



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RENAN ARYEL FERNANDES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE RADIOTELESCÓPIO DE 93,9 CM DE
ABERTURA EFETIVA, PARA OBSERVAÇÃO SOLAR ENTRE 10 E 12
GHZ**

Campo Grande - MS

03 de agosto de 2020



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



RENAN ARYEL FERNANDES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE RADIOTELESCÓPIO DE 93,9 CM DE
ABERTURA EFETIVA, PARA OBSERVAÇÃO SOLAR ENTRE 10 E 12
GHZ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência para obtenção do grau de
Bacharelado em Engenharia Elétrica da Uni-
versidade Federal de Mato Grosso do Sul –
UFMS.

Orientador: Cristiano Quevedo Andrea
Co-orientador: Hamilton Perez Soares Corrêa

Campo Grande - MS

03 de agosto de 2020

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Renan Aryel Fernandes da Silva, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado de Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 001.611.038, SEJUSP-MS e CPF nº 031.047.331-47, declaro que o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado, com o título “Desenvolvimento de Radiotelescópio de 93,9 cm de abertura efetiva, para observação solar entre 10 e 12 GHz” é de minha autoria, com a orientação do Prof. Dr. Cristiano Quevedo Andrea e co-orientação do Prof. Dr. Hamilton Perez Soares Corrêa. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este texto não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 03 de agosto de 2020

Renan Aryel Fernandes da Silva
RGA 2009.2103.021-8
Curso de Engenharia Elétrica - UFMS

*“Se não existe vida fora da
Terra, então o universo é um
grande desperdício de espaço.”*

Carl Edward Sagan

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço aos meus pais, Antonio da Silva e Santa Livrada, pessoas inspiradoras de origem humilde e que acreditam ser a educação a maior herança que se possa deixar aos filhos, por todo apoio e esforço empreendido ao longo de toda a minha fase escolar.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Cristiano Quevedo Andrea, por ter aceitado me orientar nesse trabalho e possibilitar aprimorar em muito esse radiotelescópio.

Agradeço à equipe do Programa de Extensão Casa de Ciência e Cultura de Campo Grande, por fornecerem acesso a espaços técnicos e fomentarem a existência de um ambiente plural, para que os acadêmicos aprendessem a trabalhar em equipe e desenvolvessem projetos impactantes na sociedade. Agradeço à prof^a. Isabela Porto Cavalcante, à Prof^a. Dorotéia de Fátima Bozano e em especial ao Prof. Hamilton Perez Soares Corrêa, meu co-orientador, que sempre apoiou, acreditou em mim, e me incentivou a desenvolver atividades ao longo de todos os anos de faculdade. Também agradeço ao Rafael Nadai e ao Renato Ferreira pela amizade, confiança e apoio nesses anos.

Agradeço aos companheiros e amigos do Clube de Astronomia Carl Sagan e Laboratório de Radioastronomia Amadora (LARA). Sem dúvida, levarei ótimas lembranças e aprendizados valiosos dos projetos que desenvolvemos.

Agradeço aos companheiros do Rotaract Club de Campo Grande, pelas muitas experiências proporcionadas nos projetos voluntários que tivemos a oportunidade de trabalhar. Também agradeço ao Thales, ao Giacomo e a Mariá pela amizade e confiança em mim depositadas.

Agradeço aos professores do curso, com os quais tive a oportunidade de aprender os mais complexos conceitos da Engenharia Elétrica, e também aos demais funcionários que contribuem para o funcionamento dessa grande instituição pública, a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Por fim, agradeço enormemente ao apoio dos muitos amigos feitos ao longo destes anos, pessoas que a seu modo, me inspiraram a continuar, aconselharam e me possibilitaram ter novas perspectivas a respeito da vida. Um abraço especial para o Leandro Boeira, a Evelyn Gaspar, a Taís Turaça e o Sandys Nunes. Poderia citar muitos nomes, mas tenho medo de esquecer alguém importante, portanto, pretendo por meio da nossa amizade, esboçar a gratidão que sinto por vocês ao longo dos anos que estão a nossa frente.

RESUMO

Este trabalho descreve o projeto de um circuito de filtragem e condicionamento para sinais na faixa de frequência de 950 MHz a 2150 MHz. O equipamento também foi pensado para que sirva de ferramenta didática, permitindo que as pessoas reproduzam o projeto, e, assim, tenham contato com conceitos de eletrônica, física e radioastronomia. Contribuindo, dessa maneira, na melhor compreensão do mundo que nos cerca. No projeto é proposto um sistema de observação solar, constituído por antena, filtragem, amplificação e análise por meio de Arduino. O projeto é uma proposta de aprimoramento de um radiotelescópio de baixa resolução, construído com base em equipamentos comerciais usados para realizar apontamento de antenas. No sistema de filtragem foi projetado um dispositivo passa-faixa utilizando Amplificadores operacionais (Amp. Op.), resistores e capacitores. O Arduino compõe o projeto como uma solução *open source hardware*, executando a tarefa de conversão A/D e análise dos dados provenientes do sol, captados, filtrados e amplificados pelo sistema desenvolvido neste trabalho.

Palavras-chave: Radioastronomia, Radiotelescópio, Clima Espacial, Filtro Passa-Faixa, Arduino.

ABSTRACT

This work describes the design of a filtering and conditioning circuit for signals in the frequency range from 950 MHz to 2150 MHz. The equipment was also designed to serve as a teaching tool, allowing people to reproduce the project, and thus have contact with electronics, physics and radio astronomy concepts. Thus contributing to a better understanding of the world around us. In the project, a solar observation system is proposed, consisting of antenna, filtering, amplification and analysis by means of Arduino. The project is a proposal to improve a low-resolution radio telescope, built on the basis of commercial equipment used to perform antenna pointing. In the filtration system, a bandpass device was designed using Operational Amplifiers (Op. Amp.), Resistors and capacitors. Arduino composes the project as an open source hardware solution, performing the task of A / D conversion and analysis of data from the sun, captured, filtered and amplified by the system developed in this work.

Keywords: Radio Astronomy, Radio Telescope, Space Weather, Bandpass Filter. Arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Réplica da antena usada por Jansky, no Observatório Green Bank . . .	11
Figura 2 – Espectro eletromagnético.	12
Figura 3 – Transparência da atmosfera para diferentes comprimentos de onda. . .	13
Figura 4 – Resposta em frequência de filtros: (a) passa-baixa, (b) passa-alta, (c) passa-faixa, (d) rejeita-faixa, (e) e (f) passa-tudo.	19
Figura 5 – Sinal $v(t)$. Obtido usando o <i>software</i> MATLAB.	20
Figura 6 – Sinais analisados: (a) sinal $v_1(t) = 0,8sen(t)$ e (b) sinal de saída do filtro passa-baixa para a entrada $v(t)$. Obtido usando o <i>software</i> MATLAB. .	21
Figura 7 – Sinais analisados: (a) sinal $v_2(t) = 0,5sen(40t)$ e (b) sinal de saída do filtro passa-faixa para a entrada $v(t)$. Obtido usando o <i>software</i> MATLAB.	22
Figura 8 – Sinais analisados: (a) sinal $v_3(t) = 0,2sen(100t + \phi)$ e (b) sinal de saída do filtro passa-alta para a entrada $v(t)$. Obtido usando o <i>software</i> MATLAB.	23
Figura 9 – Diferenciador eletrônico. Obtido usando o <i>software</i> Qucs	23
Figura 10 – Diagrama de Bode do diferenciador. Obtido usando o <i>software</i> MATLAB. .	24
Figura 11 – Integrador eletrônico. Obtido usando o <i>software</i> Qucs.	24
Figura 12 – Diagrama de Bode do integrador. Obtido usando o <i>software</i> MATLAB. .	25
Figura 13 – Integrador eletrônico não inversor. Obtido usando o <i>software</i> Qucs. . .	26
Figura 14 – Filtro passa-faixa. Obtido usando o <i>software</i> Qucs.	26
Figura 15 – Diagrama de Bode do filtro passa-faixa. Obtido usando o <i>software</i> MATLAB.	28
Figura 16 – Filtro KRC. Obtido usando o <i>software</i> Qucs.	29
Figura 17 – Filtro KRC passa-faixa. Obtido usando o <i>software</i> Qucs.	29
Figura 18 – Filtro passa-faixa com múltipla realimentação. Obtido usando o <i>software</i> Qucs.	31
Figura 19 – Diagrama do sistema completo.	32
Figura 20 – Configuração da antena: (a) antena de prato offset, (b) fixação da estrutura de apoio do prato, (c) antena montada e (d) detalhe da conexão do LNB com o cabo coaxial.	33
Figura 21 – Circuito condicionador. Obtido usando o <i>software</i> Qucs.	35
Figura 22 – Circuito completo. Obtido com ambiente de trabalho Simulink. . . .	37
Figura 23 – Blocos para simular o sinal do LNB. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.	38
Figura 24 – Sinais simulados: (a) vindo da antena e (b) ruído de alta frequência. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.	38

Figura 25 – (a) Blocos para somar os sinais e enviar a FI com ruídos ao filtro e (b) sinal distorcido recebido na entrada do filtro. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.	39
Figura 26 – (a) Sinal de saída do filtro passa-faixa e (b) comparação do sinal de entrada ruidoso com o sinal filtrado. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.	40
Figura 27 – Filtro e circuito de condicionamento. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.	41
Figura 28 – Sinal enviado ao Arduino. Obtido com ambiente de trabalho Simulink .	41
Figura 29 – LNB e detalhes: (a) diagrama do circuito de um LNB, (b) Satellite Finder e (c) Detalhe da extração do sinal desejado, a fita preta indica o terminal de referência a ser ligado no ground do Arduino.	43
Figura 30 – Fonte e conexões: (a) alimentação do SatFinder ajustada em 15 V, (b)ligação dos terminais de alimentação do SatFinder e (c) conexão dos cabos da fonte com o cabo coaxial do SatFinder.	44
Figura 31 – Funduino MEGA 2560, a cor vermelha indica que o terminal positivo deve ser ligado na porta A0 da placa, a verde indica a ligação da referência GND.	45
Figura 32 – Vista geral do sistema de aquisição de dados do radiotelescópio montado sobre bancada.	46
Figura 33 – Registro da passagem do Sol em 18 de dezembro de 2018.	48
Figura 34 – Ajuste dos dados.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do filtro passa-faixa.	27
Tabela 2 – Parâmetros do filtro passa-faixa.	34
Tabela 3 – Parâmetros do filtro passa-faixa KRC.	34
Tabela 4 – Parâmetros do circuito.	35
Tabela 5 – Hardware e <i>Software</i> Necessários.	53

SUMÁRIO

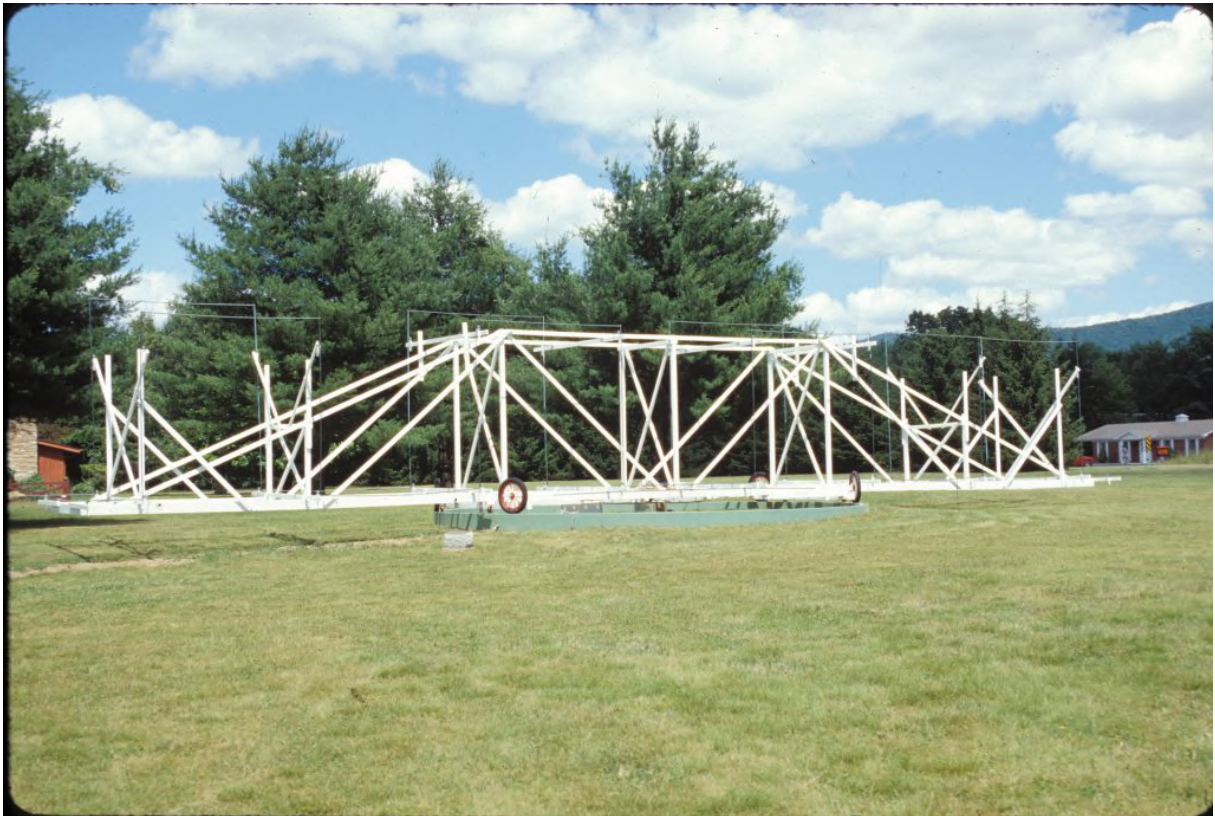
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	METODOLOGIA	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Sistema de Filtragem	18
3.1.1	Filtro	18
3.1.1.1	Respostas em Frequência	18
3.1.1.2	Filtro Ativo	21
3.1.1.2.1	O Diferenciador	22
3.1.1.2.2	O Integrador	24
3.1.1.3	Filtro Passa-Faixa	26
3.1.1.4	Filtro Passa-Faixa KRC	28
3.1.1.5	Filtro Passa-Faixa com Múltipla Realimentação	30
4	DESENVOLVIMENTO DO RADIOTELESCÓPIO DE 93,9 CM DE ABERTURA EFETIVA	32
4.1	Recepção de Sinal	32
4.2	Filtragem e Amplificação	33
4.2.1	Projeto com Amp. Op.	34
4.2.1.1	Filtro Passa-Faixa	34
4.2.1.2	Filtro Passa-Faixa KRC	34
4.2.1.3	Filtro Passa-Faixa com Múltiplas Realimentações	35
4.2.1.4	Circuito Condicionador	35
4.2.1.5	Simulação e Resultados	36
4.2.2	Projeto com o Dispositivo de Apontamento de Antenas (<i>Sat- finder</i>)	42
4.3	Conversão A/D	45
4.4	Processamento dos Dados	46
4.5	Apontamento da Antena	46
4.6	Teste de Observação	47
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51

A	- LISTA DE MATERIAIS	53
B	- CÓDIGO PARA PLACA FUNDUINO MEGA 2560	54

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da radioastronomia por volta de 1930, esse ramo da astronomia cresceu e se estabeleceu como grande área de pesquisa científica. Os engenheiros Karl Jansky e Grote Reber são considerados pioneiros na radioastronomia, por serem os primeiros a compreenderem que a origem das interferências de rádio, até então inexplicáveis, observadas nas telecomunicações, era o espaço.

