

Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP  
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – IP&D  
Programa de Mestrado Acadêmico em Física e Astronomia

Telmo Claudinei Machado

**ATUALIZAÇÃO E MODERNIZAÇÃO DO CIRCUITO DE SÍNTESE  
DE FREQUÊNCIA DO BDA (BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY)**

**UPGRADE AND MODERNIZATION OF FREQUENCY SYNTHESIS CIRCUIT OF  
BDA (BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY)**

São José dos Campos  
2023

Telmo Claudinei Machado

**ATUALIZAÇÃO E MODERNIZAÇÃO DO CIRCUITO DE SÍNTESE  
DE FREQUÊNCIA DO BDA (BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY)**

Dissertação apresentada ao Curso do Programa de Mestrado Acadêmico em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como requisito à obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Professor Doutor Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho

Coorientador: Professor Doutor Carlos Alexandre Wuensche de Souza

São José dos Campos  
2023

## TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

### Ficha catalográfica

Machado, Telmo Claudinei

Atualização e Modernização do Circuito de Síntese de Frequência do BDA (Brazilian Decimetric Array) / Telmo Claudinei Machado; orientador, Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho; co-orientador Carlos Alexandre Wuensche de Souza. - São José dos Campos, SP, 2023.

1 CD-ROM, 74 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Brazilian Decimetric Array. 3. Radiação eletromagnética em radiofrequências. 4. Interferometria. I. Oliveira Filho, Irapuan Rodrigues de, orient. II. Souza, Carlos Alexandre Wuensche de, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Telmo Claudinei Machado, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 16 de Fevereiro de 2024.

---

Autor(a) da Obra

---

**TELMO CLAUDINEI MACHADO**

**“ATUALIZAÇÃO E MODERNIZAÇÃO DO CIRCUITO DE SÍNTESE DE FREQUÊNCIA DO BDA  
(BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY)”.**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Alexandre S. de Oliveira	<i>Alexandre S. Oliveira</i>
Prof. Dr. Irapuan R. de O. Filho	<i>Irapuan Rodrigues</i>
Prof. Dr. Carlos A. Wuensche de Souza	<i>Carlos Alexandre Wuensche de Souza</i>
Prof. Dr. Paulo R. Fagundes	<i>Paulo R. Fagundes</i>
Prof. Dr. Francisco C. R. Fernandes	<i>Francisco C. R. Fernandes</i>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia vieira  
Diretora do IP&D – Univap  
São José dos Campos, 04 de outubro de 2023.

*A meus pais **Brasilino e Nilza,**  
a meus irmãos **Carlos e Regina**  
e a minha companheira **Patrícia***

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço às agências fomentadoras, a saber: FAPESP, CNPq, FINEP e CAPES por todos os suportes oferecidos ao Projeto. Também gostaríamos de agradecer ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – pelas condições oferecidas para a realização deste trabalho, aos colegas de INPE, professores, pesquisadores, orientadores e, especialmente, à equipe do BDA, principalmente representada por: Khristhiano L. R. Souza, Cesar Strauss, Matheus C. Abelha e J. R. Cecatto, assim como ao meu coorientador, o Pesquisador Doutor Carlos Alexandre Wuensche Souza. Igualmente agradeço à Univap e ao IPD por toda infraestrutura e conhecimentos ofertados, aos colegas de pós-graduação, professores e meu orientador, Doutor Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho.

E, finalmente, gostaria de deixar meus agradecimentos e reconhecimentos a todos que, direta ou indiretamente, tiveram sua importância na composição deste projeto.

## HOMENAGEM PÓSTUMA

Gostaria de iniciar destacando como me sinto privilegiado e honrado de ter trabalhado com o Doutorando Frederico Augusto Silva Vieira, o nosso querido “Fred”.

Agradeço a oportunidade de o ter conhecido e trabalhado com ele.

A vida é feita de encontros e desencontros, de chegadas e partidas, e na vida vamos enfrentar muitos encontros e muitas despedidas. Gosto de lembrar de minha chegada ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. No meu primeiro dia, foi apresentado a uma figura peculiar, com quem eu passaria a conviver e trabalhar com muita proximidade pelos próximos 3 anos e meio. Tratou-se do, à época, Mestrando Frederico Augusto. Fred, como ele se apresentou. Fred, como eu passei a chamá-lo. Por sua vez, ele passou a me chamar de “Tiozeira”.

Dividimos os laboratórios por horas. Muitas vezes, ambos presencialmente, algumas vezes um presencial e o outro remotamente. Isso não fazia diferença. O entrosamento se deu a ponto de não importar a distância: trabalhávamos bem em equipe assim mesmo. Apreendi muito com ele. Ele dizia aprender algumas coisas comigo. Enfim, era uma boa troca de aprendizados. Por mais que seja extremamente doloroso dizer adeus, é preciso saber que esta despedida chega para todos nós um dia. Mais cedo ou mais tarde, ela virá. Quanto mais percebemos esta realidade, mais devemos saber viver a vida, e aprender superar as dores do adeus para seguir em frente. Desta partida ninguém pode escapar, mas a vida sempre continua para alguém.

Viver é um mistério que se revela aos poucos, e esta partida é o grande mistério que só se revela com o fim da vida. Cabe a quem fica se resignar diante daquilo que é inevitável para todos. Resta-nos pedir paz para quem fica e desejar paz para quem vai. Desta vez tivemos que dizer adeus! Amanhã outros se despedirão de nós. Façamos o nosso tempo de vida valer a pena! Que mesmo com as nossas dores, saudades e tristezas, possamos ser felizes, fortes e adquirir sabedoria. Há muitos sonhos a serem realizados, há muitos caminhos a trilhar. Podemos dizer adeus, mas carregar para sempre em nossos corações a alegria de ter desfrutado de excelentes momentos com os que conosco viveram. Dizer adeus é trocar as expectativas e as possibilidades do futuro pelo passado. É perder o presente e o futuro, e ficar com a história e memória de quem partiu. É perder a presença e ficar com a ausência e a saudade. Por isso é tão difícil dizer adeus. Mas é preciso transformar a memória e a saudade em um sentimento vivo e sereno, e não triste e pesado. Viver em estado de dor, não traz ninguém de volta à vida. Saibamos viver o luto, mas também a hora de voltar a lutar pela vida.

Meu amigo Fred se foi, sem uma despedida apropriada, sem possibilidade de um último adeus, um abraço ou uma lágrima enxugada. Partiu... seguiu seu caminho em sua última viagem, e conosco ficam as boas lembranças e as saudades. Até sempre ou até à eternidade! Foi um privilégio conhecer você e por isso esta despedida está doendo tanto. Sentiremos sua falta, nosso amigo!

Encerro citando o próprio Doutorando Frederico Augusto Silva Vieira:

***“As mãos sempre unidas nos fortalecem e não nos deixam só”.***  
In “Protótipo de Radiômetro Simples para Pesquisa em Fast Radio Burst com o Radiotelescópio BINGO”, 2020

*From this distant vantage point, the Earth might not seem of any particular interest. But for us, it's different. Consider again that dot. That's here. That's home. That's us. On it everyone you love, everyone you know, everyone you ever heard of, every human being who ever was, lived out their lives. The aggregate of our joy and suffering, thousands of confident religions, ideologies, and economic doctrines, every hunter and forager, every hero and coward, every creator and destroyer of civilization, every king and peasant, every young couple in love, every mother and father, hopeful child, inventor and explorer, every teacher of morals, every corrupt politician, every "superstar," every "supreme leader," every saint and sinner in the history of our species lived there—on a mote of dust suspended in a sunbeam.*

— Carl Sagan (1994)

## RESUMO

A maioria dos eventos solares energéticos, como explosões solares (*flares*) e ejeções de massa coronal (CMEs), têm origem na energia magnética acumulada na atmosfera solar, especialmente em regiões ativas. Porém, ainda é necessário estudar melhor os mecanismos de acumulação, liberação e transporte, que pode ser feito por diversos instrumentos, em solo ou no espaço. Investigar o Sol em faixas espectrais não ópticas ou de rádio requer a colocação de instrumentos em órbita para evitar o bloqueio atmosférico terrestre nessas bandas, gerando custos substanciais. Assim, uma alternativa menos onerosa foi sugerida: criação, instalação, supervisão e operação de instrumentos em terra, principalmente nas faixas óptica e de rádio. O interferômetro rádio, chamado de Brazilian Decimetric Array (BDA), foi proposto para realizar investigações de fenômenos solares (como *flares* e CMEs, auxiliando em suas previsões) assim como investigações galácticas e extragalácticas. Além da redução de custos, essa alternativa permite monitoramento da evolução das emissões em rádio desde a liberação. Por exemplo, em observações de CME com coronógrafos (como LASCO), a localização, do ponto de *target* não pode ser obtida. Outras observações são complementares e importantes, como as interferométricas em rádio. Um interferômetro rádio é um instrumento que combina sinais de dois ou mais elementos, compostos de antenas, e os respectivos receptores, para criar uma imagem em rádio mais detalhada do objeto observado. Considerando que um radiotelescópio sozinho não gera imagens, dois (ou mais) podem gerar imagens, com melhor ou pior resolução, dependendo das linhas de base e cobertura do plano UV. Para frequências relativamente altas ( $f > 1$  GHz), são empregados receptores superheteródinos, projetados para converter sinais das frequências altas para as mais baixas, a fim de permitir o transporte do sinal pelos cabos e componentes do receptor com baixa perda e mantendo coerência de fase, o que permite a detecção, armazenamento e processamento do sinal. O interferômetro rádio é composto por vários radiotelescópios, sendo um instrumento complexo, podendo envolver mais etapas de conversão de frequência ao longo das etapas para estabilidade do sinal, principalmente em fase. Em um interferômetro, o ajuste de frequência de cada receptor consome muito tempo. Para agilizar, minimizar perdas e maximizar a estabilidade do sinal, foi concebida a automatização da síntese de frequência dos receptores do BDA. Este desenvolvimento pioneiro emprega microcontrolador de baixo custo junto com circuitos convencionais. É uma tecnologia desenvolvida na própria instituição, a partir de competência existente, implicando significativa redução de custos. Neste trabalho, são apresentados o novo circuito da síntese de frequências, as características do *hardware* e do *software*, assim como parâmetros de ajuste e controle, resultados de testes de bancada e de validação operacional.

**Palavras-chave:** BDA: Brazilian Decimetric Array; Sol: radiação eletromagnética em radiofrequências; Instrumentação: interferômetros; Técnicas: interferometria; Telescópios.

## ABSTRACT

The majority of energetic solar events, such as solar flares and coronal mass ejections (CMEs), stem from the magnetic energy accumulated within the solar atmosphere, particularly within active regions. However, it is still necessary to better study its mechanisms of accumulation, release, and transport, which can be done by a variety of instruments, both on the ground and in space. To investigate the Sun across non-optical or radio spectral bands necessitates the deployment of instruments in orbit to circumvent the terrestrial atmospheric obstruction within these bands, thereby incurring substantial costs. Thus, a less expensive alternative has been proposed: the development, installation, control and operation of instruments on the ground, especially in the optical and radio bands. The radio interferometer, named Brazilian Decimetric Array (BDA), was proposed to investigate solar phenomena (such as flares and CMEs, assisting in their predicting) and also galactic and extragalactic investigations. In addition to cost reduction, this alternative enables the continuous monitoring of radio emissions evolution from their inception. For instance, in the context of CME observations using coronagraphs (such as LASCO), target point localization remains unattainable. Other observations are supplementary and significant, including radio interferometry. A radio interferometer is an instrument that combines signals from two or more elements, composed of antennas and their respective receivers, to create a more detailed radio image of the observed object. Considering that a single radio telescope does not produce images, two (or more) telescopes can generate images with varying resolutions based on the lines of baseline and coverage in the UV plane. For relatively high frequencies ( $f > 1$  GHz), superheterodyne receivers are used, designed to convert high-frequency signals to lower frequencies, to allow the signal to be transported by cables and receiver components with low loss while maintaining phase coherence. This allows the signal to be detected, stored, and processed at the end of the receiver. As the radio interferometer is composed of several radio telescopes, it is a considerably complex instrument that can involve multiple frequency conversion stages throughout its parts for signal stability, especially in phase. In an interferometer, the frequency adjustment of each receiver consumes a lot of time. To enhance the agility, minimize losses and maximize signal stability, the automation of receiver frequency synthesis for the BDA has been developed. This pioneering technological development employs a low-cost microcontroller along with conventional circuits. It is a technology developed within the institution itself, based on existing competencies, and which implies a significant reduction in costs. In this work, the new frequency synthesis circuit, the hardware and software characteristics are presented, as well as adjustment and control parameters, the results of bench tests and validation tests under operational conditions.

**Keywords:** BDA: Brazilian Decimetric Array; Sun: electromagnetic radiation in radio frequencies; Instrumentation: interferometers; Techniques: interferometry; Telescopes.

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1: Fotografia de satélite do instrumento.....	16
Figura 2: Modelo padrão de uma explosão solar.....	18
Figura 3: Esquema da intensidade de uma erupção solar .....	19
Figura 4: Painel de controle das antenas.....	23
Figura 5: Layout do instrumento.....	28
Figura 6: Diagrama de blocos detalhado do receptor.....	29
Figura 7: Esquemático do funcionamento de um interferômetro multiplicador.....	31
Figura 8: Diagrama de blocos básico do receptor.....	34
Figura 9: Diagrama de um sistema PLL básico.....	35
Figura 10: Esquema das conexões entre antenas e central de controle (versão 1)..	36
Figura 11: Esquema das conexões entre antenas e central de controle (versão 2)..	37
Figura 12: Circuito original da síntese de frequências.....	37
Figura 13: Unidade remota.....	38
Figura 14: Diagrama de temporização da interface serial.....	45
Figura 15: Desenvolvendo o layout do PCB.....	48
Figura 16: Layout (à esquerda) e PCB (à direita) do protótipo.....	48
Figura 17: Furação da placa do protótipo.....	48
Figura 18: Montagem dos componentes na placa do protótipo.....	49
Figura 19: Placa do primeiro protótipo montada.....	49
Figura 20: Primeiro protótipo (à esquerda) e os protótipos 1 e 2 (à direita).....	50
Figura 21: Diagramas de temporizações sintetizadas.....	51
Figura 22: Diagrama de ligação para testes do correlacionador.....	52
Figura 23: Telas do analisador de espectro .....	52

## LISTA DE TABELAS

### Página

Tabela 1: Alguns valores para os parâmetros A, M e R. ....	46
Tabela 2: Alguns resultados dos sinais com determinadas atenuações.....	53
Tabela 3: Alguns resultados da autocorrelação.....	54

## LISTA DE QUADROS

### Página

Quadro 1: Coordenadas e altitudes das antenas.....	61
Quadro 2: Alocação de frequências entre 1,2 e 1,7 GHz. ....	62
Quadro 3: Trabalhos apresentados na XLV Reunião da SAB.....	74

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BDA	Brazilian Decimetric Array
CLP	Controlador Lógico Programável
CME	Coronal Mass Ejections (Ejeção de Massa Coronal)
EUV	Extreme Ultraviolet (Ultravioleta Extrema)
FC	Fim de Curso
FI	Frequência Intermediária
FO	Fibra Óptica
FPGA	Field Programmable Gate Array (Matriz de Portas Programáveis)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	Internet of the Things (Internet das Coisas)
IPD	Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
PID	Proportional-Integral-Derivative (Proporcional-Integral-Derivativo)
SA	Saída Analógica
SAB	Sociedade Astronômica Brasileira
SD	Saída Digital
MSB	Most Significant Bit (Bit Mais Significativo)
LSB	Least Significant Bit (Bit Menos Significativo)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)
PD	Phase Detect (Detecção de Fase)
PLL	Phase-Locked Loop (Controle de Fase em Malha Fechada)
LPF	Loop Filter (Filtro de Malha)
VCO	Voltage Controlled Oscillator (Oscilador Controlado por Tensão)
FI	Frequência Intermediária
Univap	Universidade do Vale do Paraíba
USB	Universal Serial Bus (Barramento Serial Universal)
RX, RX1	Receptor
TX, TX1	Transmissor
Wi-Fi	Wireless Field (Rede Sem Fio)

## LISTA DE SÍMBOLOS

eV	Elétron-volt
keV	Quiloelétron-volt
MeV	Megaelétron-volt
V	Volts
kV	Quilovolts
mV	Milivolts
W	Watts
mW	Miliwatts
dB	Decibel
dBm	Decibel Miliwatt
Hz	Hertz
KHz	Quilohertz
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
bit	Binary Digit
byte	8 bits

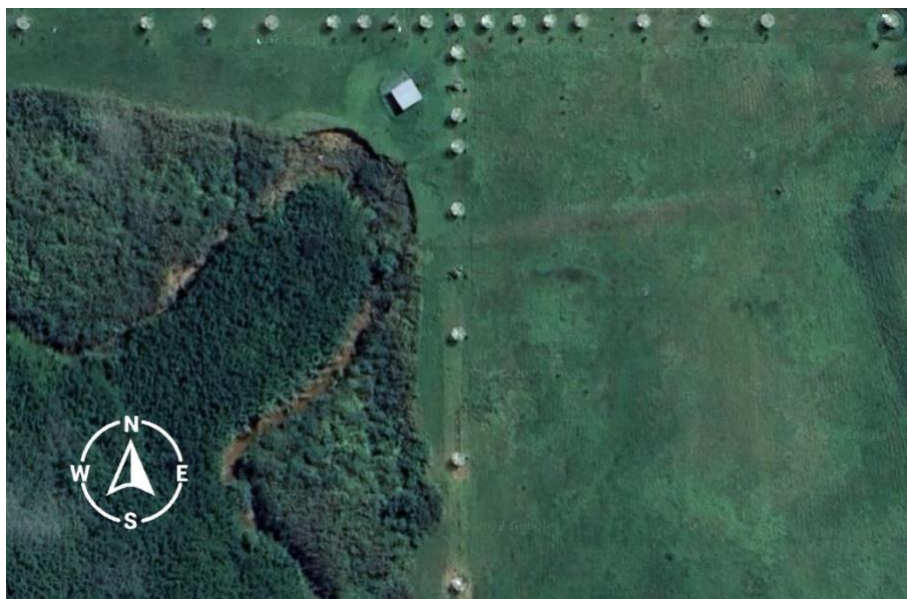
## SUMÁRIO

	Página
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1 Ciência com BDA</b> .....	<b>17</b>
1.1.1 Física solar .....	17
1.1.2 Propriedades de regiões ativas .....	20
1.1.3 Clima espacial .....	21
<b>1.2 Contextualização</b> .....	<b>22</b>
<b>1.3 Situação atual</b> .....	<b>23</b>
<b>1.4 Objetivos</b> .....	<b>23</b>
1.4.1 Objetivo geral .....	24
1.4.2 Objetivos específicos .....	24
<b>1.5 Relevância da proposta</b> .....	<b>24</b>
<b>1.6 Escopo do trabalho</b> .....	<b>25</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>27</b>
2.1 Breve descrição do instrumento .....	27
2.2 Engenharia e Astronomia .....	29
2.3 Automação .....	30
2.4 Instrumentação .....	30
2.5 Interferometria .....	31
<b>3 O INTERFERÔMETRO RÁDIO BDA</b> .....	<b>34</b>
3.1 Síntese de frequências .....	34
3.1.1 Circuitos da síntese de frequências .....	36
3.1.2 Correlação de sinais .....	39
<b>4 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO DE SÍNTESE DE FREQUÊNCIAS</b> .....	<b>41</b>
4.1 Desenvolvimento do protótipo .....	42
4.2 Determinação dos parâmetros para as frequências observadas .....	43
4.3 Desenvolvimento prático da Síntese de Frequências .....	47
4.4 Sinais obtidos .....	50
<b>5 RESULTADOS</b> .....	<b>51</b>
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>58</b>
<b>ANEXO A: LOCALIZAÇÃO DAS ANTENAS</b> .....	<b>61</b>
<b>ANEXO B: ALOCAÇÃO DE FREQUÊNCIAS ENTRE 1,0 E 3,0 GHZ</b> .....	<b>61</b>
<b>APÊNDICE A: ROTINA EM MATLAB</b> .....	<b>66</b>
<b>APÊNDICE B: TABELA COM PARÂMETROS A, M E R</b> .....	<b>67</b>
<b>APÊNDICE C: SOFTWARE DA SÍNTESE DE FREQUÊNCIAS</b> .....	<b>70</b>
<b>APÊNDICE D: TRABALHOS APRESENTADOS</b> .....	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brazilian Decimetric Array (BDA) é o resultado dos esforços de cientistas brasileiros em colaboração com renomados astrônomos internacionais para construir um interferômetro bidimensional em forma de "T" dedicado à pesquisa solar e astrofísica, galáctica e extragaláctica. O instrumento se encontra na longitude de  $45^{\circ} 0' 20''$  Oeste e latitude  $\sim 22^{\circ} 41' 19''$  Sul (Sawant *et al.*, 2005) e uma fotografia do instrumento via satélite é mostrada na Figura 1.

