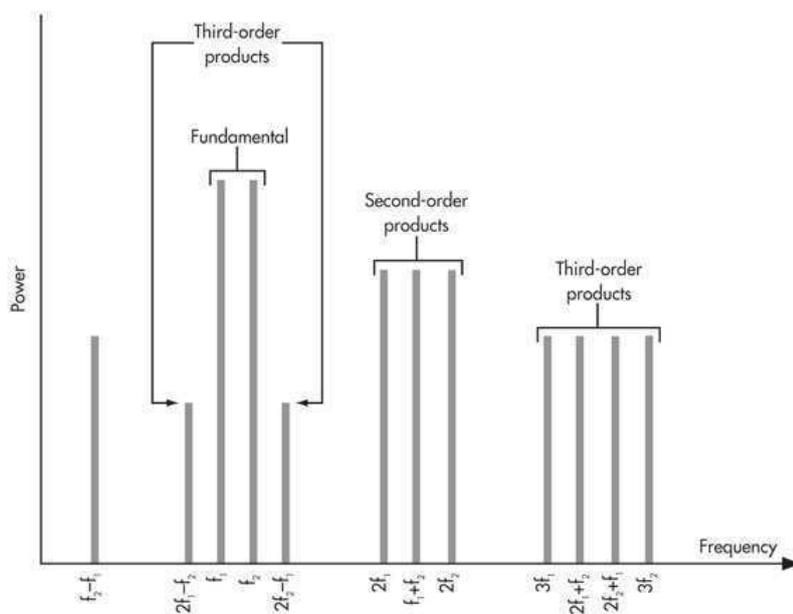


Figura 45 – Componentes de frequência vs potência. [23]

Então, o ponto de interceptação de terceira ordem será o ponto onde todos esses quatro componentes de frequência estarão no mesmo nível de potência.

O ponto de interceptação de saída pode ser calculado usando a seguinte equação, onde P_{out} é a potência de saída e A é a diferença em dB entre a potência de saída e a potência de intermodulação.

$$IP3(dbm)_{out} = P_{out}(dbm) + \frac{A}{2} \quad (4.23)$$

Intermodulação é a modulação de amplitude de sinais contendo duas ou mais frequências

diferentes, causadas por não linearidades ou variação de tempo em um sistema [53].

4.3.3 Relação de Onda Estacionária de Tensão - (Voltage Standing Wave Ratio - VSWR)

Uma VSWR é uma relação que pode ser definida como a proporção entre as ondas estacionárias de tensão transmitidas e refletidas em um sistema de transmissão elétrica de radiofrequência. A relação de onda estacionária de tensão é uma medida que mostra o quão eficientemente a energia de radiofrequência é transmitida de uma fonte de energia, através de uma linha de transmissão, para uma carga [54]. Por exemplo: de um amplificador de potência através de uma linha de transmissão, para uma antena. Em sistemas RF, impedâncias incompatíveis fazem com que parte da energia seja refletida de volta para a fonte. Essas reflexões causam interferências destrutivas, ocorrendo picos e vales na tensão e a VSWR mede as variações dessa tensão.

Tal como mencionado acima, a relação para VSWR pode ser definida analiticamente como:

$$VSWR = \frac{|V(max)|}{|V(min)|}, \quad (4.24)$$

onde, $V(max)$ é a tensão máxima do sinal e $V(min)$ a tensão mínima do sinal.

Uma outra maneira alternativa de representar a VSWR é dada por:

$$VSWR = \frac{(1 + \Gamma)}{(1 - \Gamma)} \quad (4.25)$$

onde Γ é o coeficiente de reflexão de tensão, obtida por meio da impedância da carga (Z_L) e da fonte (Z_o), o qual pode ser definido pela seguinte relação:

$$\Gamma = \frac{(Z_L - Z_o)}{(Z_L + Z_o)}. \quad (4.26)$$

Por fim, a VSWR pode ser encontrada, também, a partir da relação com a perda de retorno (explicada na seção 5.2.2):

$$VSWR = \frac{1 + 10^{\frac{-RL}{20}}}{1 - 10^{\frac{-RL}{20}}} \quad (4.27)$$

4.3.3.1 Output/Input VSWR

A saída VSWR (Output VSWR) é uma medida de quanta potência é refletida de volta da porta de saída do amplificador quando um sinal externo é aplicado a essa porta. O mesmo raciocínio vale para a entrada VSWR (Input VSWR) para a porta de entrada.

Para medirmos Output/Input VSWR, uma configuração simples usando um acoplador direcional é mostrada na figura

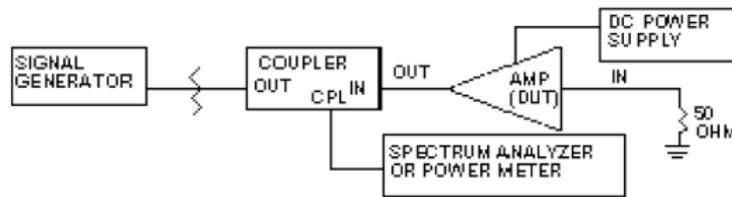


Figura 46 – Medição Output/Input VSWR. Fonte: [24]

Estabelecendo, de início, uma referência de 0 dB, aplica-se um sinal de entrada na porta de saída do acoplador direcional. Em seguida, o próximo passo é aplicar um curto circuito na porta de entrada do acoplador e realizar a medição da potência na porta acoplada. Depois, substituir o curto por um circuito aberto e observar a leitura na porta. A média das duas leituras é de 0 dB de referência. Após esses passos, substituir o circuito aberto por uma carga de 50 ohms, isto fornecerá a faixa de medição da configuração. Em seguida, remove-se a carga de 50 ohms e substituímos por um DUT para medirmos a distância do sinal refletido, ou seja, a perda de retorno de saída (RL), e utiliza-se a equação 4.27 para determinar VSWR.

4.3.4 Isolação - (Isolation)

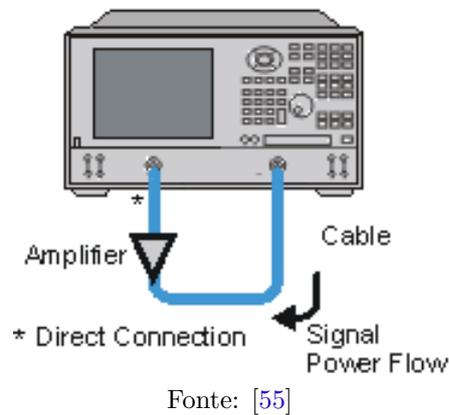
Outro conceito importante a ser discutido é o isolamento reverso, que é uma medida da resposta da transmissão reversa do amplificador, da saída para a entrada. Ou seja, é uma medida de quão bem um sinal aplicado à saída do dispositivo está “isolado” de sua entrada. Se o isolamento do amplificador for muito alto, o nível do sinal transmitido pode estar próximo ao nível de ruído. Para diminuir o nível de ruído: usar e/ou aumentar as médias de medição e reduzir a largura de banda IF do analisador.

Para medir a isolação é preciso seguir alguns passos, os quais definimos sucintamente a seguir. Conectar o amplificador conforme a figura 47, predefinir (preset) o analisador, selecionar a medição S12, colocar as configurações para o amplificador em teste, remover o amplificador e executar a calibração, escalar a medição exibida para uma visualização ideal e usar um marcador para medir o isolamento reverso em uma frequência desejada.

4.4 Filtro Passa Banda

Um filtro passa banda é um dispositivo que permite a passagem de frequências dentro de uma certa faixa desejada e rejeita (atenua) frequências fora desta faixa. Por exemplo, um receptor de rádio contém um filtro passa-banda para selecionar a frequência do sinal de rádio desejado entre todas as ondas captadas pela antena [56]. Ou seja, os filtros RF e os de micro-ondas são usados para filtrar sinais indesejados de entrar em um sistema, e existem vários tipos diferentes de filtros RF, por exemplo, filtros passa banda, filtros passa banda baixo e alto. Com o aumento

Figura 47 – Esquema de montagem para medição da isolamento.



dos padrões sem fio nas bandas de frequência existentes, os filtros agora desempenham um papel extremamente importante e são necessários para minimizar a interferência. Os filtros de RF são um elemento essencial em praticamente todos os projetos de RF. Eles também são extremamente necessários nos sistemas, bem como na entrada e na saída, de modo que sua utilização permite que os sinais corretos sejam habilitados para alcançar as partes necessárias do circuito e, desta forma, a fidelidade do sinal final é mantida nos mais altos padrões, a interferência é reduzida e o desempenho do sistema é mantido o mais alto possível [57].

4.4.1 Tipos básicos de filtros RF

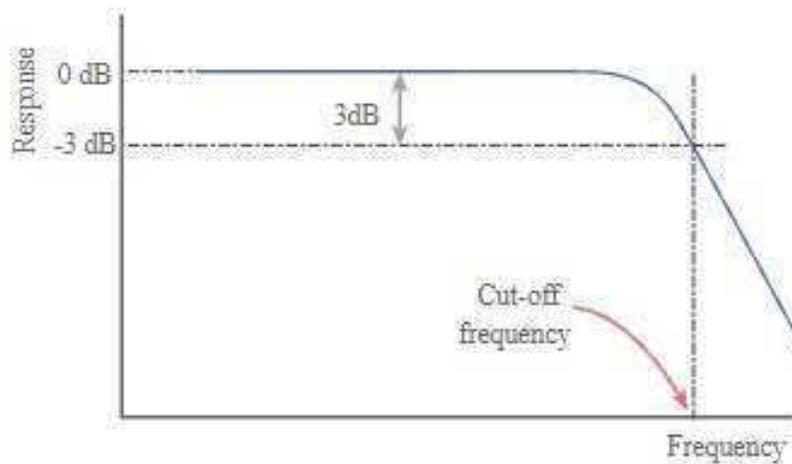
Existem quatro tipos de filtros que podem ser definidos. Cada tipo diferente rejeita ou aceita sinais de uma maneira diferente e, usando o tipo correto de filtro RF, é possível aceitar os sinais necessários e rejeitar aqueles que não são desejados [25].

O **filtro passa baixa** é uma forma de filtro que só permite passar pelas frequências mais baixas.

O **filtro de passagem alta** só permite a passagem de sinais superiores à frequência de corte.

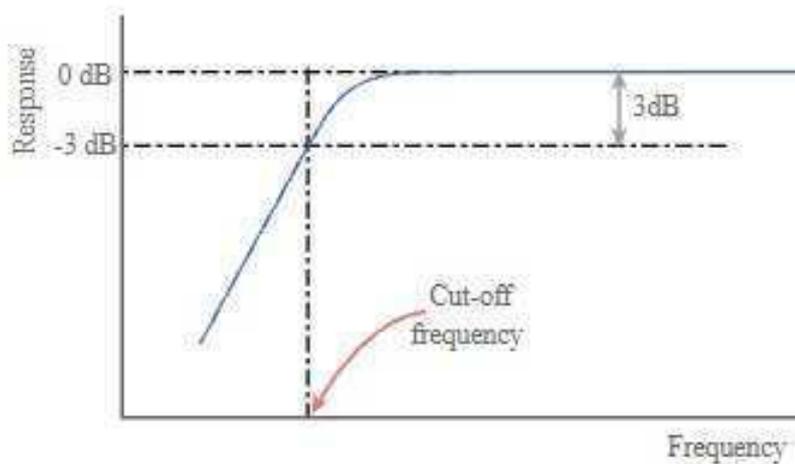
O **filtro de parada de banda** é um componente que bloqueia e rejeita as frequências situadas entre seus dois pontos de corte. Ele permite a passagem das frequências localizadas fora dessa faixa, ou seja, nas regiões adjacentes. Esse tipo de filtro desempenha um papel importante na seleção e separação de sinais em sistemas de comunicação, garantindo que apenas as frequências desejadas sejam transmitidas ou recebidas [26].

O filtro de parada de banda, também conhecido como filtro de rejeição de banda, permite a passagem de todas as frequências, exceto aquelas dentro de uma banda de parada especificada, que são bastante atenuadas. Então, a função de um filtro de parada de banda é também passar todas as frequências de zero até seu primeiro ponto de frequência de corte f_L e passar todas essas frequências acima de sua segunda frequência de corte f_H , mas bloqueia ou rejeita todas as frequências intermediárias. Então a largura de banda dos filtros é definida como $(f_H - f_L)$.



Resposta do filtro passa-baixo genérico

Figura 48 – Filtro passa baixa. Fonte: [25]



Resposta do filtro passagem alta genérico

Figura 49 – Filtro de passagem alta. Fonte: [25]

Portanto, para um filtro de parada de banda larga, a banda de parada real do filtro fica entre seus pontos -3dB inferior e superior à medida que atenua ou rejeita qualquer frequência entre essas duas frequências de corte [26]. A curva de resposta de frequência de um filtro de parada de banda ideal é, portanto, dada como:

A soma dos filtros passa-alta e passa-baixa significa que suas respostas de frequência não se sobrepõem, ao contrário do filtro passa-banda. Isso se deve ao fato de que suas frequências inicial e final estão em pontos de frequência diferentes.

O **filtro passa banda** permite apenas sinais dentro de certas frequências. Acima e abaixo das frequências de corte, os sinais serão atenuados e, dentro da faixa aceita de frequências de rádio, os sinais serão transmitidos.

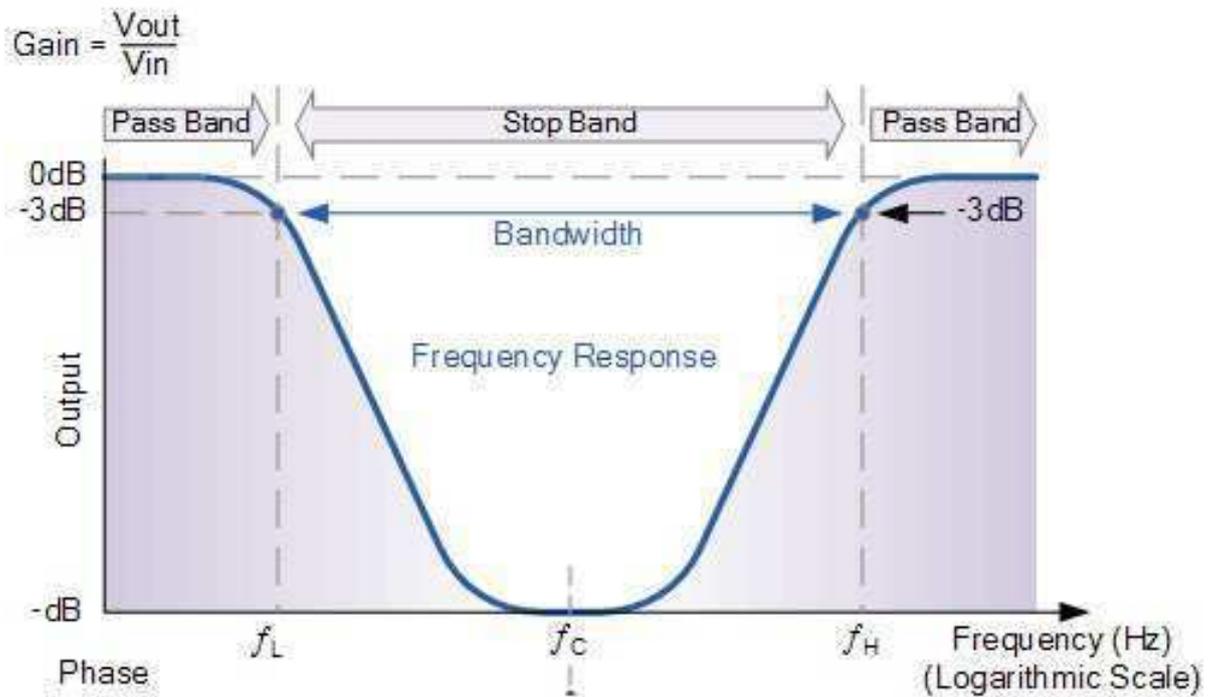


Figura 50 – Resposta do filtro de parada de banda. Fonte: [26]

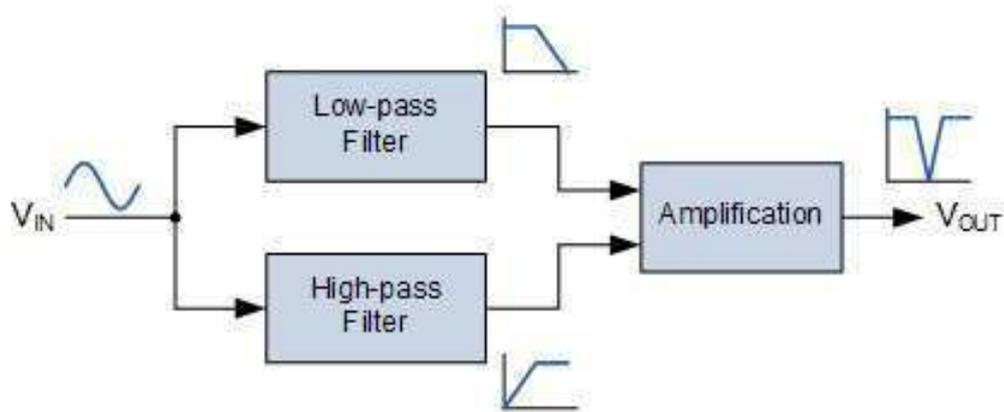
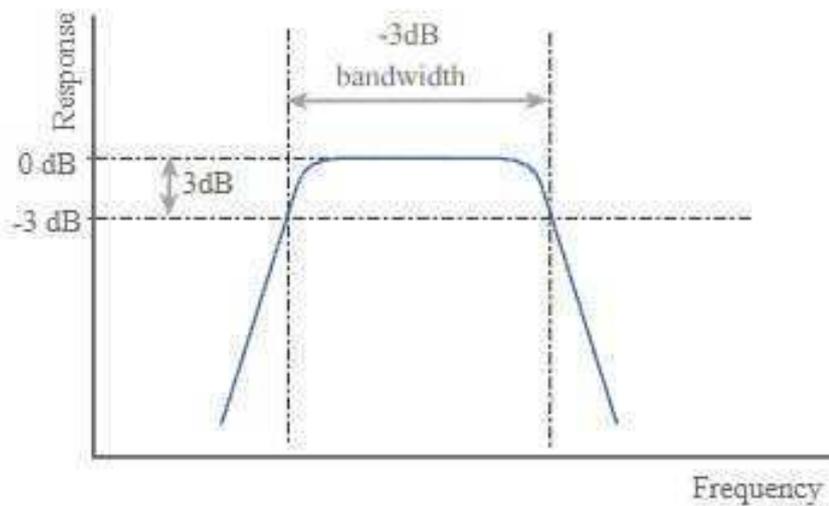


Figura 51 – Configuração típica do filtro de parada de banda. Fonte: [26]

Na prática, uma linguagem mais simples é frequentemente usada para descrever filtros passa banda, como mostrado na figura 53. Aqui, existem apenas dois parâmetros: a frequência central e uma largura de banda. A banda passante é considerada a região onde o filtro tem pelo menos metade do ganho de potência no pico. A largura de banda é a largura, em unidades de frequência, da banda passante. A frequência central é o ponto de ganho máximo, que é aproximadamente o ponto médio da banda passante.