Figura 1 – Réplica da antena usada por Jansky, no Observatório Green Bank

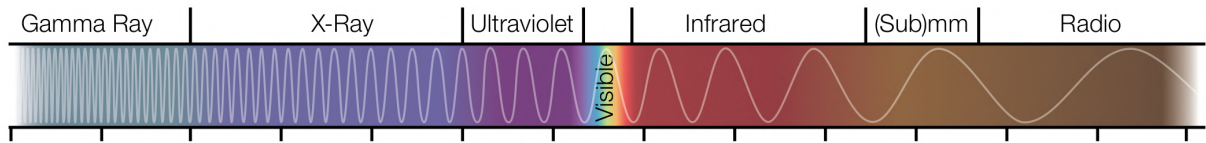


Fonte: NRAO/AUI/NSF

Jansky e Reber foram responsáveis por identificar algumas fontes de rádio e confirmar a forte emissão em 20,5 MHz proveniente do centro da galáxia, a Via Láctea, na direção da constelação de Sagitário, hoje tida como oriunda da influência de um grande buraco negro existente em seu centro (BAGANOFF et al., 2003). Tem início, dessa forma, um estudo criterioso sobre a natureza das emissões que chegavam à Terra (AQUINO, 2013).

O espectro eletromagnético se revelou como algo muito além do que o olho humano é capaz de perceber (Figura 2). Abaixo do vermelho existem as faixas do infravermelho, das micro-ondas e do rádio. A atmosfera da Terra limita os baixos comprimentos de onda, as radiações Gama, Raios X e uma parte do Ultravioleta (Figura 3), devido à absorção pela ionosfera (MILLER, 1998).

Figura 2 – Espectro eletromagnético.

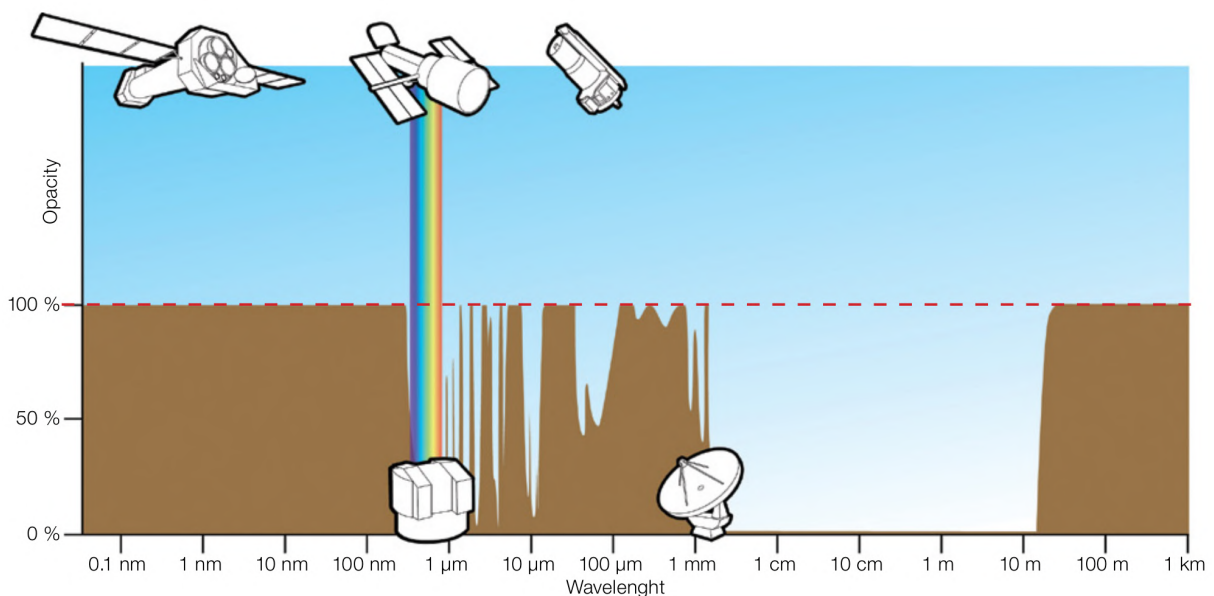


Fonte: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

Na luz visível há uma janela muito usada para observação por telescópios ópticos. Já na região do infravermelho, ocorrem variações na opacidade da atmosfera, sendo necessário que alguns mapeamentos e estudos sejam realizados por equipamentos na órbita da Terra, como por exemplo o Observatório Espacial Herschel (ESA, 2019).

A Janela do Rádio corresponde aos comprimentos de onda de aproximadamente 100 m até cerca de 1 mm (5 MHz a mais de 300 GHz), além dessa janela ocorre limitação devido à atenuação do sinal causada pelo vapor de água e dióxido de carbono na atmosfera. Para a astronomia, que até o século XIX era altamente dependente das boas condições atmosféricas para realizar observações, uma grande fronteira se abriu, pois na Janela do Rádio existe um amplo espectro ao qual a atmosfera é transparente, possibilitando dessa maneira o desenvolvimento de uma grande quantidade de estudos, sem a necessidade de colocar um equipamento em órbita da Terra.

Figura 3 – Transparência da atmosfera para diferentes comprimentos de onda.



Fonte: ESA/Hubble (F. Granato)

A importância da radioastronomia é evidenciada, por exemplo, no trabalho de Silva (SILVA, 2010), que apresenta o resultado da observação do Sol no dia 15 de julho de 2010. Nele podemos ver uma comparação entre observações do Radioheliógrafo de Nobeyama,

no Japão, na radiofrequência de 17 GHz e do Observatório Solar Culgoora, na Austrália, utilizando comprimento de onda da luz visível.

Nos resultados de imageamento por rádio, há uma região mais clara bastante evidente que indica uma mancha solar, um fenômeno altamente energético capaz de causar danos e interferência eletromagnética em equipamentos no espaço, redes de comunicação GPS e linhas de transmissão de energia elétrica. Esses fenômenos também são um perigo para os astronautas em órbita da Terra, que ficariam expostos a quantidades alarmantes de radiação (NASA, 2009).

Nos últimos 200 anos, há registros de grandes eventos de atividade solar. No ano de 1859, há o registro conhecido como *Evento Carrington*, durante os dias 28 de agosto e 04 de setembro, em que se observou em vários locais do mundo o aparecimento de auroras boreais e austrais visíveis por vários dias. Em cidades como Havana, na América Central, e Santiago no Chile, um espetáculo de cores foi visto no céu noturno.

Na época, embora não existisse a rede mundial de computadores, o sistema de telégrafo, que já era amplamente utilizado, foi afetado. Segundo o jornal *Philadelphia Evening Bulletin*, várias mensagens ilegíveis eram recebidas pelos operadores nos escritórios do telégrafo durante aquelas noites na cidade de Filadélfia (EUA).

Cerca de 62 anos depois, em maio de 1921, também foi registrada uma tempestade solar de grande intensidade. Diversos informes veiculados por jornais e publicações científicas como a revista *Nature*, tanto no EUA quanto na Europa, registraram falha nas redes de telégrafo, incidentes com alto grau de risco envolvendo a perda de comutação de trilhos ferroviários, e o aparecimento de auroras boreais visíveis no zênite, sobre a cidade de Pasadena (EUA) (SOLARSTORMS.ORG, 1921).

Apesar desses dois eventos terem sido notáveis, o que causou grande impacto econômico, com prejuízos estimados em dezenas de milhões de dólares, foi a tempestade de março de 1989, na qual a companhia canadense *Hydro-Québec*, responsável pelo abastecimento de energia elétrica no Canadá, sofreu um grande blecaute de 9 horas devido ao colapso das redes de transmissão, em função dos efeitos de uma grande tempestade solar (HYDRO-QUÉBEC, 1989).

Numa sociedade em constante desenvolvimento, com moderna infraestrutura tecnológica e dependente de sistemas de comunicação via satélite, é vital que os eventos que alteram o clima espacial sejam compreendidos e previstos. Com estudos dependentes apenas do espectro visível seria difícil detectar as manchas solares. E assim, grandes tempestades, como as do *Evento Carrington* e as de 1921, poriam em sério risco o abastecimento de energia elétrica, hoje cada vez mais vital para a vida humana, além da perda de comunicação de rádio e GPS (do inglês, *Global Positioning System*) em aviões e naves espaciais, que poderia causar grandes desastres aéreos. Em uma sociedade cada vez mais conectada, o mundo como conhecemos poderia vir a se tornar um caos (COUNCIL, 2009).

A partir desse cenário, apresentamos neste trabalho um projeto de um sistema de observação solar, por meio de captação de sinal utilizando uma antena do tipo *offset*. No projeto, realizou-se um sistema de filtragem do sinal oriundo da antena, bem como amplificação do mesmo para níveis compatíveis com o Arduino. O projeto será implementado num dispositivo didático que foi desenvolvido para aplicar conceitos de eletromagnetismo na astronomia, mais especificamente a radioastronomia.

O sistema desenvolvido não apresenta a montagem do sistema de filtragem, o qual tem a função de melhorar a qualidade dos sinais provenientes da antena para o Arduino. Deste modo, o sistema de filtragem foi simulado.

O equipamento consiste de um sistema de captação e armazenamento de dados das emissões na faixa de frequência de operação da antena, 10 a 12 GHz. Na implementação, foram utilizados equipamentos comerciais, tecnologias *open source hardware* para prototipagem baseadas em Arduino (ARDUINO, 2018) e ainda, linguagem Python. Embora o equipamento não permita realizar o monitoramento de manchas solares, no atual estágio de desenvolvimento do sistema, apresentamos uma promissora captação de radiação do Sol em radiofrequência.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de um sistema de observação solar, entre 10 GHz e 12 GHz, com filtragem e amplificação de sinal para implementação de análises em Arduino, operando entre 950 MHz e 2150 MHz.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar o porquê da importância do monitoramento do clima espacial, em especial das atividades solares, por meio da radioastronomia com base no histórico de eventos marcantes causados por explosões solares de grande magnitude;
- Revisar a teoria a respeito de filtros ativos com amplificador operacional;
- Apresentar um projeto replicável de aquisição de dados das emissões solares, na faixa de frequência de 10 a 12 GHz;
- Projetar um circuito de filtragem e condicionamento, operando entre 950 MHz e 2150 MHz;
- Realizar simulação do funcionamento do circuito com filtragem de ruído.

2 METODOLOGIA

O sistema de observação desenvolvido é composto por uma antena, sistemas de filtragem e amplificação, e análise de dados via Arduino. A seguir, as etapas desenvolvidas a pesquisa:

Etapa 1: Introdução, tendo como motivação, a história dos primórdios da radioastronomia e dos grandes eventos registrados que ocorreram na Terra em decorrência da atividade solar.

Etapa 2: Revisão bibliográfica sobre o filtro ativo e apresentação das topologias mais comuns.

Etapa 3: Desenvolvimento do sistema de captação baseado na literatura existente. Foram utilizados equipamentos comerciais, porém, com a inovação do uso de Arduino para otimizar e facilitar a replicabilidade do projeto.

Etapa 4: Desenvolvimento de um sistema de amplificação específico otimizado. A magnitude do sinal oriundo da antena foi condicionada para níveis compatíveis com o Arduino. Neste projeto utilizou-se Amp. Op., resistores e capacitores. Para a filtragem foi considerado um filtro passa-faixa, com frequência de corte de acordo com a Frequência Intermediária de transmissão da antena superior de 2150 Mhz e inferior de 950 MHz.

Etapa 5: Simulação do sistema com antena, filtragem e amplificação.

Etapa 6: Documentação do trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistema de Filtragem

Neste trabalho é abordado uma análise sobre a interferência do clima espacial para sistemas de comunicação. Então, é realizado um estudo de caso no qual, a radiação solar atinge uma antena, e o sinal desta observação é captado por um sistema de filtragem. Neste contexto, o sinal proveniente da estrutura de captação da antena é ruidoso, o que não é adequado para ser analisado, sendo assim, utiliza-se um filtro passa-faixa. Tal dispositivo, o filtro ativo, opera com a frequência de corte de 950 a 2150 MHz, que será descrito nesta seção.