Figura 1: Fotografia de satélite do instrumento.



Fonte: Google® Maps.

As antenas são colocadas em posições determinadas com linhas de base otimizadas para a obtenção de imagens de rádio. A confecção do BDA foi dividida em três fases estabelecidas tendo em mente os interesses científicos de cada um dos grupos envolvidos neste projeto. A Fase II, atual, é a construção do arranjo com 26 antenas fixas compacto para obter imagens na faixa de frequências de 1,2~1,7 GHz (Cecatto *et al.*, 2022). As coordenadas das antenas da Fase II encontram-se no ANEXO A, que são baseadas na Tabela 1, na página 6, de **Campanha de determinações das coordenadas das antenas do BDA utilizando GPS**, de Sousa e Baesso (2016). A versão final do BDA, chamada de FASE III, está prevista para ser um arranjo interferométrico consistindo em 38 antenas parabólicas com 4 metros de diâmetro dispostas em forma de "T".

## 1.1 Ciência com BDA

A ciência possibilitada pelo interferômetro rádio BDA pode ser estendida a várias aplicações. Sua configuração atual (Fase II) permite o estudo de diversos problemas astrofísicos e observações de diferentes objetos (física solar, galáctica e extragaláctica) que dependem, principalmente, da resolução espacial. No contexto desta dissertação, foram estudados os efeitos relacionados com física solar.

### 1.1.1 Física solar

As observações solares em rádio frequências métricas, decimétricas e milimétricas<sup>1</sup> têm sido uma contribuição fundamental nas últimas décadas para o avanço do conhecimento sobre os *flares* solares (Sawant *et al.*, 2005), permitindo a compreensão de questões como os processos de armazenamento e liberação de energia, a aceleração e o transporte de partículas, bem como a identificação da região onde ocorre a aceleração destas partículas. As atividades solares, em ciclos de 11 anos (Usoskin, 2017), possuem processos ativos de longa duração nos quais as manchas solares variam em número e em área (Hathaway, 2015).

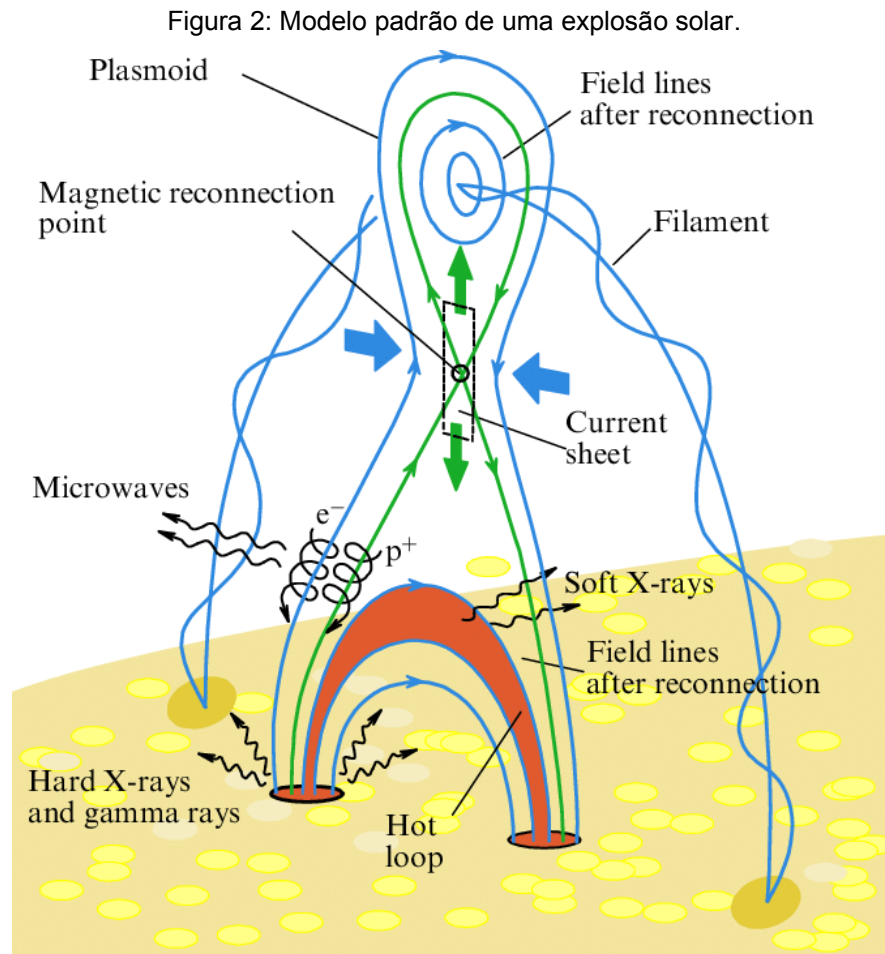
Pick, Gary e Zirin (1990) e Bastian, Benz e Gary (1998) realizaram revisões detalhadas sobre as radio emissões solares associadas aos *flares*, que são os eventos mais explosivos da atividade solar, liberando enormes quantidades de energia (entre  $10^{26}$  e  $10^{32}$  ergs). A grande quantidade de energia liberada durante os *flares* solares resulta principalmente do aquecimento do plasma ambiente e da aceleração das partículas do meio. Lysenko *et al.* (2020) relataram sobre a emissão de Raios X e Raios Gama em explosões solares no artigo intitulado **X-ray and Gamma-ray Emission of Solar Flares**, publicado na revista Phys. Usp., volume 63, páginas 818-832.

Um modelo padrão de explosão solar é ilustrado na Figura 2, na qual a explosão é desencadeada pela ascensão de um filamento, resultando na reconexão magnética, no fluxo de plasma frio das laterais do *loop* ou arco (setas azuis) e no fluxo de plasma quente para cima e para baixo (setas verdes). As hélices mostram o movimento de

---

<sup>1</sup>Frequências métricas: em torno de 300 MHz  
 Frequências decimétricas: em torno de 3 GHz  
 Frequências milimétricas: em torno de 300 GHz

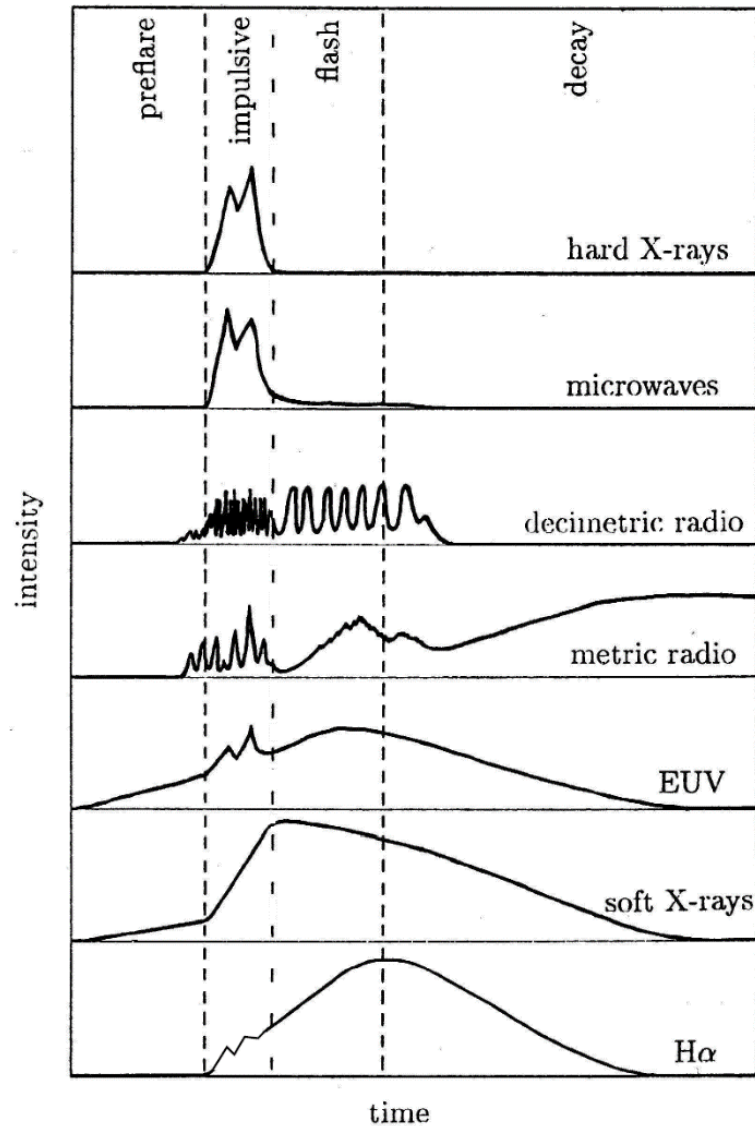
elétrons e íons, acelerados devido à reconexão, ao longo das linhas de campo em direção aos pontos de ancoragem da alça, dando origem a Raios X duros (na figura chamados de *Hard X-Rays*) e raios gama. Como resultado da desaceleração das partículas carregadas, a atmosfera solar aquece, evapora, preenche as alças pós-erupção e emite na faixa de Raios X moles (na figura chamados de *Soft X-Rays*).



Fonte: Lysenko *et al.* (2020).

Durante a fase impulsiva, principalmente dos *flares* mais intensos, os elétrons podem ser acelerados a energias da ordem de MeV (Benz, 2017), acompanhados por emissões em rádio e emissões em Raios X. Um perfil esquemático da intensidade de uma erupção solar em vários comprimentos de onda é apresentado na Figura 3, na qual as diferentes fases indicadas na parte superior variam significativamente em duração. Em um evento grande, a fase pré-erupção geralmente dura alguns minutos, a fase impulsiva de 3 a 10 minutos, a fase de pico de 5 a 20 minutos e a fase de decaimento de uma a várias horas (Benz, 2002).

Figura 3: Esquema da intensidade de uma erupção solar



Fonte: Benz (2002).

As emissões solares decimétricas foram amplamente observadas nas décadas de 60 e 70 e sua associação com a liberação de energia dos *flares* foi negligenciada até que as observações da Estação Espacial Skylab<sup>2</sup> mostraram que os *flares* solares em Raios X moles são originados em regiões da atmosfera ( $> 2 \times 10^4$  km acima da fotosfera), correspondentes a densidades eletrônicas da ordem de  $10^9$  a  $10^{10}$  cm<sup>-3</sup>,

<sup>2</sup>Skylab – Laboratório Espacial Norte-Americano lançado ao espaço em março de 1973. Serviu como o maior observatório solar de sua época e, também, como laboratório com microgravidade, laboratório médico, estação de observação da Terra entre outras funções. A estação teve sua reentrada precoce na atmosfera terrestre em julho de 1979, sendo destruída neste processo e alguns de seus fragmentos caindo no Oceano Índico e na costa oeste da Austrália (Costa, 2007).

evidenciando que a aceleração das partículas e/ou o aquecimento ocorre próxima às regiões onde são geradas as explosões decimétricas (MOORE *et al.*, 1980).

O BDA também pode colaborar com o monitoramento constante das emissões solares em radiofrequências, permitindo o estudo da evolução de regiões ativas e, conseqüentemente, melhorar a previsão de ocorrências de fenômenos energéticos como explosões solares (*flares*) e ejeções de massa coronal (CMEs).

### 1.1.2 Propriedades de regiões ativas

As explosões solares e as ejeções de massa coronal (respectivamente *flares* e CMEs) estão entre as principais causas de interferências geomagnéticas no planeta Terra. Atualmente, é extremamente importante se conhecer a localização destas liberações com antecedência, de forma a tentar evitar que essas radiações causem danos a diversos dispositivos, como satélites, aviões e outros. Também fazem parte desta previsão os efeitos nas camadas mais próximas da crosta terrestre, como tempestades geomagnéticas, *blackouts* em radiocomunicações, geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e em grande parte dos dispositivos eletrônicos (Gopalswamy *et al.*, 2014; Gopalswamy *et al.*, 2015; Gopalswamy, 2016; Kay *et al.*, 2017), assim como os impactos na tecnologia, na infraestrutura e, inclusive, na saúde humana (Stoupelet *et al.*, 2019).

No entanto, as informações sobre a localização dessas emissões solares ainda não são suficientes em quantidade e qualidade para permitir conclusões e avanços significativos (Gopalswamy *et al.*; 1995), sendo que o principal problema não está relacionado com o espectro de frequências (observações em banda de frequência). Trata-se de um problema espacial (observações em rádio com resolução espacial que os interferômetros permitem ser realizadas). Revisões mais recentes e trabalhos mais atuais de diversos autores fornecem uma visão geral mais atualizada do tema e discutem as implicações das erupções solares e tempestades geomagnéticas para a Terra e seus habitantes, como European Commission *et al.* (2016).

As emissões solares são observadas espectroscopicamente e estão relacionadas com a região de liberação de energia. Assim, estas observações e imageamentos de explosões solares decimétricas permitem mapear as trajetórias ascendentes e descendentes dos agentes emissores, conduzindo a determinação mais precisa do local de liberação de energia. Nos momentos iniciais de um *flare* solar

ocorrem aquecimentos e liberações de energia. Durante estas fases, a turbulência no plasma de regiões ativas pode ser observada em movimentos chamados de evaporação cromosférica (Sturrock *et al.*, 1973). Este processo é considerado como um dos principais mecanismos de transporte de plasma aquecido, emitindo Raios X moles na coroa solar. Aschwanden e Benz (1995) sugeriram que investigações de evaporação cromosférica fossem observadas em emissões na faixa de 300 MHz a 3 GHz. De um modo geral, podem ser observadas explosões decimétricas na faixa de 1 a 5 GHz, com banda estreita (~600 MHz).

Os campos magnéticos das regiões ativas são compostos de vários arcos contendo plasma aquecido, nos quais o campo magnético está emergindo na coroa solar. São detectados em observações ópticas e conhecidos como manchas solares. No entanto, sua natureza é revelada em observações no EUV (*Extreme Ultraviolet*, entre os comprimentos de onda do ultravioleta e dos Raios X) e em Raios X moles (radiação eletromagnética na faixa de comprimento de onda dos Raios X, mas que se encontra na extremidade de baixa energia de seu espectro). Com relação às características do campo magnético na coroa, ainda não existe um consenso. O que se conhece (estimativas do campo magnético nessa região) provêm de observações do espectro rádio de explosões solares. Solanki, Krivova e Haigh (2013) e Lagg *et al.* (2009) consideram difícil, porém possível encontrar os vetores do campo magnético da cromosfera. Jing *et al.* (2011), utilizando um modelo de campo magnético potencial a partir de magnetogramas cromosféricos, verificaram que em certos locais o campo segue o modelo, mas em outros locais, não.

O espectro em micro-ondas fornece um elevado número de *flares* fracos, com espectro opticamente espesso. A frequência de pico está relacionada com a intensidade do campo magnético e o seu ângulo com a linha de visada. Então, observações de regiões ativas espacialmente resolvidas e de frequência de pico de explosões em micro-ondas e sua evolução temporal permitirão estimativas do campo magnético e sua evolução. Desta forma, observações realizadas com o instrumento BDA possibilitarão determinar a dependência dos campos magnéticos com a altura e sua evolução temporal nos casos de regiões ativas de fracas explosões.

### 1.1.3 Clima espacial

Uma das principais aplicações destes estudos e do desenvolvimento do instrumento é a previsão do clima espacial através técnicas e observações instrumentais de *flares* e CMEs. A previsão de clima espacial emprega modelos físico-matemáticos das atividades solares, a análise de dados históricos, a observação em tempo real destas atividades e suas influências (Buzulukova; Tsurutani, 2022) com o objetivo de estudar os efeitos em sistemas e serviços tecnológicos no planeta Terra, fornecimento de energia, satélites (em seus painéis solares e na eletrônica) e comunicações (por causa da ionização).

As principais vantagens destas detecções em radiofrequências estão no fato de que, geralmente, o disco solar se encontra oculto em observações com coronógrafos e apenas as CMEs que se propagam em direções perpendiculares à linha de visada são detectadas. Porém, quando se usa observações em rádio, o disco solar não é ocultado, ou seja, CMEs sobre o disco podem ser observadas por meio de rádio heliógrafos. No caso de observações óticas, estas ejeções são identificadas apenas como filamentos ou arcos emergentes, uma vez que a visualização ocorre em um momento posterior ao início do evento.

Neste cenário, o BDA permite investigar os problemas fundamentais da física solar e, conseqüentemente, melhorar a capacidade e previsão de clima espacial e de relações Solares-Terrestres.

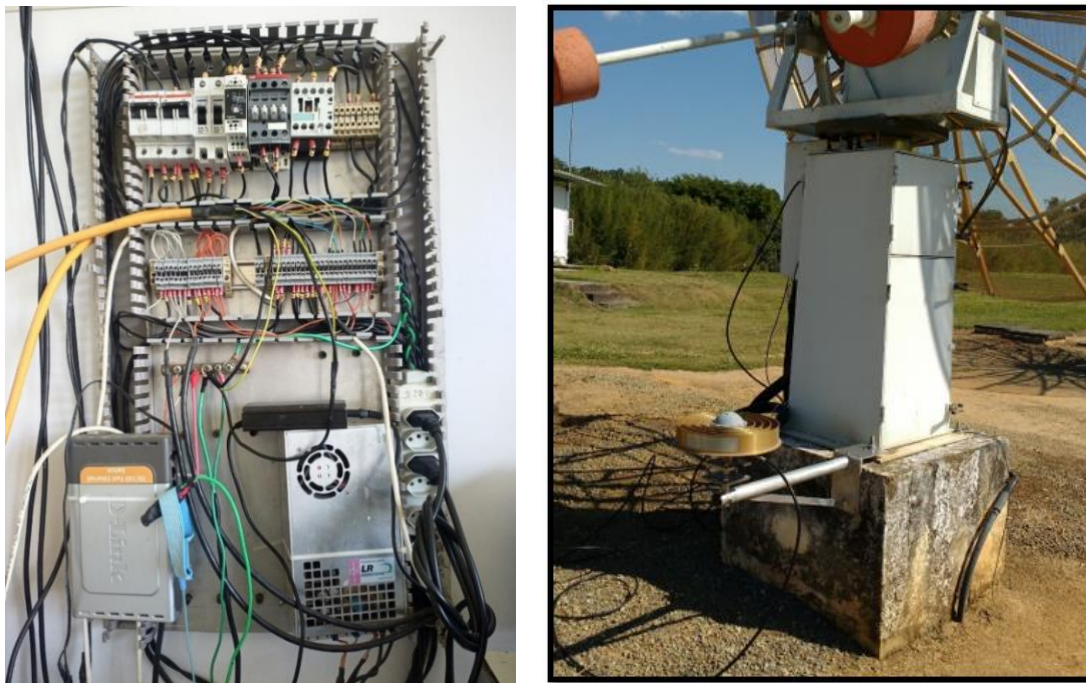
## 1.2 Contextualização

Após mais de uma década de desenvolvimento, alguns componentes de subsistemas do instrumento se tornaram obsoletos ou tiveram sua produção e manutenção descontinuadas. Dentre os elementos que enfrentaram a obsolescência, podem ser citados o controlador dos motores, os próprios motores e o controlador de síntese de frequência, este último sendo o escopo desta dissertação. Também pode ser mencionado o subsistema do correlacionador de sinais, que ainda está em estágio de prototipagem e deverá ser substituído pelo subsistema definitivo atualizado e incorporado ao instrumento.