A Figura 54 mostra a resposta de frequência de um filtro passa-banda, com os principais parâmetros rotulados. Um filtro de banda de parada faz o inverso, rejeitando as frequências



Resposta do filtro passa banda genérico

Figura 52 – Filtro passa banda. Fonte: [25]

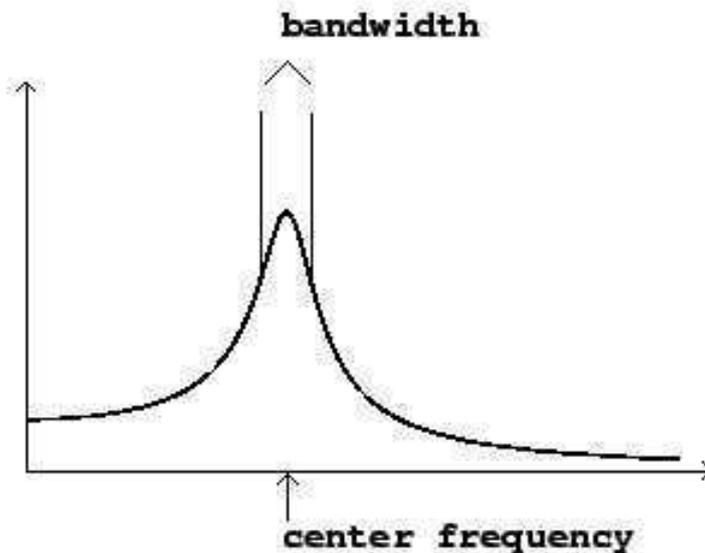


Figura 53 – Uma visão simplificada de um filtro passa banda, mostrando a largura de banda e frequência central. Fonte: [27]

dentro da banda e deixando passar as frequências fora dela. O eixo horizontal é a frequência e o eixo vertical o ganho.

O **filtro de rejeição de banda** é o oposto de um filtro de passagem de banda, pois rejeita sinais dentro de uma certa banda de RF. Essa forma de filtro de RF é usada para remover sinais indesejados que sabemos que existem em um sistema.

Um conceito bastante importante presente nos filtros é a *Insertion Loss* (perda de

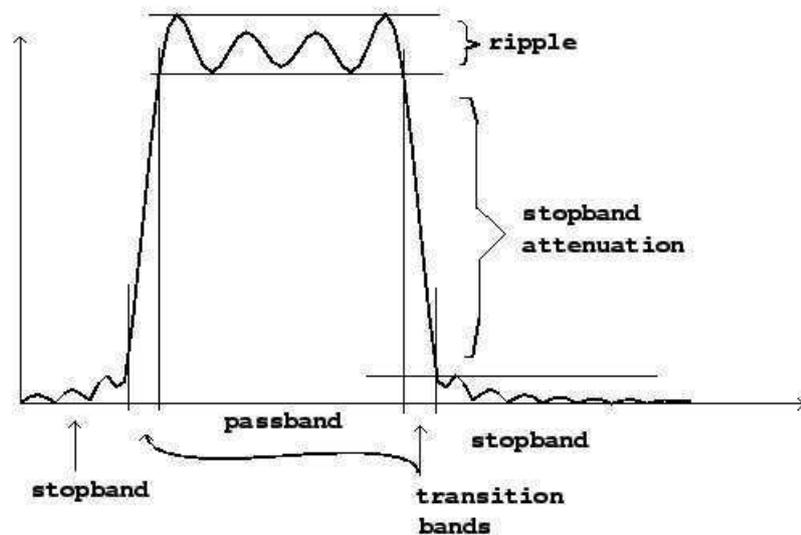
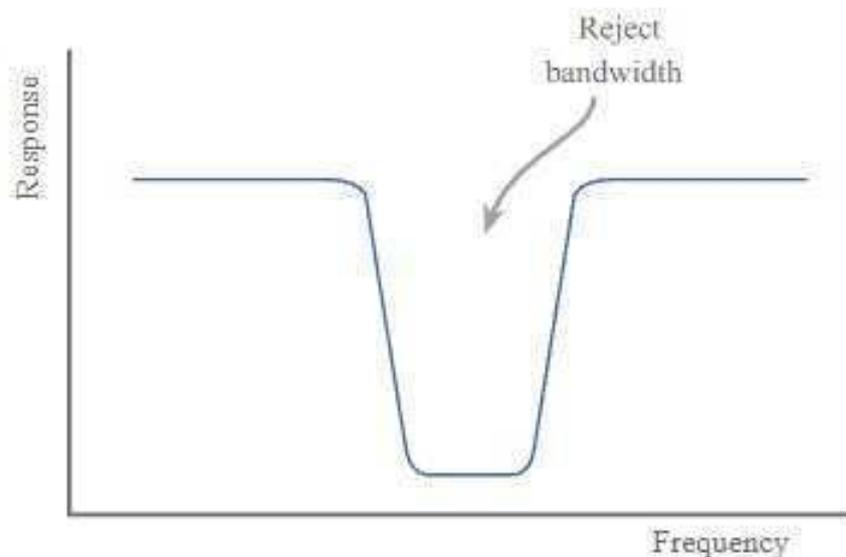


Figura 54 – Resposta em frequência de filtros passa banda e de banda parada. Fonte: [27]



Resposta do filtro de rejeição de banda genérica

Figura 55 – Filtro de rejeição de banda. Fonte: [25]

inserção), que é uma medida de quanto o filtro atenua um sinal em uma determinada frequência. Numericamente, a perda de inserção de um filtro é a razão entre o nível do sinal na entrada do filtro e o nível do sinal na saída do filtro.

A perda de inserção é a perda de potência do sinal resultante da inserção de um dispositivo em uma linha de transmissão e é expressa em dB [58]. Se a potência transmitida para a carga antes da inserção for P_T e a potência recebida pela carga após a inserção for P_R , então a perda

de inserção em dB é:

$$IL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R} \quad (4.28)$$

Existe uma outra forma de calcular a perda de inserção, sendo ela definida como uma relação entre o nível de sinal em uma configuração de teste sem o filtro instalado $|V_1|$ e o nível do sinal com o filtro instalado $|V_2|$ [59]. Essa relação é descrita em dB pela seguinte equação:

$$IL(dB) = 10 \log_{10} \frac{|V_1|^2}{|V_2|^2} = 20 \log_{10} \frac{|V_1|}{|V_2|} \quad (4.29)$$

5 Procedimento experimental e Dados

5.1 Radiômetros

Um rádio telescópio intercepta uma parte do campo de radiação incidente com flutuação aleatória e o direciona para o receptor, onde é transformado em uma voltagem de ruído flutuante. Se o barulho é aleatório, então a única unidade mensurável é a sua intensidade, ou a potência total, que é medida por um radiômetro: o espectro de frequência é plana. Um receptor que mede o sinal de potência em função da frequência é denominado espectrômetro e um receptor que é sensível ao estado de polarização chama-se de polarímetro. Será apresentado dois dos mais importantes tipos de radiômetros existentes e que possui relação direta e/ou indireta com este trabalho [30].

5.1.1 Conceitos e Funcionamento de um Radiômetro

Um radiômetro é um dispositivo que mede o fluxo radiante (potência) da radiação eletromagnética e geralmente é um detector de radiação infravermelha ou ultravioleta. Os radiômetros de micro-ondas operam nos comprimentos de onda de micro-ondas. A antena acopla a radiação eletromagnética com a entrada do radiômetro e como saída fornece uma potência média integrada em uma banda de frequência [15].

Em um radiômetro ideal, temos uma relação em que a potência medida é diretamente proporcional à temperatura de brilho atrelada da fonte observada, conforme abaixo:

$$P = kBG T_B, \quad (5.1)$$

Sendo k a constante de Boltzmann, B a banda de frequência, G é o ganho do receptor e T_B a temperatura de brilho da fonte.

O radiômetro seleciona uma certa porção da potência de saída disponível da antena, ou seja, uma largura de banda B em torno de uma determinada frequência central.

Na figura a seguir, é apresentado um exemplo de radiômetro idealizado.



Figura 56 – Radiômetro idealizado. Fonte: [28]

Na vida real, o radiômetro irá gerar ruído, e este ruído irá adicionar ao sinal de entrada. Algumas contribuições como o solo, céu, ambiente e a própria antena transferem potência para a antena, relacionada a uma temperatura de antena T_A . O radiômetro produz ruídos que também

possui relação com temperatura, sendo denominada de temperatura de ruído do radiômetro T_R . Na figura 57, pode ser visto um esquema simples de um diagrama real.

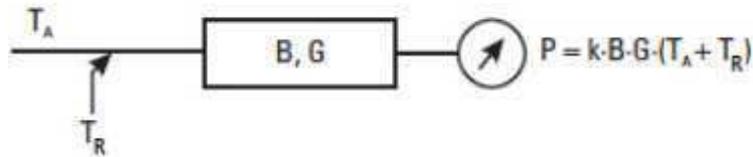


Figura 57 – Radiômetro Real. Fonte: [15]

5.1.2 Radiômetro do tipo Potência Total

Podemos exemplificar um radiômetro de potência total a seguir com algumas especificações. O ganho do radiômetro é simbolizado por um amplificador com um ganho G , e a seletividade de frequência simbolizada por um filtro com uma largura de banda B (centrado em torno de uma determinada frequência). Em outras palavras, este tipo de radiômetro é formado, além do amplificador de ganho G e um filtro seletor de banda B , por um detector quadrático X^2 e um integrador, representado pela letra τ . Na figura 58, é mostrado um diagrama simplificado que exemplifica um radiômetro de potência total.

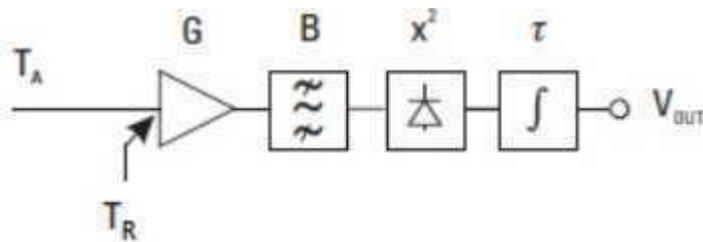


Figura 58 – Radiômetro de Potência Total. Fonte: [28]

5.2 Instrumentação

Antes da realização dos procedimentos experimentais e com a iniciação da medição dos dados do radiotelescópio Uirapuru, foi realizada alguns testes para analisar as perdas dos cabos e a perda de retorno, conectados da antena até os componentes de medição, com o intuito de verificar a quantidade de dB perdida seja ela na entrada ou na saída dos cabos, visando compreender quanto está sendo perdido de potência/energia durante as medições e procurando meios para minimizar essas perdas.

Também, neste capítulo, trataremos sobre o comportamento do ganho para 1, 2 e 3 LNA's, bem como o conjunto de dispositivos que compõe um radiômetro, como por exemplo, amplificadores normais, amplificadores de baixo ruído (LNA), filtros passa banda, isoladores, etc.

Para iniciarmos as medições, utilizamos o analisador de cabos e antenas FieldFox N9912A da Keysight Technologies, que é ideal para realização de medições de cabos e antenas (CAT), com

diversas funcionalidades e que nos ajudam a entender o funcionamento de componentes da área da radioastronomia, principalmente. Também, foi utilizado o VNA (*Vector Network Analyzer*), que é um analisador de rede vetorial usado para testar as especificações dos componentes e verificar algumas simulações para garantir que os sistemas e seus componentes funcionem corretamente em conjunt, ou seja, o VNA contém uma fonte usada para gerar um sinal de estímulo conhecido para o DUT e a medição é feita tanto do sinal que é refletido do lado de entrada quanto o sinal que passa para o lado de saída do DUT, e esse sinal é processado em conjunto com o FieldFox. Na figura 59 temos os dois equipamentos de medição e a cadeia de componentes que compõe o receptor, como filtros, amplificadores e isolador.



Figura 59 – Direita: FieldFox N9912A - Keysight Technologies. Esquerda: VNA – Agilent N5181A (MXG Analog Signal Generator – 100kHz a 6GHz). Fonte: Produção do autor.

Para armazenar os dados que o FieldFox nos mostra na tela, optamos salvá-los em arquivos de formato CSV, para facilitar na leitura e processamento de dados por meio de linguagem python, plotando os gráficos com a utilização dos códigos.

5.2.1 Perda de cabos

Todos os cabos têm perdas e estas acabarão por limitar o desempenho de um sistema. O valor da perda depende da qualidade do cabo e de suas especificações. Conforme o sinal viaja pelo caminho de transmissão, parte da energia é dissipada no cabo e nos componentes, ou seja, a perda do cabo refere-se à quantidade de perda de potência ao longo do comprimento do cabo e varia com a frequência. Por exemplo, mais energia é perdida quanto mais tempo o cabo estiver. O termo correto para perda de cabo é “Perda de inserção”.

A maioria dos analisadores de cabo e antena portáteis hoje são equipados com um modo de perda de cabo que exhibe a perda média de cabo da faixa de frequência de varredura, e isso pode nos auxiliar a entender e perceber o quão está sendo perdido nos cabos ligados ao radiotelescópio Uirapuru e o BINGO.

Na figura 60, foi feito um teste de perda em um dos cabos conectados no radiotelescópio Uirapuru, onde conectamos o analisador de espectro FieldFox no cabo e na antena. Percebe-se a variação da potência (dB) em função da frequência utilizada, na faixa do BINGO, entre 980 MHz a 1280 MHz. O gráfico de perda de cabo mostra como a perda de inserção do cabo aumenta e/ou diminui com a frequência.

Em suma, a perda de inserção (perda de cabo) da linha de transmissão é uma medida da quantidade de energia que é absorvida pela linha de transmissão conforme um sinal viaja pelo cabo. Essa perda é causada pela resistência do cabo e é medida em decibéis (dB). Em geral, um cabo de diâmetro menor tem mais perda do que cabo de diâmetro maior. Diferentes tipos de cabos têm diferentes perdas. Além disso, a perda é específica da faixa de frequência - quanto mais alta a faixa de frequência, maior a perda.

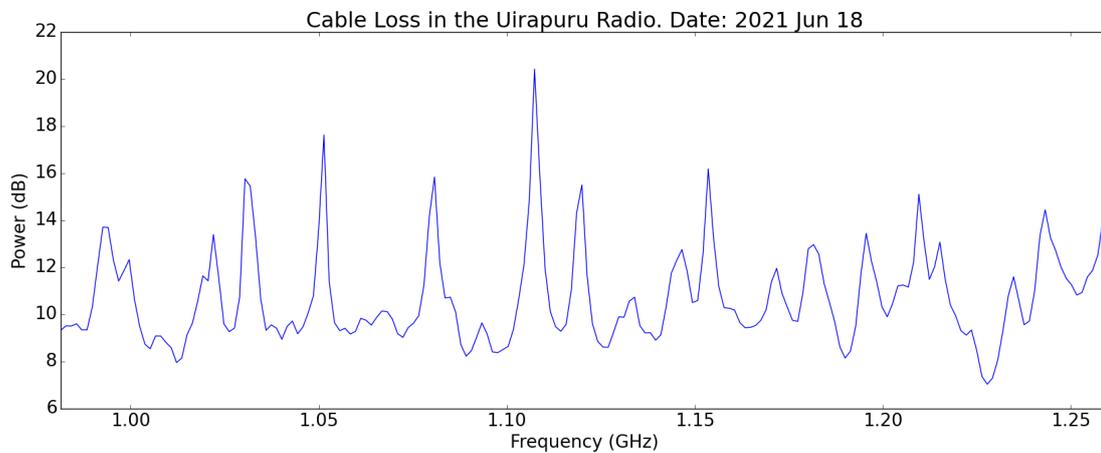


Figura 60 – Perda do cabo no radiotelescópio Uirapuru. Data: 18 de junho de 2021. Fonte: Produção do autor.

5.2.2 Perda de retorno

Nas telecomunicações, a perda de retorno, mais conhecida como *return Loss* é uma medida em termos relativos da potência do sinal refletido por uma descontinuidade em uma linha de transmissão ou fibra óptica. Essa descontinuidade pode ser causada por uma incompatibilidade entre a terminação ou carga conectada à linha e a impedância característica da linha. Geralmente é expresso como uma proporção em decibéis (dB) [60].

Quando um sinal é transmitido por uma linha de transmissão, parte da potência do sinal é sempre refletida ou retornada à fonte devido a descontinuidades na linha de transmissão. A descontinuidade pode ocorrer devido a conexão a um sistema, outra linha de transmissão ou conector. A medida dessa potência refletida é chamada de perda de retorno.

A perda de retorno é a razão entre a potência refletida e a potência incidente, em decibéis (dB) [61], conforme a equação abaixo:

$$ReturnLoss(dB) = 10\log_{10} \frac{P_{entrada}}{P_{refletida}} \quad (5.2)$$

Quanto maior for essa razão, melhor será a junção de impedâncias entre a fonte e antena.

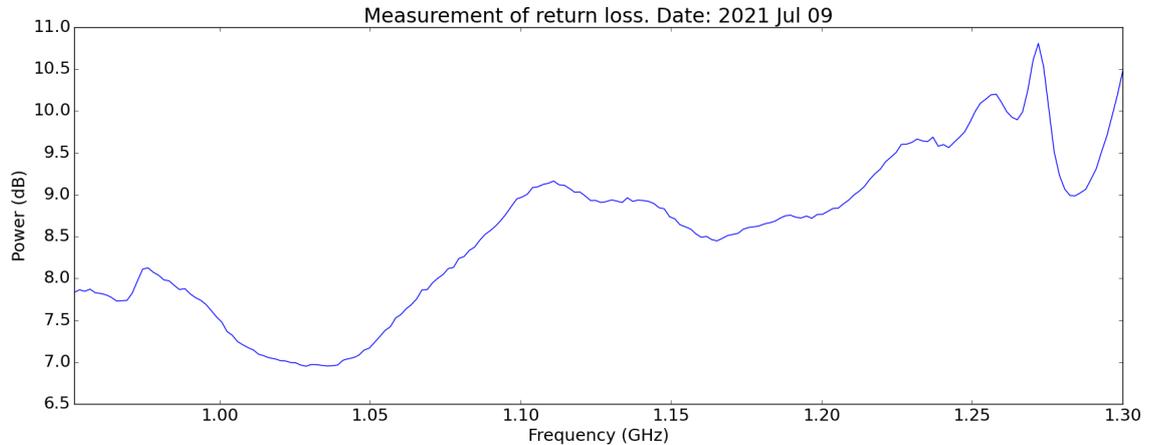


Figura 61 – Medição da perda de retorno. Fonte: produção do autor.