3.1.1 Filtro

Um filtro é um circuito que processa sinais em uma determinada frequência. Neste caso, cada filtro possui a característica de amplificar ou atenuar, ou ainda, causar defasagem no sinal de saída em relação a entrada. Este comportamento é denominado de resposta em frequência. Em outras palavras, a função de transferência de um filtro $H(j\omega)$, sendo $\omega = 2\pi f$, tem variação de módulo e fase conforme varia a frequência do sinal de entrada do mesmo. A resposta de magnitude do filtro em função da frequência pode ser representado por $|H(j\omega)|$ e a resposta do ângulo em função da variação da frequência por $\angle H(j)$. O gráfico que permite a análise de magnitude em dB (Decibel) e fase em graus é o diagrama de Bode (NISE, 2017).

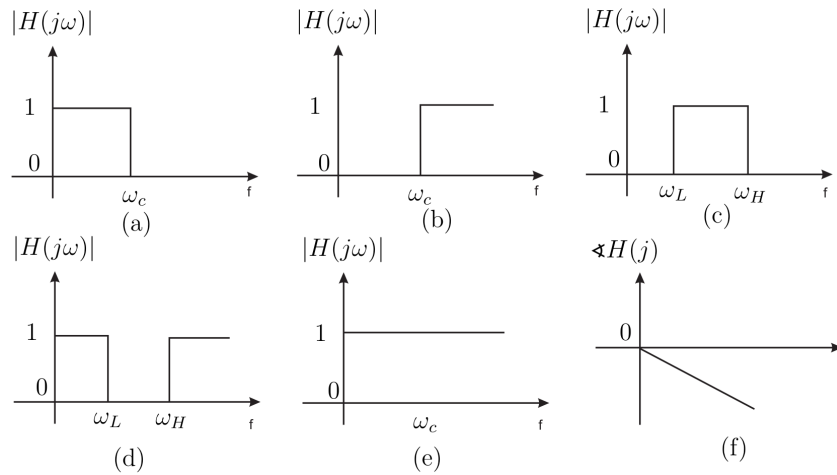
3.1.1.1 Respostas em Frequência

Analisando-se a resposta em frequência de magnitude dos filtros, estes circuitos podem ser classificados como: passa-baixa, passa-faixa, passa-alta, rejeita faixa e passa-tudo. A Figura 4 ilustra a resposta em frequência de magnitude dos filtros citados anteriormente. Considera-se que os filtros são ideais para análise de sistemas de filtragem.

O filtro passa-baixa, cuja resposta da magnitude em função da frequência é ilustrada na Figura 4(a), tem a frequência de corte ω_c . Para este filtro tem-se $|H(j\omega)| = 1$ para $\omega < \omega_c$ e $|H(j\omega)| = 0$ para $\omega > \omega_c$. Então, para este filtro, se forem aplicados sinais com frequências menores que ω_c , não ocorre mudança na amplitude do mesmo na saída do filtro. Mas, para sinais com frequência acima de ω_c existe a atenuação do mesmo. Uma aplicação muito comum do filtro passa-baixa é a sua utilização em sensoriamento de circuitos com ruídos de alta frequência. Outra aplicação é na filtragem de sinal de saída em sistemas de controle com realimentação e utilização do controle PID. A ação derivativa amplifica distúrbios de alta frequência (FRANCO, 2002).

O filtro passa-alta tem análise complementar ao filtro passa-baixa. Então, sinais com frequência maior que ω_c tem ganho unitário, enquanto sinais com frequência abaixo

Figura 4 – Resposta em frequência de filtros: (a) passa-baixa, (b) passa-alta, (c) passa-faixa, (d) rejeita-faixa, (e) e (f) passa-tudo.



Fonte: Autor.

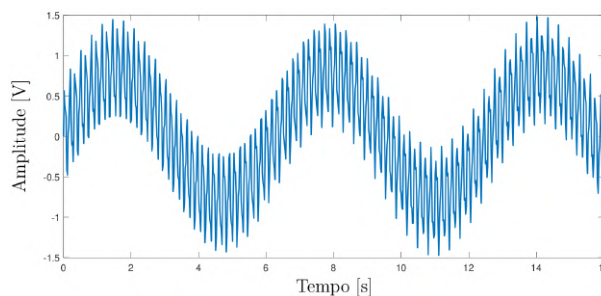
de ω_c são atenuadas. Para o filtro passa-faixa (passa-banda), o qual é utilizado neste trabalho, tem-se que sinais com frequência $\omega_L < \omega < \omega_H$ tem ganho unitário e sinais com frequência fora desta faixa são atenuados. Pode-se observar a utilização de filtros passa-faixa em sistemas de sintonia de rádio.

O filtro rejeita faixa tem análise complementar ao filtro passa-faixa. Para este filtro, sinais com frequência $\omega_L < \omega < \omega_H$ são atenuados e sinais com frequência fora desta faixa tem ganho unitário. Na Figura 4(f) aborda-se o filtro passa-tudo. Este filtro tem ganho unitário para todo o espectro de frequência, entretanto causa defasagem angular entre a saída do filtro e sua entrada. Por esta característica o filtro passa-tudo é denominado de filtro de atraso.

Considere o seguinte sinal contínuo no tempo,

$$v(t) = 0,8\text{sen}(t) + 0,5\text{sen}(40t) + 0,2\text{sen}(100t)[V] \quad (1)$$

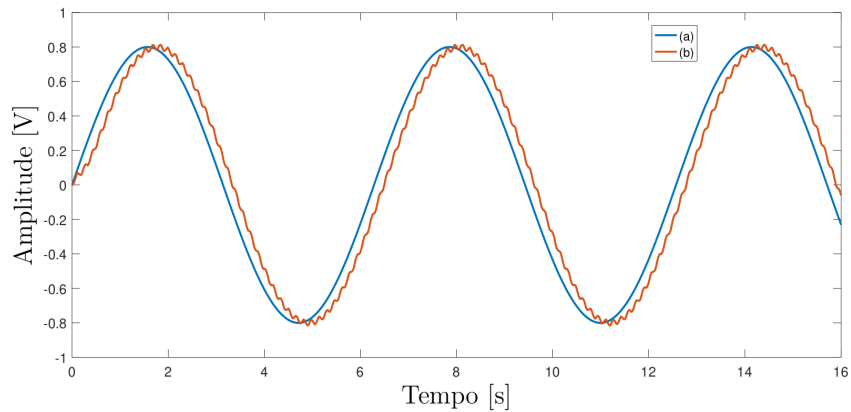
Figura 5 – Sinal $v(t)$. Obtido usando o *software* MATLAB.



Fonte: Autor.

A Figura 5 ilustra o sinal $v(t)$ em função do tempo. Então, aplica-se o sinal $v(t)$ em um filtro passa-baixa com frequência de corte de 2 rad/s. A resposta do filtro supracitado é ilustrado na Figura 6, no qual podemos observar que os sinais que compõem $v(t)$, dado em (1), com frequências acima de 2 rad/s foram atenuados.

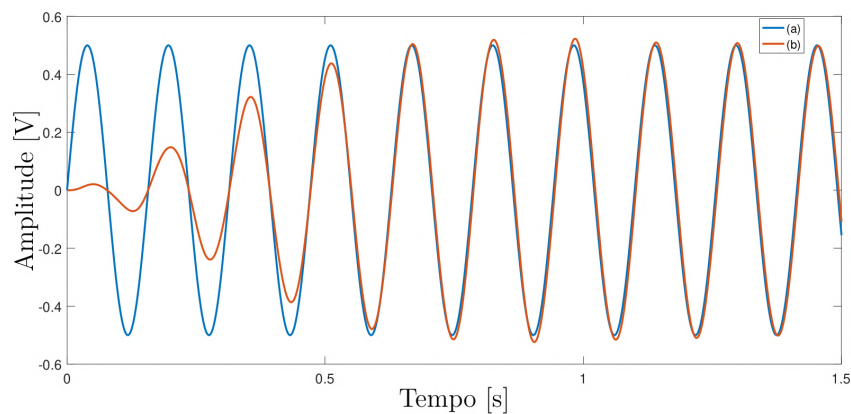
Figura 6 – Sinais analisados: (a) sinal $v_1(t) = 0,8\text{sen}(t)$ e (b) sinal de saída do filtro passa-baixa para a entrada $v(t)$. Obtido usando o *software* MATLAB.



Fonte: Autor.

Dando sequência no estudos dos filtros, aplica-se $v(t)$ a um filtro passa-faixa, com frequência inferior de corte 35 rad/s e frequência superior de corte 45 rad/s. A resposta deste filtro é ilustrada na Figura 7. Observa-se que os sinais com frequência com valores que não pertencem a faixa do projeto são atenuados, com isso o sinal predominante na saída do mesmo é $v_2(t) = 0,5\text{sen}(40t)$.

Figura 7 – Sinais analisados: (a) sinal $v_2(t) = 0,5\text{sen}(40t)$ e (b) sinal de saída do filtro passa-faixa para a entrada $v(t)$. Obtido usando o *software* MATLAB.

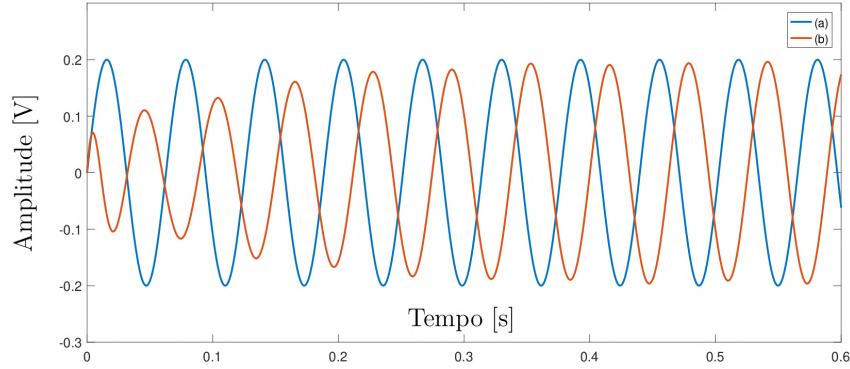


Fonte: Autor.

Na Figura 8 é ilustrado a ação do filtro passa-alta quando aplicado a entrada $v(t)$. O filtro passa-alta utilizado tem frequência de corte em 95 rad/s. Então, sinais com frequência abaixo da frequência de corte supracitada são atenuados no sinal de saída

do filtro. Isto pode ser observado na Figura 8, no qual verifica-se que o sinal de saída é $v_3(t) = 0,2\text{sen}(100t + \phi)$, isto é, a saída do filtro apresenta o sinal de $v(t)$ com frequência de 100 rad/s, com defasagem angular ϕ , sendo as outras componentes de $v(t)$ com frequência 1 rad/s e 40 rad/s e atenuadas.

Figura 8 – Sinais analisados: (a) sinal $v_3(t) = 0,2\text{sen}(100t + \phi)$ e (b) sinal de saída do filtro passa-alta para a entrada $v(t)$. Obtido usando o *software* MATLAB.



Fonte: Autor.

Pode-se implementar filtros utilizando resistores, capacitores e indutores. Neste caso, este filtro é denominado de filtro passivo. Entretanto existem outros modos de implementações de tais dispositivos, dentre os quais por exemplo podemos citar: implementações em sistemas computacionais e implementações utilizando Amp. Op. Os filtros que utilizam Amp. Op. em sua estrutura não necessitam de indutores, apenas capacitores. Estes filtros são denominados de filtros ativos, o qual será utilizado neste trabalho.

3.1.1.2 Filtro Ativo

Os filtros ativos são implementados utilizando Amp. Op. e capacitores. A impedância capacitiva no domínio de Laplace, considerando condições iniciais nulas, é dada por,

$$Z_c = \frac{1}{sC} = \frac{1}{j\omega}. \quad (2)$$

A expressão descrita em (2) tem sua magnitude e fase variando em relação ao valor da frequência ω . Deste modo,

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} Z_c = \infty, \quad (3)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_c = 0. \quad (4)$$

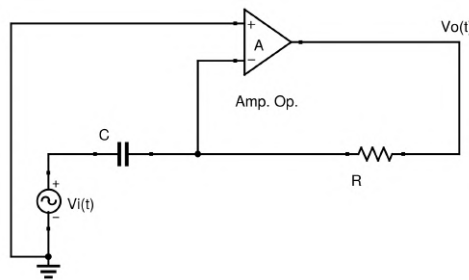
Baseado em (3) e (4), tem-se que a impedância capacitiva se comporta como um circuito aberto para sinais de baixa frequência e, para sinais com alta frequência, o capacitor comporta-se como um circuito fechado. Neste trabalho utiliza-se o filtro passa-faixa para adequar os sinais oriundos da antena, os quais contém ruídos, para o

sistema computacional. Optou-se por utilizar o Arduino na análise sobre a interferência do clima espacial para sistemas de comunicação. Antes de apresentar a teoria sobre os filtros passa-faixa é realizado uma introdução a alguns itens básicos de filtragem, os quais são: o diferenciador e o integrador.

3.1.1.2.1 O Diferenciador

O diferenciador realiza a derivada de um dado sinal de entrada. Considere o circuito eletrônico do diferenciador ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Diferenciador eletrônico. Obtido usando o *software* Qucs



Fonte: Autor.

A função de transferência do diferenciador ilustrado na Figura 9 é dada por,

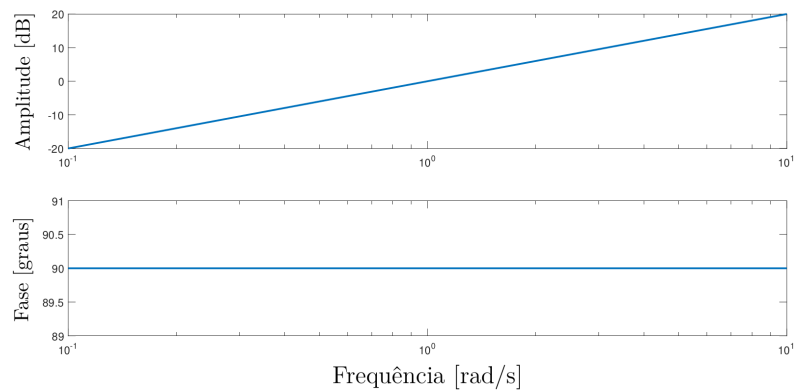
$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -RCs, \quad (5)$$

na qual se pode observar um zero na origem. Considerando $s = j\omega$ em (5) e $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, obtém-se:

$$H(j\omega) = -j\frac{\omega}{\omega_0} = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \angle -90^\circ. \quad (6)$$

O diagrama de bode do diferenciador é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de Bode do diferenciador. Obtido usando o *software* MATLAB.