A Figura 4 mostra painéis de controle das antenas (em laboratório, à esquerda, e em campo, à direita). O que se encontra no laboratório é utilizado para testes, simulações de erros para encontrar os motivos de eventuais falhas e, inclusive, para fins didáticos. Nele, estão conectados os diversos subsistemas de cada antena,

incluindo os que necessitarão de uma atualização como forma de manter o instrumento operacional.

Figura 4: Painel de controle das antenas.



Fonte: Khristhiano Souza – INPE.

### 1.3 Situação atual

Os módulos responsáveis pelas informações fornecidas ao circuito integrado que fornece as frequências de controle de várias antenas se danificaram, interrompendo a operação dos seus respectivos elementos do instrumento. São equipamentos que tiveram sua produção e comercialização cessados tornando-se, assim, obsoletos e indisponíveis para substituição. Entretanto, a parte de síntese de frequência e da unidade de controle não estavam suficientemente detalhadas no projeto original do receptor. Deste modo, a equipe de especialistas do INPE diretamente envolvidos no instrumento BDA efetuou um levantamento minucioso do diagrama de ligações e dos sinais em cada ponto, informações fundamentais para o desenvolvimento dos novos projetos para o instrumento.

### 1.4 Objetivos

Os objetivos deste trabalho podem ser definidos como objetivo geral, que

consiste na atualização e modernização do circuito de síntese de frequência do interferômetro, e os objetivos específicos, que contemplam o desenvolvimento dos protótipos e o projeto dos novos circuitos e *software* a serem integrados ao BDA.

#### 1.4.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral é a atualização e modernização do circuito de síntese de frequência do interferômetro rádio BDA, permitindo a recuperação do instrumento e sua operacionalização, servindo para propósitos científicos e acadêmicos, uma vez que se trata de um instrumento único no Brasil (e um dos poucos no hemisfério Sul), podendo ser empregado por pesquisadores e estudantes de diversas instituições nacionais e internacionais.

O escopo deste trabalho abrange o subsistema do BDA da síntese de frequências.

#### 1.4.2 *Objetivos específicos*

- Revisar bibliografia e mapear o estado da arte relacionado à automação e instrumentação científicas aplicadas à Física e Astronomia;
- Coletar informações do circuito original da síntese de frequências, como diagrama de ligações, sinais em cada ponto e outras informações para o desenvolvimento do projeto do novo circuito;
- Determinação dos parâmetros (A, M e R) que podem ser empregados para faixa de frequência entre 1200 MHz e 1700 MHz;
- Obtenção de uma fórmula relacionando os parâmetros com a frequência desejada para o desenvolvimento do *software*;
- Desenvolvimento do circuito eletrônico do protótipo da síntese de frequências;
- Implementação do *software* a ser embarcado no circuito;
- Execução de testes funcionais e
- Execução de testes de integração do novo circuito ao sistema.

### 1.5 **Relevância da proposta**

Os objetivos geral e específicos por si só já justificam o trabalho. Entretanto, durante a execução deste trabalho, foram desenvolvidas novas tecnologias,

totalmente nacionais, de baixo custo, com a capitalização de conhecimento, que é o processo de coleta, organização, armazenamento e disseminação de conhecimento para as instituições interessadas na tecnologia desenvolvida, podendo ser acadêmicas, institutos de pesquisa e todos que possam a empregar em diversas aplicações. Este processo visa a valorizar e tornar acessível o conhecimento produzido no país para fomentar desenvolvimento científico e tecnológico, além de incentivar inovação e transferência de tecnologia (como referência para outros projetos).

A capitalização de conhecimento pode ser por diferentes canais, como repositórios de dados, bibliotecas digitais, bases de dados, entre outros. É importante destacar que a capitalização de conhecimento não se restringe apenas à área acadêmica, mas também inclui conhecimento gerado em instituições de pesquisa e empresas. Como resultado secundário, ela é fundamental para a construção de uma economia baseada no conhecimento, que pode ser usada para aumentar a competitividade econômica e fomentar a inovação.

No ponto de vista científico, vale ressaltar que este projeto permitirá a seleção de frequências a serem observadas de forma mais dinâmica e ágil, com o envio dos valores dos parâmetros a todas as antenas simultaneamente, além de permitir, em aplicações específicas, a configuração de frequências a serem enviadas a cada antena de acordo com o objetivo de cada observação. A modernização deste subsistema incorpora significativa agilidade nos processos de seleção de frequências e permite aos pesquisadores ampliarem a gama de utilização do interferômetro rádio BDA.

## **1.6 Escopo do trabalho**

Com as obsolescências parciais dos equipamentos do instrumento, optou-se pelo desenvolvimento de novas tecnologias, 100% nacionais, com custo extremamente acessível, desenvolvidas pela equipe composta por colaboradores brasileiros. Uma das principais motivações é servir como referência para outros equipamentos, instrumentos e projetos, desta instituição ou de quaisquer que desejarem desenvolver na mesma linha. Inclusive o ingresso de alunos de pós-graduação pode ajudar a transmitir estes conhecimentos, levando as novas tecnologias para quem possa necessitar. Os sistemas desenvolvidos para o

instrumento (*hardware* e *software*) poderão ser facilmente reproduzidos, modificados e aprimorados conforme as necessidades de cada projeto. Nesta linha, afirma Cerutti (2017, p. 35):

Todas as invenções e **inovações** trazem em sua essência o conhecimento científico como base. A inovação como agente de mudança conceitual. Mudança nesse contexto significa o novo sob determinado ponto de vista, em função de uma necessidade de mercado; pode-se afirmar então que a inovação é o produto de um momento, algo que é produzido, planejado e construído, não obtido pelo acaso.

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos, cada um abordando um aspecto importante do tema de pesquisa. No primeiro capítulo, é apresentada uma revisão da literatura relevante para esta pesquisa, discutindo as principais teorias e estudos anteriores que informaram esta dissertação. No segundo capítulo, são feitas uma revisão bibliográfica e uma descrição introdutória do instrumento, discorrendo sobre engenharia eletrônica e algumas de suas aplicações em astronomia, especificando as áreas de automação e instrumentação e suas utilizações no interferômetro rádio BDA. No terceiro capítulo, uma análise mais aprofundada do instrumento é feita, com enfoque mais detalhado em alguns de seus subsistemas, principalmente os afetados pelos novos circuitos, como interferometria e correlação de sinais. O quarto capítulo é dedicado à parte prática do projeto, discorrendo um pouco sobre prototipagem e suas aplicações em eletrônica e astronomia para, em seguida, serem detalhados os estudos efetuados para o desenvolvimento, a criação do projeto e seu protótipo eletrônico que, após os primeiros testes, foi repetido para a criação do segundo protótipo (serão empregados dois circuitos em duas antenas). Também são mostrados parâmetros necessários e os sinais obtidos dos primeiros protótipos, confirmando suas funcionalidades. Finalmente, o quinto capítulo conclui o trabalho e apresenta as considerações finais, as contribuições para o instrumento e os resultados alcançados, incluindo a participação das apresentações da 45ª Reunião da SAB e os trabalhos submetidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É consenso que a maioria dos fenômenos solares energéticos (explosões ou *flares* solares e CMEs) se origina da energia magnética armazenada na atmosfera solar, principalmente em regiões ativas. Mas os mecanismos de armazenamento, liberação e transporte dessa energia ainda precisam ser mais bem estudados para que modelos mais completos e precisos sejam criados. A importância da investigação desses fenômenos se encontra no fato de que quando atingem o ambiente terrestre geralmente produzem algum tipo de efeito, prejuízo ou danos a serviços/sistemas de alta tecnologia ou até risco de vida a humanos.

Esses fenômenos energéticos podem ser observados usando vários tipos de instrumentos em solo ou no espaço. No caso dos *flares*, que geralmente possuem amplo espectro, podem ser observados desde ondas de rádio até Raios X e Raios Gama. Apesar disso, sabe-se que instrumentos usados para monitorar e estudar o Sol, em bandas que não ótica e rádio, devem ser colocados a bordo de satélites em órbita. Isto devido ao bloqueio da atmosfera terrestre para todas essas bandas espectrais. Como consequência, estes instrumentos tornam-se mais caros, tanto do ponto de vista de esforço e complexidade de desenvolvimento e testes, quanto de instalação, controle e operação. Assim, a alternativa menos onerosa é o desenvolvimento, instalação, controle e operação de instrumentos em solo, especificamente nas bandas rádio e ótica.

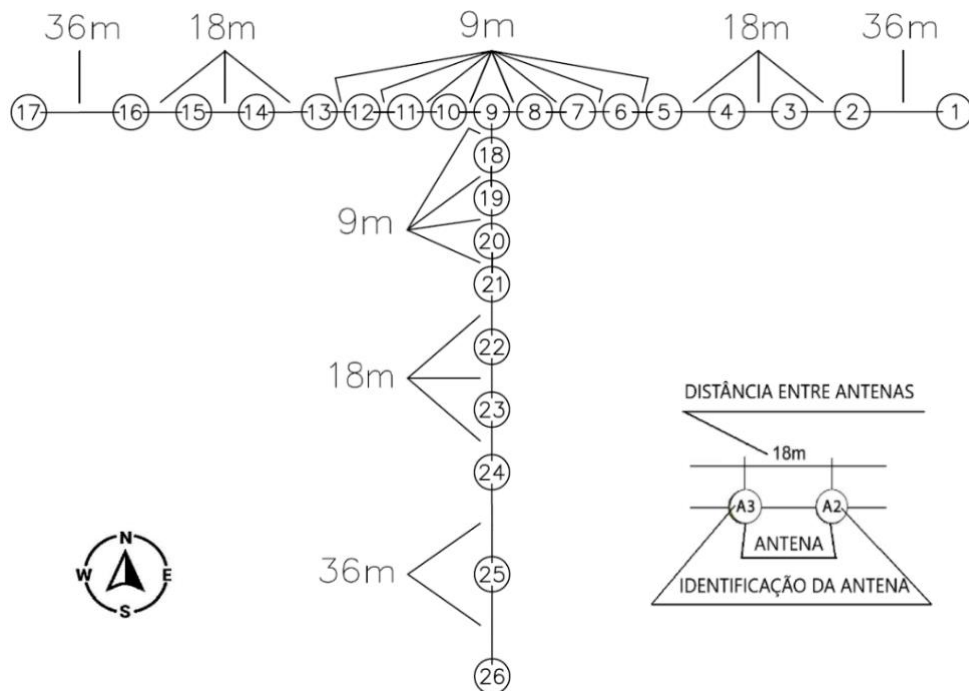
### 2.1 Breve descrição do instrumento

Considerando a necessidade de avançar nas pesquisas astronômicas, foi proposto o desenvolvimento de um interferômetro rádio. A implementação desse instrumento, designado por Brazilian Decimetric Array (BDA), que representa um marco significativo no campo da radioastronomia, permite a realização de investigações de fenômenos solares energéticos (*flares* e CMEs) para melhorar o conhecimento sobre estes fenômenos, principalmente os processos de armazenamento e liberação de energia na atmosfera solar. Também pode ser usado para determinados tipos de investigações galácticas e extragalácticas, o monitoramento de fenômenos e tem potencial para auxiliar na tarefa de prever suas ocorrências.

Um interferômetro é um conjunto de radiotelescópios e estes, por sua vez, utilizam receptores super-heteródinos, que são projetados para converter sinais de alta frequência em sinais de frequência mais baixa para serem mais facilmente processados pelo circuito de demodulação. Seu princípio de operação envolve a mistura de um sinal de frequência de rádio de entrada com um sinal de frequência fixa gerado internamente pelo receptor. O resultado é uma série de sinais de frequência intermediária (FI) que são mais fáceis de processar e filtrar do que o sinal original em frequência mais alta. FI geralmente é selecionada para ser fixa, tornando o projeto do circuito mais simples.

O instrumento BDA é composto por 26 conjuntos, conforme ilustrado na Figura 5, dispostos em um arranjo em “T”, com 252 metros na linha de base na direção Leste-Oeste e 162 metros na linha de base na direção sul. Cada conjunto possui um painel com controlador lógico programável (CLP), um driver para dois eixos (de elevação e de azimute) e dois servomotores (um para cada eixo: de elevação e de azimute). Cada painel é responsável por controlar e posicionar uma antena, receber os sinais observados e os enviar para a Central de Comando a fim de serem tratados e utilizados pelo Correlacionador.

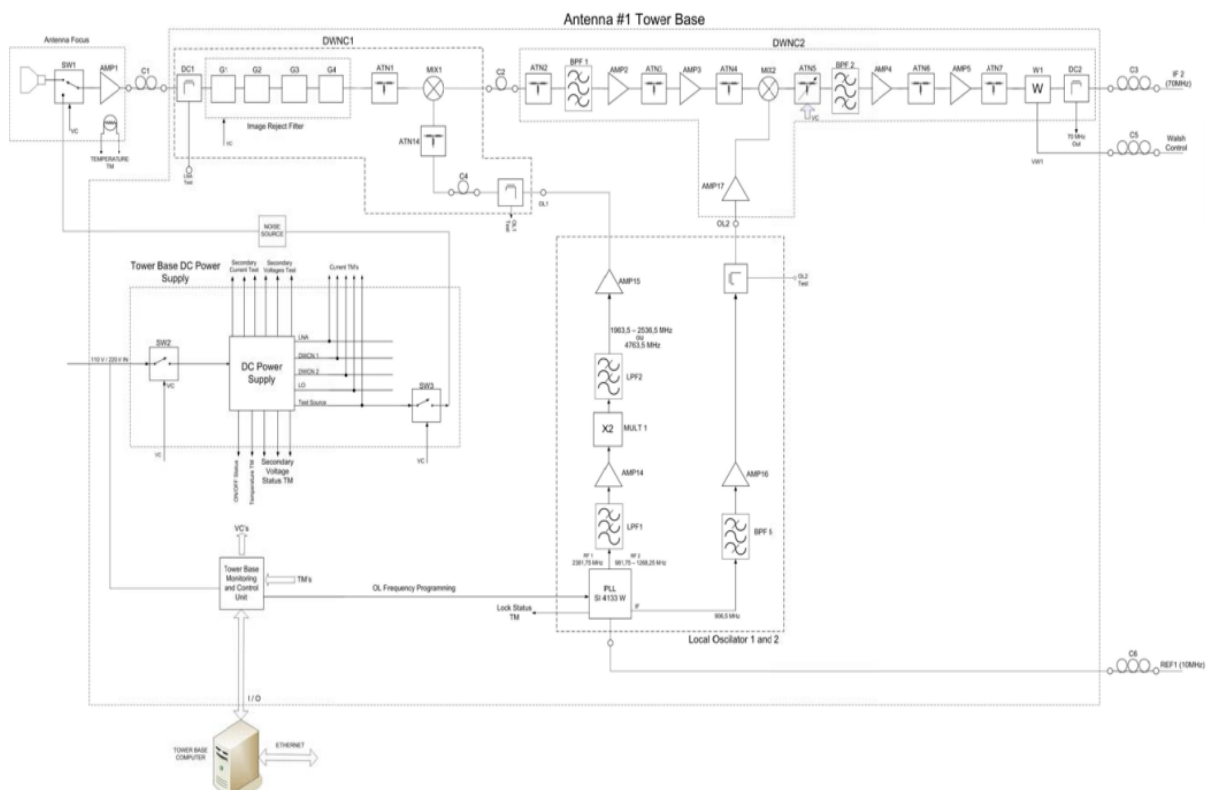
Figura 5: Layout do instrumento.



Fonte: O Autor.

O BDA é composto de vários subsistemas: receptor, rastreo, controle, transmissão e recepção de sinais, além dos subsistemas do correlacionador, aquisição, transporte e armazenamento de dados e imageamento. O módulo controlador se comunica com a Central de Comando e recebe as posições e o tempo para posicionar sua antena. Desta forma, o instrumento faz suas observações recebendo informações de todos os 26 conjuntos. Um diagrama de blocos detalhado se encontra na Figura 6.

Figura 6: Diagrama de blocos detalhado do receptor.



Fonte: Neuron Eletrônica (2009)

## 2.2 Engenharia e Astronomia

Os radiotelescópios captam ondas eletromagnéticas emitidas por objetos celestes. A radiação eletromagnética do espaço é convertida em sinais elétricos para processamento e análise por equipamentos eletrônicos cada vez mais modernos e com maior capacidade de processamento. A engenharia, em especial a engenharia eletrônica, desempenha um papel fundamental na pesquisa científica astronômica moderna, permitindo o desenvolvimento de instrumentos e tecnologias cada vez mais

sofisticados e precisos para a observação e análise de objetos e fenômenos astronômicos.

Ela permite modernizar áreas como o processamento de dados, o que permite analisar grandes volumes de dados coletados, incluindo algoritmos para a redução de ruído, correção de distorções e análise estatística dos dados, e telecomunicações, com o desenvolvimento de tecnologias que permitem transmissões a longas distâncias, como os dados originados de instrumentos no espaço.

### **2.3 Automação**

A automação representa o processo de controlar ou fazer tarefas sem intervenção humana empregando tecnologias disponíveis, como *software*, robótica, instrumentos e outras ferramentas tecnológicas. É amplamente utilizada para aumentar a eficiência, reduzir perdas (como erros humanos) e aumentar a produtividade. Surgiu com a necessidade de substituir operadores humanos por máquinas devido a motivos como a diminuição da presença dos seres humanos em ambientes perigosos, insalubres, repetitivos a fim de preservar sua integridade. Ela também permitiu um aumento da qualidade do serviço e de sua produtividade (Brynjolfsson; McAfee, 2014).

Por sua vez, a automação científica é o uso de sistemas automatizados em experimentos, coleta e análise de dados em diversas áreas das ciências, como biologia, química, física e astronomia, entre outras. Esta abordagem permite a realização de experimentos repetitivos e precisos, bem como coleta de grandes quantidades de dados em curtos intervalos de tempo (Bellm *et al.*, 2019). Também pode ajudar a eliminar erros e melhorar a precisão dos resultados. Algumas tecnologias de automação científica incluem robôs de laboratório, sistemas de aquisição de dados e *softwares* de análise de dados. No caso do BDA, a automação permite o posicionamento das antenas, rastreando e apontando os conjuntos para o objeto espacial a ser estudado.