Na figura 61 foi feita a medição da perda de retorno com o conjunto de dois amplificadores de baixo ruído (LNA'S, da especificação ZX60-P162LN+), dois amplificadores (não LNA, da especificação ZX60-V63+), um filtro passa banda desenvolvido pela colaboração BINGO, especificamente para o nosso radiotelescópio, um isolador e fonte digital de 3,5V ligada nos conectores dos LNA's e amplificadores (não LNA). Dessa forma, a medição representa a medida de potência efetivamente entregue por uma linha de transmissão à uma antena.

Na figura 62 está representada o esquema dos componentes para podermos visualizar como foi construído os passos iniciais das medições.



(a) Fase da montagem e testes dos componentes. (b) Componentes instalados no receptor da corneta.

Figura 62 – Montagem e instalação dos componentes. Fonte: Produção do autor.

Neste ponto, vamos investigar o significado físico da perda de retorno. Em um sistema de RF, quando a energia é enviada da fonte para a carga, existem três parâmetros principais a serem considerados, quais sejam: (1) energia incidente; (2) potência refletida; e (3) potência absorvida pela carga (transmitida à carga).

A energia incidente é independente da linha de transmissão (ou cabo) e da carga, depende apenas da configuração da fonte e não pode ser alterada depois de transmitida da fonte. A potência

absorvida pela carga é essencialmente a potência refletida subtraída da potência incidente.

Uma perda de retorno maior indica que menos energia é refletida da carga [62]. Geralmente, esse é um resultado desejável. Já uma menor perda de retorno indica que mais energia é refletida de volta da carga. Isso geralmente significa que há uma incompatibilidade de impedância na carga.

5.2.3 Parâmetro S

O parâmetro de espalhamento (S parameter) pode caracterizar o componente de RF ou o desempenho do caminho. Esses parâmetros são matrizes complexas que mostram características de reflexão/transmissão (amplitude/fase) em domínio da frequência.

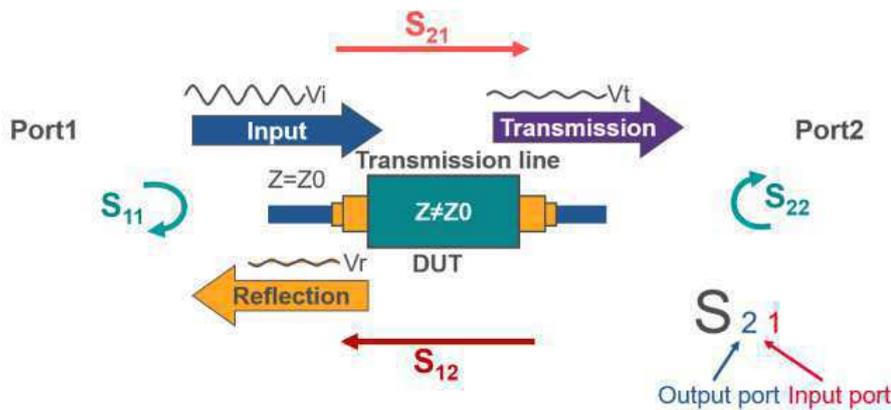


Figura 63 – Parâmetros de espalhamento. Fonte [29]

Neste ponto, para compreender melhor a figura acima é interessante destacar os seguintes aspectos:

Reflexão/entrada = coeficiente de reflexão $\rightarrow S_{11}, S_{22}$.

Transmissão/entrada = coeficiente de transmissão $\rightarrow S_{21}, S_{12}$.

O Vector Network Analyzer (VNA) é usado para medir e analisar o comportamento do sinal dos parâmetros-S. O comportamento do sinal pode ser observado como ganho, perda de retorno, VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) e coeficiente de reflexão. Na figura 64 está representado um esquema para melhor compreensão.

Nas tabelas 6, 7 e 8 são mostradas as condições de testes que foram medidas do LNA ZX60-P162LN+ na faixa de frequência do BINGO. É importante destacar a escolha dos parâmetros de tensão, corrente e temperatura do dispositivo ao realizar as medições desejadas, pois para cada valor selecionado nas condições de testes, os resultados medidos apresentam valores distintos.

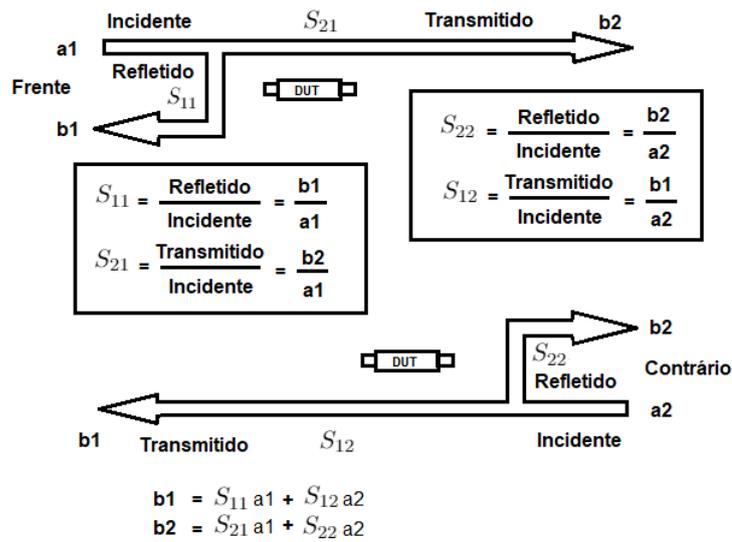


Figura 64 – Medição dos parâmetros S. Fonte: Produção do autor.

Frequência (MHz)	Ganho (dB)	Isolação (dB)	Perda de retorno na entrada (dB)	Perda de retorno na saída (dB)	Figura de ruído (dB)
1000	22.62	37.57	31.45	16.38	0.52
1100	21.92	37.59	29.58	15.69	0.50
1200	21.29	37.66	23.25	14.44	0.59
1300	20.64	37.55	20.08	13.07	0.56

Tabela 6 – Condições de teste: $V_d = 4V$, $I_d = 50,99mA$, Temperatura = $25^{\circ}C$. Fonte: [32]

Frequência (MHz)	Ganho (dB)	Isolação (dB)	Perda de retorno na entrada (dB)	Perda de retorno na saída (dB)	Figura de ruído (dB)
1000	23.15	37.96	22.70	15.99	0.28
1100	22.52	37.82	31.95	15.54	0.26
1200	21.89	37.88	32.87	14.51	0.34
1300	21.26	37.74	26.12	13.32	0.34

Tabela 7 – Condições de teste: $V_d = 4V$, $I_d = 51,96mA$, Temperatura = $-45^{\circ}C$. Fonte: [32]

Frequência (MHz)	Ganho (dB)	Isolação (dB)	Perda de retorno na entrada (dB)	Perda de retorno na saída (dB)	Figura de ruído (dB)
1000	22.28	37.65	31.03	16.11	0.67
1100	21.60	37.73	24.61	15.43	0.66
1200	20.92	37.84	20.46	14.16	0.71
1300	20.25	37.86	18.06	12.27	0.73

Tabela 8 – Condições de teste: $V_d = 4V$, $I_d = 52,33mA$, Temperatura = $85^{\circ}C$. Fonte: [32]

5.2.3.1 Análise vetorial de rede - parâmetro S11

O analisador vetorial de rede, mais conhecido como *Vector Network Analyzer* do analisador de cabos e antenas *FieldFox* funciona como coeficiente de transmissão e reflexão dos cabos, o parâmetro S11, na frequência entre 950 MHz a 1300 MHz.

Para ilustrar esse tipo de medição, utilizamos um sistema entre cabos, conectando eles na entrada e saída do analisador de espectro FieldFox, junto com os componentes iguais ao da figura 62.

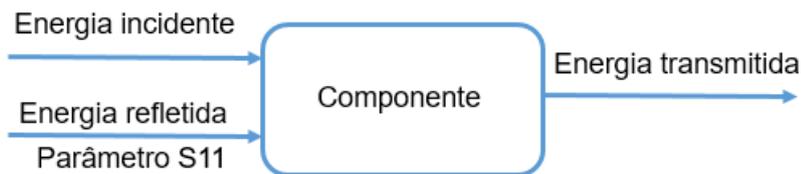


Figura 65 – Transmissão e reflexão de potência através de um componente. Fonte: Produção do autor.

O gráfico 66 representa dois tipos de sinais captados pelo analisador de cabos e antenas FieldFox. No gráfico com linha vermelha mostra o sinal variando sem a presença de fonte ligada nos componentes. Por outro lado, vemos que no gráfico com linha azul, com a fonte ligada, percebe-se uma diferença da variação da potência em dB.

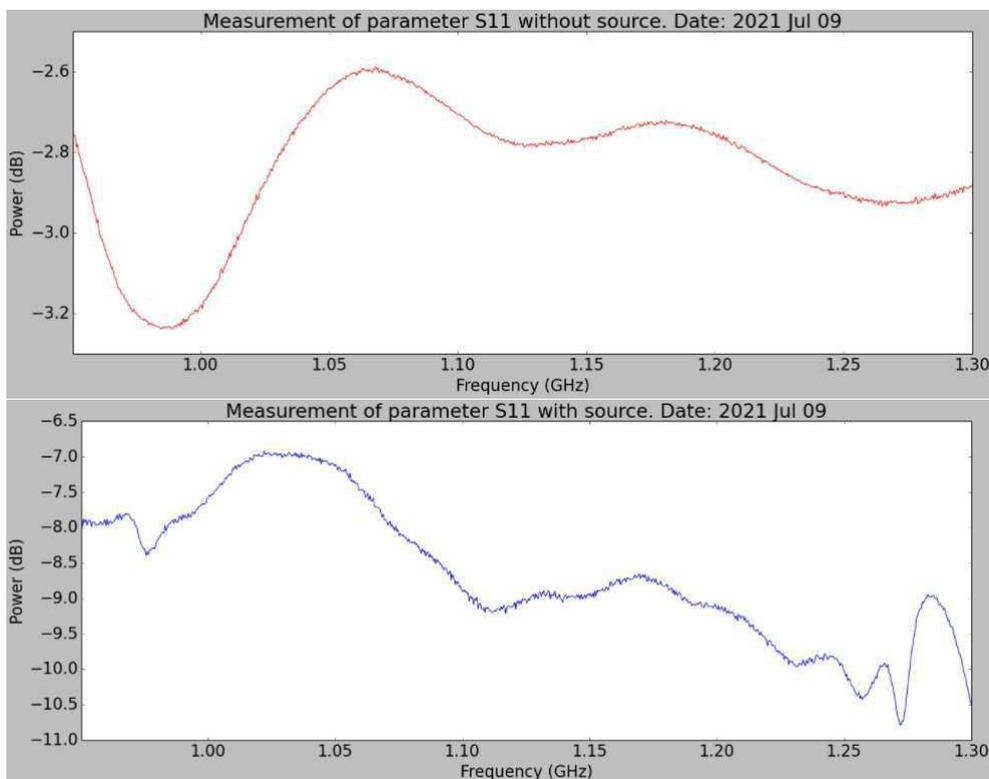


Figura 66 – Medição do parâmetro S11 entre cabos. Fonte: Produção do autor.

5.2.3.2 Parâmetro S21

O parâmetro S21 representa a energia transferida de um determinado sistema de componentes. O gráfico 67 representa a medição feita em um amplificador ZX60-V63+ por meio do analisador de espectro (*Spectrum Analyzer*) do FieldFox e o VNA (*Vector Network Analyzer*) disponíveis no laboratório LABMET da UFCG.

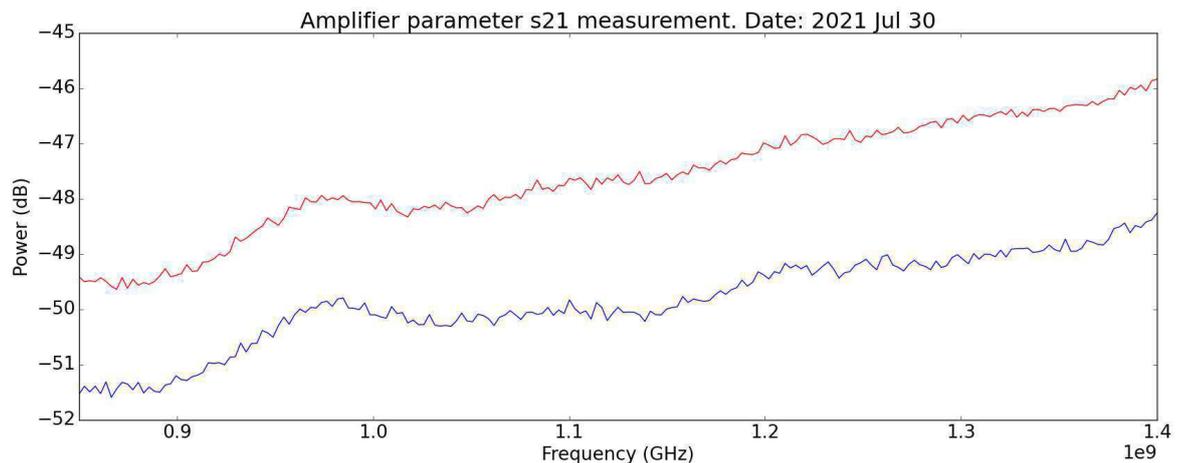


Figura 67 – Medição do parâmetro S21 do amplificador ZX60-P162LN+. Fonte: Produção do autor.

Conforme o gráfico acima, o traço vermelho representa o amplificador ZX60-V63+ ligada na fonte de 4.5V, enquanto o traço azul mostra o sinal com a fonte desligada, podendo notar pouca diferença de ganho entre os dois casos, o que significa que esses amplificadores não dependem exclusivamente de uma fonte de alimentação para o seu funcionamento.

5.2.4 Amplificadores LNA

Na figura 68 está representada o sinal que foi gerado por um VNA emitindo na entrada um sinal de rádio frequência de 1.1 MHz e amplitude de -50 dbm, detectada através do analisador de espectro do FieldFox na banda de 900 MHz a 1300 MHz. Utilizamos essas especificações para mostrar que o VNA emite um pulso de sinal e posteriormente o LNA irá amplificá-lo.

Já na figura 69 podemos perceber o ganho no sinal captado pelo FieldFox junto com o VNA, mostrando que o LNA ZX60-P162LN+ irá amplificar o sinal recebido, o que é bastante interessante e importante nas medições e estudos da radioastronomia. Também, é preciso uma fonte de alimentação para ligarmos o componente e amplificá-lo. Com isso, comparando a voltagem dos gráficos, quanto maior a voltagem, maior será o ganho da magnitude do sinal de entrada, em que o ganho é representado pela relação da magnitude de sinal de saída/entrada de um amplificador.

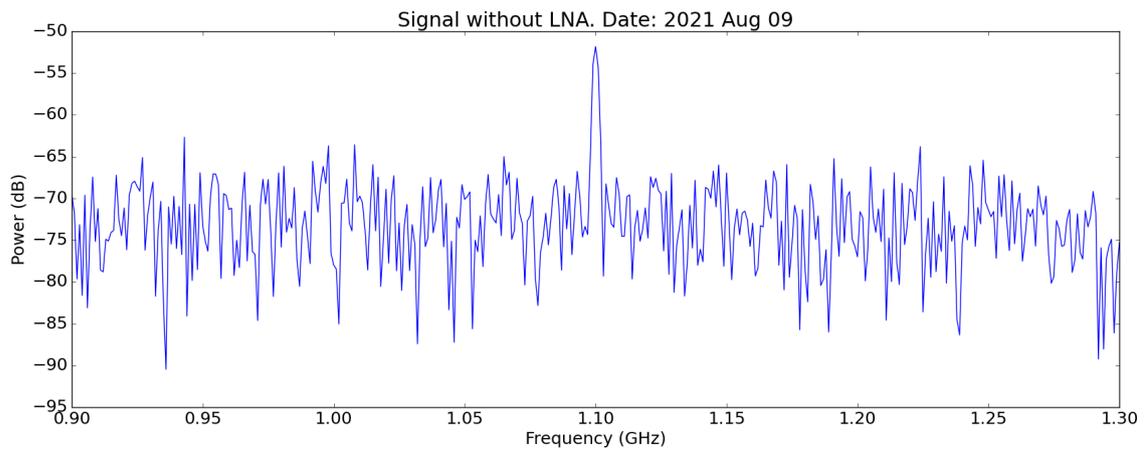


Figura 68 – Medição de um sinal sem LNA. Fonte: Produção do autor.

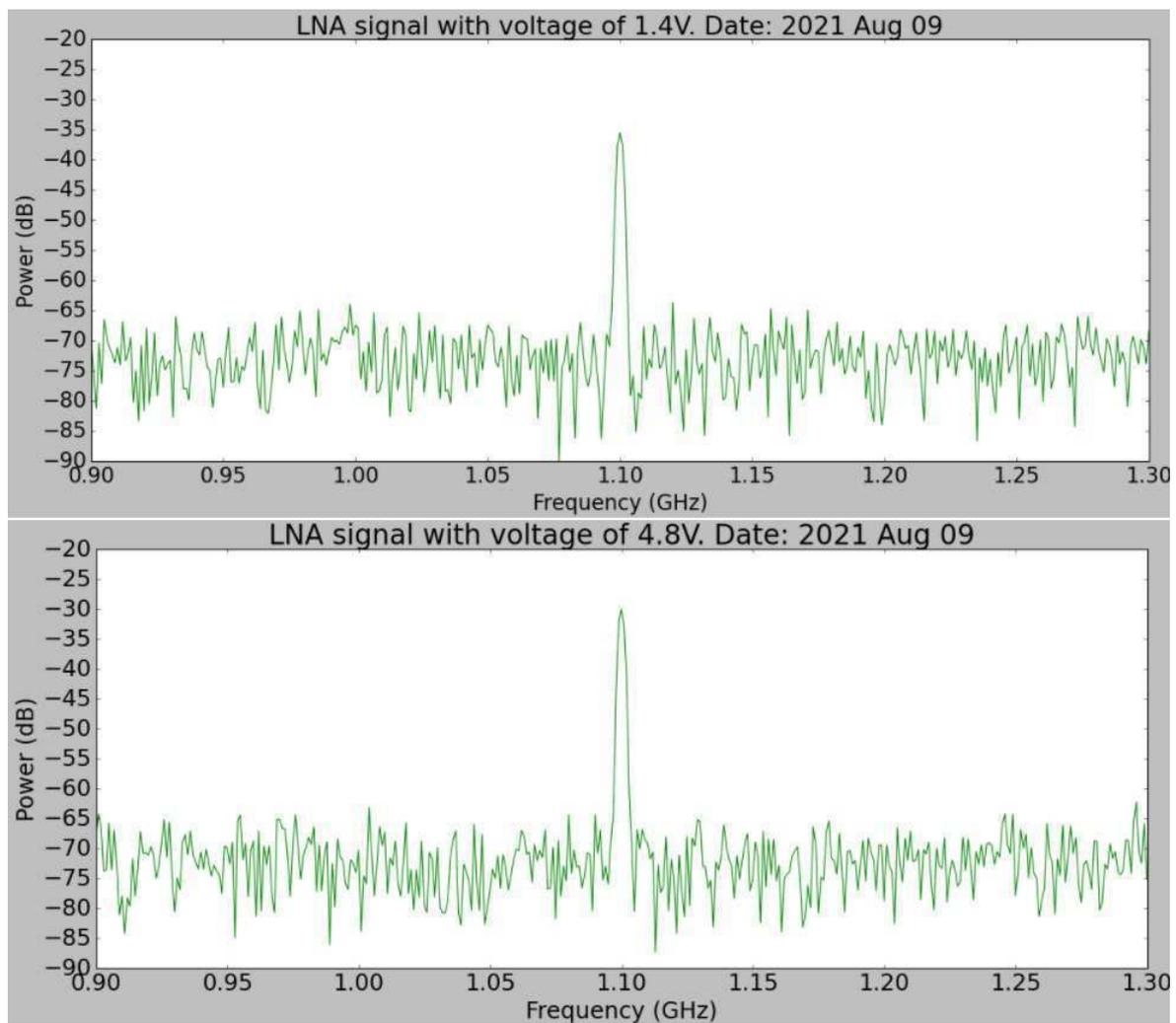


Figura 69 – Medição do sinal do LNA com voltagem. Fonte: Produção do autor.