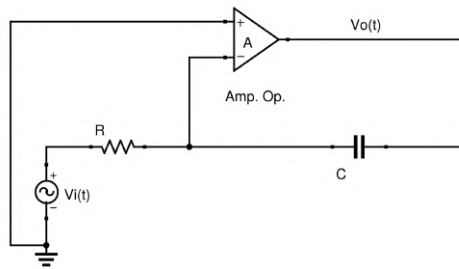
Fonte: Autor.

Por meio da análise do diagrama de Bode do diferenciador (Figura 10), verifica-se que este operador matemático amplifica sinais de alta frequência, e que, com o aumento da frequência há um aumento de 20 dB por década. Ainda, o sinal de saída que passa por um derivador tem um acréscimo de fase de 90° .

3.1.1.2.2 O Integrador

Considere o circuito eletrônico de um integrador ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Integrador eletrônico. Obtido usando o *software* Qucs.



Fonte: Autor.

O circuito ilustrado na Figura 11 tem a seguinte função de transferência,

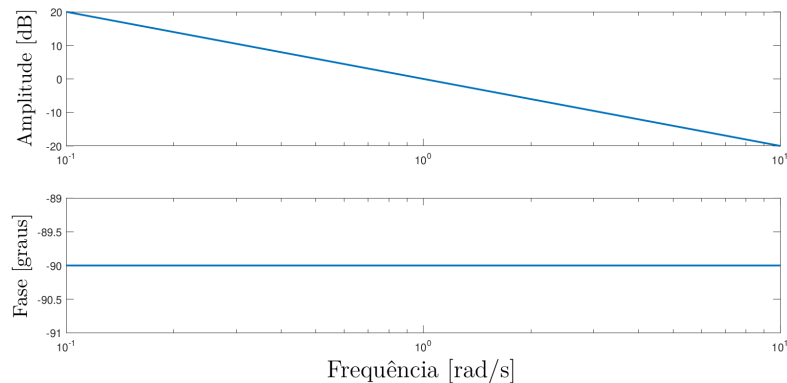
$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{1}{RCs}. \quad (7)$$

Conforme (7), a função de transferência do integrador possui um polo na origem do plano complexo s . Considerando $s = j\omega$ em (7), obtém-se,

$$G(j\omega) = -\frac{1}{j\frac{\omega}{\omega_0}} = \frac{1}{\frac{\omega}{\omega_0}} \angle +90^\circ, \quad (8)$$

sendo $\omega_0 = \frac{1}{RC}$. O diagrama de Bode do integrador é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama de Bode do integrador. Obtido usando o *software* MATLAB.

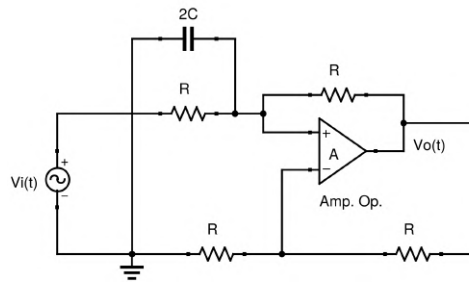


Fonte: Autor.

No caso do integrador, cuja diagrama de Bode é ilustrado na Figura 12, observa-se que o mesmo apresenta um decaimento de 20 dB por década conforme a frequência do sinal de entrada aumenta. Esta característica pode ser resumida no fato que o integrador atenua sinais de alta frequência. Ainda, existe um defasamento de -90° entre o sinal de entrada e saída do mesmo.

Existe também a possibilidade da implementação de um integrador não inversor, o qual possui a implementação eletrônica ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Integrador eletrônico não inversor. Obtido usando o *software* Qucs.



Fonte: Autor.

Para o circuito eletrônico ilustrado na Figura 13, a função de transferência é dada por,

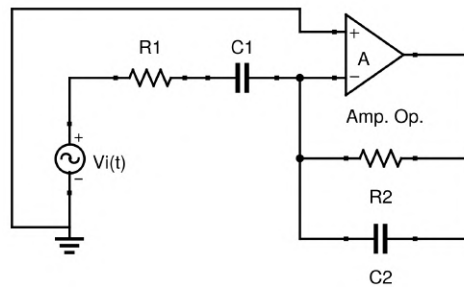
$$G(s) = \frac{1}{RCs}, \quad (9)$$

e para este tipo de integrador, existe um avanço de fase de $+90^\circ$, mantendo-se a característica da magnitude igual ao integrador inversor.

3.1.1.3 Filtro Passa-Faixa

Considere o seguinte circuito eletrônico para implementação de um filtro passa-faixa.

Figura 14 – Filtro passa-faixa. Obtido usando o *software* Qucs.



Fonte: Autor.

A impedância $Z_1(s)$ pode ser obtida como,

$$Z_1(s) = \frac{R_1 C_1 s + 1}{C_1 s} \quad (10)$$

e $Z_2(s)$ por,

$$Z_2(s) = \frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1}. \quad (11)$$

Deste modo, a função de transferência do filtro passa-faixa pode ser determinado da seguinte maneira,

$$H_{pf}(s) = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_1 C_1 s}{R_1 C_1 s + 1} \right) \left(\frac{1}{R_2 C_2 s + 1} \right). \quad (12)$$

De acordo com (12), o filtro passa faixa possui um zero na origem do plano complexo s e dois polos: $-(1/R_1 C_1)$ e $-(1/R_2 C_2)$. Considerando $s = j\omega$ em (12), tem-se:

$$H_{pf}(j\omega) = H_0 \frac{j\omega/\omega_L}{(1 + j\omega/\omega_L)(1 + j\omega/\omega_H)} \quad (13)$$

sendo,

$$H_0 = -\frac{R_2}{R_1}, \quad \omega_L = \frac{1}{R_1 C_1} \quad e \quad \omega_H = \frac{1}{R_2 C_2}, \quad (14)$$

sendo H_0 o ganho de meia frequência.

No projeto do filtro passa-faixa geralmente tem-se $\omega_L \ll \omega_H$, e as frequências ω_L e ω_H são frequências de baixa e alta, respectivamente, de -3 dB. Este filtro é muito utilizado em aplicações com áudio (FRANCO, 2002), onde é desejado amplificar um sinal em uma certa frequência e rejeitar ruídos presentes no mesmo em outras frequências.

Em um filtro passa-faixa temos que a largura de banda é $\beta = \omega_H - \omega_L$ e o fator de qualidade $Q = \frac{\omega_0}{\beta}$, sendo ω_0 a frequência central ou frequência de ressonância, vide (JOHNSON; HILBURN; JOHNSON, 1994)(JOHNSON; HILBURN; JOHNSON, 1994) para maiores detalhes.

Considere um filtro passa-faixa ilustrado como na Figura 14 com ganho de 20 dB ($\frac{R_2}{R_1} = 10$) para uma faixa de áudio. Os parâmetros do circuito eletrônico são descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do filtro passa-faixa.

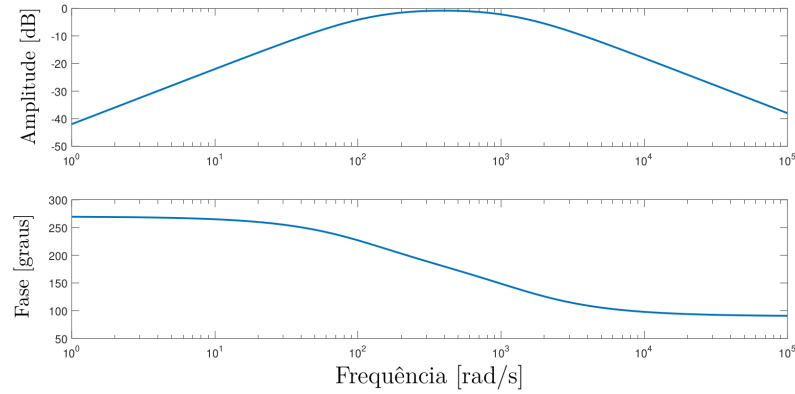
R_1	10 k Ω
R_2	100 k Ω
ω_L	125,65 rad/s
ω_H	1256,59 rad/s
C_1	0,7958 μF
C_2	70,58 nF

Considerando os parâmetros descritos na Tabela 1, de (12), a função de transferência do filtro passa-faixa abordado é,

$$H_{pf}(s) = \frac{-1256,59s}{s^2 + 1382,28s + 157903,04}. \quad (15)$$

O diagrama de Bode de um filtro passa-faixa $H_{pf}(s)$ dado em (15) é ilustrado na Figura 12. No diagrama de Bode ilustrado na Figura 15, observa-se que os sinais com frequência que não pertencem a faixa $\omega_L < \omega < \omega_H$ são atenuados na saída do filtro passa faixa.

Figura 15 – Diagrama de Bode do filtro passa-faixa. Obtido usando o *software* MATLAB.



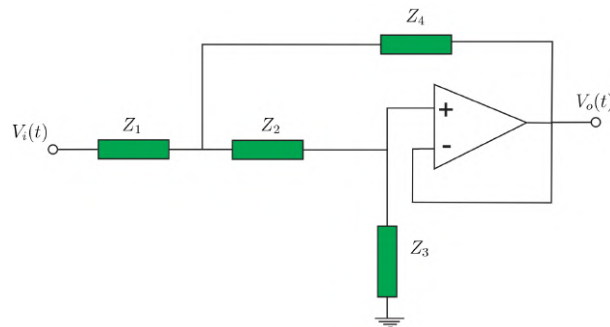
Fonte: Autor.

Na seção seguinte aborda-se o filtro passa-faixa KRC, ou também denominado de Filtro passa-faixa do tipo *Sallen-Key*.

3.1.1.4 Filtro Passa-Faixa KRC

Os filtros KRC são circuitos eletrônicos que utilizam resistores, capacitores e Amp. Op. em sua estrutura. Na Figura 16 é ilustrado um filtro KRC.

Figura 16 – Filtro KRC. Obtido usando o *software* Qucs.



Fonte: Autor.

Este filtro tem a seguinte função de transferência,

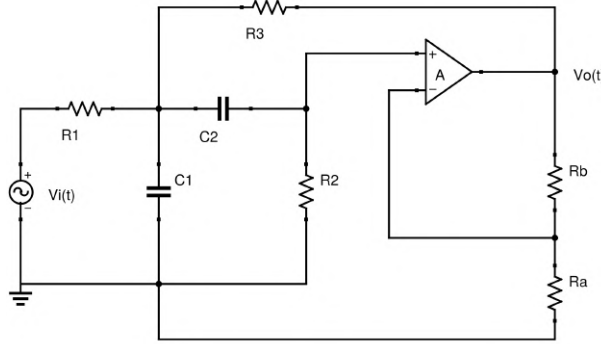
$$H_{KRC}(s) = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_4 (Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4}. \quad (16)$$

Por meio da escolha adequada das impedâncias Z_1, Z_2, Z_3 e Z_4 , pode-se projetar um circuito passa-faixa. Na Figura 17 é ilustrado um filtro passa-faixa KRC, o qual possui

a seguinte função de transferência,

$$\frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = H_{OBP} \frac{j\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{j\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{Q}}. \quad (17)$$

Figura 17 – Filtro KRC passa-faixa. Obtido usando o *software* Qucs.



Fonte: Autor.

Sendo Q o fator de qualidade do filtro, e H_{OBP} dado por,

$$H_{OBP} = \frac{K}{1 + (1 - K)\frac{R_1}{R_3} + (1 - \frac{C_1}{C_2})\frac{R_1}{R_2}}. \quad (18)$$

Neste contexto, o ganho K do sistema de filtragem ilustrado na Figura 17 é a magnitude da amplificação não inversora dada por,

$$K = 1 + \frac{R_b}{R_a}. \quad (19)$$

Neste contexto, o parâmetro K se relaciona com o fator de qualidade Q conforme em (20).

$$Q = \frac{\sqrt{1 + \frac{R_1}{R_3}}}{[1 + (1 - K)\frac{R_1}{R_3}]\sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} + \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}}}. \quad (20)$$

Para esse circuito a frequência de ressonância é dada por,

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{1 + \frac{R_1}{R_3}}}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}. \quad (21)$$

Observe que podemos variar ω_0 por meio de R_1 e podemos ajustar Q pela alteração do valor de R_B .

Considere um projeto com um fator de qualidade $Q > 0,47$. Neste caso, tem-se que $R_1 = R_2 = R_3 = R$ e $C_1 = C_2 = C$. Então, obtém-se,

$$H_{OBP} = \frac{K}{4 - K}, \quad \omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{RC} \quad e \quad Q = \frac{\sqrt{2}}{4 - K}. \quad (22)$$

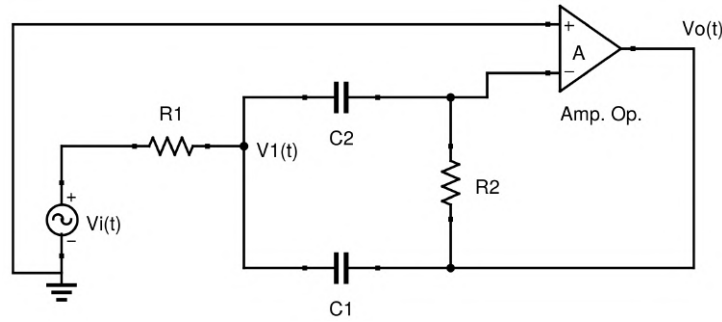
Na seção seguinte, aborda-se o projeto para filtros passa-faixa com múltiplas malhas de realimentação.