### **2.4 Instrumentação**

A instrumentação efetua estudos, desenvolvimentos e aplicações para equipamentos de transmissão, recepção, registro e controle de sinais e sistemas. As análises das informações passam a ser efetuadas por dispositivos desenvolvidos

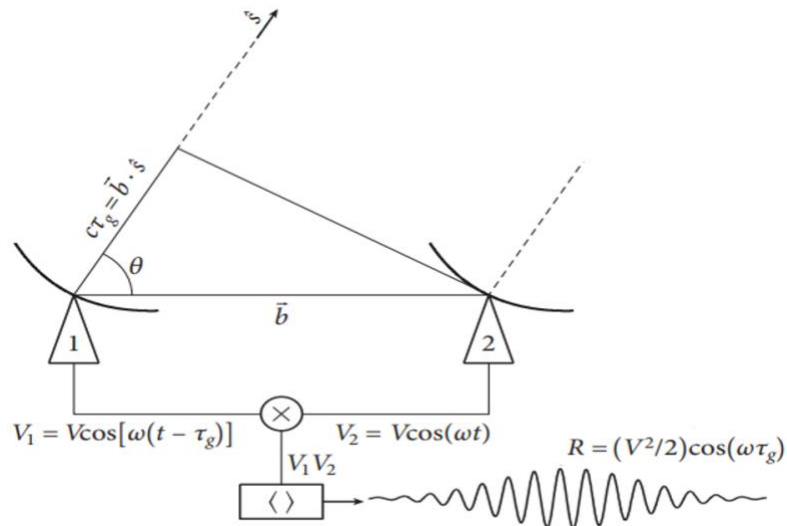
especificamente para determinado fim, diminuindo a interferência humana e, por consequência, as incertezas e imprecisões que o operador pode inserir em medições manuais. Esses dispositivos são de diversas naturezas, como sensores, atuadores e transmissores. Com a precisão introduzida por estes equipamentos, a qualidade da informação obtida, assim como seu rendimento, sofre um considerável aprimoramento. De acordo com o livro **Electronic Instrumentation and Measurements**, de Bell (2019), a eletrônica e a instrumentação são aplicadas desde os sistemas de aquisição de dados até o processamento de sinal mais avançados.

A instrumentação científica se refere às ferramentas e aos equipamentos utilizados para coletar, medir e analisar dados em pesquisas, desde simples medidores manuais até sofisticados equipamentos eletrônicos, como microscópios, espectrômetros e dispositivos de aquisição de dados. Ela é crucial para a obtenção de informações precisas e confiáveis, que são utilizadas para desenvolver teorias, testar hipóteses e compreender fenômenos naturais (Vasconcelos; Silva; Boaventura, 2010).

## 2.5 Interferometria

Interferometria é a técnica empregada para medir a distribuição de sinais de objetos, como estrelas, galáxias, discos de poeira, Sol entre outros, combinando dois ou mais sinais da mesma fonte, coletados por diferentes telescópios, para criar uma imagem virtual de alta resolução. Esta técnica se baseia na propriedade dos sinais de se interferirem consigo mesmos, e esses sinais podem se reforçar ou se cancelar, dependendo de como as ondas se combinam. O princípio básico do funcionamento de um interferômetro é ilustrado na Figura 7, que mostra um esquema simplificado de um interferômetro multiplicador com apenas duas antenas.

Figura 7: Esquemático do funcionamento de um interferômetro multiplicador.



Fonte: Condon e Ransom (2016).

Ao combinar sinais de diferentes telescópios, é possível obter-se uma imagem virtual de alta resolução, que pode ser usada para estudar detalhes estruturais finos em objetos celestes. No interferômetro multiplicador ilustrado acima, observando em banda estreita centrada em  $\nu = \omega/(2\pi)$ , o vetor  $\hat{S}$  é unitário na direção da fonte pontual distante a ser observada e  $\vec{b}$  é o vetor da linha de base entre as antenas 1 e 2. As tensões elétricas (voltagens) de cada antena são dadas por:

$$V_1 = V \cdot \cos [\omega(t - \tau_g)] \quad (1)$$

$$V_2 = V \cdot \cos [\omega t] \quad (2)$$

Sendo o atraso geométrico representado por  $\tau_g = \vec{b} \cdot \hat{s} / c$ .

O atraso geométrico significa a distância a mais que a onda eletromagnética plana deve percorrer do momento que ela é captada em uma antena até ser captada na próxima antena. O ângulo  $\theta$  define a inclinação da fonte em relação ao vetor da linha de base. Por relações trigonométricas, afirma-se que o ângulo formado entre a normal e a fonte é a diferença entre  $90^\circ$  e o ângulo  $\theta$  ( $\gamma = 90^\circ - \theta$ ).

Estes sinais, em grandezas elétricas, são amplificados e multiplicados para, em seguida, ser efetuada uma média temporal, operação a ser efetuada pelo correlacionador, sendo obtida uma resposta de saída  $R$  conforme a Equação (3), que é proporcional à densidade de fluxo da fonte, que possui como fase  $\omega\tau_g$ . Essa fase está relacionada ao atraso e à frequência (Condon; Ransom, 2016).

$$R = \langle V_1 \cdot V_2 \rangle = (V^2/2) \cos(\omega\tau_g) \quad (3)$$

Para que o instrumento possa operar como um interferômetro rádio, é essencial que ocorra a coerência entre as fases de todas as antenas envolvidas na observação, sejam duas, como na Figura 7, sejam 26, como no BDA em sua fase II, ou as mais de 130 mil do SKA (*Square Kilometer Array*), estendendo-se desde a África do Sul até a Austrália (Grainge *et al.*, 2017).

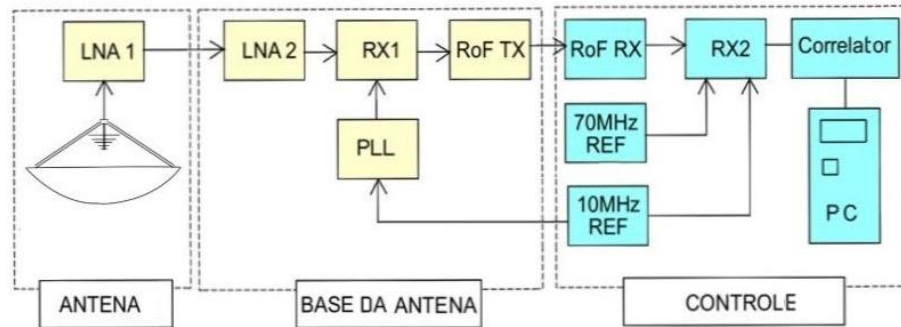
A coerência entre as fases pode ser obtida ajustando-se os atrasos das fases das ondas incidentes nas antenas em relação à antena de referência, sendo obtida pelo ajuste dos atrasos geométricos, gerados pelas diferenças de propagação do sinal entre a fonte emissora e cada uma das antenas e pela fase dos sinais de cada uma delas, passando por toda a cadeia de componentes eletrônicos e cabeamentos de seus receptores até a entrada do subsistema correlacionador de sinais (Perley; Dreher; Cowan, 1989). Este atraso é conhecido como “atraso instrumental”.

A interferometria emprega correlacionadores e, de maneira simplificada, pode ser descrita como a multiplicação e a integração dos sinais oriundos de cada conjunto de duas antenas. Deste modo, o correlacionador utiliza componentes real e imaginária de cada sinal, obtendo um sinal complexo ( $Re + j.Im$ ) através da multiplicação de sinais complexos das antenas envolvidas na operação, igualmente sinais complexos. É feita uma operação de combinação sem repetição (os pares de antenas só são combinados uma vez). O sinal empregado necessariamente deve ser complexo para carregar as informações relativas à amplitude e à fase. Deste modo, o correlacionador oferece como saída sinais que correspondem aos dados interferométricos de todas as frequências obtidas da fonte observada (Perley; Dreher; Cowan, 1989). É uma ferramenta poderosa e valiosa para a astronomia, permitindo estudar objetos celestes de maneira muito detalhada, sem a necessidade de um único telescópio de grande porte. Além disso, a combinação de imagens de diferentes telescópios pode ajudar a minimizar os efeitos da turbulência atmosférica, resultando em imagens mais nítidas e precisas.

### 3 O INTERFERÔMETRO RÁDIO BDA

O instrumento pode ser, didaticamente, dividido em blocos, a saber: as antenas propriamente ditas, seus painéis e a unidade de controle. Cada bloco tem subsistemas incorporados a ele. Os blocos e os subsistemas são mostrados na Figura 8.

Figura 8: Diagrama de blocos básico do receptor.



Fonte: Khristhiano Souza – INPE.

O escopo deste documento contempla o projeto de um novo circuito, mais moderno, empregando automação atual, para a síntese de frequência dos sinais a serem observados, como 1405 MHz. A partir destas informações e de posse dos parâmetros necessários, definidos no catálogo do circuito integrado do PLL (*Phase Loop Lock*), o PE3336, da Peregrine Semiconductor, e com o diagrama de ligação dos conectores e cabos, foi desenvolvido o esquema de ligação do Arduino, e, consecutivamente, o *software* a ser embarcado no circuito, reproduzido no Apêndice C.

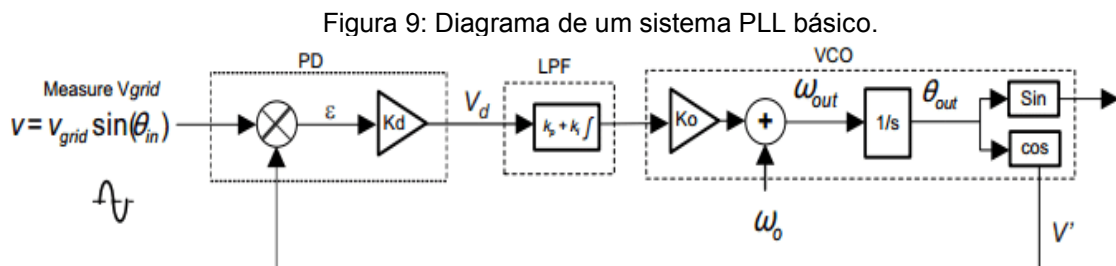
#### 3.1 Síntese de frequências

A partir de um sinal de referência e empregando métodos de síntese de frequências, podem ser gerados sinais com frequências em uma ampla faixa. A necessidade de serem obtidas frequências diferentes da referência é muito importante em telecomunicações ou transmissão de sinais, entre outras aplicações. A síntese de frequência pode ser definida como uma multiplicação da frequência, sendo que o divisor que é inserido entre o sinal e o comparador de fase é selecionado de acordo com a vontade do usuário. Estas operações permitem que informações sejam trocadas entre o painel da antena e o receptor no Prédio Central, no qual é executado o *software* de monitoração e controle. As informações originadas nas antenas em

campo são telemetrias de *status* do *hardware* que se encontra acomodado no Painel à base da torre da antena. Tais informações recebidas pela unidade são comandos que, após condicionamento na própria unidade, resultam em tensões de controle para ligar ou desligar uma caixa eletrônica, mudar o estado de uma chave ou um “trem de *bits*” para ajuste da frequência dos osciladores locais e da fonte de teste.

Também, no painel, há uma fonte que gera as tensões secundárias utilizadas pelas unidades e caixas eletrônicas. De maneira geral, esta fonte possui telemetria de *status* das correntes e tensões secundárias e de *status* “ON/OFF” da própria fonte. Elas também possuem pontos de teste de tensão e corrente secundárias para permitir a medida destas grandezas com instrumentação externa no caso de diagnose de falhas. Esta fonte possui a facilidade de ser comandada remotamente para ser “ligada” e “desligada” a partir do Prédio Central.

O subsistema PLL é responsável por gerar um sinal de saída com frequência e fase instantâneas em sincronismo com o sinal amostrado a partir de um sinal de entrada. Por manter em regime permanente a frequência de saída igual à frequência de entrada, tal sistema pode rastrear a frequência do sinal amostrado, assim como gerar frequências múltiplas do sinal de entrada. As propriedades da malha de controle permitem desenvolvimento das mais variadas aplicações, como como rádio, telecomunicações, análise de sinais entre outras. Um sistema PLL básico é composto por um *Phase Detect* (PD), um *Loop Filter* (LPF) e um *Voltage Controlled Oscillator* (VCO), conforme Figura 9.



Fonte: Oliveira, 2017.

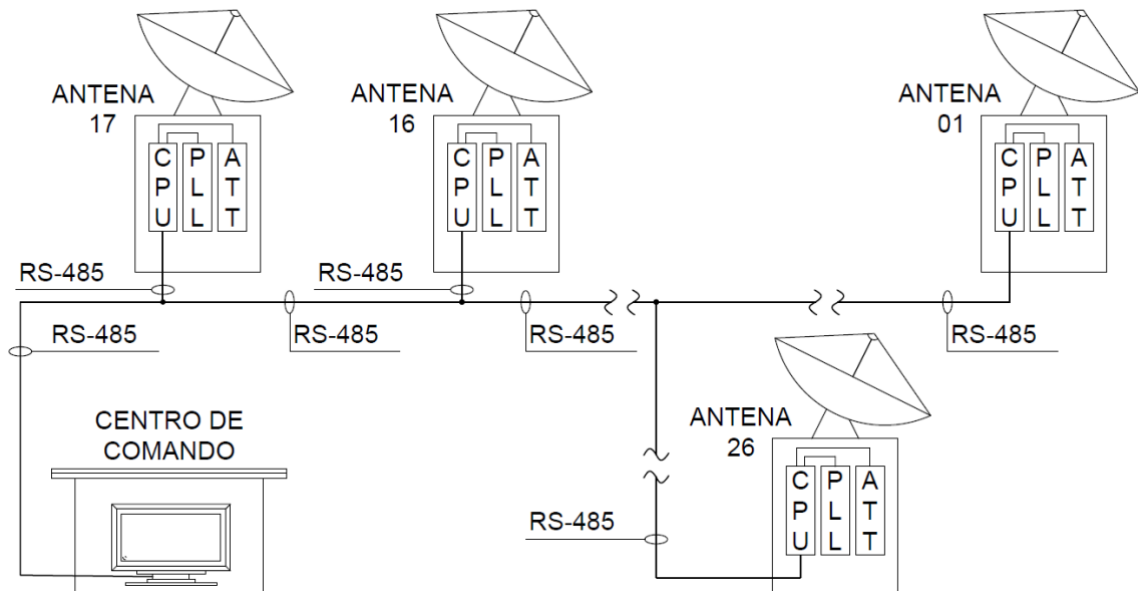
A função do bloco PD é comparar o seno do sinal de entrada com o cosseno do bloco VCO com o objetivo de gerar um sinal de erro proporcional ao erro do ângulo. Para isto o bloco em questão multiplica o sinal de saída do VCO com o sinal medido na entrada. No entanto, a informação do erro possui uma variável que é duas vezes a frequência de entrada o que necessariamente deve ser removida para o correto

funcionamento do sistema. O erro é a entrada para o *Loop Filter* que nada mais é que um controlador PI, este controlador é usado para zerar o erro permitindo que o sistema entre em regime permanente. A componente não linear da saída do PD deve ser removida. Um filtro rejeita-faixa é usado para eliminar a linearidade que é imposta pela multiplicação da frequência da rede por dois.

### 3.1.1 Circuitos da síntese de frequências

A Síntese de Frequências, conforme o projeto original, era efetuada por um circuito responsável em gerar o sinal a ser transmitido para o circuito responsável pela sintetização da frequência desejada. Este circuito era composto principalmente pela CPU, que se comunicava com a central de comando através de uma rede RS-485, que é um padrão de comunicação serial de dados utilizado para transmitir informações a inúmeros equipamentos em ambientes ruidosos, o circuito integrado que produz a frequência desejada a partir de parâmetros fornecidos a ele e o sistema de atuação, responsável pelo posicionamento das antenas. A primeira versão da rede do BDA era baseada nesta tecnologia e está ilustrada na Figura 10.

Figura 10: Esquema das conexões entre antenas e central de controle (versão 1).

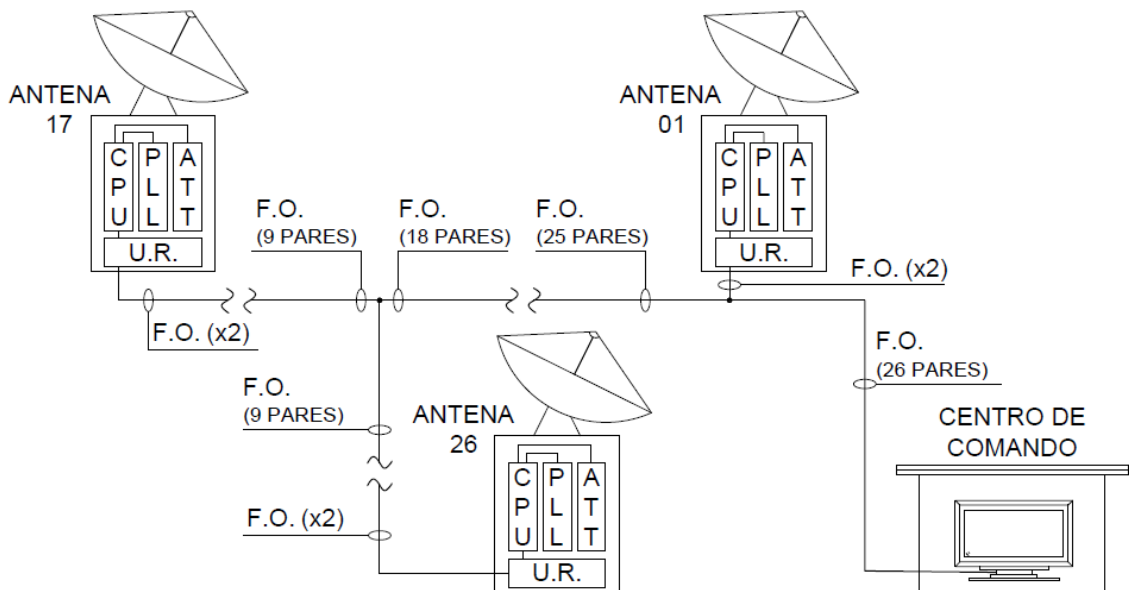


Fonte: O Autor.

Porém, no caso do BDA, mesmo com distâncias aparentemente curtas, as antenas mais distantes estavam perdendo informações, atrapalhando o funcionamento do instrumento. Assim, tornou-se necessária a adoção de uma nova

topologia que não apresentasse este problema. Adotou-se rede de fibras ópticas, que são uma excelente solução para ambientes com diversos equipamentos. Oferecem altas velocidades de transmissão, possuem uma excelente imunidade a interferências eletromagnéticas, tanto em receber quanto em emitir, o que é muito desejado em um ambiente de observação de sinais de rádio. Um esquemático das ligações com as redes de fibras ópticas se encontra ilustrado na Figura 11.

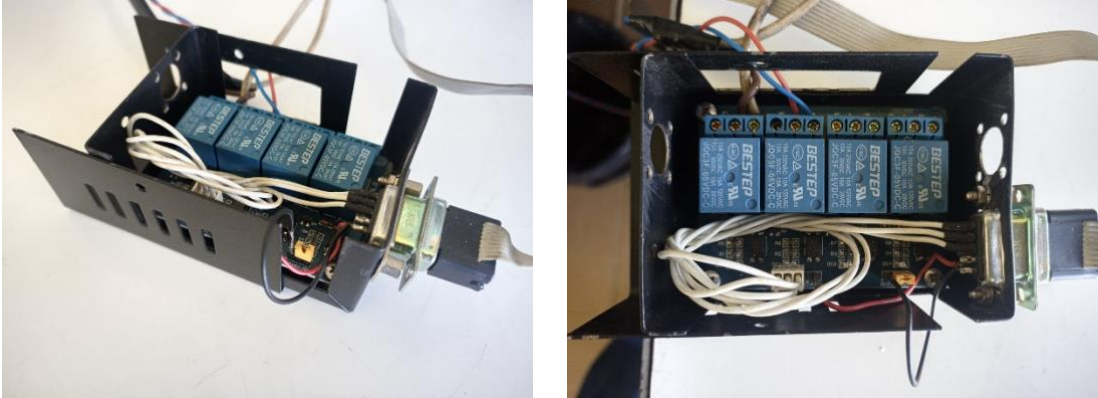
Figura 11: Esquema das conexões entre antenas e central de controle (versão 2).