6 Resultados e discussões das medições de ganho dos LNA's ZX60-P162LN+ e receptor.

Neste capítulo, abordaremos as medições de ganho para cada conjunto de componentes, sendo com 1 LNA, 2 LNA's, 3 LNA's e a cadeia de equipamentos e dispositivos que compõe o radiômetro/receptor que será utilizado no radiotelescópio BINGO e Uirapuru. O objetivo é perceber e entender como se comporta o ganho em determinadas configurações, de acordo com a potência aplicada no gerador de sinal e como os amplificadores de baixo ruído mudam os resultados do ganho quando ligado e/ou desligado.

6.1 Dados de ganho para 1 LNA

Os amplificadores de baixo ruído amplificam sinais fracos em sua entrada sem adicionar ruído significativo ao sinal de saída. Os amplificadores são normalmente usados em receptores para melhorar a recepção do sinal. O ganho do LNA refere-se à sua capacidade de aumentar ou amplificar o nível do sinal de entrada para um nível que possa ser processado pelo receptor. O ganho é um dos conceitos primordiais na radioastronomia, uma vez que os sinais captados pelos radiotelescópios são fracos e que precisam de amplificadores de sinais, como o LNA, para estudá-los.

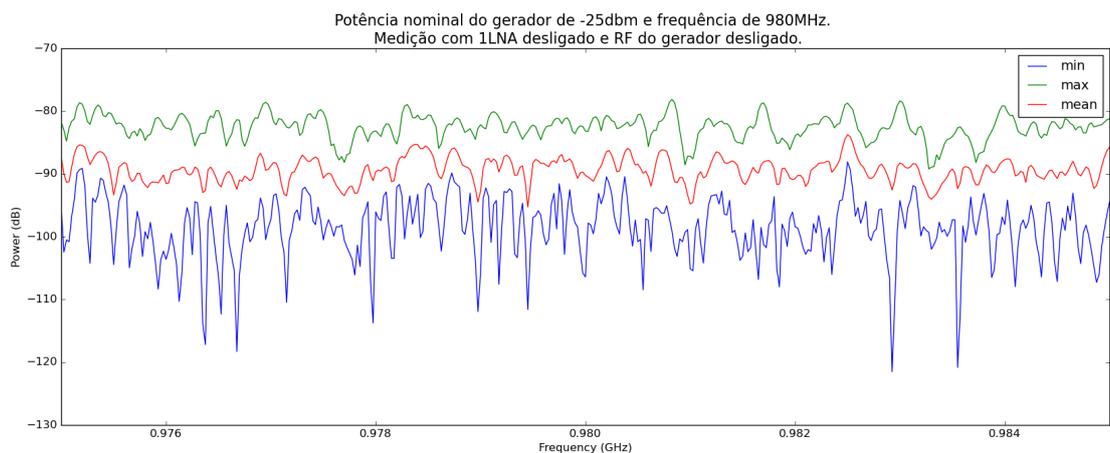


Figura 70 – 1 LNA desligado, potência de entrada -25dbm. Fonte: Produção do autor.

A figura 70 mostra a medição da configuração de 1 LNA desligado e o RF do gerador desligado, com potência de entrada -25dbm e frequência a 980MHz. Uma vez que o gerador de sinal está desligado, o que a figura mostra é apenas um ruído eletromagnético do detector.

Como vimos, para calcularmos o ganho de amplificadores, utilizamos a equação 4.2, em que precisamos da potência do sinal da fonte recebido na entrada pelo receptor (RF (Radio Frequência) do gerador de sinal) e a potência lida na saída do receptor com o LNA ligado (lido pelo Field Fox). Já a figura 71 mostra a mesma configuração, só que com o LNA e RF ligados, podendo notar um ganho do sinal emitido pelo FieldFox.

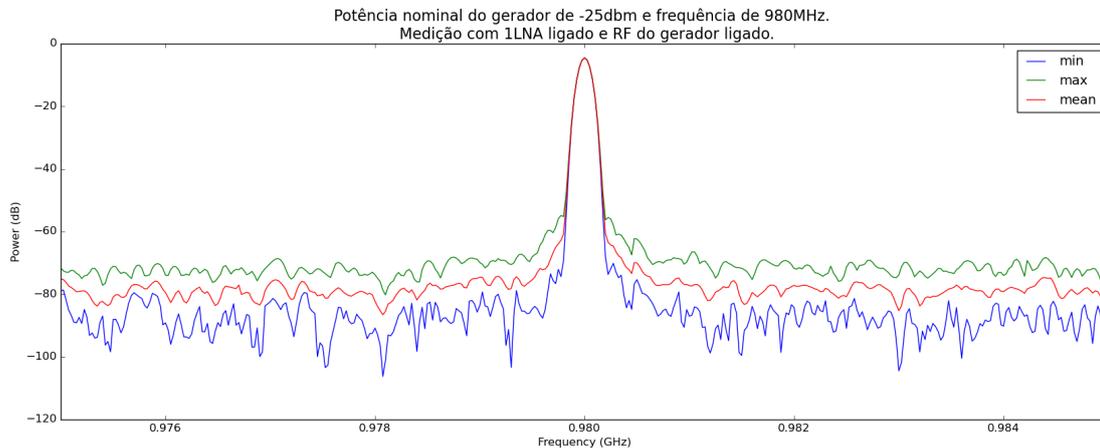


Figura 71 – 1 LNA ligado, potência de entrada -25dbm. Fonte: Produção do autor.

O FieldFox possui a opção de analisarmos os valores mínimos, máximos e médios dos sinais, possibilitando a comparação dos mesmos e análise detalhada do comportamento do sinal captado. Na imagem 72, podemos ver a tela do FieldFox de como é mostrado enquanto as medições são feitas.

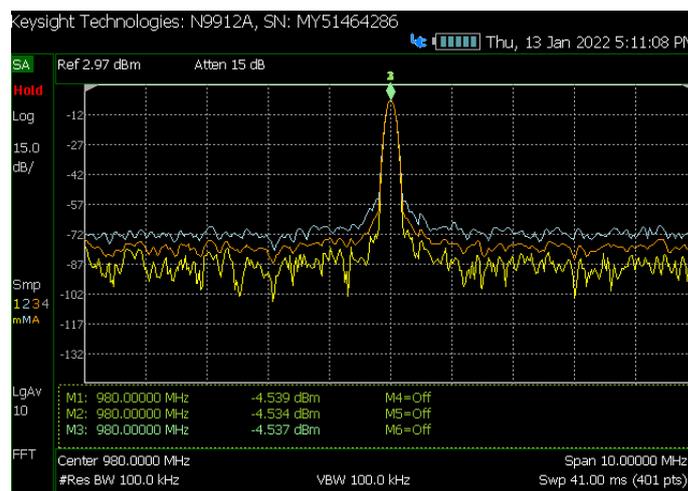


Figura 72 – Tela do FieldFox da configuração de 1LNA, sinal de entrada de -25dbm, frequência de 980MHz, LNA ligado e RF do gerador ligado. Fonte: Produção do autor.

Nas medições realizadas para este tipo de configuração e para as outras que serão mostradas adiante, o FieldFox permite realizar mais de uma medição daquilo que está sendo medido no aparelho, função esta que permite um resultado mais preciso. Então, o LogAv quer dizer que foram feitas 10 medições e ele apresenta os valores mínimo e máximo entre essas 10

medidas, além de calcular o valor médio delas, após isto, o FieldFox finaliza a contagem, com o nome *Hold* no canto superior esquerdo, e nos mostra o resultado. Outros parâmetros a serem considerados, são a largura de banda de resolução (Res BW) e largura de banda de vídeo (VBW), que utilizamos 100 KHz, e o span de 10MHz definido como o intervalo de -10 MHz antes da frequência central e +10 MHz depois da frequência central.

Usando a 4.2, com a potência de entrada -25 db e a potência de saída, usando o valor médio de -4,537 dbm da imagem 72, teremos um ganho de 20,46 dB, o que condiz com o datasheet do LNA ZX60-P162LN+ [31]. Os gráficos 73, 74, 75, 76, 77, 78 e 79 mostram o ganho com relação a frequência, onde foram feitas várias medições com a variação de potência e variação de frequência.

As próximas imagens continuam na mesma configuração, mas com uma variação da potência. Podemos perceber que o comportamento do gráfico permanece quase constante ao mudarmos a potência de entrada do gerador de sinais, e o valor do ganho continua consistente com os valores padrões do datasheet do amplificador ZX60-P162LN+.

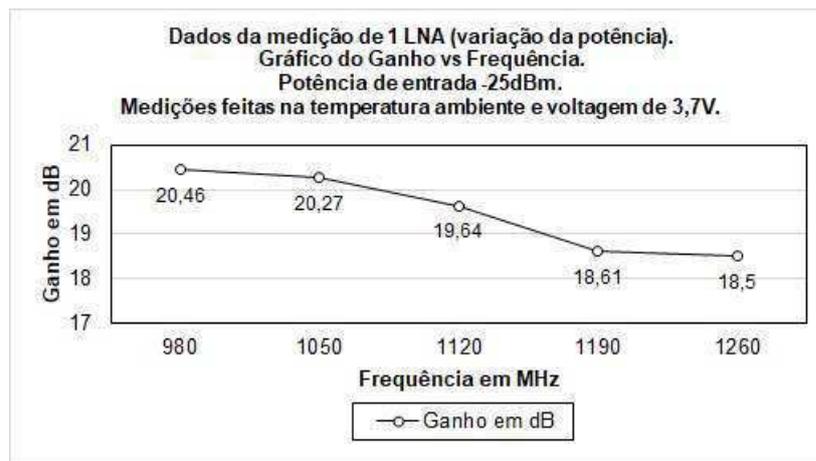


Figura 73 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -25dbm. Fonte: Produção do autor.

O gráfico 77, agora com a variação da frequência, nos mostra o mesmo raciocínio com a variação da potência. Em suma, podemos afirmar que com uma certa potência de entrada aplicada e frequência estabelecida dentro do aceitável do amplificador, o ganho permanece quase que constante e de acordo com os valores do datasheet.

Os LNA's trabalham no ganho deles até uma certa potência. Se aplicarmos um sinal muito forte em 1 LNA, o ganho irá diminuir. Segundo o datasheet do LNA ZX60-P162LN+, o amplificador pode receber até no máximo uma potência de entrada de +25dbm Então, dependendo do sinal, o primeiro e o segundo LNAs podem trabalhar normalmente, pelo fato de que podemos ligar os LNA's em cadeia e, também, ligar 2 LNA's e 3 LNA's em série, mas com um terceiro há possibilidade de sair do regime linear. Se sairmos da frequência que o LNA opera, tanto para mais ou para menos, o ganho irá diminuir.

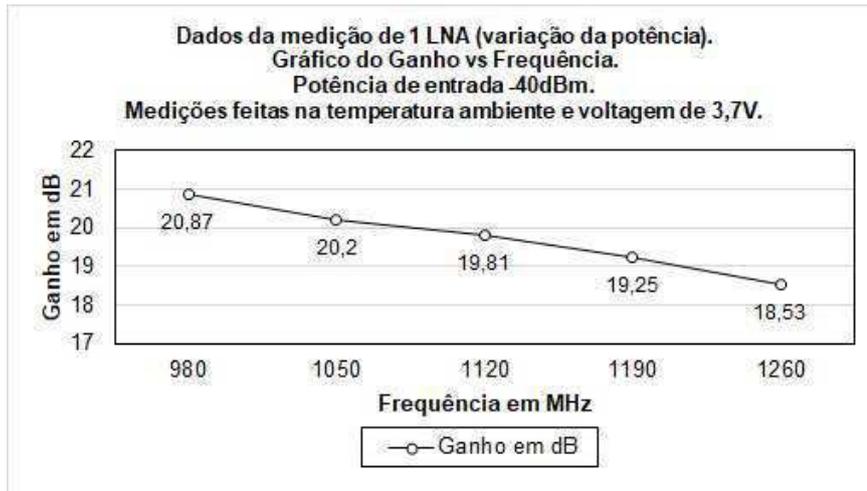


Figura 74 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -40dbm. Fonte: Produção do autor.

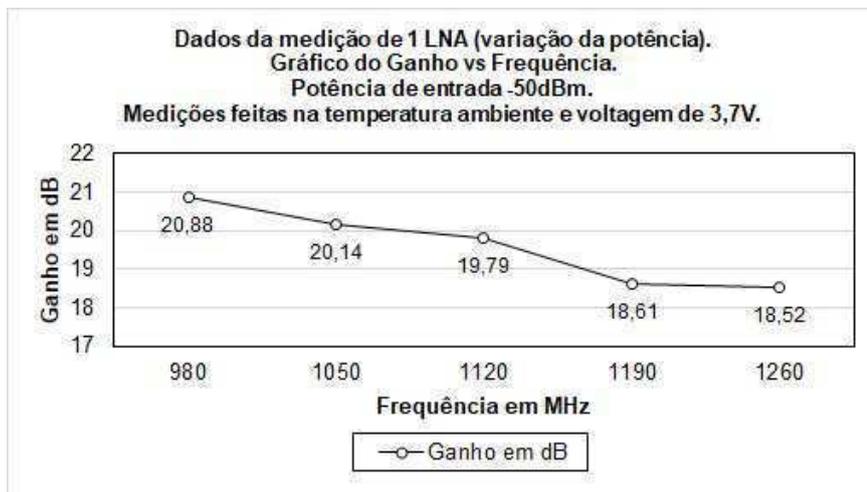


Figura 75 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -50dbm. Fonte: Produção do autor.

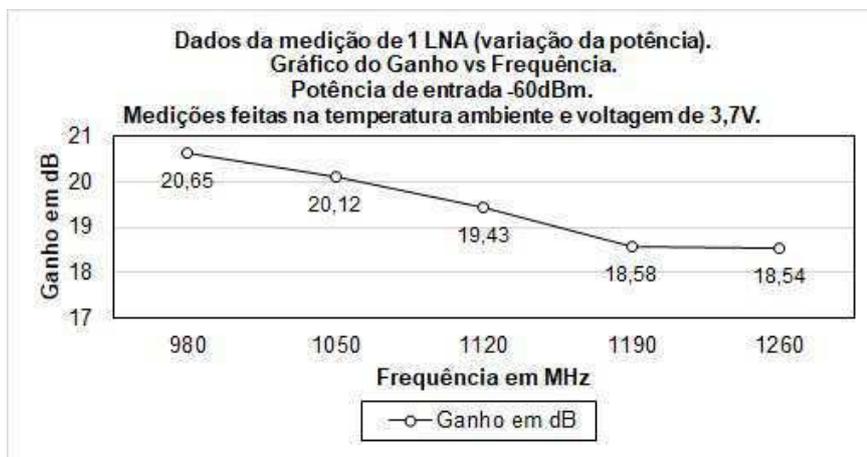


Figura 76 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -60dbm. Fonte: Produção do autor.

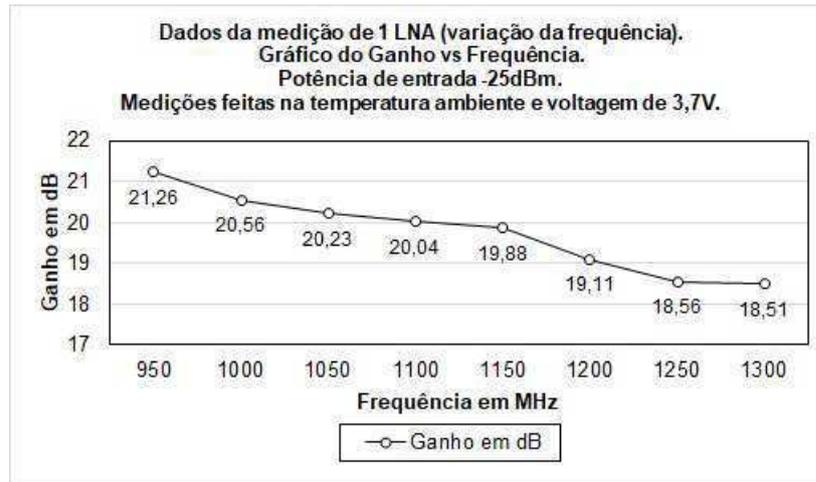


Figura 77 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -25dbm, variando a frequência.
Fonte: Produção do autor.

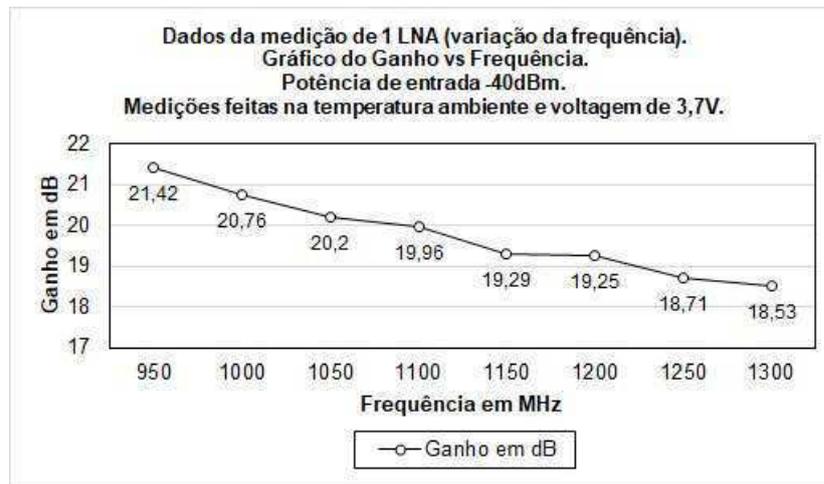


Figura 78 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -40dbm, variando a frequência.
Fonte: Produção do autor.