3.1.1.5 Filtro Passa-Faixa com Múltipla Realimentação

Os filtros com múltipla realimentação são projetados com vários laços de realimentação em sua estrutura, o que os tornam mais flexíveis para o projeto. Os filtros KRC tem ganho finito, enquanto o ganho de um filtro com múltiplas malhas de realimentação são referidos na literatura com filtro de ganho infinito.

Considere o circuito eletrônico do filtro passa-faixa com múltipla realimentação mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Filtro passa-faixa com múltipla realimentação. Obtido usando o *software* Qucs.



Fonte: Autor.

Utilizando a modelagem na frequência, pode-se equacionar $V_0(s)$ como,

$$V_0(s) = -sR_2C_2V_1(s) \quad (23)$$

sendo $V_1(s)$ a transformada de Laplace, considerando-se condições iniciais nulas, da tensão no nó entre o resistor R_1 e o capacitor C_1 . Somando-se as correntes no nó com tensão $V_1(s)$ tem-se,

$$\frac{V_i(s) - V_1(s)}{R_1} + \frac{V_0(s) - V_1(s)}{\frac{1}{sC_1}} + \frac{0 - V_1(s)}{\frac{1}{sC_2}} = 0. \quad (24)$$

Realizando manipulações algébricas em (24), com $s = j\omega$, resulta,

$$H(j\omega) = \frac{V_0(j\omega)}{V_i(j\omega)} = -\frac{j\omega R_2C_2}{1 - \omega^2 R_1R_2C_1C_2 + j\omega R_1(C_1 + C_2)}. \quad (25)$$

Adotando,

$$\omega^2 R_1R_2C_1C_2 = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2, \quad (26)$$

a frequência de ressonância ω_0 deste filtro passa-faixa é dada por,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}. \quad (27)$$

Ainda, considerando-se que,

$$j\omega R_1(C_1 + C_2) = \frac{j\omega}{Q}, \quad (28)$$

obtem

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}}{\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}}. \quad (29)$$

Para um projeto com $C_1 = C_2 = C$, pode-se simplificar os equacionamentos para o filtro passa-faixa do seguinte modo,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2} C} \quad e \quad Q = 0,5 \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}. \quad (30)$$

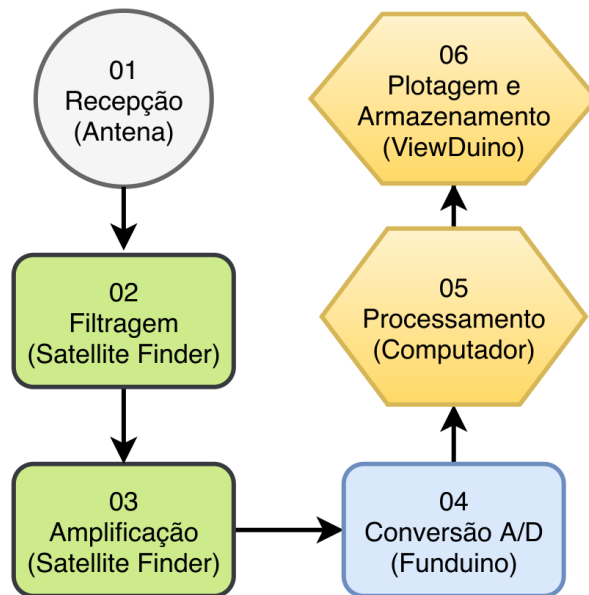
4 DESENVOLVIMENTO DO RADIOTELESCÓPIO DE 93,9 CM DE ABERTURA EFETIVA

É comum se observar muitas antenas de banda Ku espalhadas pela cidade, subutilizadas e se tornando lixo tecnológico em telhados e paredes. A faixa de operação dessas antenas é em torno de 10 a 12 GHz, nessa banda, com base em trabalhos desenvolvidos até então (AQUINO, 2013), (FERNANDES, 2007), (PINTO; ARANHA, 2018) e (LEADBEATER, 2007), é possível realizar a captação de ondas de rádio emitidas pelo Sol.

Com base nos trabalhos citados, foi desenvolvido um pequeno radiotelescópio. Diferente dos projetos anteriores, ele é aprimorado com base em tecnologias *open-source* e permite, de forma mais simples, obter os mesmos resultados encontrados.

O funcionamento do radiotelescópio é condicionado em seis etapas: recepção de sinal; filtragem; amplificação; conversão A/D; processamento dos dados. Como pode ser observado na Figura 19. Diferente de um sistema convencional de recepção em rádio, neste projeto não precisamos trabalhar com modulação e demodulação de sinais.

Figura 19 – Diagrama do sistema completo.

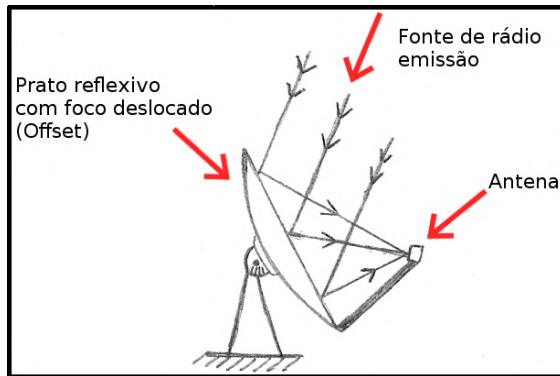


Fonte: Autor.

4.1 Recepção de Sinal

As ondas de rádio incidem sobre a superfície do prato da antena e são refletidas para o LNB (do inglês, *Low Noise Block*). A configuração *offset* (foco deslocado) vista na Figura 20 (a), torna prática a instalação desse tipo de antena em superfícies laterais, onde o apontamento de uma parabólica seria inviável em alguns casos. O cabo coaxial de maior comprimento, depois de ligado à antena (Figura 20 (d)), foi conectado ao terminal LNB indicado no *SatFinder* (*Satellite Finder*), como pode ser visto na Figura 29 (b).

Figura 20 – Configuração da antena: (a) antena de prato offset, (b) fixação da estrutura de apoio do prato, (c) antena montada e (d) detalhe da conexão do LNB com o cabo coaxial.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor.

4.2 Filtragem e Amplificação

O LNB é um dispositivo eletrônico capaz de receber sinais dos satélites em micro-ondas de intensidade baixa, amplificá-los e convertê-los para uma banda de frequência menor, a chamada Frequência Intermediária (FI), de 950 MHz a 2150 MHz.

A seguir mostraremos o projeto e simulação do circuito de filtragem e amplificação utilizando Amp. Op. Depois será mostrado um projeto baseado nos trabalhos dos quatro autores citados anteriormente, usando o dispositivo comercial *SatFinder*, mas incluindo Arduino para otimizar o radiotelescópio. As frequências de corte, inferior e superior, foram escolhidas com base na faixa que o LNB transmite pelo cabo coaxial, a FI.

4.2.1 Projeto com Amp. Op.

Para realizar esse projeto temos três opções de filtros. A seguir é mostramos os cálculos dos parâmetros para os filtros: passa-faixa; passa-faixa KRC; passa-faixa com múltipla realimentação.

4.2.1.1 Filtro Passa-Faixa

De (14), tomando o ganho de meia frequência como $H_0 = -1$, teremos que $R_1 = R_2$. E considerando a frequência de corte inferior $\omega_L = 5.969.026.041$ rad/s (950 MHz) e a frequência de corte superior $\omega_H = 13.508.848.410$ rad/s (2150 MHz), teremos os seguintes parâmetros para o filtro:

Tabela 2 – Parâmetros do filtro passa-faixa.

R_1	10 $k\Omega$
R_2	10 $k\Omega$
ω_L	5.969.026.041 rad/s
ω_H	13.508.848.410 rad/s
C_1	0,0167 ρ F
C_2	0,00740 ρ F

4.2.1.2 Filtro Passa-Faixa KRC

De (19), tomando $R_b = 10$ $k\Omega$ e $R_a = 20$ $k\Omega$, temos um ganho $K = 1,5$. Logo, de (18), teremos $H_{OBP} = 0,6$, e a frequência de ressonância será $\omega_0 = 141.421.000$ rad/s ou 22,5 MHz, o que está bem abaixo da frequência de corte inferior (950 MHz). O fator de qualidade será $Q = 0,56$.

Tabela 3 – Parâmetros do filtro passa-faixa KRC.

R	10 $k\Omega$
C	1 ρ F
R_a	20 $k\Omega$
R_b	10 $k\Omega$
K	1,5
H_{OBP}	0,6
ω_0	141.421.000 rad/s
frequência de ressonância	22,5079 MHz

4.2.1.3 Filtro Passa-Faixa com Múltiplas Realimentações

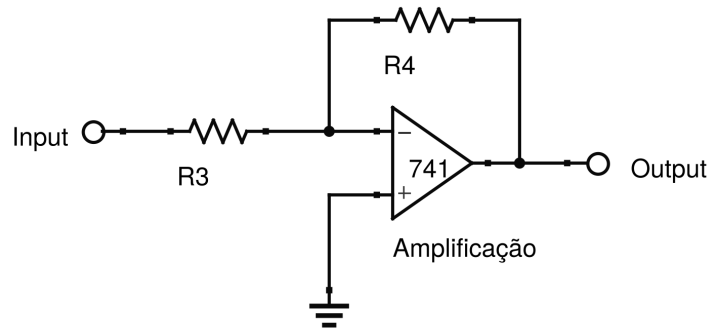
De (30), adotando $C_1 = C_2 = 1$ ρ F e $R_1 = R_2 = 10$ $k\Omega$, a frequência de ressonância em hertz será de 22,5079 MHz. O fator de qualidade $Q = 0,5$, como na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do circuito.

R_1	$10\text{ k}\Omega$
R_2	$10\text{ k}\Omega$
$C_1 = C_2$	$1\text{ }\mu\text{F}$
ω_0	$1 \cdot 10^8\text{ rad/s}$
frequência de ressonância	$15,9155\text{ MHz}$

4.2.1.4 Circuito Condicionador

Na Figura 21 podemos ver um circuito a base de Amp. Op. utilizando o LM741 (comum comercialmente). O Amp. Op. recebe o sinal de fase invertida vindo do filtro passa-faixa e o inverte. Alimentamos o circuito do 741 com +5 e -5 volts para que o sinal de saída esteja de acordo com o limite das portas analógicas do Arduino. Terminada essa etapa, o sinal está pronto para ser monitorado pelo Arduino.

Figura 21 – Circuito condicionador. Obtido usando o *software* Qucs.

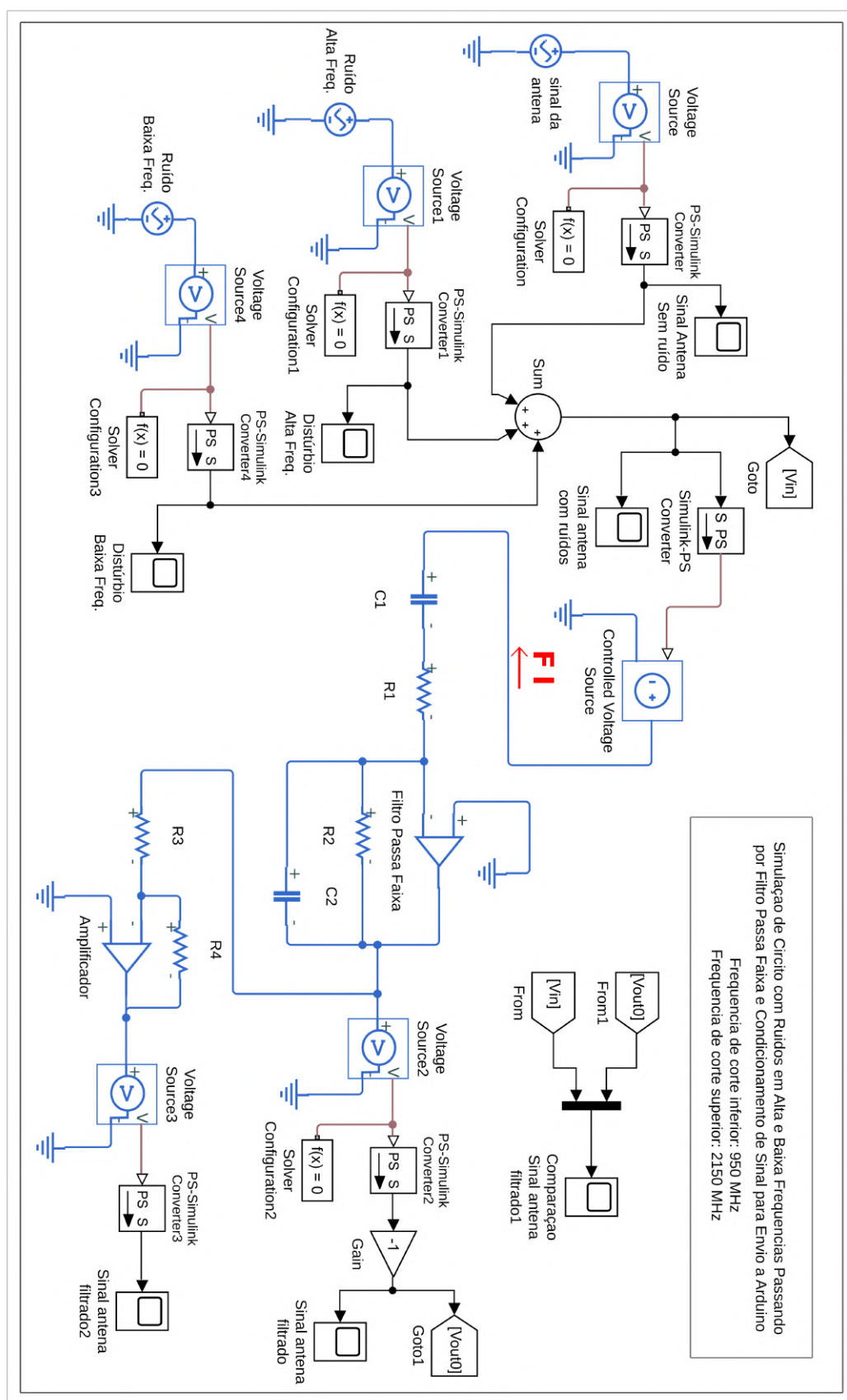
Fonte: Autor.