Fonte: O Autor.

O circuito original da síntese de frequências encontra-se ilustrado na Figura 12. A Unidade Remota, que é um computador simplificado executando um sistema operacional baseado em Linux, é mostrada na Figura 13.

Figura 12: Circuito original da síntese de frequências.



Fonte: O Autor.

Figura 13: Unidade remota.



Fonte: O Autor.

A atualização do circuito da síntese de frequências focou na substituição dos blocos *Tower Base Computer* e *Tower Base Monitoring and Control Unit* por um sistema único, composto por um Arduino, que é uma placa miniaturizada para automações e que possuem a capacidade de executar pequenos *software* embarcados e que são extremamente versáteis e com grande capacidade de expansão. Esta substituição é necessária e recomendada uma vez que os componentes originais vêm apresentando problemas e são de difícil aquisição.

Originalmente, a central de operações e controle se comunicava com cada painel por uma Rede do tipo RS-485. Como já explicado, esta configuração não estava

sendo eficiente, tendo sido adotado o emprego de redes de fibras-ópticas e uma placa controladora com sistema operacional Linux que recebe os sinais de um conversor FO-Ethernet que, por sua vez, se comunica com a central através de rede de fibras-ópticas. A controladora utiliza RS-485 apenas dentro do painel, eliminando os problemas anteriores com as distâncias destas redes.

### 3.1.2 Correlação de sinais

Em uma observação astronômica, as principais etapas da correlação de sinais incluem:

1. Aquisição de dados: As fontes de sinal são coletadas por antenas de rádio e convertidas em formato digital para processamento;
2. Sincronização: As fontes de sinal são sincronizadas para que as amostras de dados possam ser comparadas;
3. Correlação: As amostras de dados são comparadas para determinar a correlação entre elas. O processo pode ser realizado usando diferentes técnicas, como correlação fraca, *cross-correlation* ou autocorrelação;
4. Análise de resultados: Os resultados da correlação são analisados para determinar a direção e a origem do sinal astronômico;
5. Interpretação: Os resultados são interpretados com o objetivo de obter informações sobre a fonte observada, como posição, movimento, temperatura entre inúmeras outras.

Estas etapas são repetidas para muitos sinais ao longo do tempo para produzir imagens e dados mais precisos. A correlação de sinais é uma técnica fundamental na astronomia de rádio e permite aos pesquisadores obterem informações valiosas sobre a natureza dos objetos astronômicos. Um correlacionador efetua a operação de correlacionar sinais rádio astronômicos recebidos de diferentes fontes, com o objetivo de detectar e caracterizar objetos astronômicos. No instrumento BDA é empregado um correlacionador do tipo *hardware* (um FPGA, *Field Programmable Gate Array*), que se trata de um tipo de circuito programável que pode ser usado para implementar as mais diversas funções e operações digitais com elevada capacidade de processamento, velocidades altas e vasta gama de programações possíveis. A

vantagem de seu emprego é a possibilidade do desenvolvimento mais eficiente e de maior desempenho do que uma correspondente baseada em *software*, acarretando, conseqüentemente, uma correlação mais rápida e precisa dos sinais desejados.

## 4 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO DE SÍNTESE DE FREQUÊNCIAS

Em qualquer processo de desenvolvimento tecnológico, o emprego de protótipos é a forma mais racional de chegar a resultados favoráveis. E, para equipamentos científicos, não é diferente. É uma etapa crucial na construção de instrumentos, pois permite aos engenheiros e aos cientistas testarem, corrigirem, adaptarem e validarem a funcionalidade e a eficiência dos equipamentos antes de sua replicação. Seu objetivo é produzir um modelo funcional do equipamento que possa ser usado para testes e aperfeiçoamentos e analisar a funcionalidade e a eficiência do equipamento, permitindo aos cientistas utilizarem diferentes configurações e ajustes a fim de obterem o melhor desempenho possível. Desta forma, podem ser obtidos instrumentos mais precisos e confiáveis, crucial para resultados positivos para a ciência e a pesquisa.

Para estas funções, podem ser utilizados sistemas embarcados, que são sistemas digitais microcontrolados para aplicações específicas nos quais o controlador está anexado ao sistema que ele controla. Podem realizar tarefas predefinidas e incorporadas ao sistema. Utilizado em atividades específicas, possibilita otimizar determinados equipamentos, com tamanho diminuído e necessitando menos recursos computacionais, com confiabilidade e valor final reduzido.

Os microcontroladores são projetados para ser usados em aplicações em que é necessário um controle embarcado, como automação industrial, equipamentos eletrônicos e sistemas de automação. Em geral, os sistemas são usados em aplicações com poucas exigências. Costumam ser projetados a partir de uma aplicação bem definida e para tarefas específicas. O sistema pode ainda ser executado com recursos computacionais bastante limitados, mesma na ausência de teclados e telas ou com pouca memória.

O Arduino é uma plataforma utilizada para prototipação de circuitos eletrônicos e de automações. É composto por uma placa com microcontrolador e seu ambiente de programação. Tanto o *hardware* como o ambiente de programação são livres, podendo ser modificados e reproduzidos sem qualquer restrição e permitindo as mais variadas soluções. Por possuir código aberto, tem se tornado popular em aplicações de automação, robótica, IoT (Internet das coisas) e outras áreas. Ele usa microcontroladores Atmel AVR e oferece uma ampla gama de modelos para atender

a diferentes necessidades de projeto. Uma de suas principais características é sua facilidade de uso, com uma linguagem de programação simplificada baseada em C/C++ e uma ampla comunidade de usuários e recursos de desenvolvimento. Além disso, oferece uma variedade de recursos, como portas de entrada/saída, sensores, atuadores, interfaces de comunicação (como USB, Ethernet e Wi-Fi), entre outros. O Arduino também é amplamente compatível com uma ampla gama de componentes eletrônicos e sensores, tornando fácil para os usuários adicionarem capacidades adicionais a seus projetos. A plataforma Arduino é utilizada em uma ampla variedade de aplicações, desde projetos caseiros e educacionais até projetos industriais e comerciais, não sendo uma exceção, é claro, projetos para comunidade científica.

#### **4.1 Desenvolvimento do protótipo**

As frequências a serem observadas podem ser escolhidas aleatoriamente de forma a atender às necessidades da pesquisa que estiver sendo realizada. A de 1405 MHz fica próxima ao centro da banda de 1200 a 1700 MHz. A linha de radioastronomia do átomo de Hidrogênio é a linha de 21,1 cm, equivalente à frequência de 1420,4 MHz. A frequência de 1405 MHz é importante para a astronomia por ser a frequência de uma linha de hidrogênio hiperfina amplamente utilizada na astronomia de rádio. Essa linha é uma transição específica entre dois níveis de energia do átomo de hidrogênio que é produzida por emissão de radiação. Essa frequência de rádio é muito fraca e de difícil detecção, porém amplamente utilizada na astronomia por ser uma das poucas transições específicas que podem ser detectadas a grandes distâncias.

Além disso, é uma frequência estável (não variando com o tempo), tornando-a uma ferramenta bastante útil para determinar a velocidade e a distância de objetos astronômicos a serem observados. Outra informação que essa frequência fornece para a astronomia é sobre a composição química da região observada, uma vez que a presença de hidrogênio pode ser detectada pela linha hiperfina. Outro efeito possível é o estudo da evolução de galáxias já que a presença de hidrogênio é um indicador da formação de estrelas.

A outra frequência utilizada no desenvolvimento do protótipo do novo circuito é a de 1705 MHz. No caso deste instrumento, a motivação científica da escolha da banda de observação de 1200 a 1700 MHz foi baseada na ideia que, a partir das observações do satélite Skylab na faixa dos Raios X, descobriu-se que a região de aceleração de

partículas dos *flares* solares ocorre em regiões da atmosfera solar cujas densidades são da ordem de  $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . E, sabe-se que a emissão de plasma associada com densidades dessa ordem de grandeza encontra-se dentro da banda de ondas de rádio decimétricas. Nesse caso, as observações em ondas decimétricas (nessa faixa de frequência entre 1200 e 2500 MHz) podem fornecer informação direta sobre as regiões de liberação de energia e aceleração de partículas para os *flares* solares.

#### 4.2 Determinação dos parâmetros para as frequências observadas

Para observar em 1405 MHz, com a FI de saída em 70 MHz, as frequências das PLLs são 2240 MHz e 905 MHz.

Deste modo, tem-se:

$$f = 2240 - 905 + 70$$

$$f = 1405 \text{ MHz}$$

Para tal, conforme o manual do circuito integrado PLL "PEE3336", a programação exigida segue o exposto abaixo.

De acordo com a fórmula:

$$F_{in} = [ 10 \times (M + 1) + A ] \times \left[ \frac{f_r}{(R+1)} \right] \quad (4)$$

onde

$$A \leq M + 1 \quad \text{e} \quad 1 \leq M \leq 511$$

E a frequência de referência ( $f_r$ ) é:

$$f_r = 10 \text{ MHz}$$

Deste modo, para as frequências desejadas de 905 MHz e 2240 MHz, os parâmetros encontrados necessariamente são os seguintes:

Para 905 MHz:

$$\begin{aligned} R &= 19 \\ M &= 180 \\ A &= 0 \end{aligned}$$

Para 2240 MHz:

$$\begin{aligned} R &= 0 \\ M &= 21 \\ A &= 4 \end{aligned}$$

Para que o circuito integrado PLL PEE3336 forneça as frequências desejadas, o circuito do Arduino envia os parâmetros R, M e A para as PLLs de forma serial. De acordo com o *datasheet*, os dados devem ser enviados respeitando as informações apresentadas no Quadro 1 e na Figura 14.

Quadro 1: Programação do registro primário.

Interface Mode	Enh	Bmode	Smode	R <sub>5</sub>	R <sub>4</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	Pre_en	M <sub>6</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>0</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>
Parallel	1	0	0	M2_WR rising edge load				M1_WR rising edge load								A_WR rising edge load							
				D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>
Serial*	1	0	1	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	B <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>	B <sub>9</sub>	B <sub>10</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>14</sub>	B <sub>15</sub>	B <sub>16</sub>	B <sub>17</sub>	B <sub>18</sub>	B <sub>19</sub>
Direct	1	1	X	0	0	0	0	Pre_en	M <sub>6</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>0</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>

\*Serial data clocked serially on Sclk rising edge while E\_WR "low" and captured in secondary register on S\_WR rising edge.

↑  
MSB (first in)

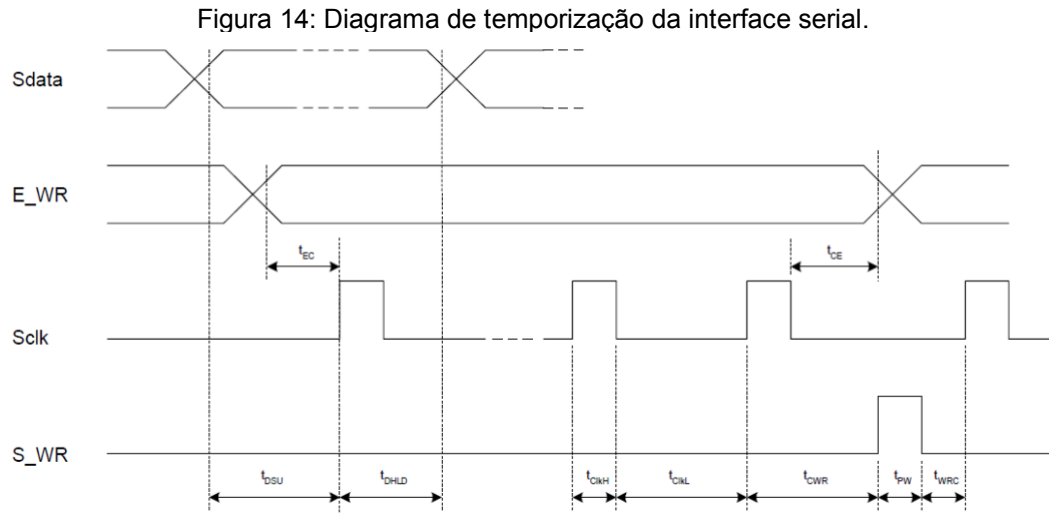
↑  
(last in) LSB

Fonte: Peregrine Semiconductor (2005, p. 9).

No Quadro 1, destacam-se os termos “MSB” e “LSB” que representam, respectivamente, *Most Significant Bit* (Bit Mais Significativo) e *Least Significant Bit* (Bit Menos Significativo). O Bit Mais Significativo deve ser o primeiro a ser transmitido e o Bit Menos Significativo deve ser o último.

Por se tratar de uma comunicação serial, os dados são transmitidos um bit de cada vez, de forma sequencial, em um determinado canal de comunicação. Uma forma muito conhecida de comunicação serial é o protocolo USB (*Universal Serial Bus*).

Assim, deve ser conhecido o formato em que os dados devem ser recebidos pelo circuito integrado PLL. Esses dados devem ser transmitidos de acordo com o Diagrama de Temporização apresentado na Figura 14.



Fonte: Peregrine Semiconductor (2005, p. 10).

A implementação numérica da teórica exposta acima será detalhada a seguir. Baseado no Quadro 1, depreende-se que  $0 \leq R \leq 63$  e que:

1) R possui 6 bits, variando de R0 a R5:

0 a  $(2^6 - 1)$ , portanto, de 0 a 63

2) A possui 4 bits e varia de A0 a A3:

0 a  $(2^4 - 1)$ , portanto, de 0 a 15

3) M possui 9 bits, variando de M0 a M8:

0 a  $(2^9 - 1)$ , portanto, de 0 a 511

Valores fora destas faixas não são razoáveis para a programação e como o objetivo é o emprego do Arduino para estes cálculos, devem ser escolhidos os métodos mais simples.

Como a Equação (4) possui três incógnitas, foi desenvolvida a Rotina 1, em Matlab, apresentada no APÊNDICE A, cujo objetivo principal era testar os valores possíveis para as soluções. Alguns destes valores estão relacionados na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1: Alguns valores para os parâmetros A, M e R.

Frequência de Saída (MHz)	Frequência de Observação (MHz)	Frequência de Saída x 2 (MHz)	Parâmetros		
			A	M	R = 1
2040	1205	4080	8	39	
2045	1210	4090	9	39	
⋮					
2240	1405	4480	8	43	
2245	1410	4490	9	43	
⋮					
2535	1700	5070	7	49	
2540	1705	5080	8	49	

Fonte: O Autor.

A partir dos dados obtidos pela a Rotina 1, observou-se que, ao multiplicar a frequência de saída do PLL por 2, é identificado um padrão visual que facilita a obtenção de uma fórmula relacionando os parâmetros A e M com o dobro da frequência de saída. O dígito das “dezenas” desta frequência (destacado na cor verde) é exatamente o parâmetro A e os dois dígitos de “milhares” e “centenas” (destacados na cor vermelha), subtraindo-se uma unidade, fornecem o parâmetro M.

Assim, foi possível adotar uma fórmula para A e M. O parâmetro R retorna os menores parâmetros para A e M quando possui valor unitário. Além dos menores valores, o parâmetro R = 1 fornece a visualização do padrão acima descrito. Com um padrão mais simplificado, o custo computacional também é muito menor, o que se torna uma excelente vantagem haja vista a simplicidade do sistema escolhido (Arduíno).

A partir do padrão observado, utilizando a função “módulo” no valor da Frequência de Saída multiplicada por 2 e, em seguida, dividida por 10 (a fim de descartar o algarismo menos significativo), obtendo-se os parâmetros desejados.

Assim:

a) Para a Frequência de saída = 2040 MHz:

O dobro da frequência = 4080 MHz.

Dividindo por 10 = 408 (a divisão inteira por 10 tem justamente o efeito de deslocar o dígito das dezenas para as unidades).

O parâmetro A é encontrado no resto da divisão deste 408 por 10:

$$A = 408 \% 10$$

$$A = 8$$

(% representa a Função Módulo)

Para o Parâmetro M, basta encontrar o valor inteiro do quociente da divisão de 408 por 10, subtraindo-se 1 no final. Assim, neste exemplo,

$$M = 40 - 1$$

$$M = 39$$

b) Para a Frequência de saída = 2540 MHz:

O dobro da frequência = 5080 MHz.

Dividindo por 10 = 508.

Então,

$$A = 508 \% 10 = 8$$

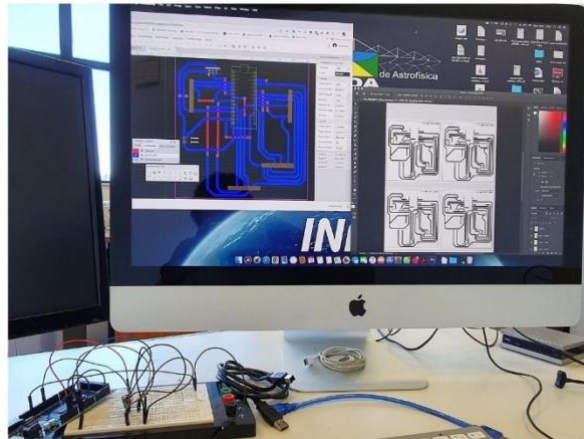
$$M = (508 // 10) - 1 = 50 - 1 = 49$$

A relação completa dos valores para o intervalo em questão é apresentada no APÊNDICE B, com um dos conjuntos de soluções empregados no desenvolvimento do software a ser embarcado no Arduíno da síntese de frequência.

### 4.3 Desenvolvimento prático da Síntese de Frequências

De posse das informações necessárias e decidido o dispositivo integrado a ser empregado, desenhou-se o *layout* do circuito a ser desenvolvido. Optou-se por uma placa de circuito impresso (PCB ou *Printed Circuit Board*) que é um processo de criar as placas de circuito eletrônico em uma base de baquelite com trilhas de cobre, que conduzem sinais elétricos. O *design* da placa foi, inicialmente, desenhado com uso de *software* específico, como mostrado na Figura 15, para um posicionamento otimizado das trilhas. Como a placa é simples, com poucas trilhas e camada única, *freeware softwares* ou *sharewares* podem ser utilizados, diminuindo os custos de projeto.

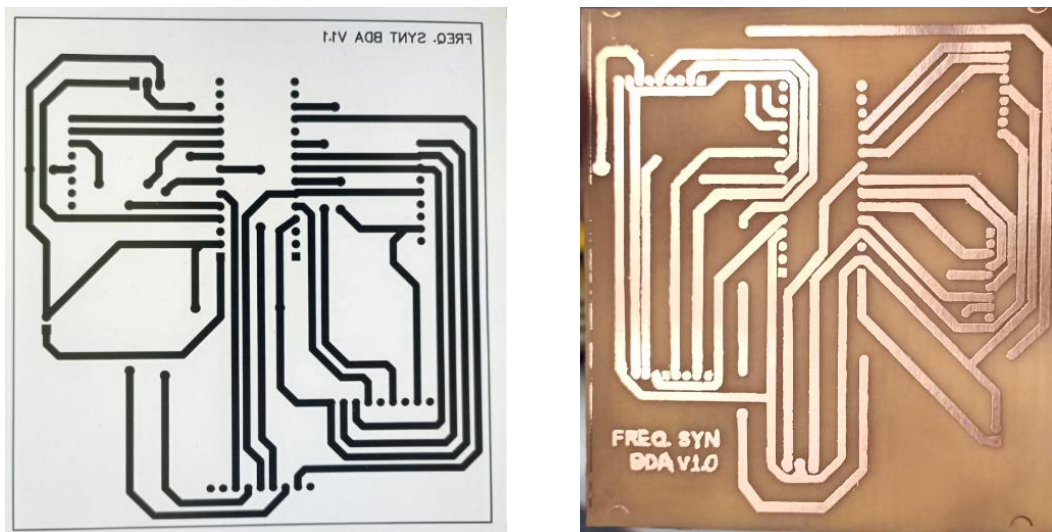
Figura 15: Desenvolvendo o layout do PCB.