6.2 Dados de ganho para 2 LNA's

As medições e cálculos foram realizados, também, para um conjunto de 2 LNA's conectados, para verificarmos o comportamento dos sinais e valores do ganho. Aqui, será mostrado gráficos na frequência de 980MHz e 1260MHz, que está dentro da faixa de operação do BINGO, ambos com a configuração de 2 LNA's e RF do gerador ligados.

Comparando os dois gráficos, na frequência de 980MHz o sinal foi amplificado, onde o seu valor máximo atingiu cerca de -10dB, aproximando de 0 dB, o que é bastante importante em questão do aproveitamento do sinal captado. Já na frequência de 1260MHz, o sinal amplificado se distancia um pouco, ou seja, o valor máximo chega aproximadamente a -16 dB.

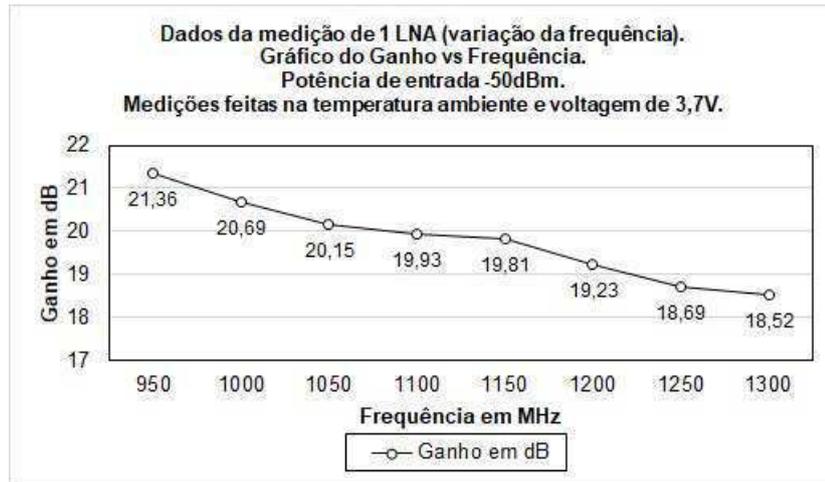


Figura 79 – Ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, -50dbm, variando a frequência.
Fonte: Produção do autor.

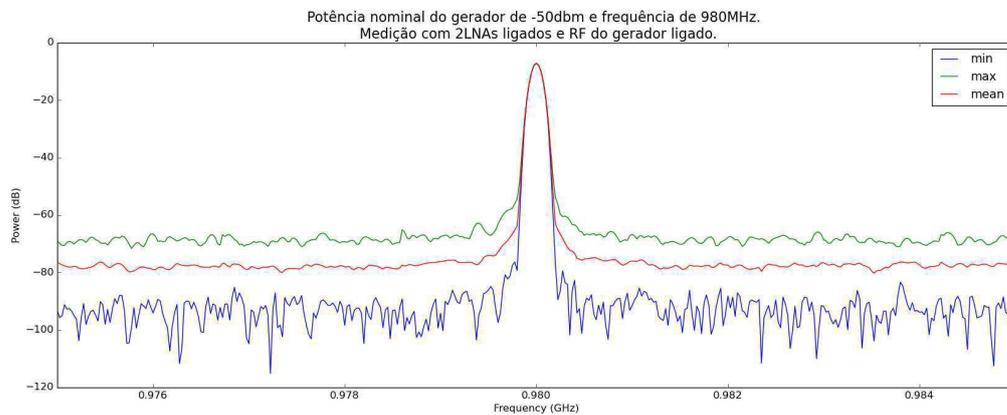


Figura 80 – 2 LNA's ligados com potência de entrada -50dbm e frequência de 980MHz.
Fonte: Produção do autor.

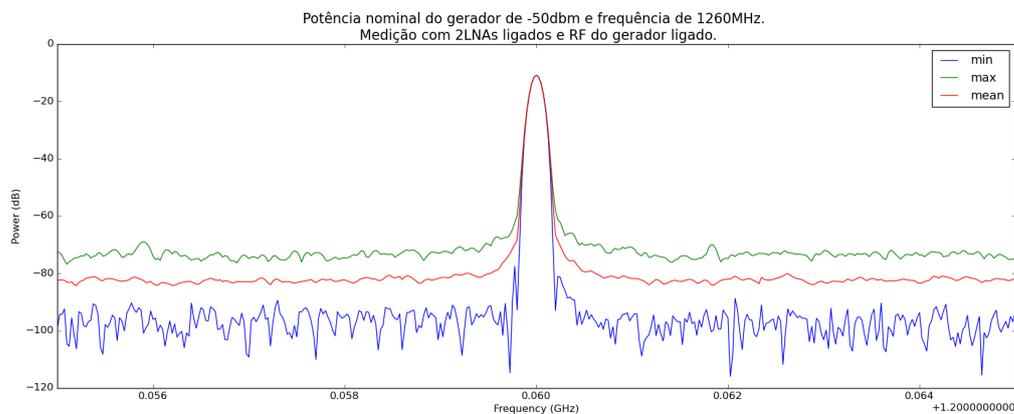


Figura 81 – 2 LNA's ligados com potência de entrada -50dbm e frequência de 1260MHz.
Fonte: Produção do autor.

Agora, mudando a potência de entrada para -70 dbm, percebemos o comportamento semelhante.

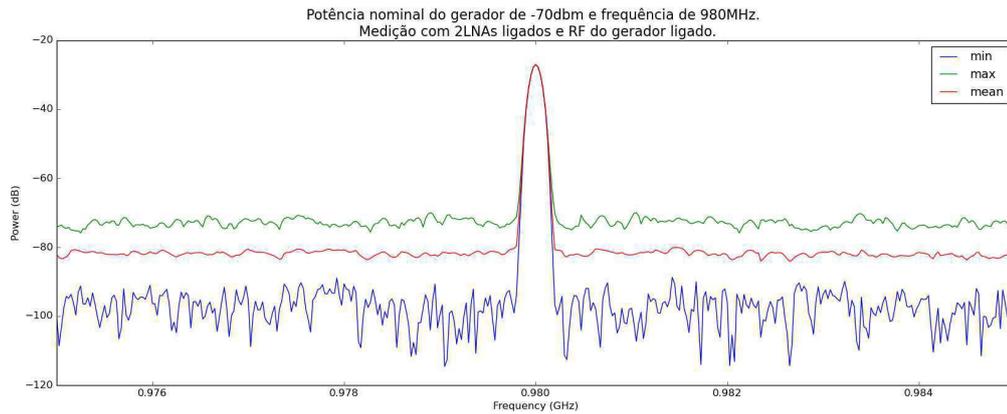


Figura 82 – 2 LNA's ligados com potência de entrada -70dbm e frequência de 980MHz.
Fonte: Produção do autor.

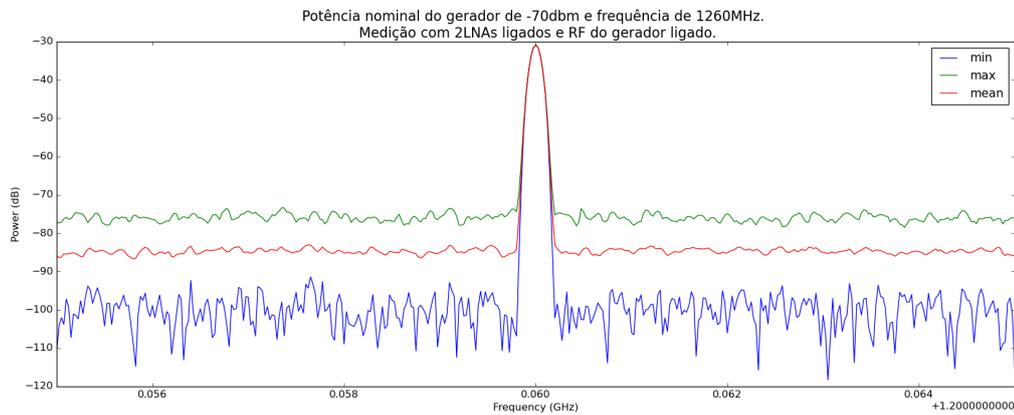


Figura 83 – 2 LNA's ligados com potência de entrada -70dbm e frequência de 1260MHz.
Fonte: Produção do autor.

Como visto anteriormente, a configuração de 1 LNA nos fornece um ganho em torno de 20 a 22 dB. Já com 2 LNA's, o ganho será duplicado, o que é esperado. O ganho só não será duplicado, caso a potência de entrada for muito alta. Por exemplo, cada LNA possui um ganho intrínseco, se colocarmos 5 LNA's com um sinal de entrada -180 dBm ou menos, conseguiremos um ganho 5x maior, comparado a 1 LNA apenas.

O cálculo segue o mesmo raciocínio, usando a potência de saída com o valor médio de potência de -7,12 dbm captado pelo Fieldfox e a potência de entrada fornecida pelo gerador de sinais de -50 dbm, achamos o valor de ganho 42,88 dB para a frequência de 980 MHz, por exemplo. O mesmo procedimento é realizado para as frequências restantes.

Na imagem 84, podemos verificar o comportamento do sinal nos valores mínimo, máximo e médio, com uma média de contagem de 50 vezes, para uma precisão melhor da medida. Os valores M1, M2 e M3 são semelhantes, o que torna a medição mais confiável e sem oscilações de valores.

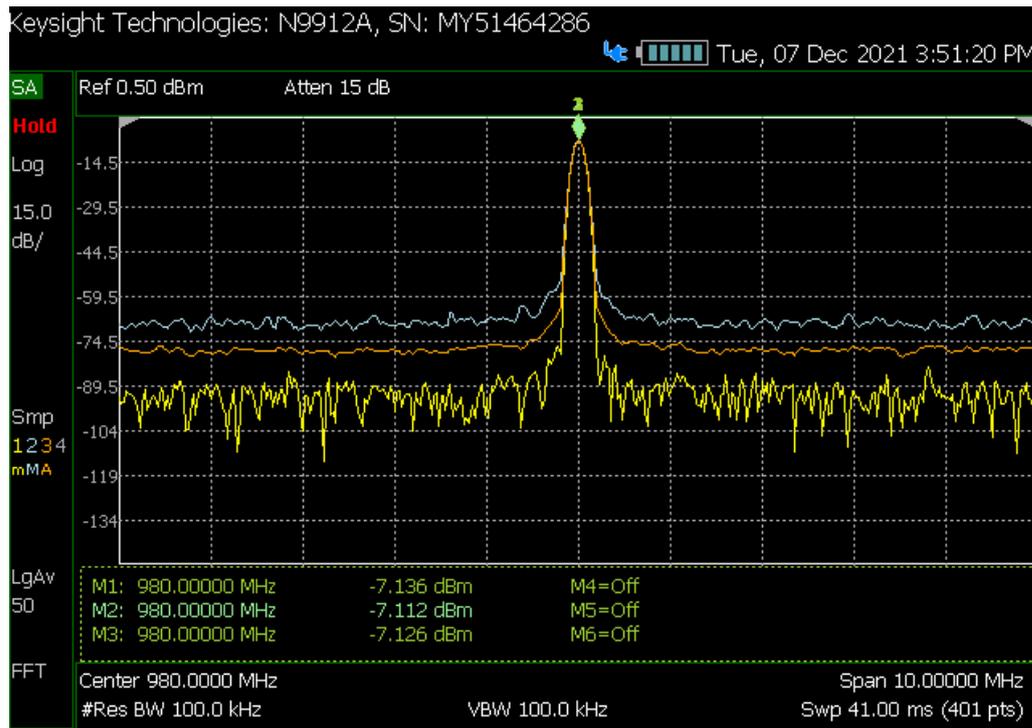


Figura 84 – Tela do FieldFox da configuração de 2LNA's, sinal de entrada de -50dbm, frequência de 980MHz, LNA ligado e RF do gerador ligado. Fonte: Produção do autor.

As próximas imagens mostram o comportamento similar do ganho vs frequência da configuração de 1 LNA, podendo perceber a diminuição do ganho conforme a frequência é aumentada e o ganho duplicado pelo fato de acrescentarmos mais 1 LNA.

Por exemplo, no gráfico 88 observamos que na potência gerada de -80dbm pelo gerador de sinais, quando diminuimos a frequência, o ganho sofre uma redução do seu valor, isso ocorre devido aos amplificadores operarem até uma certa faixa de frequência, de acordo com o sinal de entrada aplicado a ele. Segundo o datasheet do LNA ZX60-P162LN+, o mesmo acontece quando é aplicado a partir de 0.7 GHz até 1.6 GHz, tendo a diminuição também do seu ganho.

6.3 Dados de ganho para 3 LNA's

Agora, com 3 LNA's, iremos observar o comportamento dos sinais em algumas frequências, bem como os valores do ganho triplicado, o que é esperado.

Nesse tipo de configuração, duas potências de entradas foram possíveis de realizar durante as medições, sendo de -70 dbm e -80 dbm, pois quando inseria uma potência de -90 dbm em diante, os valores e sinais mostrados pelo FieldFox não eram razoáveis, e fugiam do que os LNA's operavam. Ao colocar uma potência de entrada de -60 dbm em diante, o FieldFox começava a esquentar e aparecia mensagem de erro alertando falhas, pelo fato da configuração possuir 3 LNA's conectados com uma potência de entrada que não os suportavam.

Os gráficos a seguir mostram o sinal dos 3 LNA's amplificados na potência de entrada de

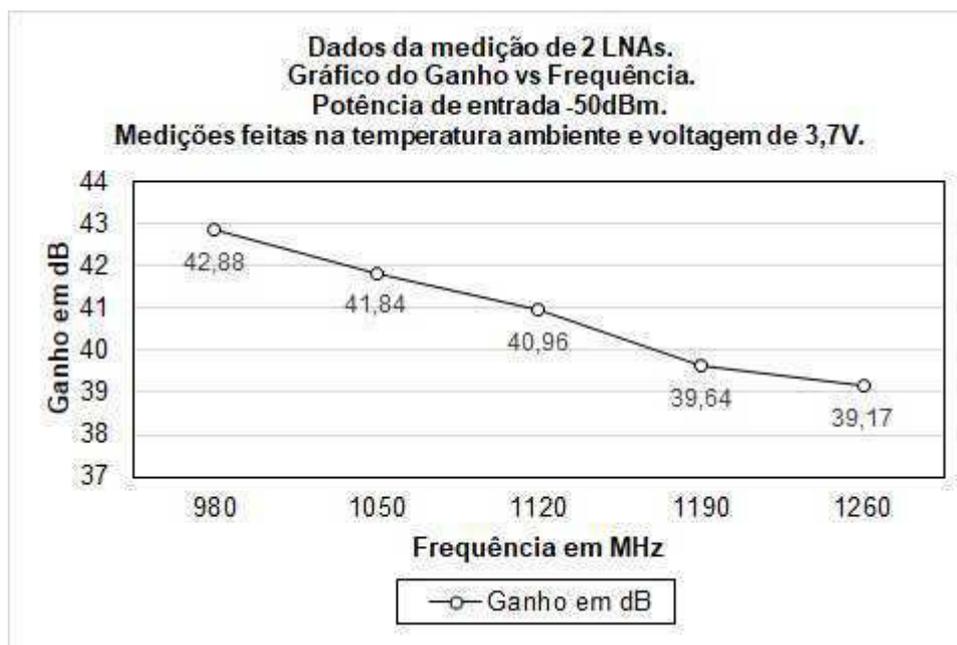


Figura 85 – Ganho vs frequência da configuração de 2 LNA's, potência de entrada -50 dbm. Fonte: Produção do autor.

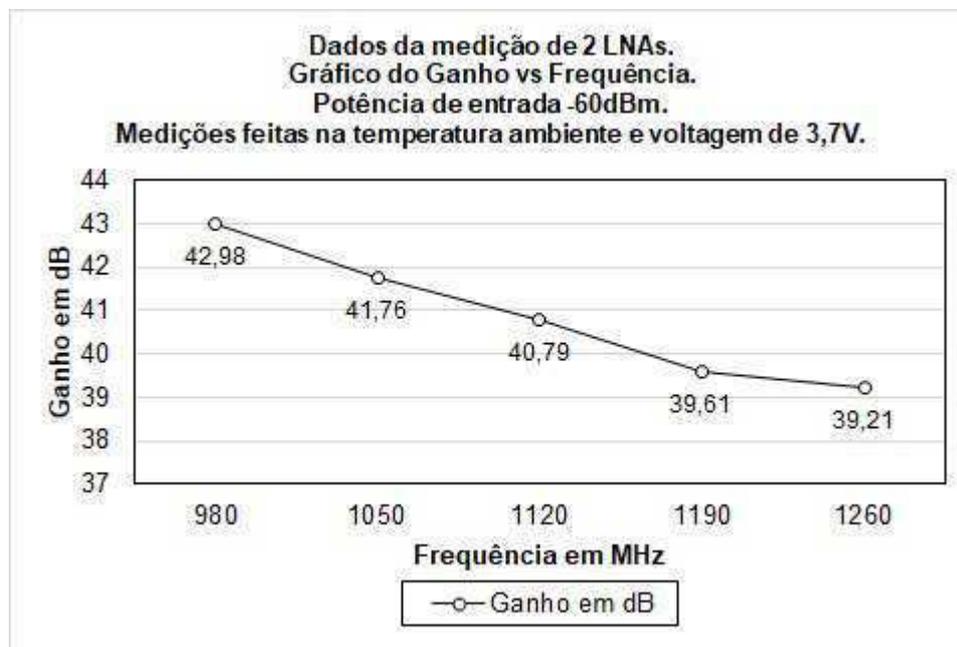


Figura 86 – Ganho vs frequência da configuração de 2 LNA's, potência de entrada -60 dbm. Fonte: Produção do autor.