4.2.1.5 Simulação e Resultados

O filtro escolhido para este projeto, visto que temos uma faixa de trabalho bem objetiva (950 a 2150 MHz), foi o Passa-Faixa, que se adéqua bem a condição. Por meio do pacote Simulink[®] do ambiente do MATLAB[®], realizamos uma simulação do sistema. Era esperado poder implementar o circuito de filtragem e condicionamento usando Amp. Op., evitando assim o uso do dispositivo comercial, o *SatFinder*. Porém, devido a pandemia do novo corona vírus (COVID 19), não foi possível realizar testes práticos na universidade para implementar o sistema.

Na Figura 22 é apresentada uma visão geral do esquemático da simulação. A seguir é explicado o passo a passo.

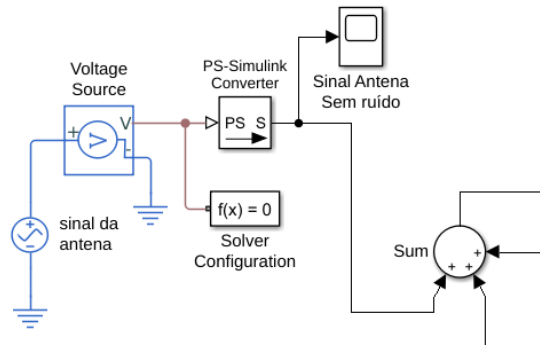
Figura 22 – Circuito completo. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.



Fonte: Autor.

Para começar, foi simulado o sinal que seria enviado pelo LNB ao filtro (Figura 23). Utilizamos os blocos *AC Voltage Source* para criar os sinais desejados. O 'sinal da antenna' foi setado com amplitude de pico de 0,5 V, defasamento 0 graus e frequência de 1500 MHz, dentro da FI. Na sequência, os blocos *Voltage Source* e *PS-Simulink Converter* tem a função de converter o valor físico (volts) para um valor numérico sem unidades, o qual será usado na operação de soma com as outras frequências da simulação. O bloco *Solver Configuration* é necessário para todos os modelos do pacote *Simscape*, sua função é especificar as opções de simulação do sistema físico. Cada diagrama de bloco topologicamente distinto exige exatamente um bloco do *Solver Configuration* conectado a ele (THOMPSON; SHURE, 2020). Esse sinal é então enviado ao bloco somador *Sum*.

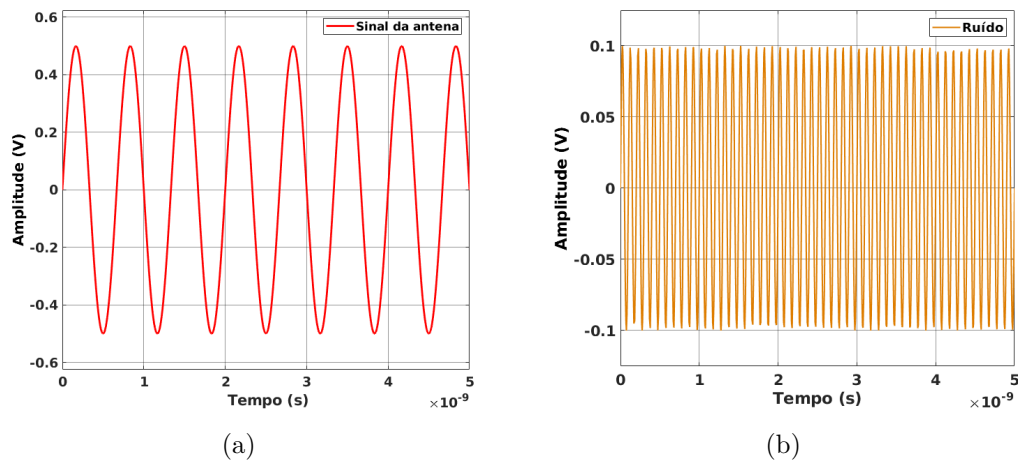
Figura 23 – Blocos para simular o sinal do LNB. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.



Fonte: Autor.

O procedimento foi repetido para os sinais de ruídos em alta (10 GHz) e baixa (10 kHz) frequências. Na Figura 24 (a) está o sinal proveniente da antenna. Já na Figura 24 (b), observamos o sinal de alta frequência.

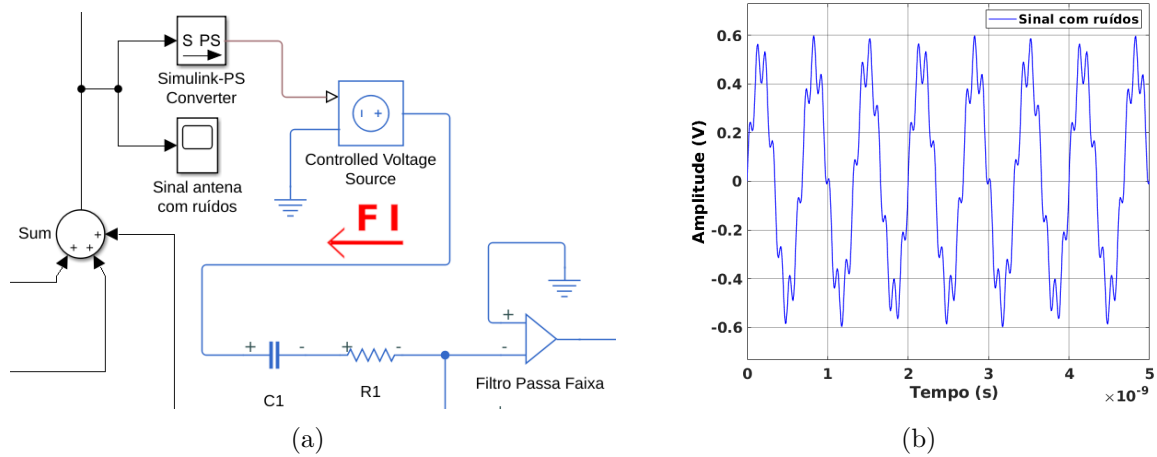
Figura 24 – Sinais simulados: (a) vindo da antenna e (b) ruído de alta frequência. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.



Fonte: Autor.

A seguir, por meio dos blocos *Simulink-PS Converter* e *Controlled Voltage Source*, a resultante dos três sinais somados foi convertida para uma grandeza física do ambiente de simulação e enviada ao filtro (Figura 25 (a)). Esse sinal com distúrbios é mostrado na Figura 25 (b).

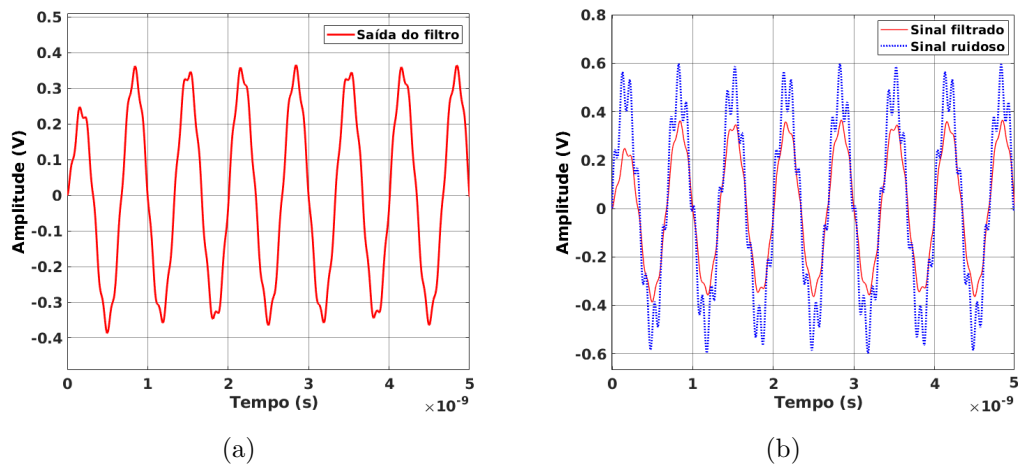
Figura 25 – (a) Blocos para somar os sinais e enviar a FI com ruídos ao filtro e (b) sinal distorcido recebido na entrada do filtro. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.



Fonte: Autor.

Na Figura 26 (a) vemos a saída do filtro e na Figura 26 (b) temos uma comparação entre o sinal de entrada (em azul) e o de saída (em vermelho). Apesar de algumas pequenas distorções no sinal, percebemos que a amplitude do sinal filtrado está condizente com a do sinal oriundo da antenna, logo podemos concluir, com base nessa simulação, que o filtro projetado é adequado para teste no tratamento de ruídos do radiotelescópio.

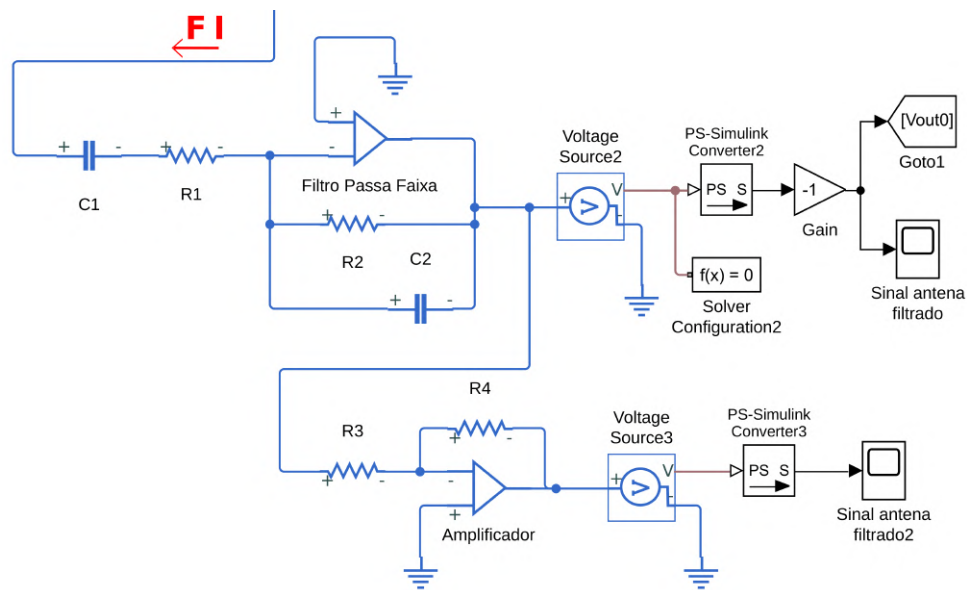
Figura 26 – (a) Sinal de saída do filtro passa-faixa e (b) comparação do sinal de entrada ruído com o sinal filtrado. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.



Fonte: Autor.

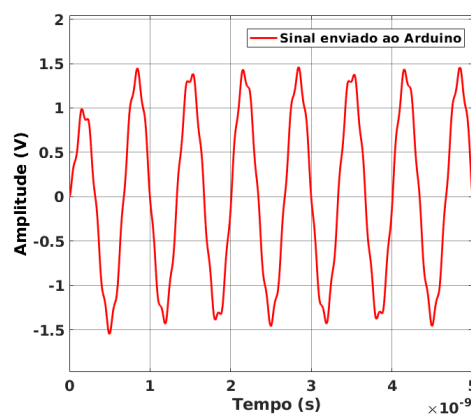
A seguir, na Figura 27 vemos o circuito de filtragem acoplado com o circuito de condicionamento. Esse amplificador, como já citado anteriormente, tem a função de adequar a amplitude de tensão para níveis seguros ao Arduino. Para fins de simulação, o sinal de saída recebeu uma amplificação de quatro vezes. Podemos ver pela Figura 28 (a) que isso não causou ruídos indesejados no sinal final, logo o circuito pode ser acoplado com o Arduino em segurança.

Figura 27 – Filtro e circuito de condicionamento. Obtido com ambiente de trabalho Simulink.



Fonte: Autor.