Fonte: Khristhiano Souza – INPE.

Com o *layout* definitivo pronto, ele deve ser impresso em papel (Figura 16 à esquerda) a fim de ser transferido para a placa revestida de cobre (Figura 16 à direita).

Figura 16: Layout (à esquerda) e PCB (à direita) do protótipo.

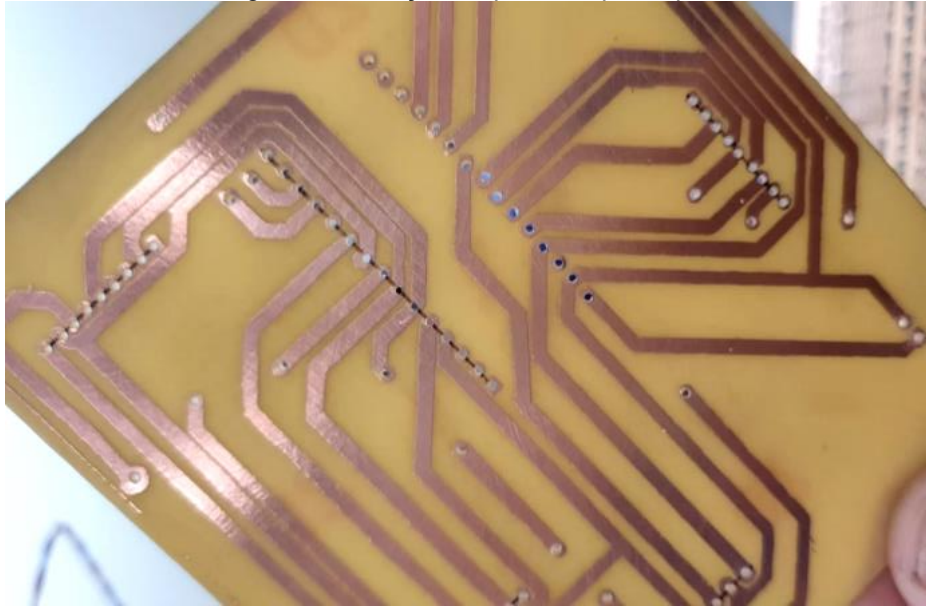


Fonte: Khristhiano Souza – INPE.

A próxima etapa envolveu a furação para a solda dos componentes eletrônicos na placa, mostrado na

Figura 17. A furação precisa ser exata para os componentes se encaixarem perfeitamente e serem soldados no cobre. Caso contrário, podem ocorrer mau-contatos ou curtos-circuitos, inviabilizando o correto funcionamento do protótipo.

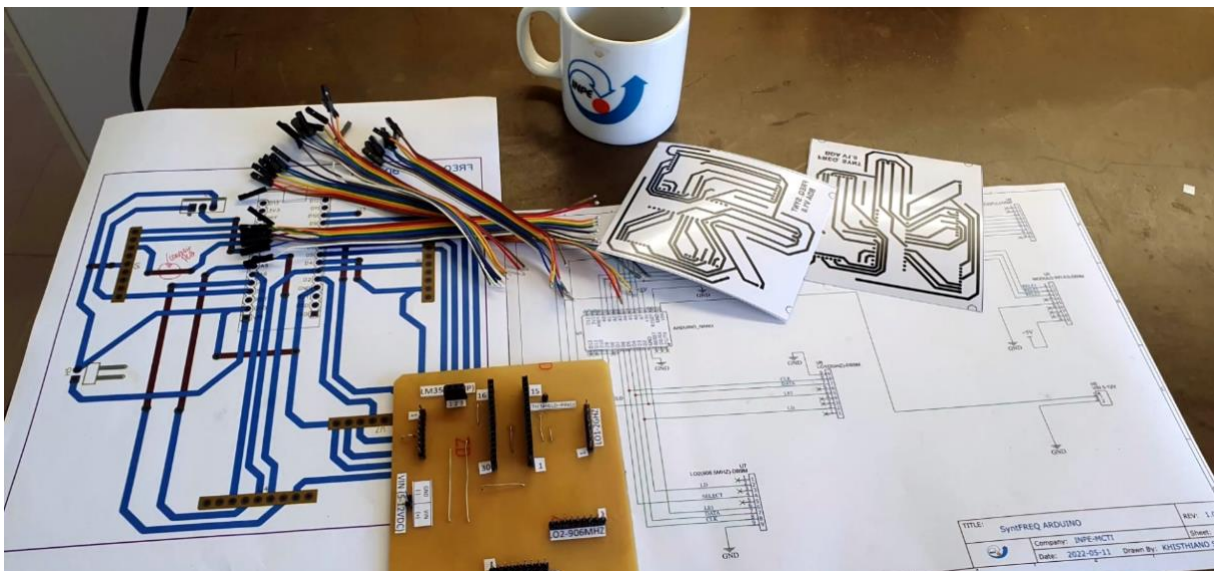
Figura 17: Furação da placa do protótipo.



Fonte: Khristhiano Souza – INPE.

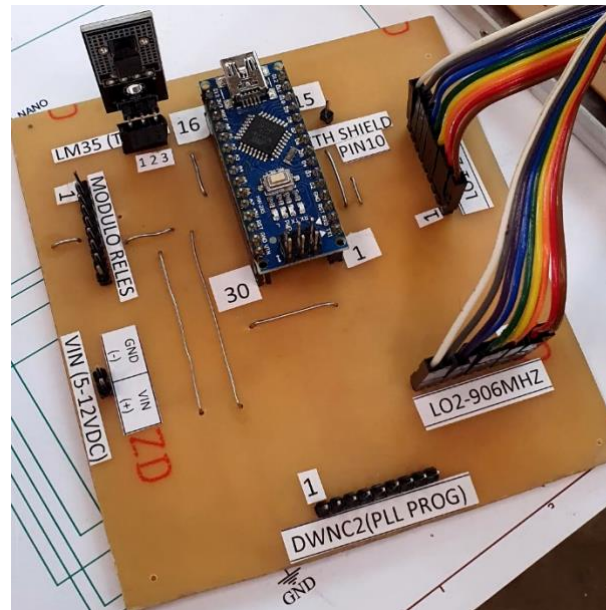
Com o diagrama elétrico do circuito eletrônico e o *layout* da placa de circuito impresso, as conexões foram efetuadas seguindo estritamente as instruções do projeto, ilustradas na Figura 18, obtendo a placa montada do primeiro protótipo, mostrado na Figura 19.

Figura 18: Montagem dos componentes na placa do protótipo.



Fonte: Khristhiano Souza – INPE.

Figura 19: Placa do primeiro protótipo montada.



Fonte: Khristhiano Souza – INPE.

Em seguida, a placa foi montada na caixa metálica definitiva a ser utilizada no painel, junto à antena. O primeiro protótipo montado é mostrado na Figura 20 (à esquerda). Repetindo os passos para a montagem do primeiro protótipo, obteve-se o segundo protótipo, similar ao primeiro. Os dois protótipos são exibidos na Figura 20 (à direita).

Figura 20: Primeiro protótipo (à esquerda) e os protótipos 1 e 2 (à direita).

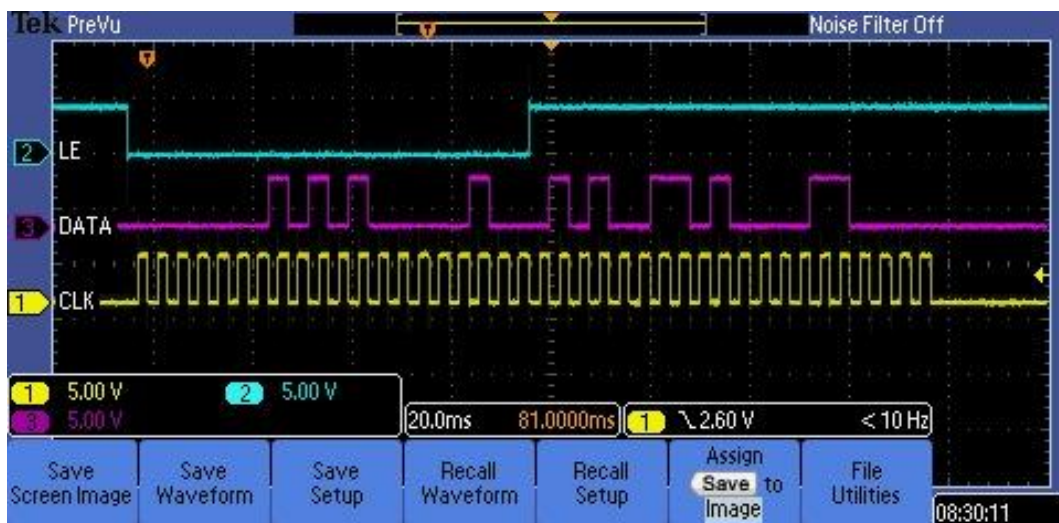
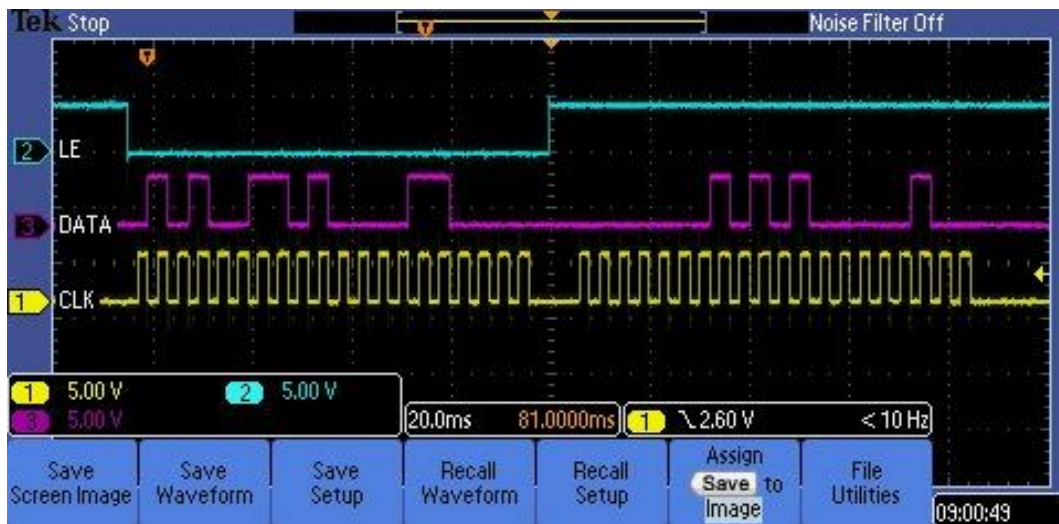


Fonte: Khristhiano Souza – INPE.

#### 4.4 Sinais obtidos

Adotando as metodologias apresentadas no item 4.2 para a determinação dos parâmetros A, M e R para as frequências a serem utilizadas nas observações e também fazendo uso da tabela do Apêndice B, foi desenvolvido um *software*, apresentado no Apêndice C, para os protótipos baseados em Arduino, mostrados na Figura 20, para gerar os pulsos exatamente da forma que os integrados do PLL precisam para sintetizar as frequências. A precisão destes sinais para 1405 MHz e 1705 MHz foi acompanhada pelo osciloscópio, conforme a Figura 21.

Figura 21: Diagramas de temporizações sintetizadas (1405 MHz acima e 1705 MHz abaixo).



Fonte: O Autor.

## 5 RESULTADOS

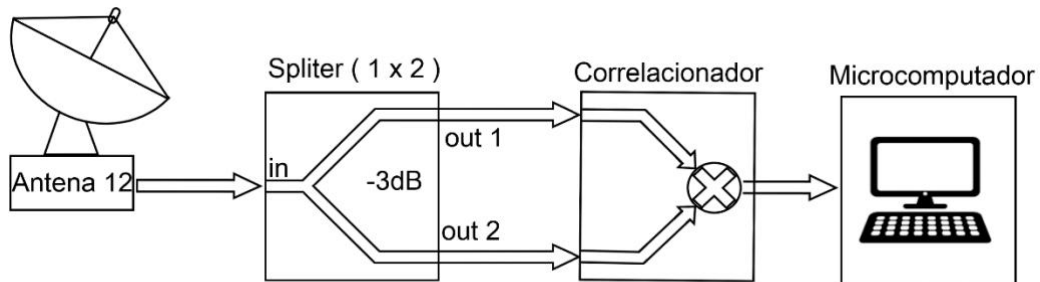
Este capítulo apresenta os primeiros resultados parciais obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa deste trabalho de mestrado.

Como já foi explicado anteriormente, o instrumento sofreu diversas avarias que o incapacitaram para uso científico. Assim, conforme os objetivos deste trabalho, os esforços foram concentrados em atualizar e modernizar certos subsistemas do instrumento para que ele voltasse a operar. Isto envolveu um extenso trabalho de levantamento de informações e de identificação de soluções.

Os protótipos desenvolvidos precisam ser testados tanto em bancada quanto no campo. Para isso, é necessário que as antenas estejam operacionais, permitindo que esses subsistemas (como no caso da síntese de frequências) sejam comissionados e testados.

Inicialmente, apenas uma das antenas (a de número 12) estava funcionando. Isso limitava os testes, pois o mesmo sinal era aplicado a 2 (duas) células do correlacionador, após passarem por um *splitter* (divisor) de “1 para 2”, conforme Figura 22.

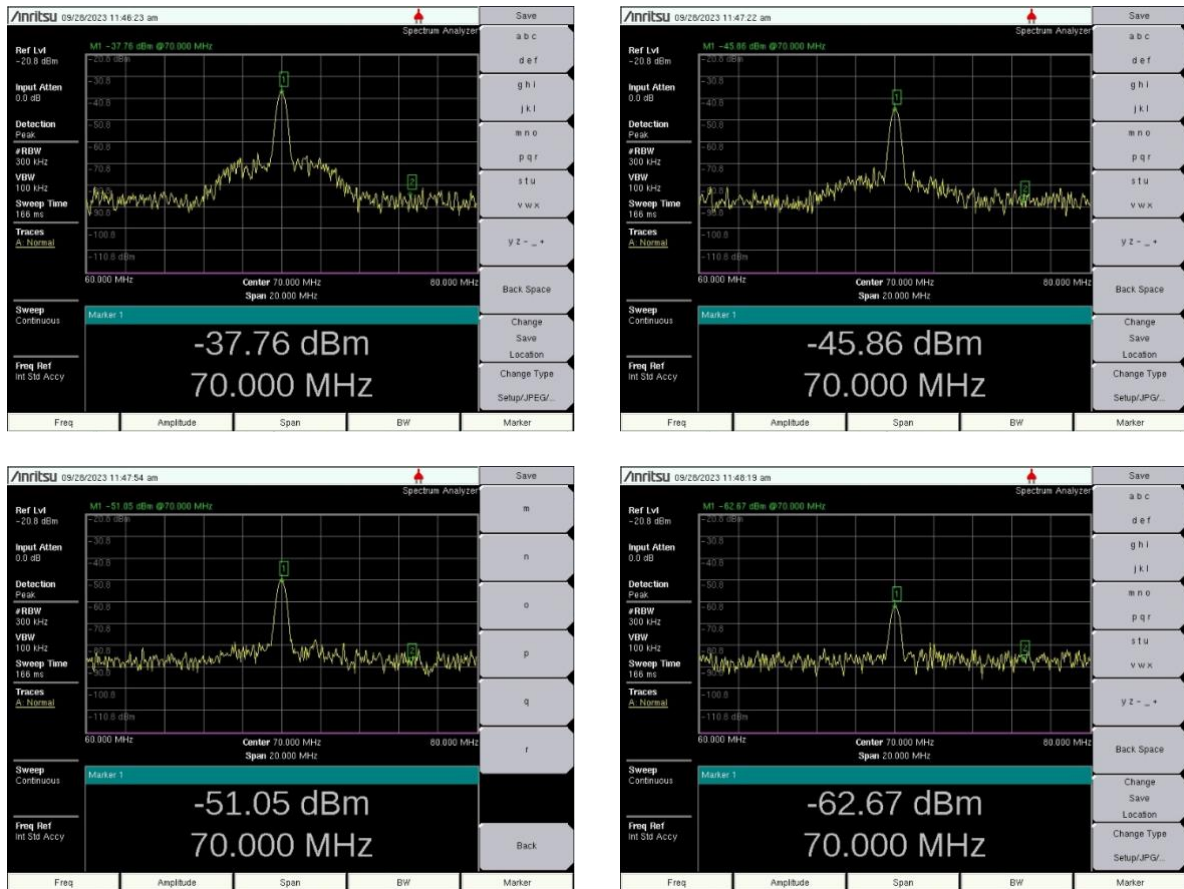
Figura 22: Diagrama de ligação para testes do correlacionador utilizando uma fonte única de sinal.



Fonte: O Autor.

Foram feitos alguns testes e ajustes na potência e na atenuação. Uma das possibilidades é a regulação das atenuações via *software*. Deste modo, foram definidos alguns valores e medidos no analisador de espectro o resultado. Como pôde ser observado, ao requisitar atenuação 0 (zero) dBm, foi lido o valor de -37 dBm @ 70MHz. Quando a atenuação escolhida foi de 10 dBm, a leitura foi de -45 dBm @ 70MHz. A próxima seleção foi de 15 dBm e o analisador verificou um nível de -51 dBm @ 70MHz e, por último, foi escolhido o valor de 25 dBm e a resposta foi de -62 dBm. Estes resultados podem ser vistos na Figura 23 e na Tabela 2.

Figura 23: Telas do analisador de espectro com diversas atenuações.



Fonte: O Autor.

Os resultados obtidos foram muito próximos do esperado. Utilizando como referência o sinal sem atenuação (-37 dBm @70 MHz), após algumas atenuações serem selecionadas, os valores medidos foram muito coerentes, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Alguns resultados dos sinais com determinadas atenuações.

Atenuação Escolhida [dBm]	Atenuação Medida [dBm]	Atenuação "Calculada" [dBm]	Diferença [%]
0	-37	-37	0,00%
10	-45	-35	5,41%
15	-51	-36	2,70%
25	-62	-37	0,00%

Fonte: O Autor.

Como o sistema trabalha na potência de dois, são possíveis 32 níveis de atenuação, obtidos por 5 (cinco) *bits* (uma vez que  $2^5 = 32$ ), variando de 0 (zero), que

representa sem atenuação via *software*, a 31, que representa a atenuação máxima que o circuito consegue inserir via *software*.

Assim, o valor máximo de atenuação que se consegue solicitar pelo terminal é de 31 dBm. Por comodidade, utiliza-se 30 dBm. E, novamente pelo mesmo motivo, foram criadas *aliases* com valores mais comuns de 5 em 5 dBm. Porém, caso sejam necessários outros valores inteiros, podem ser digitados os comandos completos com estes valores.

A atenuação é ajustada com base na intensidade do sinal observado, visando a melhorar a detecção e não requerendo mudanças frequentes. Se for necessária atenuação maior que 30, ou 31 dBm, podem ser inseridos atenuadores físicos. No dia da realização deste teste o circuito estava com 2 (dois) atenuadores de 3 dBm, totalizando 6 dBm.

Com estes ajustes devidamente conhecidos e a Antena 12 na situação de *tracking* (rastreamento), no caso o objeto rastreado sendo o Sol, foram efetuadas medidas da correlação, lembrando que se trata de uma “autocorrelação”, uma vez que o sinal de uma única antena foi dividido através de um *Splitter* e inserido em 2 (duas) células de correlação. Parte dos resultados é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Alguns resultados da autocorrelação.