-70 dbm, com o RF do gerador e tensão aplicada de 3,7v nos amplificadores ligados, chegando num valor próximo de -10 dB. Já para a potência de -80 dbm, o sinal amplificado se aproxima do valor de -20 dB, em que cada frequência fornecida pelo gerador, o valor pode variar ou até mesmo permanecer constante, mas a escala e amplitude do sinal se diferenciam. No receptor

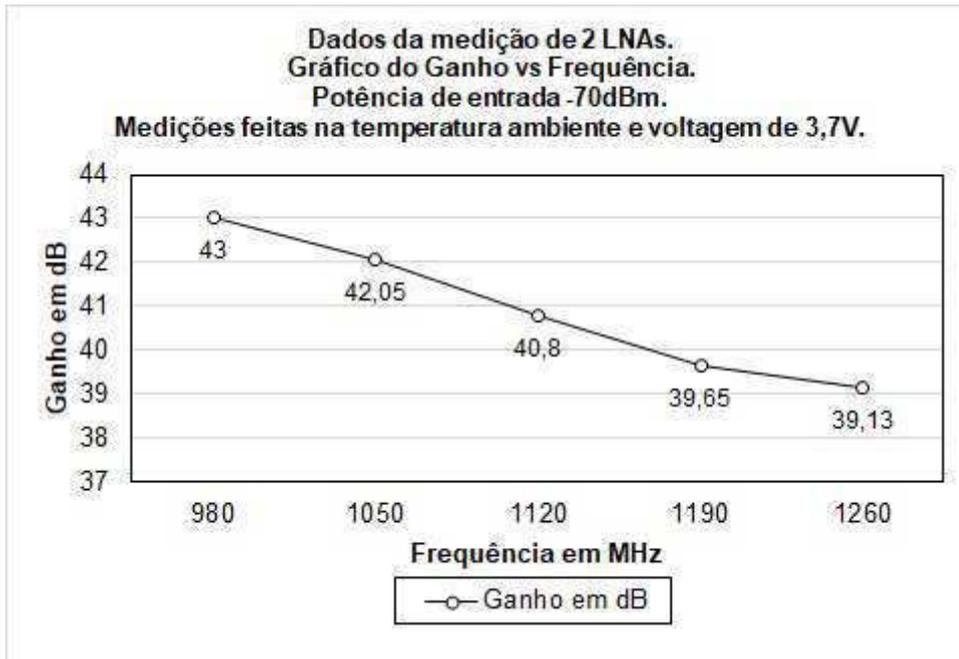


Figura 87 – Ganho vs frequência da configuração de 2 LNA's, potência de entrada -70 dbm. Fonte: Produção do autor.

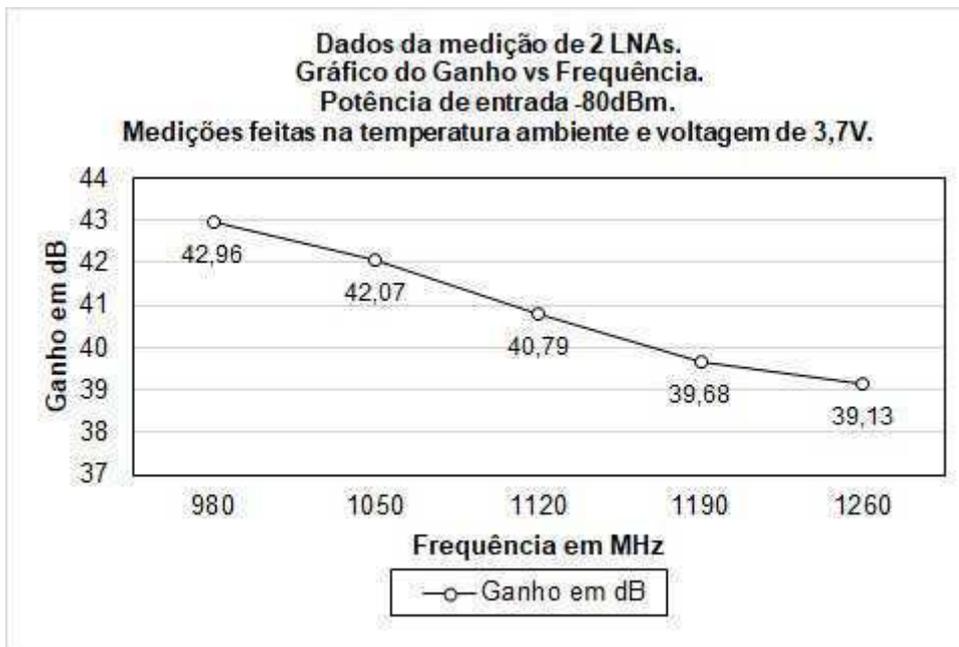


Figura 88 – Ganho vs frequência da configuração de 2 LNA's, potência de entrada -80 dbm. Fonte: Produção do autor.

do Radiotelescópio Uirapuru, utilizamos um conjunto de 3 LNA's, alguns filtros de passabanda, isoladores e amplificadores normais, formando uma cadeia de dispositivos para captar o sinal e integrá-lo para estudo.

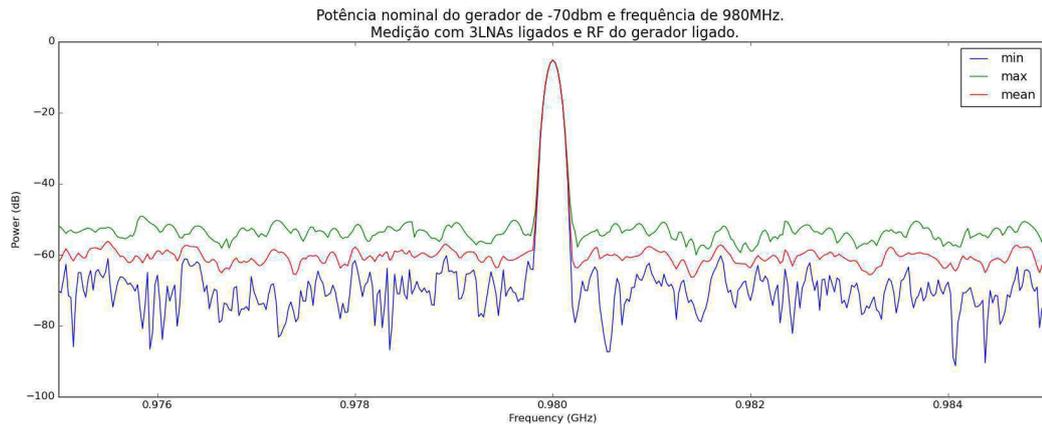


Figura 89 – 3 LNA's ligados com potência de entrada -70dbm e frequência de 980MHz.
Fonte: Produção do autor.

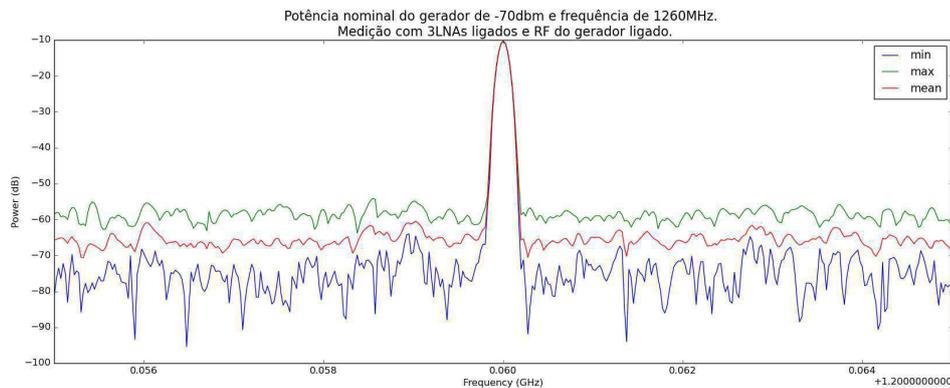


Figura 90 – 3 LNA's ligados com potência de entrada -70dbm e frequência de 1260MHz.
Fonte: Produção do autor.

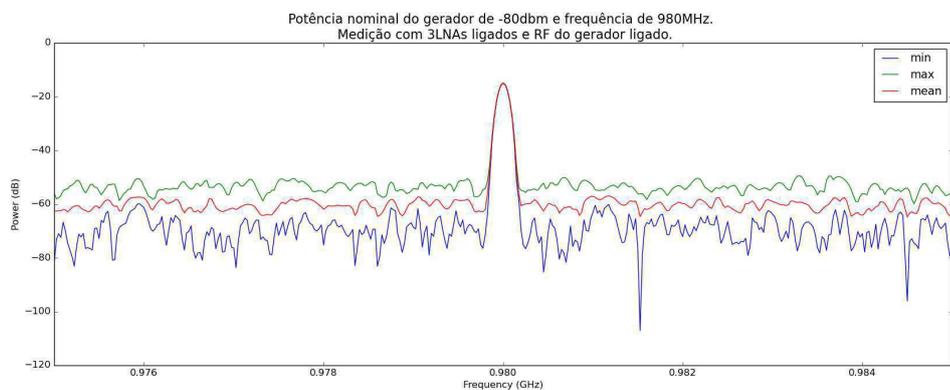


Figura 91 – 3 LNA's ligados com potência de entrada -80dbm e frequência de 980MHz.
Fonte: Produção do autor.

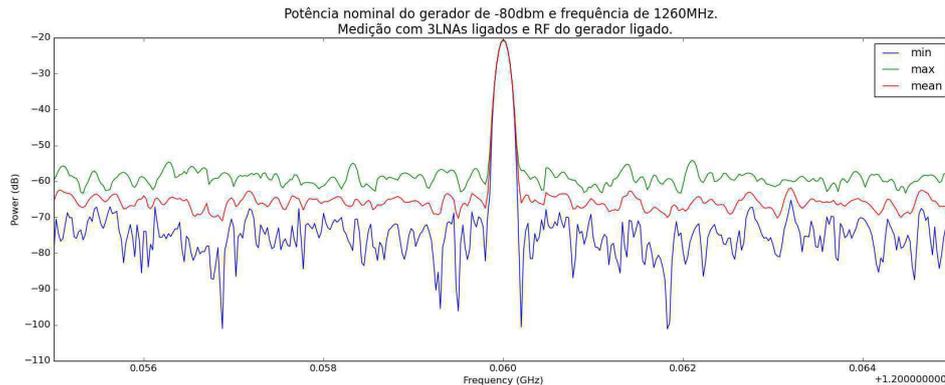


Figura 92 – 3 LNA's ligados com potência de entrada -80dbm e frequência de 1260MHz. Fonte: Produção do autor.

Agora, vamos analisar o comportamento do ganho triplicado para os 3 LNA's.

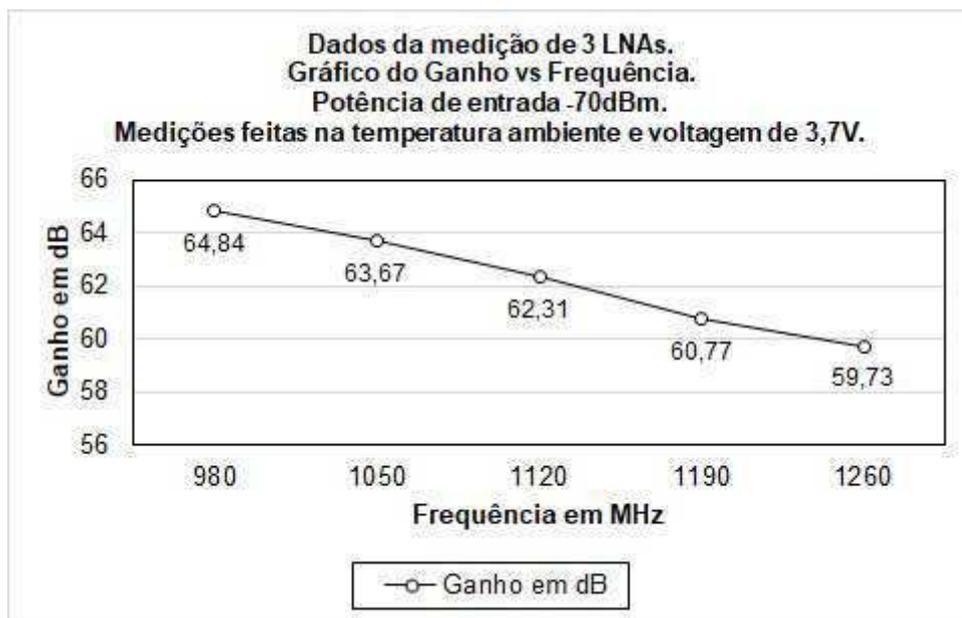


Figura 93 – Ganho vs frequência da configuração de 3 LNA's, potência de entrada -70 dbm. Fonte: Produção do autor.

6.4 Dados de ganho para o receptor

Para a configuração do receptor, utilizando os seguintes equipamentos: gerador de sinais, 3 LNA's, 2 isoladores, 1 filtro passabanda desenvolvido especificamente para a colaboração BINGO e o analisador de espectro (FieldFox), conforme as imagens 95 e 96.

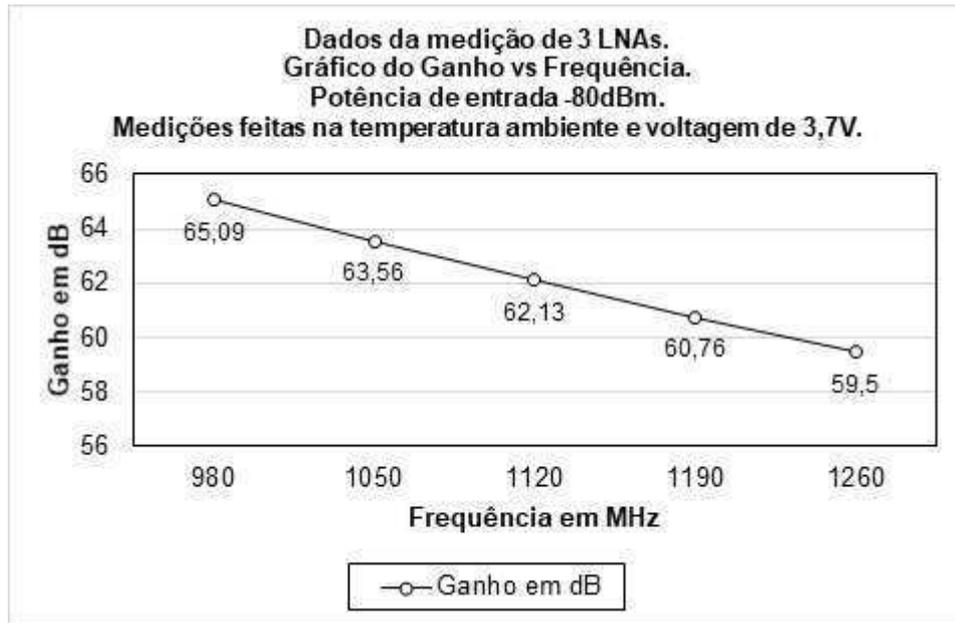


Figura 94 – Ganho vs frequência da configuração de 3 LNA's, potência de entrada -80 dbm. Fonte: Produção do autor.

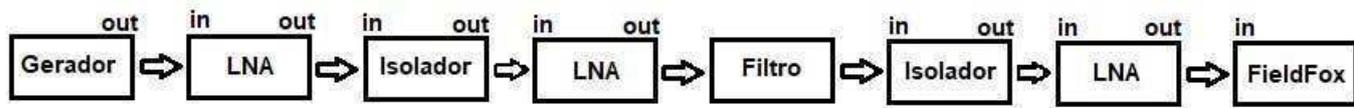


Figura 95 – Esquema do receptor. Fonte: Produção do autor.



Figura 96 – Receptor montado no LABMET da UFCG. Fonte: Produção do autor.

Utilizamos duas potências de entrada para verificarmos o comportamento do sinal amplificado nas frequências de 980MHz e 1260MHz.

Na potência de entrada de -80 dbm e frequências de 980MHz e 1260MHz, gráficos 97 e 98, o sinal amplificado se apresenta no valor em torno de -20 dB, o que diferencia da frequência de 1260MHz é a amplitude desse sinal e os valores de mínimo e máximo.

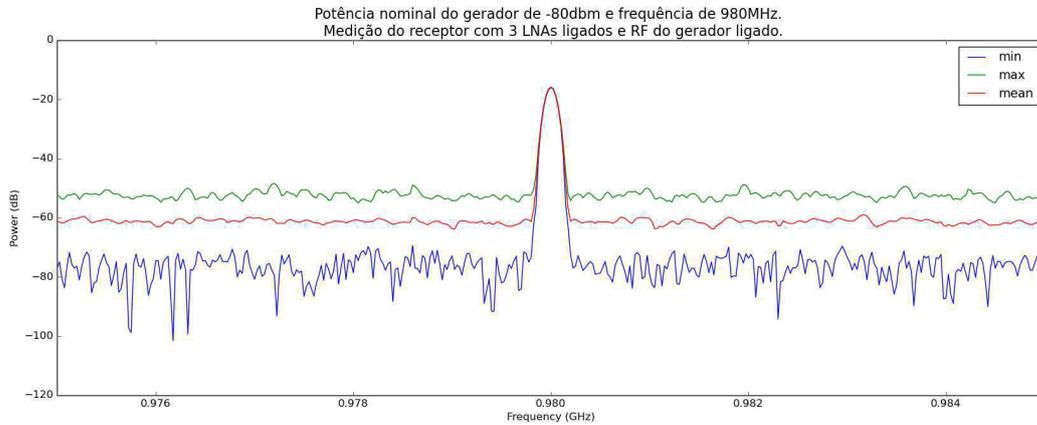


Figura 97 – Receptor de 3 LNA's ligados com potência de entrada -80dbm e frequência de 980MHz. Fonte: Produção do autor.

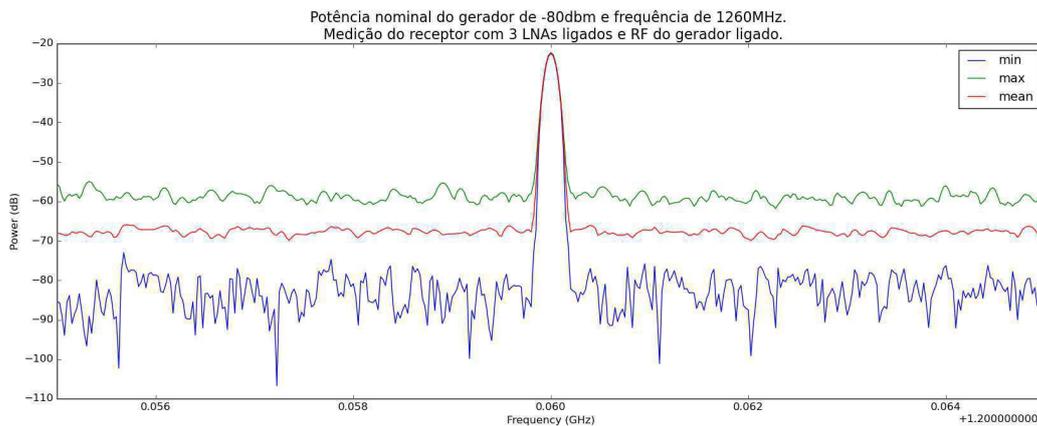


Figura 98 – Receptor de 3 LNA's ligados com potência de entrada -80dbm e frequência de 1260MHz. Fonte: Produção do autor.