Figura 28 – Sinal enviado ao Arduino. Obtido com ambiente de trabalho Simulink



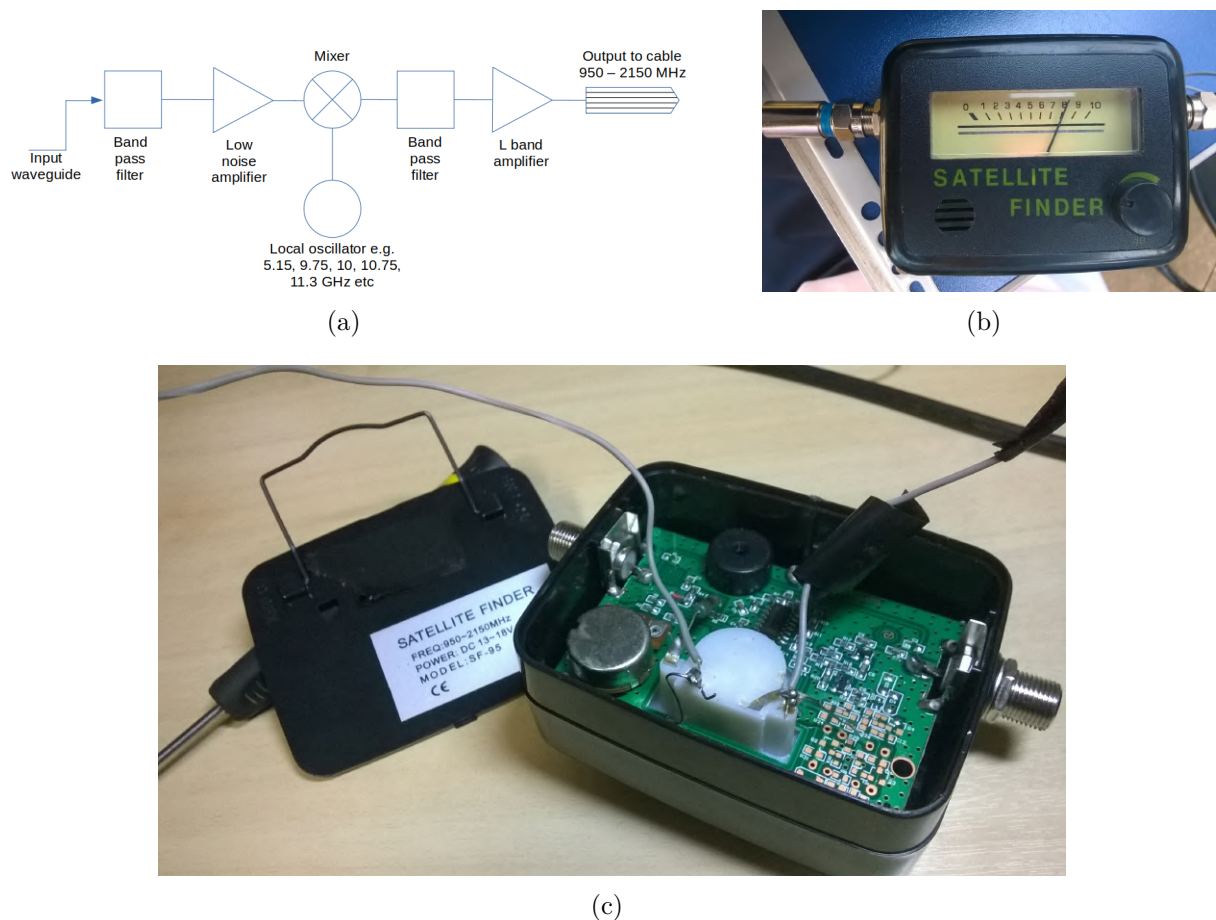
(a)

Fonte: Autor.

4.2.2 Projeto com o Dispositivo de Apontamento de Antenas (Satfinder)

A seguir é mostrado como, em vez de utilizar Amp. Op., pode-se montar o projeto com o *SatFinder* (Figura 29 (a)). Ele é o dispositivo que recebe o sinal em FI do LNB e envia ao Arduino.

Figura 29 – LNB e detalhes: (a) diagrama do circuito de um LNB, (b) Satellite Finder e (c) Detalhe da extração do sinal desejado, a fita preta indica o terminal de referência a ser ligado no ground do Arduino.



Fonte: Autor.

O *SatFinder* é empregado por técnicos durante o apontamento de antenas. Normalmente é conectado entre o receptor de TV e o LNB da antena. O receptor fornece um nível DC de 13 a 18 V por meio do cabo coaxial para acionar o *SatFinder* e o LNB. Esse mesmo nível DC ativa o circuito do LNB, o qual passa a enviar, sobreposto ao nível DC, o sinal oriundo do satélite comercial, em que no nosso caso é uma fonte natural, o Sol. A ligação para extração desse sinal é mostrada na Figura 29 (c).

O *SatFinder* opera com tensão contínua de 13 a 18 V. Para este projeto foi usada fonte CC ajustada em 15 V com corrente de 0,07 A, conforme ilustrado na Figura 30 (a), sendo que fizemos uma adaptação para alimentação do *SatFinder*. Todo esse procedimento

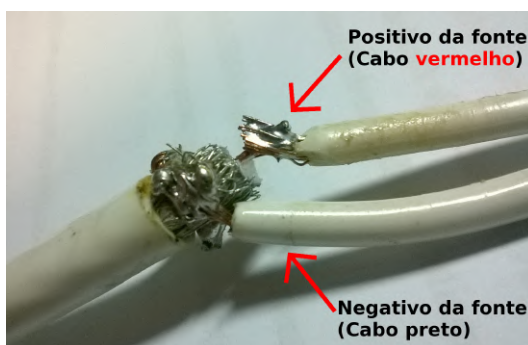
de adaptação foi realizado dentro do protocolo de segurança para evitar o risco de choque elétrico e queima de equipamento.

O cabo coaxial, composto de um condutor fino de cobre envolto por uma camada isolante revestida com uma couraça metálica trançada, foi desencapado com cuidado para não danificar os condutores do cabo, realizando a remoção até que o fio de cobre interno e a couraça metálica externa ficassem a mostra. O fio de cobre interno recebe a tensão pelo terminal positivo (cabo vermelho na Figura 30 (a)) e a couraça metálica é ligada ao terminal negativo da fonte (cabo preto na Figura 30 (a)). Essas conexões foram feitas por meio de solda de estanho, conforme mostrado na Figura 30 (b). Em seguida, foi feito o isolamento, impedindo que ocorram curto-circuitos no sistema. O terminal negativo foi marcado com a fita preta, deixando-o assim destacado para evitar acidentes. O resultado final dessa adaptação pode ser visto na Figura 30 (c).

Figura 30 – Fonte e conexões: (a) alimentação do SatFinder ajustada em 15 V, (b) ligação dos terminais de alimentação do SatFinder e (c) conexão dos cabos da fonte com o cabo coaxial do SatFinder.



(a)



(b)



(c)

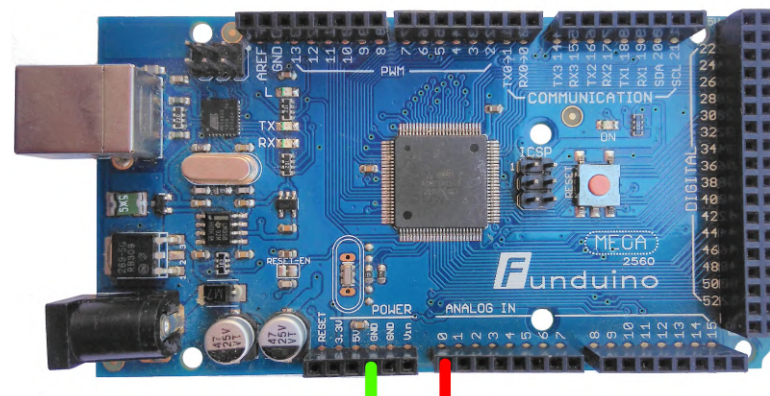
Fonte: Autor.

4.3 Conversão A/D

A conversão dos dados é feita por meio do conversor embutido nas placas Arduino. Neste caso, usamos um dos modelos derivados do projeto italiano, o Funduino MEGA 2560 (FUNDUINO, 2019). O sinal proveniente do circuito de filtragem, do *SatFinder* nesse caso, foi retirado por meio de dois fios soldados nos terminais do indicador analógico (Figura 29 (c)). O positivo desse sinal é recebido na porta analógica (A0) e o negativo na de referência GND (*ground*) da placa, como pode ser visto na Figura 31.

O *hardware* foi programado para realizar o trabalho de conversão A/D, conforme o código descrito no Apêndice B. Para carregar este programa é necessário ter instalado no computador a interface de programação do Arduino (IDE), disponível gratuitamente no site oficial. Nesse projeto foi utilizado um ajuste que aumenta a precisão de leitura da placa Mega 2560, trata-se do parâmetro `INTERNAL1V1`, indicado pela configuração de referência analógica na linha `analogReference (INTERNAL1V1)`. Se fossemos usar uma placa diferente, como o Arduino UNO ou NANO, tal configuração não se aplicaria. Para tanto, deve-se verificar no manual de placas qual é o parâmetro correto para o ajuste.

Figura 31 – Funduino MEGA 2560, a cor vermelha indica que o terminal positivo deve ser ligado na porta A0 da placa, a verde indica a ligação da referência GND.

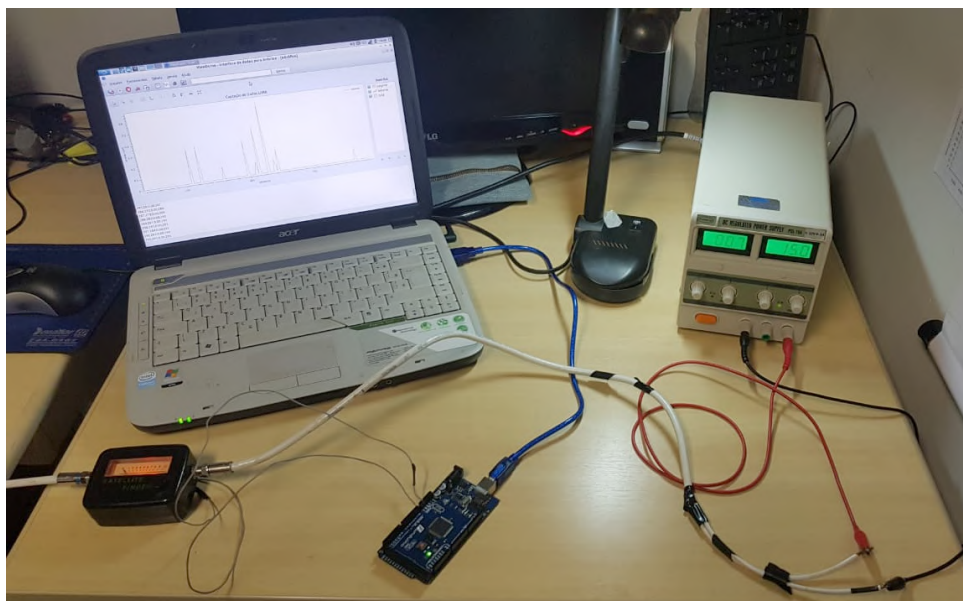


Fonte: Autor.

4.4 Processamento dos Dados

Uma vez a placa Funduino conectada via USB ao computador, ela obtém a alimentação necessária e, também, envia os dados convertidos da etapa anterior. Para visualizar e armazenar os dados, foi usado o *software* de visualização gráfica *ViewDuino*, cuja operação é simples e está descrita pelo autor no *site* oficial (GIRARDI, 2018). A seguir, na Figura 32, há uma visão geral da montagem do sistema eletrônico com o *SatFinder* em operação.

Figura 32 – Vista geral do sistema de aquisição de dados do radiotelescópio montado sobre bancada.



Fonte: Autor.

4.5 Apontamento da Antena

A antena deve ser apontada para um local do céu limpo e sem nuvens. Em seguida, mexendo no botão de ajuste de ganho do *SatFinder*, deve-se regular para que o ponteiro indique ganho 1 (um), haverá então um pequeno sinal de tensão sendo captado. Com este procedimento, medimos a radiação de fundo (*background*) normal do céu, depois, subtraindo essa medida do sinal obtido durante a passagem do objeto alvo, teremos como resultado os dados do objeto de estudo, no caso o Sol.

O procedimento para apontar a antena leva em conta o Sistema Horizontal de coordenadas, também conhecido como Auto-Azimutal (FILHO; SARAIVA, 2019). Nele, precisamos conhecer dois valores de posição de um objeto, o azimute e a altura. O azimute tem como referência o norte geográfico, variando para a direita de 0 até 360 graus no sentido horário. A altura tem como referência o horizonte e varia de 0 a 90 graus até o Zênite. Com essas duas coordenadas é possível descrever a posição de qualquer objeto no céu, de forma semelhante ao que se faz nos mapas geográficos, que usam longitude e latitude para determinar posições sobre o globo terrestre.

O movimento de rotação da Terra faz com que a posição dos objetos celestes varie constantemente no céu. Como esse radiotelescópio é fixo, é preciso montar a estrutura de forma a antecipar a passagem do objeto em frente a antena. Sabemos, com base em testes, que o Sol leva cerca de 13 minutos para completar sua passagem em frente à antena. Para garantir o sucesso da observação, o sistema foi montado com 1 (uma) hora de antecedência. As coordenadas do Sol foram obtidas por meio do planetário virtual

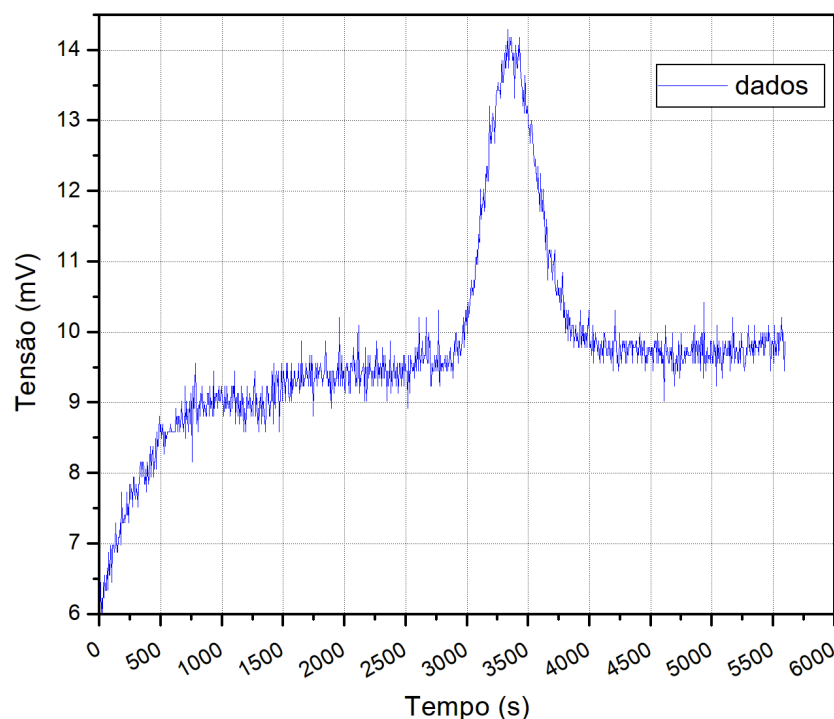
Stellarium (CHÉREAU, 2018), disponível no *site* oficial gratuitamente, e devidamente configurado para as coordenadas geográficas locais.