Correlação	Fase	Total Power (célula 1)	Total Power (célula 2)
0,93	0,24	0,25	0,19
0,93	0,22	0,25	0,19
0,93	0,21	0,25	0,19
0,93	0,24	0,25	0,19
0,93	0,24	0,25	0,19
0,93	0,23	0,25	0,19
0,93	0,24	0,25	0,19
0,93	0,22	0,25	0,19
0,93	0,26	0,25	0,19
0,93	0,19	0,25	0,19
0,93	0,23	0,25	0,19
0,93	0,26	0,25	0,19
0,93	0,21	0,25	0,19
0,93	0,23	0,25	0,19
0,93	0,24	0,25	0,19
0,93	0,24	0,25	0,19
0,93	0,28	0,25	0,19
0,93	0,23	0,25	0,19
0,93	0,22	0,25	0,19

Fonte: O Autor.

Ao se correlacionar um sinal “consigo mesmo”, seria esperada uma correlação de 100% ou 1,00, e a defasagem de 0,00°, já que se trata do mesmo sinal. Mas, como pode ser observado na Tabela 3, isso não foi obtido.

A correlação esperada de 100% (ou 1,00), durante a aquisição dos dados, foi de 93%, ou 0,93. E a defasagem, embora tenha sido relativamente baixa, não foi o valor esperado de 0°. Nas duas colunas seguintes são apresentadas grandezas denominadas “*total power*” (sem explicar detalhadamente, pode-se definir que se trata da medida da amplitude total de cada sinal). Por se tratar do mesmo sinal, esperavam-se valores iguais para as grandezas, o que, visivelmente, não ocorreu.

Estas discrepâncias de valores podem ser facilmente justificadas devido a diferenças no circuito real, como cabos, conectores e demais elementos localizados logo após o *splitter*. Por mais que os cabos tenham sido produzidos com comprimentos muito similares e empregados os mesmos terminais e conectores, na prática eles não são exatamente iguais, o que leva a inserção de perdas e defasagens diferentes em cada trecho entre o divisor de sinal e o correlacionador. Os resultados mostram que os novos circuitos desenvolvidos foram bem-sucedidos quando submetidos aos testes de verificação de funcionalidades dos subsistemas de

síntese de frequência, comissionados tanto nas antenas em campo e quanto em situações reais de uso.

No momento do encerramento deste trabalho, mais antenas estão sendo recuperadas e colocadas em funcionamento, o que permitirá em um curto intervalo de tempo a obtenção de informações mais robustas e precisas, bem como a análise do comportamento do instrumento durante sua operação.

Estas análises mais aprofundadas permitirão projeções mais precisas sobre sua utilização. O próximo capítulo abordará as conclusões, consolidando os *insights* obtidos ao longo deste estudo.

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi a atualização e modernização do circuito de síntese de frequência do Brazilian Decimetric Array (BDA), permitindo a recuperação do instrumento e sua operacionalização, servindo para propósitos científicos e acadêmicos. O escopo deste trabalho abrangeu o subsistema da síntese de frequências. Na revisão bibliográfica e mapeamento do estado da arte relacionado aos temas de interesse foi possível identificar as alternativas tecnológicas para automação e instrumentação científicas aplicadas à Física e Astronomia e disponíveis, que subsidiaram a escolha, como disponibilidade no mercado (“itens de prateleiras”), código aberto, acessível, fácil de usar e altamente versátil, a ampla variedade de acessórios disponíveis e, um dos principais fatores, sua popularidade e comunidade ativa em todo o mundo, abrangendo desde entusiastas, estudantes, profissionais, pesquisadores e cientistas, levando à consolidação de uma vasta base de conhecimento, experiências e projetos compartilhados, além da possibilidade de integração a outros sistemas, mesmo os existentes (como no caso do BDA).

A coleta de informações do circuito original foi importante e permitiu identificar alguns *gaps*, como o registro em documentação dos procedimentos iniciais dos subsistemas, o que necessitou de um esforço da equipe do BDA para coletar informações do circuito original da síntese de frequências, como diagrama de ligações, sinais em cada ponto e outras informações cruciais para o desenvolvimento do projeto do novo circuito, assim como a determinação dos parâmetros a serem empregados e a obtenção de uma fórmula relacionando os parâmetros com a frequência desejada, que foi determinante para o desenvolvimento do *software*. Em sequência, foram efetuados o desenvolvimento do circuito eletrônico do protótipo da síntese de frequências e a implementação de *software* que foi embarcado no circuito. Na fase atual, estão sendo realizados testes funcionais e de integração do novo circuito ao sistema.

Os resultados obtidos neste trabalho foram satisfatórios, pois foi possível desenvolver um novo circuito de síntese de frequências compatível com o interferômetro rádio BDA e que pode substituir os circuitos originais, apresentando vantagens em relação a estes que podem ser destacadas como sendo mais modernos, atualizados e atualizáveis, robustos, flexíveis, ajustáveis e confiáveis.

Outras melhorias obtidas com o novo circuito são a maior eficiência energética (menor consumo elétrico) e os custos de implementação e reprodução menores.

A atualização e modernização do circuito de síntese de frequências do BDA é um importante passo para a continuidade do instrumento e das observações científicas. O novo circuito permitirá que o BDA seja utilizado em uma ampla gama de aplicações, incluindo a observação de fenômenos solares, galácticos e extragalácticos e estendendo a utilização do interferômetro rádio por um público mais amplo, incluindo pesquisadores e estudantes de diversas instituições, nacionais e internacionais.

O trabalho desenvolvido neste projeto contribui para o desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil, pois envolveu o emprego de novas tecnologias, 100% nacionais, com custo extremamente acessível. O trabalho também contribui para a divulgação e popularização da ciência, pois propicia a divulgação do BDA, que é um instrumento único no Brasil e um dos poucos no hemisfério Sul.

Como engenheiro eletrônico e mestrando em Física e Astronomia pude contribuir com conhecimentos em ambas as áreas, aproximando-as através dos projetos eletrônicos desenvolvidos para o interferômetro rádio BDA, que colaboraram para difusão de conhecimento, inclusive, com a participação, no ano de 2022, em setembro, na 45<sup>a</sup> Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira (XLV SAB). A equipe do BDA apresentou alguns de seus desenvolvimentos para o instrumento na forma de trabalhos submetidos, que são listados no APÊNDICE D.

Os objetivos pretendidos neste projeto de pesquisa foram alcançados e contribuíram para a recuperação e o desenvolvimento do instrumento. O novo circuito de síntese de frequências faz parte de um rol de atualizações que colocarão o BDA novamente 100% operacional, permitindo seu emprego nas observações originalmente pensadas para seu desenvolvimento e, até mesmo, novas utilizações que venham a ser estudadas e implementadas em trabalhos futuros. Baseado no sucesso do desenvolvimento deste novo circuito para o subsistema da síntese de frequência, sugere-se como trabalhos futuros a repetição deste procedimento para os demais subsistemas, com a conseqüente modernização de todo o instrumento, sendo este um projeto no qual pretendo me dedicar durante a realização do Doutorado.

## REFERÊNCIAS

- ASCHWANDEN, M. J.; BENZ, A. O. Chromospheric Evaporation and Decimetric Radio Emission in Solar Flares. **Astrophysical Journal**, v. 438, p. 997-1012, 1995.
- BASTIAN, T. S.; BENZ, A. O.; GARY, D. E. On the relationship between coronal mass ejections and type II radio bursts. II. The relation between the speed of the coronal mass ejection and the speed of the leading edge of the type II radio burst. **The Astrophysical Journal**, v. 498, n. 1, p. 840-849, 1998.
- BELL, D. A. **Electronic Instrumentation and Measurements**. Oxford: Oxford University Press, 2019.
- BELLM, E. C. *et al.* **The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Result**. **Astronomical Society of the Pacific**, v. 13, p. 1-19, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aaecbe>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- BENZ, A. O. **Plasma Astrophysics: Kinetic Processes in Solar and Stellar Coronae**. 2nd ed. v. 279 of Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht, Netherlands; Boston: Kluwer, 2002.
- BENZ, A. O. Flare Observations. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 14, n. 2, 2017.
- BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. **The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies**. New York; London: W. W. Norton: Company, 2014.
- BUZULUKOVA, N.; TSURUTANI, B. Space Weather: From Solar Origins to Risks and Hazards Evolving in Time. **Front. Astron. Space Sci.**, v. 9, 2022. doi: 10.3389/fspas.2022.1017103
- CECATTO, J. R. *et al.* Análise de Configurações Operacionais do Arranjo de Antenas do Interferômetro Brazilian Decimetric Array (BDA). *In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE ASTRONÔMICA BRASILEIRA*, 45., 2022. [s.l.]. **Anais...**, [s.l.], 2002. *Online*.
- CERUTTI, D. M. L. **CTS: Ciência, tecnologia e sociedade**. Ponta Grossa: UEPG/NUTEAD, 2017. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/176344>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- CONDON, J. J.; RANSOM, S. M. **Essential Radio Astronomy**. Charlottesville: Princeton University Press, 2016.
- OLIVEIRA, P. A. **Controlador PLL – Phase Locked Loop**. 2017. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/controlador-pll>. Acesso: em 31 maio 2022.
- COSTA, J. R. V. Skylab. **Astronomia no Zênite**, 2007. Disponível em: <https://www.zenite.nu/skylab>. Acesso em: 6 mar. 2023.

EUROPEAN COMMISSION *et al.* **Space weather & critical infrastructures: findings and outlook.** Publications Office. 2016. Disponível em: [doi/10.2788/152877](https://doi.org/10.2788/152877). Acesso em: 20 jun. 2023.

GRAINGE, K. *et al.* Square Kilometre Array: the Radio Telescope of the XXI Century. **Astronomy Reports**, v. 61, p. 288-296, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1134/S1063772917040059>. Acesso em: 20 jun. 2023.

GOPALSWAMY, N. *et al.* The relationship between solar flares and geomagnetic storms. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 22, p. 3289-3292, 1995.

GOPALSWAMY, N. *et al.* Anomalous expansion of coronal mass ejections during solar cycle 24 and its space weather implications. **Geophysical Research Letters**, v. 41, p. 2673–2680, 2014. doi:10.1002/2014GL059858.

GOPALSWAMY, N. *et al.* Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds during solar cycles 23 and 24, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 11, p. 9221–9245, 2015. doi:10.1002/2015JA021446.

GOPALSWAMY, N. History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship. **Geoscience Letters**, v. 3, n. 8, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40562-016-0039-2>.

HATHAWAY, D. H. The Solar Cycle. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 12, n. 1. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>. Acesso em: 15 mar.2023.

JING, J. *et al.* Nonpotentiality of Chromospheric Fibrils in NOAA Active Regions 11092 and 9661. **The Astrophysical Journal**, v. 739, p. 1- 8, 2011.

KAY, C. *et al.* Predicting the magnetic field of Earth-impacting CMEs. **The Astrophysical Journal**, v. 835, n. 117, p. 1-10, 2017. Doi 10.3847/1538-4357/835/2/117

LAGG, A. *et al.* Internetwork Horizontal Magnetic Fields in the Quiet Sun Chromosphere: Results from a Joint Hinode/VTT Study. *In: HINODE SCIENCE MEETING, 2., 2009. Proceedings...*, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009.

LYSENKO, A. *et al.* X-ray and Gamma-ray Emission of Solar Flares. **Phys. Usp.**, v. 63, p. 818–832, 2020. Disponível em: doi: 10.3367/UFNe.2019.06.038757. Acesso em: 29 mar. 2023.

MACHADO, T. C. *et al.* Upgrade of Frequency Synthesis Circuit of BDA (Brazilian Decimetric Array). *In: Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira*, v. 31, n. 1, p. 257-261, 2023.

MOORE, R. L. *et al.* Microwave observations of nonthermal electron acceleration and heating in solar flares. **The Astrophysical Journal**, v. 238, p. 348-365, 1980.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Handbook of Frequency Allocations and Spectrum Protection for Scientific Uses**. Washington, DC: The National Academies Press. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/11719>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2023.

NEURON ELETRÔNICA. **Receptor 1-6 GHz do “Brazilian Decimetric Array”**. [São José dos Campos]: [s.l.], 2009.

PEREGRINE SEMICONDUCTOR. **Product Specification: PEE3336: 3000 MHz UltraCMOS™ Integer-N PLL for Low Phase**. 2005. Disponível em: <https://www.psemi.com/wp-content/uploads/pdf/obs/pe3336ds.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2023.

PERLEY, R. A.; DREHER, J. W.; COWAN, J. J. The morphology of radio galaxies. **Astronomical Journal**, v. 98, n. 2, p. 1499-1509, 1989.

PICK, M.; GARY, G. A.; ZIRIN, H. The relationship between coronal mass ejections and type II radio bursts. **The Astrophysical Journal**, v. 356, n. 2, p. 673-685, 1990.

SAWANT, H. S. *et al.* **Brazilian Decimetric Array – BDA: O Primeiro Interferômetro Decimétrico da América Latina**, INPE-13051-RPQ/252. 2005.

SOLANKI, S. K.; KRIVOVA, N. A.; HAIGH, J. D. Solar irradiance variability and climate. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 51, p. 311-351, 2013.

SOUZA, K. L. R.; BAESSO, N. L. **Campanha de Determinações das Coordenadas das Antenas do BDA Utilizando GPS**. São José dos Campos: INPE, versão: 2016-01-22. 2016.

STOUPEL, E. *et al.* Clinical cosmobiology: distribution of deaths during 180 months and cosmophysical activity. The Lithuanian study, 1990-2004. The role of cosmic rays. **Medicina (Kaunas)**, v. 43, n. 10, p. 824-31, 2007. PMID: 17998801.

STURROCK, P. A. *et al.* Evaporation of the solar chromosphere. **The Astrophysical Journal**, v. 182, n. 2, p. 833-847, 1973.

USOSKIN, I. G. A History of Solar Activity Over Millennia. **Living Reviews in Solar Physics**, v.14, n. 3. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>. Acesso em: 15 mar. 2023.

VASCONCELOS, F. H.; SILVA, E. J.; BOAVENTURA, W. C. Instrumentação Eletrônica com Metrologia: Bases para uma Abordagem Integrada. **SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira De Automática**, v. 21, n. 6, p. 626-633, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-17592010000600008>. Acesso em: 10 fev. 2023.

## ANEXO A: LOCALIZAÇÃO DAS ANTENAS

Quadro 1: Coordenadas e altitudes das antenas.

<b>NÚMERO DA ANTENA</b>	<b>LATITUDE (em graus)</b>	<b>LONGITUDE (em graus)</b>	<b>ALTITUDE (em metros)</b>
1	-22,693.195.127	-45,002.856.653	5,412.584
2	-22,693.196.807	-45,003.207.801	5,403.425
3	-22,693.197.614	-45,003.382.071	5,402.522
4	-22,693.198.033	-45,003.557.126	5,401.806
5	-22,693.198.838	-45,003.733.149	5,402.187
6	-22,693.199.615	-45,003.820.553	5,402.477
7	-22,693.199.691	-45,003.908.558	5,402.056
8	-22,693.199.560	-45,003.995.779	5,403.355
9	-22,693.200.173	-45,004.083.382	5,402.408
10	-22,693.200.641	-45,004.170.895	5,403.140
11	-22,693.200.902	-45,004.258.339	5,402.496
12	-22,693.201.382	-45,004.346.030	5,403.396
13	-22,693.201.496	-45,004.433.633	5,402.583
14	-22,693.202.157	-45,004.608.647	5,402.795
15	-22,693.203.096	-45,004.784.103	5,402.233
16	-22,693.203.794	-45,004.959.149	5,403.136
17	-22,693.204.991	-45,005.309.114	5,402.745
18	-22,693.281.788	-45,004.082.964	5,401.935
19	-22,693.363.135	-45,004.082.807	5,401.606
20	-22,693.444.921	-45,004.081.954	5,402.849
21	-22,693.526.208	-45,004.081.824	5,403.265
22	-22,693.689.556	-45,004.081.164	5,403.086
23	-22,693.852.377	-45,004.080.397	5,402.011
24	-22,694.015.152	-45,004.079.414	5,403.444
25	-22,694.340.663	-45,004.078.102	5,402.981
26	-22,694.666.847	-45,004.076.538	5,403.174

Fonte: Baseada na Tabela 1 "Resultados da análise. Coordenadas no sistema de referência GRS80, equivalente ao WGS84", página 6, SOUSA (2016).

## ANEXO B: ALOCAÇÃO DE FREQUÊNCIAS ENTRE 1,0 E 3,0 GHZ

A maioria das fontes de rádio (como rádio galáxias, quasares e remanescentes de supernovas) possui um espectro característico não-térmico produzido pela emissão *sinrotron* de raios de elétrons relativísticos cósmicos movendo-se em campos magnéticos em escala galáctica. O Quadro 2 apresenta algumas frequências na faixa de 1,2 a 1,7 GHz, que é a banda do BDA. É uma versão simplificada e adaptada da Tabela 3.2 do **Handbook of Frequency Allocations and Spectrum Protection for Scientific Uses** (2007). A tabela original apresenta valores entre 1,3 e 2,7 GHz.

Quadro 2: Alocação de frequências entre 1,2 e 1,7 GHz.

Banda (MHz)	Uso Científico
1300-1350	Extragalactic HI, 5 recombination lines
1350-1400	Extragalactic HI, recombination lines
1400-1427	Galactic and local extragalactic HI, recombination lines, radio source spectra, galactic continuum
1559-1610	Extragalactic OH masers
1610-1610.6	Hidrogênio neutro presente nas nuvens interestelares
1610.6-1613.8	Linha espectral de água
1660-1660.5	Distribuição de hidrogênio neutro e a detecção de pulsares
1660.5-1668.4	Estudar química e dinâmica de gás molecular no espaço e física de alta energia, bem como detectar pulsares
1668.4-1670	Emissão de hidrogênio neutro HI
1670-1675	Emissão de hidrogênio neutro HI, transições moleculares, emissões de rádio de Júpiter e de pulsares
1690-1700	Emissões de galáxias ativas, nebulosas, pulsares, quasares e outros objetos celestes, além de radiação cósmica de fundo
1700-1710	Hidrogênio ionizado (estudar regiões de formação estelar) e Linhas de emissão moleculares (como CO e H <sub>2</sub> O)
1718.8-1722.2	ondas entre 18 e 18,3 cm (emissão de nuvens moleculares, densas de gás e poeira) e também para estudar emissão de NH <sub>3</sub> e CH <sub>3</sub> OH

Fonte: Baseada em National Research Council (2007, p. 46).

Em resumo, a faixa de frequência entre 1200 MHz e 1700 MHz é importante para a radioastronomia pois permite a observação de várias fontes importantes de

emissão de rádio no universo e pode ser utilizada para estudar diversos objetos e processos astrofísicos, incluindo a distribuição de gás nas galáxias, a presença de pulsares, a atividade de buracos negros supermassivos e a emissão de moléculas em nuvens moleculares, que são regiões densas de gás e poeira no espaço. Nesta faixa de frequência há várias observações importantes que podem ser feitas pela radioastronomia, incluindo as seguintes emissões:

- a. Hidrogênio neutro (HI), que são produzidas pelo hidrogênio neutro presente nas nuvens interestelares. O hidrogênio é um dos elementos mais abundantes no universo, por isso essa emissão é bastante comum e é usada para estudar a distribuição do gás nas galáxias.
- b. Pulsares, que são estrelas de nêutrons altamente magnetizadas que emitem pulsos regulares de ondas de rádio. A frequência de emissão desses pulsos está geralmente nesta faixa de rádio. São importantes para estudos de física de alta energia e relatividade geral.
- c. Galáxias ativas, como quasares e rádio galáxias, emitem ondas de rádio devido à presença de jatos de partículas altamente energéticas que são lançados pelos buracos negros supermassivos em seus centros.
- d. Meio interestelar, que contém diversas fontes emissoras de ondas de rádio, como poeira interestelar e gás ionizado
- e. Linha espectral de água, emitida pelas moléculas de água em regiões onde há formação de estrelas e planetas, incluindo nuvens moleculares, discos protoplanetários e regiões de choque de supernovas. Amplamente utilizada em estudos de radioastronomia para observações de moléculas de água no espaço interestelar. Além disso, também detectar sinais de vida extraterrestre, uma vez que a água é essencial para a vida como a conhecemos.
- f. Linha de hidrogênio neutro, uma das principais linhas espectrais emitidas pelo hidrogênio neutro presente no meio interestelar. Usadas para estudar a distribuição e a dinâmica do hidrogênio neutro no espaço interestelar, incluindo a detecção de regiões onde ocorre a formação de estrelas, de pulsares, que são estrelas de nêutrons altamente magnetizadas que emitem pulsos regulares de ondas de rádio.