Nos gráficos 99 e 100 para a potência de entrada menor, de -110 dbm, o comportamento do sinal amplificado é diferente, para 980MHz, o valor médio chega aproximadamente -50 dbm, para 1260 MHz, se aproxima de -60 dbm, pelo fato do receptor ter vários dispositivos ligados entre si, com uma potência de entrada muito pequena, evita chances de queimá-los e obter o máximo de resultado positivo possível.

Nos gráficos 101 e 102 os dados para o ganho do receptor continuam com o valor triplicado, pelo fato de ainda termos os 3 LNA's ligados, o que torna positivo para as medições e ampliações dos sinais captados.

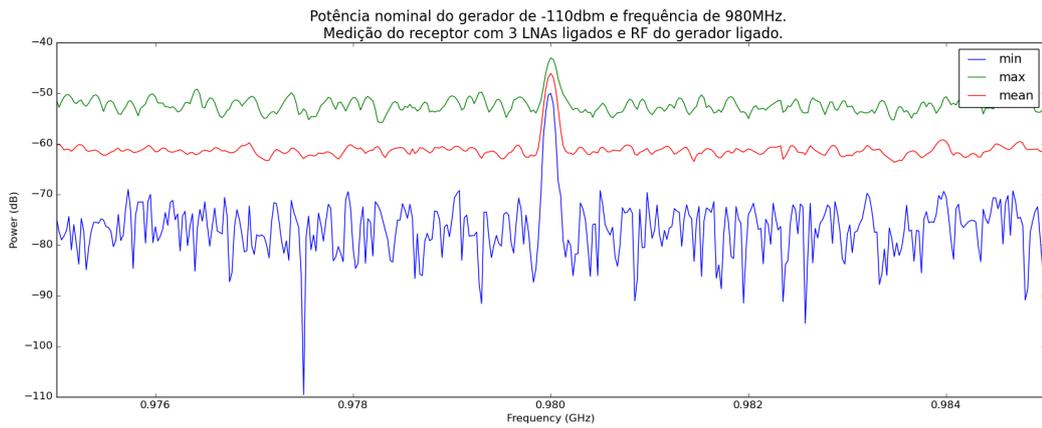


Figura 99 – Receptor de 3 LNA's ligados com potência de entrada -110dbm e frequência de 980MHz. Fonte: Produção do autor.

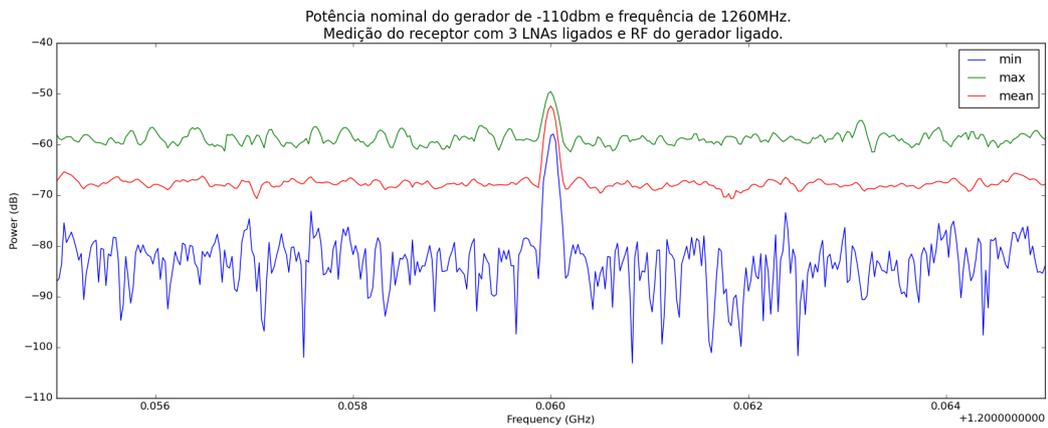


Figura 100 – Receptor de 3 LNA's ligados com potência de entrada -110dbm e frequência de 1260MHz. Fonte: Produção do autor.

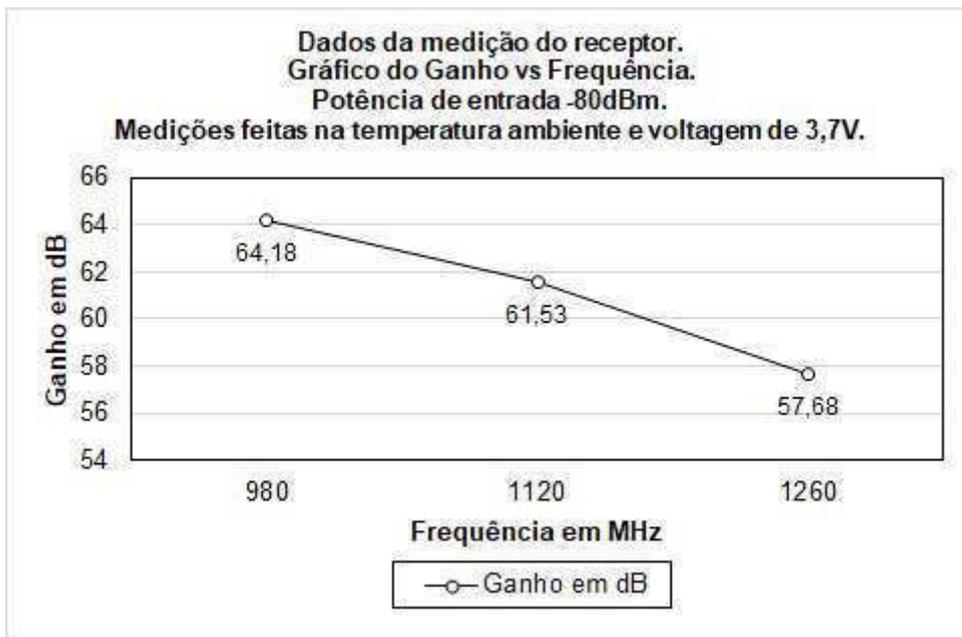


Figura 101 – Ganho vs frequência do receptor de 3 LNA's, potência de entrada -80 dbm.
Fonte: Produção do autor.

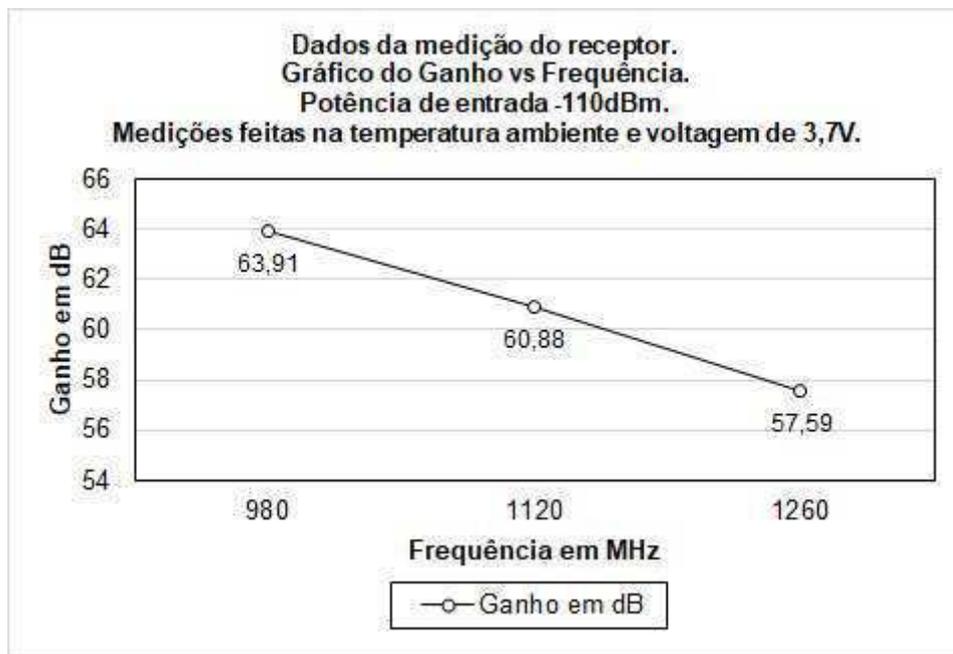


Figura 102 – Ganho vs frequência do receptor de 3 LNA's, potência de entrada -110 dbm.
Fonte: Produção do autor.

Apêndices

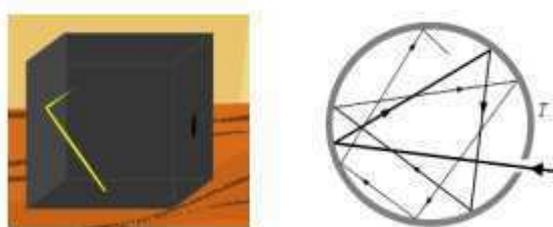
APÊNDICE A – Radiação do corpo negro

A.1 Radiação do Corpo Negro

O corpo negro é um objeto que absorve a radiação eletromagnética e emite energia em várias frequências na mesma quantidade em que recebe energia, mantendo a temperatura constante, podendo ser definido como uma emissão contínua. Em outras palavras, o corpo negro tem significado de uma superfície ideal, uma superfície que serve como referencial, como um padrão de comparação para corpos radiantes reais por ser um corpo que absorve toda a energia incidente sobre ele [63].

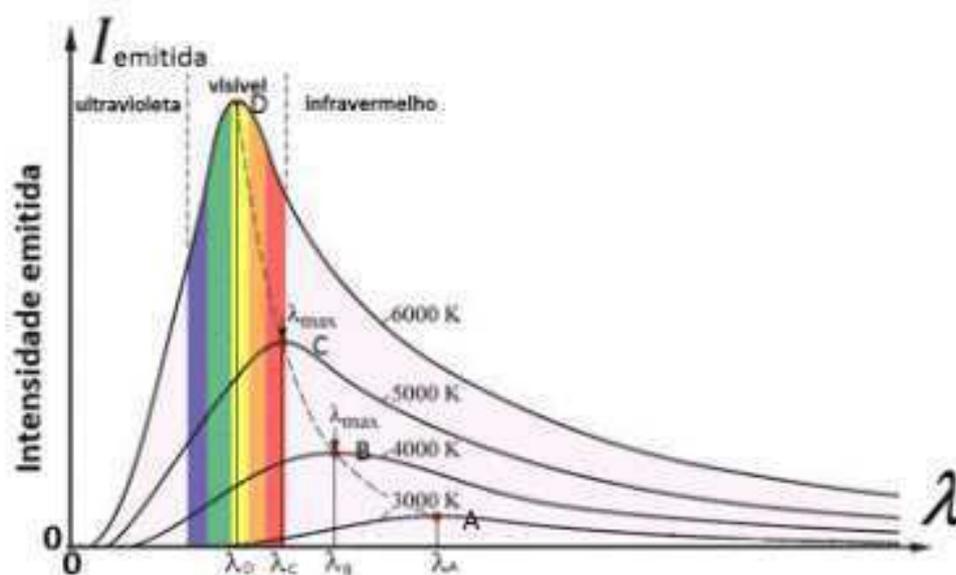
Na figura (103), observamos o corpo que possui uma pequena abertura na sua parede e toda a radiação que incide nessa abertura é absorvida.

Figura 103 – Representação de um corpo negro ou ideal. Qualquer radiação que entra pelo orifício é totalmente absorvida devido às sucessivas reflexões no interior da cavidade.



Fonte: [64]

Figura 104 – Distribuição da intensidade luminosa em relação à temperaturas.



Fonte: [65]

A figura 104 mostra o espectro da radiação térmica emitida por corpos a várias temperaturas. Ao incidir sobre um corpo, parte da radiação térmica é absorvida, parte é refletida, e o resto é transmitido.

A.2 Leis associadas à Radiação de um Corpo Negro

Considerando I como a intensidade da radiação eletromagnética emitida em vários comprimentos de onda e que em um certo intervalo de comprimento de onda entre λ e $\lambda + d\lambda$, a intensidade relaciona-se com a radiância espectral $R(\lambda)$, como [64]:

$$dI = R(\lambda)d\lambda \quad (\text{A.1})$$

Temos então a radiância espectral que é a intensidade de radiação emitida pelo corpo por comprimento de onda.

A.2.1 Lei de Stefan-Boltzmann e Lei do Deslocamento de Wien

A lei de Stefan-Boltzmann diz que a intensidade da radiação aumenta com a quarta potência da temperatura absoluta, ou seja:

$$I = \int R(\lambda)d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{A.2})$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann que possui valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Já na lei do deslocamento de Wien, o comprimento de onda máxima, $\lambda_{m\acute{a}x}$ para a qual a função $R(\lambda)$ é máxima e inversamente proporcional à temperatura absoluta [64]:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{b}{T} \quad (\text{A.3})$$

em que b é uma constante de proporcionalidade chamada constante de deslocamento de Wien no valor de $= 2,898 \times 10^{-3} \text{mK}$.

A lei do deslocamento de Wien é uma relação inversa entre comprimento de onda e temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura, menor o comprimento de onda da radiação térmica. Quanto mais baixa a temperatura, maior o comprimento de onda da radiação térmica.

A.2.2 Lei de Rayleigh - Jeans

Na tentativa de interpretar e entender os resultados das pesquisas e experimentos da radiação do corpo negro, bem como os gráficos da radiância (104) por meio das teorias clássicas do eletromagnetismo e termodinâmica resultaram num fracasso [64].

Na lei de Rayleigh-Jeans, temos a seguinte expressão:

$$R(\lambda) = \frac{c}{4} \frac{8\pi}{\lambda^4} K_B T \quad (\text{A.4})$$

onde K_B é a constante de Stefan-Boltzmann e c é a velocidade da luz.

A lei de Rayleigh-Jeans concorda com os resultados experimentais em grandes comprimentos de onda (baixas frequências), mas discorda em comprimentos de onda curtos (altas frequências). Essa inconsistência entre as observações e as previsões da física clássica é comumente conhecida como a catástrofe ultravioleta [66].

A.2.3 Lei de Planck

A lei de Planck descreve a radiação eletromagnética emitida por um corpo em equilíbrio térmico a uma temperatura definida. A lei tem o nome de Max Planck, que a propôs originalmente em 1900. É um resultado pioneiro da moderna física e teoria quântica. Todo corpo físico emite de forma espontânea e contínua radiação. Perto do equilíbrio termodinâmico, a radiação emitida é quase descrita pela lei de Planck. Devido à sua dependência da temperatura, a radiação de Planck é dita ser radiação térmica. Quanto maior a temperatura de um corpo, mais radiação ele emite em cada comprimento de onda. A radiação de Planck tem uma intensidade máxima em um comprimento de onda que depende da temperatura [66].

A radiância espectral de um corpo, B_ν , descreve a quantidade de energia que ele emite como radiação de diferentes frequências. Planck mostrou que a radiância espectral de um corpo em temperatura T [66] é dada por

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{K_B T}} - 1} \quad (\text{A.5})$$

onde K_B é a constante de Boltzmann no valor de $1,380649 \times 10^{-23} J.K^{-1}$ e h a constante de Planck no valor de $6,62607004 \times 10^{-34} m^2 kg/s$.

A radiância espectral também pode ser medida por unidade de comprimento de onda [66]. Neste caso, expressa por

$$B_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda K_B T}} - 1} \quad (\text{A.6})$$

APÊNDICE B – O desvio para o vermelho - Redshift

O Redshift é uma medida de uma velocidade relativa comparada a nós de um objeto, por exemplo. No caso da luz, quando um objeto se afasta de nós, o comprimento de onda da luz que ele emite irá aumentar, ou seja, é desviado para o vermelho (redshift). Se ele se aproxima, o comprimento de onda aumenta é desviado para o azul (blueshift).

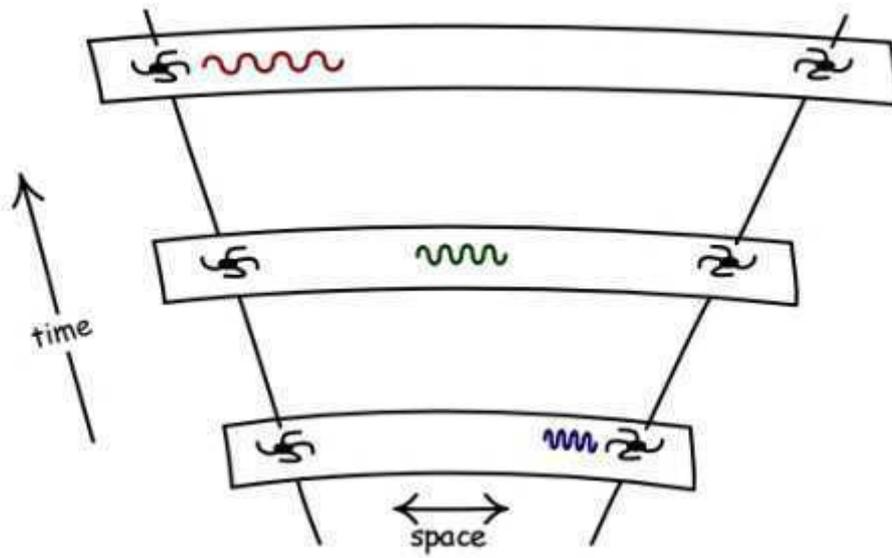
Por outro lado, uma fonte de luz distante (uma galáxia, um aglomerado de galáxias, um quasar, etc.) emite radiação de comprimento de onda λ no instante cósmico t , a qual é observada no instante cósmico presente $t_o > t$ com comprimento de onda λ_o sempre maior do que λ em um universo em expansão. Dizemos que a luz sofreu um “desvio para o vermelho” $z = \frac{\lambda_o - \lambda}{\lambda}$ (o vermelho possui o maior comprimento de onda no espectro visível, o que inspirou a nomenclatura) [67].

Existem dois tipos de interpretações do desvio para o vermelho (Redshift) como mencionado anteriormente. Em suma, para o caso do fenômeno/efeito Doppler, é possível mensurar se uma fonte sonora ou luminosa se aproxima ou se afasta de um observador. O caso sonoro é comum no cotidiano: quando um carro de bombeiros se aproxima de nós, observadores-ouvintes, com a sirene ligada, ouvimos um som muito agudo (as frentes de onda se concentram à frente da onda, diminuindo o comprimento das ondas e, portanto, aumentando a frequência. No caso oposto, quando o caminhão se afasta, o som da sirene torna-se mais grave (as ondas sofrem uma espécie de “alargamento”, tornando-se maiores, o que, em consequência, diminui a frequência) [68].

Para o caso luminoso, o feito é o mesmo: para fontes que se afastam, linhas espectrais tendem a deslocar-se para a extremidade vermelha do espectro (grande comprimento de onda, baixa frequência) – esse é o que os astrônomos batizaram de “desvio para o vermelho (redshift)”; para fontes que se aproximam, as linhas espectrais tendem a deslocar-se para a extremidade azul do espectro (pequeno comprimento de onda, alta frequência) – blueshift (deslocamento para o azul) [68].