Conhecidos os dados de posição, ajustamos a antena em função deles. A coordenada do ângulo de altura tem indicações de ajuste na própria estrutura do equipamento, porém, o ângulo de azimute é ajustado girando a base da estrutura. Por meio de uma bússola avaliamos o alinhamento; deve-se levar em conta dois fatores ao manuseá-la: a presença de campos magnéticos próximos (tubulações de energia elétrica por exemplo) e a declinação magnética local, obtida no *site* da *National Oceanic And Atmospheric Administration* (NOAA, 2018). A declinação magnética é uma medida do quanto o norte magnético, indicado pela bússola, está adiantado em relação ao norte geográfico, essa diferença é suficiente para se errar completamente o posicionamento da antena. Nos testes locais foi usado o valor de 18 graus, ou seja, foi necessário somar 18 graus ao valor de azimute indicado na simulação do *Stellarium*. Estando o sistema energizado, com a antena em posição e o monitoramento feito pelo *ViewDuino*, aguardamos a passagem do Sol.

4.6 Teste de Observação

A Figura 33 mostra o registro obtido a partir da observação do Sol, realizada das 9h27 às 11h00 no dia 18 de dezembro de 2018, apresentado no gráfico da magnitude (em escala de milivolts) por tempo (em segundos).

Figura 33 – Registro da passagem do Sol em 18 de dezembro de 2018.

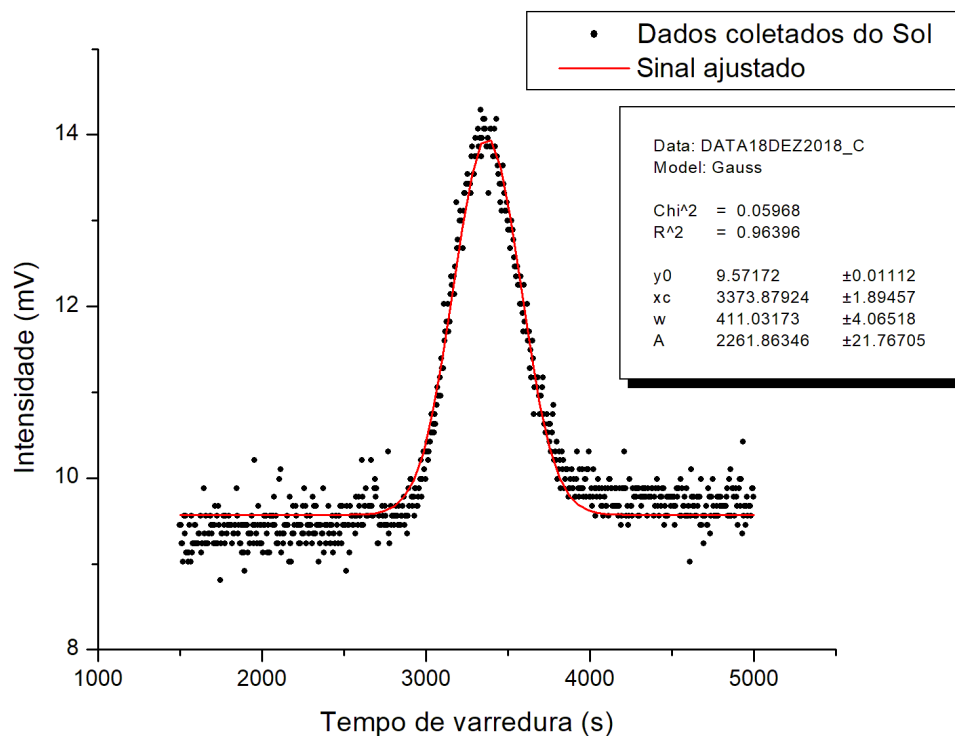


Fonte: Autor.

Foi percebido que durante os primeiros 25 minutos (até 1500 segundos) a magnitude subiu de 6 milivolts para aproximadamente 9,5 milivolts, estabilizando nesse valor. Nesse período, a antena captava apenas ruídos eletromagnéticos, provenientes da atmosfera e do ambiente ao redor. O equipamento de amplificação, conversão e processamento de dados foi montado no interior de um prédio em ambiente refrigerado, enquanto que a antena permaneceu no ambiente externo. A refrigeração do sistema de aquisição permitiu a redução dos efeitos térmicos causadores de ruídos eletrônicos.

Na Figura 34 está o recorte dos dados relacionados à observação do Sol, ajustados por meio de uma função do tipo gaussiana (vermelho – função ajustada), sendo os pontos pretos os dados experimentais coletados pela antena. O sinal captado teve duração de aproximadamente 13,8 minutos, com pico de 14 milivolts aos 3373 segundos; quando comparado com a linha de base que representa a intensidade de fundo (9,5 milivolts), percebemos uma variação de 4,5 milivolts.

Figura 34 – Ajuste dos dados.



Fonte: Autor.

Observando o comportamento de subida e de descida da curva, notamos intensidades maiores após a saída do Sol do campo de observação, que são evidenciadas pela maior densidade de pontos pretos acima da função do lado direito. Isso se deve provavelmente ao aquecimento do prato da antena, o que causa interferência nas ondas de rádio colhidas, condizendo assim com o experimento apresentado por (FERNANDES, 2007).

5 CONCLUSÃO

O procedimento de montagem do equipamento se mostrou adequado para seu uso em laboratório didático de cursos de Engenharia e Física. Foi alcançado com êxito o desenvolvimento de um sistema de captação e armazenamento de dados na frequência da ordem de 11 GHz para observação da emissão do Sol. A capacidade de amplificação do sinal proporcionada pelo *SatFinder* foi suficiente para que fossem coletados os primeiros dados de emissão do Sol. A placa Funduino, com uma programação simples, mostrou-se capaz de resolver o sinal de forma satisfatória.

Em relação ao uso exclusivo de tecnologias *open source*, em nosso caso, o ambiente de desenvolvimento em Arduino (o *software ViewDuino* em linguagem Python) e o planetário virtual *Stellarium*, obtivemos um resultado satisfatório de maneira simples, replicável e equivalente ao que se tem encontrado nos trabalhos presentes na literatura ((FERNANDES, 2007), (PINTO; ARANHA, 2018) e (LEADBEATER, 2007)). Do ponto de vista pedagógico, pudemos associar tópicos de ciências por trás desse equipamento, como princípios de: perturbações e propagação de ondas eletromagnéticas no espaço; campo magnético da Terra (de forma análoga ao de um ímã); espectro eletromagnético e partículas carregadas.

Sobre a substituição do *SatFinder* pelo novo circuito de filtragem e condicionamento, do ponto de vista acadêmico é interessante, pois, o dispositivo comercial é uma caixa preta devido ao seu circuito complexo. O esquema elétrico apresentado neste trabalho possui montagem simples e, além da vantagem de conhecer a modelagem matemática por trás dele, o circuito proposto aprimora o radiotelescópio, sendo possível reduzir os ruídos causados por radiações infravermelha e de rádio, presentes no ambiente. No caso de algum deles permanecer, será mais fácil isolar a origem do problema.

Do ponto de vista da complexidade, o circuito de filtragem e condicionamento é relativamente simples de ser montado, bastando o uso de Amp. Op., capacitores e resistores comerciais. É necessário prover alimentação por meio de fontes de 5 V (o que pode ser montado usando duas fontes comerciais de 5 V ligadas em série), e uma alimentação da ordem de 15 V (também usando fontes ajustáveis disponíveis no comércio) para o LNB da antena.

Por fim, após a experiência promissora, numa segunda etapa o projeto pode ser aprimorado. Primeiro com a implementação da filtragem de sinal e depois, com motorização do sistema de rastreamento, para realizar varreduras do céu, acompanhando outras fontes de rádio e, dessa forma, realizar imagens do céu em ondas de rádio na faixa de 10 GHz a 12 GHz.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, P. V. P. d. Introdução à radioastronomia solar. João Pessoa, PB, 2013. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/241019434/Radio-Parte-1>>.
- ARDUINO. *Arduino Introduction*. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>.
- BAGANOFF, F. K. et al. ChandraX-ray spectroscopic imaging of sagittarius a* and the central parsec of the galaxy. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 591, n. 2, p. 891–915, jul 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1086%2F375145>>.
- CHÉREAU, F. *Stellarium 0.18.0*. 2018. Disponível em: <<http://www.stellarium.org/pt/>>.
- COUNCIL, N. R. *Severe Space Weather Events—Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report: Extended Summary*. Washington, DC: The National Academies Press, 2009. ISBN 978-0-309-13811-6. Disponível em: <<https://www.nap.edu/catalog/12643/severe-space-weather-events-understanding-societal-and-economic-impacts-a>>.
- ESA. *The European Space Agency's Herschel Space Observatory*. 2019. Disponível em: <<http://sci.esa.int/herschel/>>.
- FERNANDES, K. C. Construção de um radiotelescópio amador em microondas 12 ghz, dotado de um sistema automático de aquisição de dados. Brasília, DF, 2007.
- FILHO, K. d. S. O.; SARAIVA, M. d. F. O. *Sistemas de Coordenadas*. 2019. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/coord.htm>>.
- FRANCO, S. *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002. ISBN 9780071121736.
- FUNDUINO. *Funduino Mega 2560*. 2019. Disponível em: <<https://funduino.de/hardware-software>>.
- GIRARDI, D. *VIEWDUINO Uma Interface Gráfica Para Dados Do Arduino*. 2018. Disponível em: <<http://teachduino.ufsc.br/viewduino-uma-interface-grafica-para-dados-do-arduino/>>.
- HYDRO-QUÉBEC. *Le Québec a Subi en Mars 1989 une Panne Générale d'Électricité par suite d'une Tempête Solaire*. Montreal, Canadá: [s.n.], 1989. Disponível em: <<http://www.hydroquebec.com/comprendre/notions-de-base/tempete-mars-1989.html>>.
- JOHNSON, D. E.; HILBURN, J. L.; JOHNSON, J. R. *Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos*. 4. ed. [S.l.]: LTC, 1994. ISBN 9788521612384.
- LEADBEATER, R. *Experiments With A Ku Band (12GHz) Satellite Setup*. 2007. Disponível em: <http://www.threehillsobservatory.co.uk/astro/radio_astronomy/radio_astronomy_1.ht>.
- MILLER, D. F. Basics of radio astronomy: For the goldstone-apple valley goldstone-apple valley radio telescope. Jet Propulsion Laboratory, California, EUA, 1998. Disponível em: <<http://www.jpl.nasa.gov/radioastronomy>>.
- NASA. *SDO - Solar Dynamics Observatory: A guide to the mission and purpose of nasa's solar dynamics observatory*. 2009. Disponível em: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/docs/SDO_Guide.pdf>.

NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 7. ed. [S.l.]: LTC, 2017. ISBN 9788521634355.

NOAA. *Magnetic Field Calculators*. 2018. Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>>.

PINTO, C. H.; ARANHA, N. Construção de radiotelescópio para análise de micro-ondas solares em 12 ghz. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, scielo, v. 40, 00 2018. ISSN 1806-1117. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172018000200412&nrm=iso>.

SILVA, A. L. d. Radioastronomia: um texto introdutório. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.cdcc.usp.br/cda/cursos/2013/introducao-astronomia-2s/aula-6-estrelas/Radioastronomia-Andre.pdf>>.

SOLARSTORMS.ORG. *May 13, 1921 – The New York Railroad Storm*. 1921. Disponível em: <<http://www.solarstorms.org/SS1921.html>>.

THOMPSON, C.; SHURE, L. *Global Optimization Toolbox: User's Guide (r2020a)*. MathWorks, 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/solverconfiguration.html>>.

A - LISTA DE MATERIAIS

Tabela 5 – Hardware e *Software* Necessários.

Item	Especificação
1x Funduino Mega 2560	Placa de prototipagem compatível com aplicações de Arduino.
1x Satélite Finder (SatFinder)	Dispositivo medidor de intensidade do sinal de satélites. Tensão de alimentação CC: 13 – 18 V.
1x Fonte Simétrica de Bancada	Tensão de saída CC: 0 – 32 V; Corrente de saída: 0 – 5 A; Tensão de alimentação: 127/220 V. rad/s
2x Cabos coaxiais	Um completo de 3 m para ligar na antena e outro de 30 cm para alimentação do Satélite Finder.
1x Microcomputador	O.S. Ubuntu GNU/Linux, com suporte a linguagem de programação Python 3.
<i>ViewDuino</i>	<i>Software</i> gratuito para plotagem e armazenamento de dados.
IDE de Programação Arduino	<i>Software</i> gratuito para editar e gravar programas nas placas Arduino.

B - CÓDIGO PARA PLACA FUNDUINO MEGA 2560

```
float radio = 0; // Define que o positivo do SatFinder será ligado no pino analógico A0 da placa
int contador = 0; // Inicia o contador em 0

float val, valmv; // variáveis de trabalho

void setup()
{
  analogReference(INTERNAL1V1); // Configuração para melhorar a precisão das placas MEGA
  Serial.begin(9600); // Velocidade de comunicação pela porta serial USB
}

/*
No monitor serial será mostrado de 0 a 1024 (variável val), sendo que para o caso de um
potenciômetro alimentado com 1.1 V, o valor 1024 indica máxima tensão. Como queremos medir
dados que variam na escala de milivolts, vamos converter a variável val para a escala de milivolts
usando a expressão de valmv.
*/

void loop()
{
  val = analogRead(radio); // Lê o valor do SatFinder armazenado na variável radio
  contador = contador + 5; // Contagem de cinco em cinco segundos a partir de zero
  valmv = (110*(val/1024)); // Expressão para converter o valor de volts para milivolts
  Serial.print(valmv); // Exibe o valor de tensão em milivolts
  Serial.print(";"); // Exibi um caractere para separação dos dados pelo ViewDuino
  Serial.println(contador); // Exibe o valor da contagem
  delay(5000); // Espera cinco segundos para refazer a leitura e exibir
}
```