- g. Moléculas de amônia ( $\text{NH}_3$ ) no espaço, usada para mapear a distribuição e a dinâmica do gás molecular em regiões de formação de estrelas e nuvens moleculares. Também detectar emissões de rádio de moléculas orgânicas complexas, como metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) e formaldeído ( $\text{H}_2\text{CO}$ ), que são importantes para o estudo da química orgânica no espaço.
- h. Outra aplicação da radioastronomia nessa faixa de frequência é a detecção de pulsares, que são estrelas de nêutrons altamente magnetizadas que emitem pulsos regulares de ondas de rádio. Os pulsares emitem sinais em uma ampla gama de frequências de rádio, incluindo a faixa de frequência de 1660 MHz a 1668,4 MHz, e são importantes para estudos de física de alta energia e relatividade geral.
- i. Observações das emissões de rádio do Sol e outros objetos do sistema solar, assim como para detectar sinais de origem extraterrestre, como as de galáxias e quasares distantes.
- j. Transições moleculares, como do metanol, do formaldeído e da amônia, para estudar a química e a dinâmica das nuvens moleculares no universo.
- k. Emissão de rádio de Júpiter, que emite sinais devido à interação de suas luas com seu campo magnético, permitindo uma melhor compreensão da atmosfera e do campo magnético.
- l. Radiação cósmica de fundo, que é uma forma de radiação eletromagnética emitida em todo o universo, principalmente como resultado do *Big Bang*, detectada em várias faixas de frequência. Embora tenha seu pico de emissão em torno de 160 GHz (cerca de 1,8 mm), também emite em várias outras faixas de frequência. Muito importante para entender as origens e a evolução do universo, assim como suas propriedades.
- m. Linhas de emissão moleculares: algumas moléculas, como o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), emitem radiação nesta faixa de frequência. Essas linhas de emissão moleculares são usadas para estudar a composição química de nuvens moleculares e outros processos astrofísicos. Em particular, detectar a linha espectral de hidroxila ( $\text{OH}$ ), molécula encontrada em nuvens moleculares e importante sonda do meio interestelar. Esta linha espectral é útil para estudar a dinâmica das nuvens moleculares, a formação de estrelas e a evolução química do meio interestelar. Outras moléculas, como amônia ( $\text{NH}_3$ )

e metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), que também são encontradas em nuvens moleculares e são importantes para entender a física e a química dessas regiões do espaço.

## APÊNDICE A: ROTINA EM MATLAB

A seguinte rotina foi desenvolvida para testar os valores possíveis para os Parâmetros A, M e R.

Rotina 1: Testes dos Valores para A, M e R.

```

%% CALCULO DE PARÂMETROS M, R, A PARA FREQUÊNCIAS ENTRE 1205MHz e 1705MHz
% Fin = frequência de operação (2040MHz a 2540MHz)
% f = frequência desejada (1205 MHz a 1705 MHz)
% Foi utilizado o datasheet do Peregrine PE3336 como referência

%frequencia de 10 MHz
fr = 10;

%indice do conjunto de soluções do problema. Por exemplo, x = 1 apresenta
%o primeiro conjunto A, M, R que são solução da equação
x = 1;

%indices de apoio
i = 1;
n = 1;

%Variando as frequências entre 1205MHz e 1705MHz de 5 em 5 MHz
for f = 1205:5:1705
    Fin = f-70+905; %frequencia de entrada na equação (freq. de operação)
    for m = 1:1:511 %intervalo baseado em PE3336
        for a = 0:1:9 %intervalo baseado em PE3336
            for r = 1:1:63 %intervalo baseado em PE3336
                F = (10*(m+1)+a)*(fr/(r+1));
                if F==Fin
                    A(i)=a;
                    M(i)=m;
                    R(i)=r;
                    i=i+1;
                end
            end
        end
    end
    %reset do indice "i" para nova frequência
    i = 1;
    %Apresentação da Matriz de Soluções
    S(n,:) = [Fin f A(x) M(x) R(x)];
    n=n+1;
end

%Matriz Solução [Fin f A(x) M(x) R(x)] para solução X
S

```

Fonte: Equipe do BDA (2022).

## APÊNDICE B: TABELA COM PARÂMETROS A, M E R

A Rotina 1, apresentada no APÊNDICE A, permitiu a confecção da Tabela 1, apresentada em seguida. Foi adotado o valor 1 para o parâmetro R.

Tabela 1: Parâmetros otimizados de A, M e R.

Frequência de Saída (MHz)	Frequência de Observação (MHz)	Frequência de Saída x 2 (MHz)	Parâmetros		
			A	M	R = 1
2040	<b>1205</b>	4080	8	39	
2045	<b>1210</b>	4090	9	39	
2050	<b>1215</b>	4100	0	40	
2055	<b>1220</b>	4110	1	40	
2060	<b>1225</b>	4120	2	40	
2065	<b>1230</b>	4130	3	40	
2070	<b>1235</b>	4140	4	40	
2075	<b>1240</b>	4150	5	40	
2080	<b>1245</b>	4160	6	40	
2085	<b>1250</b>	4170	7	40	
2090	<b>1255</b>	4180	8	40	
2095	<b>1260</b>	4190	9	40	
2100	<b>1265</b>	4200	0	41	
2105	<b>1270</b>	4210	1	41	
2110	<b>1275</b>	4220	2	41	
2115	<b>1280</b>	4230	3	41	
2120	<b>1285</b>	4240	4	41	
2125	<b>1290</b>	4250	5	41	
2130	<b>1295</b>	4260	6	41	
2135	<b>1300</b>	4270	7	41	
2140	<b>1305</b>	4280	8	41	
2145	<b>1310</b>	4290	9	41	
2150	<b>1315</b>	4300	0	42	
2155	<b>1320</b>	4310	1	42	
2160	<b>1325</b>	4320	2	42	
2165	<b>1330</b>	4330	3	42	
2170	<b>1335</b>	4340	4	42	
2175	<b>1340</b>	4350	5	42	
2180	<b>1345</b>	4360	6	42	
2185	<b>1350</b>	4370	7	42	
2190	<b>1355</b>	4380	8	42	
2195	<b>1360</b>	4390	9	42	

2200	<b>1365</b>	4400	0	43
2205	<b>1370</b>	4410	1	43
2210	<b>1375</b>	4420	2	43
2215	<b>1380</b>	4430	3	43
2220	<b>1385</b>	4440	4	43
2225	<b>1390</b>	4450	5	43
2230	<b>1395</b>	4460	6	43
2235	<b>1400</b>	4470	7	43
2240	<b>1405</b>	4480	8	43
2245	<b>1410</b>	4490	9	43
2250	<b>1415</b>	4500	0	44
2255	<b>1420</b>	4510	1	44
2260	<b>1425</b>	4520	2	44
2265	<b>1430</b>	4530	3	44
2270	<b>1435</b>	4540	4	44
2275	<b>1440</b>	4550	5	44
2280	<b>1445</b>	4560	6	44
2285	<b>1450</b>	4570	7	44
2290	<b>1455</b>	4580	8	44
2295	<b>1460</b>	4590	9	44
2300	<b>1465</b>	4600	0	45
2305	<b>1470</b>	4610	1	45
2310	<b>1475</b>	4620	2	45
2315	<b>1480</b>	4630	3	45
2320	<b>1485</b>	4640	4	45
2325	<b>1490</b>	4650	5	45
2330	<b>1495</b>	4660	6	45
2335	<b>1500</b>	4670	7	45
2340	<b>1505</b>	4680	8	45
2345	<b>1510</b>	4690	9	45
2350	<b>1515</b>	4700	0	46
2355	<b>1520</b>	4710	1	46
2360	<b>1525</b>	4720	2	46
2365	<b>1530</b>	4730	3	46
2370	<b>1535</b>	4740	4	46
2375	<b>1540</b>	4750	5	46
2380	<b>1545</b>	4760	6	46
2385	<b>1550</b>	4770	7	46
2390	<b>1555</b>	4780	8	46
2395	<b>1560</b>	4790	9	46
2400	<b>1565</b>	4800	0	47
2405	<b>1570</b>	4810	1	47
2410	<b>1575</b>	4820	2	47
2415	<b>1580</b>	4830	3	47
2420	<b>1585</b>	4840	4	47

2425	<b>1590</b>	4850	5	47
2430	<b>1595</b>	4860	6	47
2435	<b>1600</b>	4870	7	47
2440	<b>1605</b>	4880	8	47
2445	<b>1610</b>	4890	9	47
2450	<b>1615</b>	4900	0	48
2455	<b>1620</b>	4910	1	48
2460	<b>1625</b>	4920	2	48
2465	<b>1630</b>	4930	3	48
2470	<b>1635</b>	4940	4	48
2475	<b>1640</b>	4950	5	48
2480	<b>1645</b>	4960	6	48
2485	<b>1650</b>	4970	7	48
2490	<b>1655</b>	4980	8	48
2495	<b>1660</b>	4990	9	48
2500	<b>1665</b>	5000	0	49
2505	<b>1670</b>	5010	1	49
2510	<b>1675</b>	5020	2	49
2515	<b>1680</b>	5030	3	49
2520	<b>1685</b>	5040	4	49
2525	<b>1690</b>	5050	5	49
2530	<b>1695</b>	5060	6	49
2535	<b>1700</b>	5070	7	49
2540	<b>1705</b>	5080	8	49

Fonte: Equipe do BDA (2022).

Como existem vários conjuntos de parâmetros A, M e R que são soluções para as frequências, apenas a primeira solução para cada frequência foi apresentada nesta tabela.

## APÊNDICE C: SOFTWARE DA SÍNTESE DE FREQUÊNCIAS

Rotina 2: *Software* da síntese de frequências a ser embarcado.

```
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>

#define LE_1_pin 2 //LO2 2GHZ
#define LE_2_pin 3 //LO1 900MHZ
#define LD_pin 4
#define DATA_pin 5
#define CLK_pin 6
#define SELECT_pin 7

#define LE_pin 8
#define C1_pin 9
#define C2_pin 21 // Pino A7
#define C4_pin 18 // Pino A4
#define C8_pin 19 // Pino A5
#define C16_pin 20 // Pino A6

//Pinos de chaveamento dos reles*****
#define rele1 14 // Pino A0
#define rele2 15 // Pino A1
#define rele3 16 // Pino A2
int reles[3] = { rele1, rele2, rele3 };

//*****
//variaveis para leitura do sensor LM35
const int sensorPin = A3; //PINO ANALÓGICO UTILIZADO PELO SENSOR
//*****
// Enter a MAC address and IP address for your controller below.
// The IP address will be dependent on your local network:
byte mac[] = {
  0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };
IPAddress ip(192,168,0,102);

// Initialize the Ethernet server library
// with the IP address and port you want to use
// (port 80 is default for HTTP):
EthernetServer server(80);
EthernetServer tempserver(81);
unsigned long time;
bool led;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(115200);
  pinMode(CLK_pin,OUTPUT);
  pinMode(DATA_pin,OUTPUT);
  pinMode(LE_1_pin,OUTPUT);
  pinMode(LE_2_pin,OUTPUT);
  pinMode(LD_pin,OUTPUT);
  pinMode(SELECT_pin,OUTPUT);
  digitalWrite(CLK_pin,LOW);
  digitalWrite(DATA_pin,LOW);
  digitalWrite(LE_1_pin,HIGH);
  digitalWrite(LE_2_pin,HIGH);
  digitalWrite(LD_pin,LOW);
  digitalWrite(SELECT_pin,HIGH);
}
```

```

//*****Pinagem rele*****
pinMode(rele1,OUTPUT);
pinMode(rele2,OUTPUT);
pinMode(rele3,OUTPUT);

//*****
digitalWrite(rele1,HIGH);
digitalWrite(rele2,HIGH);
digitalWrite(rele3,HIGH);
pinMode(LE_pin,OUTPUT);
pinMode(C1_pin,OUTPUT);
pinMode(C2_pin,OUTPUT);
pinMode(C4_pin,OUTPUT);
pinMode(C8_pin,OUTPUT);
pinMode(C16_pin,OUTPUT);
digitalWrite(LE_pin,HIGH);
digitalWrite(C1_pin,HIGH);
digitalWrite(C2_pin,HIGH);
digitalWrite(C4_pin,HIGH);
digitalWrite(C8_pin,HIGH);
digitalWrite(C16_pin,HIGH);

pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
delay(1000);
atenuacao(0);
pll();
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
delay(1000);

// start the Ethernet connection and the server:
Ethernet.begin(mac, ip);
server.begin();
tempserver.begin();
Serial.print("server is at ");
Serial.println(Ethernet.localIP());

time = micros() + 1000000L;
led = false;
}

void loop() {

  if (micros() > time) {
    time += 1000000L;
    led = !led;
    digitalWrite(LED_BUILTIN, led ? HIGH : LOW);
  }

  String cmd;

  EthernetClient tempclient = tempserver.available();
  if (tempclient) {
    char c = tempclient.read();
    float temperatura = 0;
    for (int i=0; i<100; i++)
      temperatura += (analogRead(sensorPin) * 0.0048828125 * 100); //VARIÁVEL
    RECEBE A TEMPERATURA MEDIDA
    temperatura /= 100;
    tempserver.println(temperatura);
  }
}

```

```

EthernetClient client = server.available();
if (!client)
  return;
Serial.println("new client");

while (client.connected()) {
  if (!client.available())
    continue;
  char c = client.read();
  if (c != '\n') {
    cmd += c;
    continue;
  }
  Serial.println("received cmd: "+cmd);
  // cmd = Serial.readStringUntil('\n');
  cmd.trim();
  if (cmd == "")
    return;
  if (cmd == "pll") {
    Serial.println("OK - pll: "+cmd);
    server.println("OK - pll: "+cmd);
    pll();
  } else if (cmd.startsWith("on") && cmd.length() == 3) {
    int nrele = cmd[2] - '1';
    if (nrele >= 0 && nrele <= 2) {
      digitalWrite(reles[nrele], LOW);
      Serial.println("OK - rele: "+cmd);
      server.println("OK - rele: "+cmd);
    } else {
      Serial.println("?");
      server.println("?");
    }
  } else if (cmd.startsWith("off") && cmd.length() == 4) {
    int nrele = cmd[3] - '1';
    if (nrele >= 0 && nrele <= 3) {
      digitalWrite(reles[nrele], HIGH);
      Serial.println("OK - rele: "+cmd);
      server.println("OK - rele: "+cmd);
    } else {
      Serial.println("?");
      server.println("?");
    }
  } else {
    long att = cmd.toInt();
    atenuacao(att);
    Serial.println("OK - att: "+cmd);
    server.println("OK - att: "+cmd);
  }
  cmd = "";
}

void pll()
{
  const unsigned long pll_1_prog = 0x0C2CA;
  const unsigned long pll_2_prog = 0x20A80;
  digitalWrite(LE_2_pin, LOW);
  send(pll_1_prog);
  delay (2);
  digitalWrite(LE_2_pin, HIGH);
  delay (2);
}

```

```

digitalWrite (LE_2_pin, LOW);
delay (2);
digitalWrite (LE_2_pin, HIGH);
digitalWrite (LE_1_pin, LOW);
send (pll_2_prog);
delay (2);
digitalWrite (LE_1_pin, HIGH);
delay (2);
digitalWrite (LE_1_pin, LOW);
delay (2);
digitalWrite (LE_1_pin, HIGH);
delay (2);
}

void send(unsigned long prog)
{
  const int dly = 2; // milisegundos
  for (int i = 0; i < 20; i++) {
    int b = prog & 1;
    digitalWrite (DATA_pin, (b==1) ? HIGH : LOW);
    delay (dly);
    digitalWrite (CLK_pin, HIGH);
    delay (dly);
    digitalWrite (CLK_pin, LOW);
    prog >>= 1;
  }
  digitalWrite (DATA_pin, LOW);
}

void atenuacao(int att)
{
  digitalWrite (C1_pin, bitRead (att, 0));
  digitalWrite (C2_pin, bitRead (att, 1));
  digitalWrite (C4_pin, bitRead (att, 2));
  digitalWrite (C8_pin, bitRead (att, 3));
  digitalWrite (C16_pin, bitRead (att, 4));
  delay (100);
  digitalWrite (LE_pin, HIGH);
  delay (100);
  digitalWrite (LE_pin, LOW);
}

```

## APÊNDICE D: TRABALHOS APRESENTADOS

Os esforços empregados para esta atualização e modernização do circuito de síntese de frequência do BDA e demais aprimoramentos efetuados no instrumento originaram de alguns trabalhos que foram apresentados XLV SAB (45ª Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira), em setembro de 2022, listados no Quadro 3.

Quadro 3: Trabalhos apresentados na XLV Reunião da SAB.

Data	Tipo	Título	Autores
26/09/2022	Apresentação Oral	Desenvolvimento de automatização da síntese de frequência do Brazilian Decimetric Array (BDA)	Telmo Claudinei Machado <sup>3,4</sup> Khristhiano Souza <sup>5</sup> Cesar Strauss <sup>3</sup> Matheus de Carvalho Abelha <sup>3,6</sup> José Roberto Cecatto
26/09/2022	Poster	Projeto de Correlacionador para o Interferômetro BDA	Cesar Strauss <sup>3</sup> José Roberto Cecatto <sup>3</sup> Telmo Claudinei Machado <sup>3,4</sup> Khristhiano Souza <sup>5</sup> Matheus de Carvalho Abelha <sup>3,6</sup>
29/09/2022	Apresentação Oral	Análise de configurações operacionais do arranjo de antenas do interferômetro Brazilian Decimetric Array (BDA)	José Roberto Cecatto <sup>3</sup> Khristhiano Souza <sup>5</sup> Cesar Strauss <sup>3</sup> Telmo Claudinei Machado <sup>3,4</sup> Matheus de Carvalho Abelha <sup>3,6</sup>

Fonte: O Autor.

Além desses trabalhos, também foram submetidos os *papers* **Upgrade of Frequency Synthesis Circuit of BDA (Brazilian Decimetric Array)** (Machado *et al.*, 2023), tendo como autor e coautores os membros da equipe deste projeto, a saber, Telmo Machado<sup>3,4</sup>, Khristhiano Souza<sup>5</sup>, Cesar Strauss<sup>3</sup>, Matheus Abelha<sup>3,6</sup> & J. R. Cecatto<sup>3</sup>, e **Comparison with a Hypothetical Array Extension**, tendo como autor e coautores J. R. Cecatto<sup>3</sup>, Cesar Strauss<sup>3</sup>, Khristhiano Souza<sup>5</sup>, Telmo Machado<sup>3,4</sup> & Matheus Abelha<sup>3,6</sup> a serem publicados no Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira, 31, 2023.

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>4</sup>Universidade do Vale do Paraíba – Univap, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>5</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

<sup>6</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo horizonte, MG, Brasil