Na figura 105, o redshift por efeito doppler é diferente de redshift cosmológico por expansão do universo. No primeiro caso, depois da onde ser emitida, o desvio para o vermelho não muda mais. No segundo caso, o desvio em um momento é o valor acumulado para todas as taxas de expansão do universo até aquele instante [69].

Figura 105 – Redshift Cosmológico.



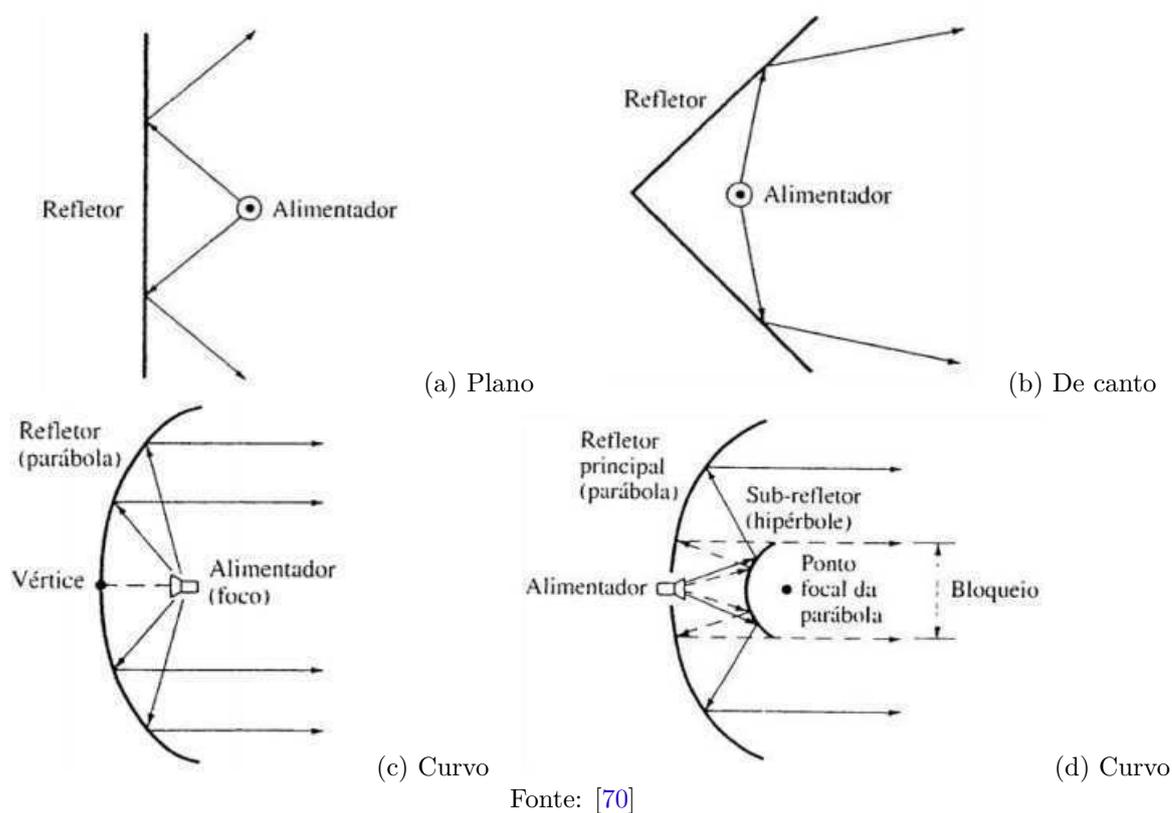
Fonte: [69]

APÊNDICE C – Antenas Refletoras

C.1 Antenas Refletoras

As antenas refletoras vem sendo aplicadas desde os primórdios com a aplicação das ondas eletromagnéticas e teve seu impulso durante a segunda guerra mundial, empregado em aplicações militares. Com isso, passou-se a utilizar antenas refletoras em outras aplicações civis mais comuns, como a radioastronomia e comunicações na faixa de frequência de micro-ondas [70]. As formas mais comuns e aplicáveis de fácil acesso e entendimento são refletores planos, de canto e os de superfície curva, sendo eles: alimentação frontal (c) e alimentação Cassegrain (d), exemplificados na figura 106.

Figura 106 – Configurações comuns de antenas refletoras.



APÊNDICE D – Ruído Aleatório Gaussiano

Todos os sinais naturais com os quais estamos lidando foram gerados por processos aleatórios de uma forma ou de outra e, quando incidente em um telescópio, exibem variações aleatórias do campo elétrico em amplitude e fase. No receptor, essas variações do campo elétrico são transformadas em tensões. As tensões do sinal são indistinguíveis das tensões geradas por flutuações térmicas nas componentes resistivas do próprio receptor e de outras fontes não astronômicas.

A precisão fundamental das medições de rádio depende das propriedades estatísticas da amplitude da tensão $V(t)$. A potência do ruído $P(t)$ é proporcional ao quadrado da amplitude $P = V^2$. Em que a potência dissipada é proporcional a equação abaixo, sendo R o termo resistivo na impedância.

$$\frac{V^2}{R} \tag{D.1}$$

A expectativa de amplitude para $V(t)$ é descrita por uma distribuição Gaussiana. O ruído aleatório Gaussiano é uma forma mais comum encontrada na prática e a mais simples de lidar quantitativamente. A probabilidade de que o valor de $V(t)$ caia entre V e $V + dV$ é determinada pela função de densidade de probabilidade $P(V)$. Para uma dada função de densidade de probabilidade, três quantidades são importantes: o valor médio V , o valor médio ao quadrado (V^2) de $V(t)$ ao longo de um determinado intervalo, e a auto correlação $R(\tau)$ de $V(t)$.

Para ruído aleatório Gaussiano, a função de densidade de probabilidade é:

$$P(V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\langle -\frac{V^2}{2\sigma^2} \rangle} \tag{D.2}$$

A amplitude tem uma probabilidade igual de ser positiva ou negativa, e seu valor médio é zero. A única quantidade estável e mensurável em um só ponto no espaço é a potência média $P(t) = V(t) = \sigma^2$.

Referências

- 1 RYDEN, B. *Introduction to cosmology*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 7, 22 e 23.
- 2 MARTINS, A. M. M. *A história do universo a partir da observação da Radiação Cósmica de Fundo: Da visão newtoniana às equações da Relatividade Geral. 139 f.* Dissertação (Mestrado) — Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 7, 26 e 27.
- 3 IFF - Instituto Federal Fluminense. Luz e Visão: entendendo o olho humano como receptor de ondas eletromagnéticas. 2019. Disponível em: <https://portal1.iff.edu.br/pesquisa-e-inovacao/pos-graduacao-stricto-sensu/mestrado-nacional-profissional-em-ensino-de-fisica/projetos-e-dissertacoes-defendidas/resumo-dos-projetos/priscila_produto-didatico.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 27.
- 4 CONDON, J. J.; RANSOM, S. M. *Essential radio astronomy*. [S.l.]: Princeton University Press, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 7, 29, 30, 32, 33 e 34.
- 5 BAARS, J. W.; KÄRCHER, H. J. *Radio Telescope Reflectors*. [S.l.]: Springer, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 32.
- 6 BERGMAN, T. L. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 33.
- 7 COLLIANDER, A. et al. Noise injection radiometer test specifications and requirement. Helsinki University of Technology, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 7, 35, 37 e 66.
- 8 SILVA, A. L. D. Radioastronomia: Um texto introdutório. Universidade Cruzeiro do Sul, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 7, 39 e 41.
- 9 INSTRUMENTOS - Observatório Astronômico. Disponível em: <<https://www.unifal-mg.edu.br/observatorio/instrumentos/>>. Acesso em: 24 fev. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 40 e 41.
- 10 Radiotelescópio de Arecibo. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Radiotelesco%CC%83pio_de_Arecibo>. Acesso em: 15 abr. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 42.
- 11 Rádio Observatório Pierre Kauffman. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: <<http://www.cea.inpe.br/roi/index.php>>. Acesso em: 16 abr. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 42.
- 12 Instalado na UFCG um dos mais avançados equipamentos de radioastronomia do mundo. Disponível em: <<https://portal.ufcg.edu.br/ultimas-noticias/2573-instalado-na-ufcg-um-dos-mais-avancados-equipamentos-de-radioastronomia-do-mundo.html>>. Acesso em: 23 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 46.
- 13 WUENSCHÉ, C. et al. Baryon acoustic oscillations from integrated neutral gas observations: Broadband corrugated horn construction and testing. **arXiv preprint arXiv:1911.13188**, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 48.
- 14 WUENSCHÉ, C. et al. The bingo telescope: a new instrument exploring the new 21-cm cosmology window. **arXiv preprint arXiv:1803.01644**, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 8, 20 e 49.

- 15 VIEIRA, F. A. S. *PROTÓTIPO DE RADIÔMETRO SIMPLES PARA PESQUISA EM FAST RADIO BURSTS COM O RADIOTELESCÓPIO BINGO*. Dissertação (Mestrado) — INPE, 2020. Citado 8 vezes nas páginas 8, 9, 49, 50, 55, 65, 77 e 78.
- 16 What is Noise Figure - measurement formula. Disponível em: <<https://www.electronics-notes.com/articles/radio/radio-receiver-sensitivity/what-is-noise-figure-measurement-calculation-formula.php>>. Acesso em: 29 mar. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 8, 56, 58 e 59.
- 17 JACKSON, E. *Noise Figure Measurements*. Agilent Technologies, 2009. Disponível em: <https://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/noise_figure_measurements.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 57.
- 18 Noise Figure. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Noise_figure>. Acesso em: 31 mar. 2021. Citado 5 vezes nas páginas 8, 57, 58, 59 e 60.
- 19 Noise figure measurement methods and formulas. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/2/2875.html>>. Acesso em: 03 nov. 2021. Citado 5 vezes nas páginas 8, 12, 61, 63 e 64.
- 20 Noise Figure Measurement Accuracy – The Y-Factor Method. [S.l.]: Agilent Technologies, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 64.
- 21 LOURENÇO, L. *Redes wireless atualizado (Sétima e última parte)*. Hardware. 2011. Disponível em: <<https://www.hardware.com.br/guias/redes-wireless/antenas.html>>. Acesso em: 27 set. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 66.
- 22 What is P1dB? Disponível em: <<https://www.everythingrf.com/community/what-is-p1db>>. Acesso em: 01 nov. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 67.
- 23 What is IP3? Disponível em: <<https://www.everythingrf.com/community/what-is-ip3>>. Acesso em: 01 nov. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 68.
- 24 Amplifier Terms Defined. Mini-circuits. Disponível em: <<https://www.minicircuits.com/app/AN60-038.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 8, 65 e 70.
- 25 RF Microwave Filters: the basics. Disponível em: <<https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-filters/understanding-rf-filters-basics-tutorial.php>>. Acesso em: 21 dez. 2021. Citado 6 vezes nas páginas 8, 9, 71, 72, 74 e 75.
- 26 Band Stop Filter. Disponível em: <<https://www.electronics-tutorials.ws/filter/band-stop-filter.html>>. Acesso em: 23 dez. 2021. Citado 5 vezes nas páginas 8, 9, 71, 72 e 73.
- 27 PUCKETTE, M. *The Theory and Techniques of Electronic Music*. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 9, 74 e 75.
- 28 VINE, D. L.; SKOU, N. *Microwave radiometer systems: design and analysis, 2 ed.* [S.l.]: Artech House, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 9, 77 e 78.
- 29 S-Parameter Measurements Basics for High Speed Digital Engineers. [S.l.]: Keysight Technologies. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 82.
- 30 BURKE, B. F.; GRAHAM-SMITH, F.; WILKINSON, P. N. *An introduction to radio astronomy, 4 ed.* [S.l.]: Cambridge University Press, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 12, 24, 37 e 77.

- 31 Coaxial Low Noise Amplifier ZX60-P162LN+. Disponível em: <<https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX60-P162LN+.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 12, 54 e 89.
- 32 Amplifiers - Typical Performance Data. Disponível em: <https://www.minicircuits.com/pages/s-params/ZX60-P162LN+_VIEW.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 83.
- 33 KRAUS, J. D. *Radio astronomy*. [S.l.]: Cygnus-Quasar Books, 2005. Citado 5 vezes nas páginas 19, 23, 33, 37 e 55.
- 34 CHAISSON, E.; MCMILLAN, S. *Astronomy today*. Pearson/Addison Wesley San Francisco, CA, 2008. 7 ed. Citado na página 21.
- 35 MORISON, I. *Introduction to astronomy and cosmology*. [S.l.]: John Wiley, 2013. Citado na página 21.
- 36 ZEILIK, M.; GREGORY STEPHEN, A. *Introductory Astronomy and Astrophysics*. 4. ed. [S.l.: s.n.], 1998. Citado na página 24.
- 37 WILSON, T. L.; ROHLFS, K.; HÜTTEMEISTER, S. *Tools of Radio Astronomy*. [S.l.]: New York: Springer, 2013. Citado na página 25.
- 38 Radiação cósmica de fundo em micro-ondas. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Radia%C3%A7%C3%A3o_c%C3%B3smica_de_fundo_em_micro-ondas>. Acesso em: 25 abr. 2021. Citado na página 26.
- 39 VERWEIJ, M. D. et al. *Electromagnetic Waves*. [S.l.]: VSSD, 2006. Citado na página 27.
- 40 BUTCHER, G. *Tour of the electromagnetic spectrum*. [S.l.]: National Aeronautics and Space Administration, 2010. Citado na página 28.
- 41 MARR, J. M.; SNELL, R. L.; KURTZ, S. E. *Fundamentals of radio astronomy: observational methods*. [S.l.]: CRC Press, 2015. v. 13. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- 42 GALE, R.; LAX, E. *Radiation: what it is, what you need to know*. [S.l.]: Knopf, 2013. Citado na página 32.
- 43 BINGO Portal - Bingo Telescope Collaboration. Disponível em: <<https://bingotelescope.org/>>. Acesso em: 15 jul. 2021. Citado na página 43.
- 44 UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - INSTITUTO DE FÍSICA. O Radiotelescópio BINGO. 2019. Disponível em: <<https://portal.if.usp.br/bingotelescope/pt-br/radiotelescopio#:~:text=O%20BINGO%20%C3%A9%20um%20acr%C3%B4nimo,por%20meio%20de%20radio%20frequ%C3%Aancia.>> Acesso em: 27 mai. 2021. Citado na página 43.
- 45 Receiver Systems. Disponível em: <https://www.atnf.csiro.au/research/radio-school/2011/talks/ReceiverSystems_2011.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2021. Citado na página 47.
- 46 RAIMUNDI, L. R. Diagramas de irradiação e perda de retorno da antena corneta do projeto bingo. São José dos Campos. Relatório técnico, 2018. Citado na página 49.
- 47 MONEBHURRUN, V. Revision of iee standard 145-2013: Ieee standard for definitions of terms for antennas [stand on standards]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 62, 2020. Citado na página 55.
- 48 TEPPATI, V.; FERRERO, A.; SAYED, M. *Modern RF and microwave measurement techniques*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013. Citado na página 57.

- 49 SILVA, P. M. M. *Projeto e caracterização de amplificadores de baixo ruído em 2,4 GHz*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis., 2009. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 60.
- 50 NUCLEARRAMBO. *Measuring noise figure using Gain Method*. Disponível em: <<https://nuclearrambo.com/wordpress/measuring-noise-figure-using-gain-method/>>. Acesso em: 03 nov. 2021. Citado na página 62.
- 51 RAO, S.; SHAFAI, L.; SHARMA, S. K. *Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems Volume III: Applications of Reflectors*. [S.l.]: Artech House, 2013. Citado na página 65.
- 52 BEZERRA, A. W. L. *Redes Wi-Fi I: Medidor de Potência de Antenas Planares na Faixa ISM (2,4 GHz)*. Teleco, 2017. Disponível em: <www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswifi1/default.asp>. Acesso em: 31 mar. 2021. Citado na página 65.
- 53 What is Intermodulation Distortion? Disponível em: <<https://www.everythingrf.com/community/what-is-intermodulation-distortion>>. Acesso em: 01 nov. 2021. Citado na página 69.
- 54 GLOSSARY DEFINITION FOR VSWR. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/glossary/definitions.mvp/term/VSWR/gpk/815>>. Acesso em: 02 nov. 2021. Citado na página 69.
- 55 Reverse Isolation. Disponível em: <https://na.support.keysight.com/pxi/help/latest/Tutorials/Rev_Isol.htm>. Acesso em: 02 nov. 2021. Citado na página 71.
- 56 RF Filters. Disponível em: <<https://www.everythingrf.com/browse/microwave-rf-filters>>. Acesso em: 21 dez. 2021. Citado na página 70.
- 57 JARRY, P.; BENEAT, J. *Advanced design techniques and realizations of microwave and RF filters*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado na página 71.
- 58 COLLIN, R. E. *Foundations For Microwave Engineering, Second Edition*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1992. Citado na página 75.
- 59 POZAR, D. M. *Microwave engineering*. [S.l.]: John wiley & sons, 2011. Citado na página 76.
- 60 BIRD, T. S. Definition and misuse of return loss [report of the transactions editor-in-chief]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 51, n. 2, p. 166–167, 2009. Citado na página 80.
- 61 BIRD, T. S. Definition and misuse of return loss [report of the transactions editor-in-chief]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 51, n. 2, p. 166–167, 2009. Citado na página 80.
- 62 What is Return Loss? Disponível em: <<https://www.everythingrf.com/community/what-is-return-loss>>. Acesso em: 23 mar. 2021. Citado na página 82.
- 63 INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6 edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Citado na página 105.
- 64 ANTUNES, L. C. S. *Radiação de corpo negro: lei de Stefan-Boltzmann, lei do deslocamento de Wien*. Tese (Doutorado), 2012. Citado 2 vezes nas páginas 105 e 106.
- 65 Introdução e radiação térmica. Disponível em: <<https://www.stoodi.com.br/resumos/fisica/radiacao-do-corpo-negro/>>. Acesso em: 05 mai. 2021. Citado na página 105.

-
- 66 KRAMM, G.; MÖLDERS, N. Planck's blackbody radiation law: Presentation in different domains and determination of the related dimensional constants. *arXiv preprint arXiv:0901.1863*, 2009. Citado na página [107](#).
- 67 SOARES, D. *O teste do desvio para o vermelho para a expansão do universo*. 2018. Citado na página [109](#).
- 68 MARTINS, M. R.; NEVES, M. C. D. Uma compreensão sobre o ensino da cosmologia na perspectiva de professores e investigadores. *Ensino, Saude e Ambiente*, v. 10, n. 1, 2017. Citado na página [109](#).
- 69 ZABOT, A. Tema 22: O big bang. *Astrofísica para Todos*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas [109](#) e [110](#).
- 70 RAMOS, N. J. P. L. *Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletivas em Frequência*. Dissertação (Mestrado) — IFPB, João Pessoa, 2016. Citado na página [111](#).