

# DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO RÁDIO BASE PARA RECEPÇÃO DE SINAIS DE HRPT

João Gabriel Fioruci Roberto <sup>1</sup>; Ricardo Caranicola Caleffo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno do Instituto Mauá de Tecnologia;

<sup>2</sup> Professor do Instituto Mauá de tecnologia.

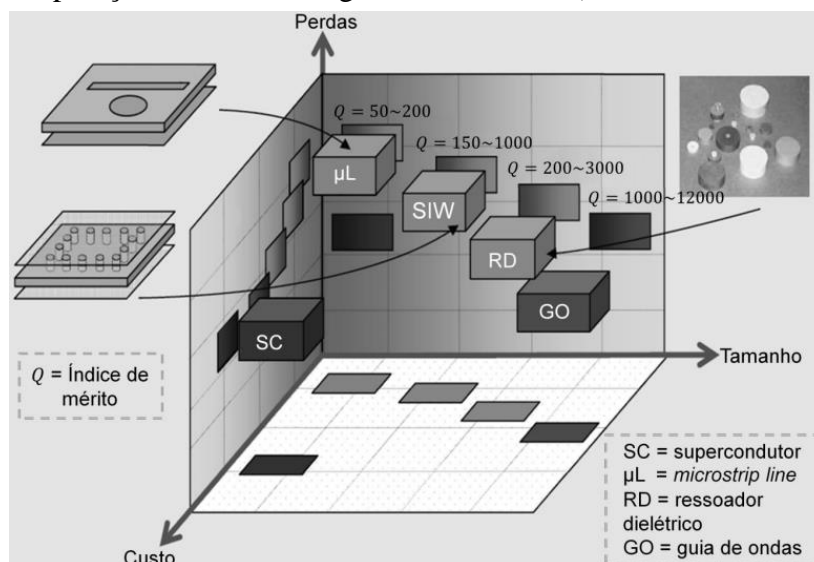
**Resumo.** *O presente trabalho apresenta uma proposta de estação rádio base de baixo custo e bom desempenho em frequências acima de 1 GHz, com particular interesse na frequência de 1,7 GHz, para receber sinais de HRPT. Foram analisados e caracterizados dispositivos como: antena Yagi-Uda, divisor de Wilkinson, amplificador de baixo ruído e RTL-SDR V3. O hardware foi integrado considerando aspectos como casamento de impedância, perda de potência e fabricação de estrutura mecânica. Dados experimentais obtidos com um Vector Network Analyzer (VNA) comprovaram o bom desempenho individual de cada componente, estando de acordo com resultados teóricos.*

## Introdução

Com o término da Segunda Guerra Mundial e a consolidação da tecnologia de radares, iniciou-se a discussão sobre a possibilidade de utilizar satélites geoestacionários, estrategicamente posicionados ao longo do equador, para viabilizar a comunicação global. Assim, por volta da década de 1960, com o advento das células solares, o satélite militar Courier 1B se destacou na história das telecomunicações ao possibilitar a retransmissão de dados enviados por estações terrestres. Com isso, a ambição de integrar satélites, estações terrestres e dispositivos eletrônicos passou a dominar o pensamento da sociedade de engenheiros do século XX.

Na conjuntura atual, as tecnologias de radiofrequência (RF) e micro-ondas (MW) permitem a ampla utilização das décadas de estudo sobre a modelagem de fenômenos eletromagnéticos. Se destacam entre elas o guia de ondas e a tecnologia de circuitos planares, se destacando o *Substrate Integrated Waveguide* (SIW), *Microstrip* e *Stripline* (Pozar, 2011). Uma comparação entre as tecnologias de RF e MW é ilustrada na Figura 1, apresentando relações entre tamanho físico, perdas e custo. A expansão do uso de tecnologias planares possibilita, pela redução de tamanho físico e integração entre demais circuitos operando em elevadas frequências, a exploração dos nano satélites, ao passo que avança para a otimização da eletrônica embarcada em satélites de maior porte.

Figura 1 – Comparações entre tecnologias de MW e RF (Caleffo, 2016 e Caleffo, 2021).



Aproveitando do surgimento desses avanços, surge a plataforma americana SatNOGS, estabelecendo uma rede global que viabiliza observações e captações de dados dos mais de 1700 satélites, nano satélites e *cubesats* pelas mais de 450 estações em pleno funcionamento, dando enfoque aos satélites de baixa órbita terrestre (*Low Earth Orbit - LEO*). A plataforma, por dez anos, ascende uma comunidade que anseia pelo progresso da comunicação espacial e que almeja o conhecimento.

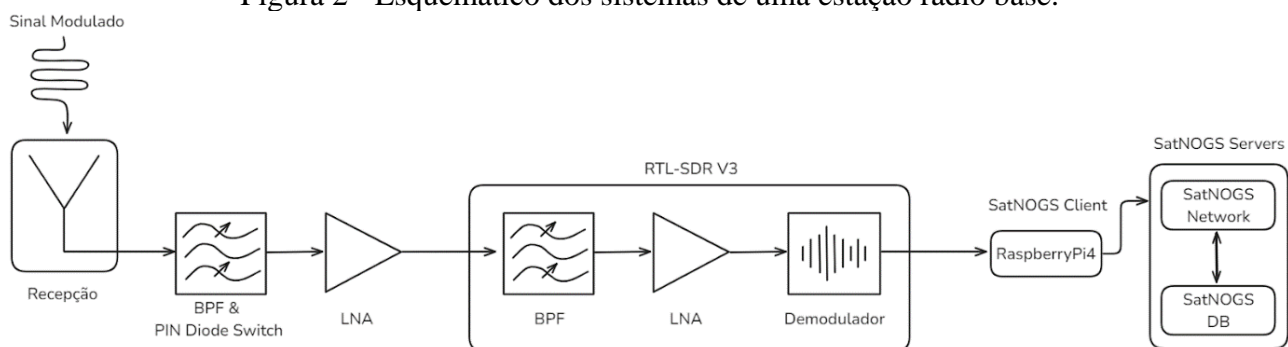
Dessa forma, o presente estudo almeja contribuir com a comunidade, detalhando os componentes de uma estação rádio base e buscando compreender e aplicar os fenômenos eletromagnéticos que regem os seus comportamentos, dando enfoque aos circuitos planares, a fim de proceder à sua construção e posterior integração à plataforma SatNOGS, considerando uma relação custo-benefício significativa.

## Material e Métodos

Os transmissores de satélites são partes cruciais para a validação dos objetivos de uma missão aeroespacial, permitindo a troca de dados entre os dispositivos e as estações rádio base por meio da propagação de ondas eletromagnéticas. Contudo, a grande diversidade de transmissores disponíveis é um ponto crucial para a determinação dos componentes de uma estação terrena. Este trabalho analisa a recepção de sinais gerados por transmissores do tipo *High Resolution Picture Transmission (HRPT)*, que possuem polarização circular e operam na banda L, 1 a 2 GHz, em torno de 1,7GHz.

Em uma análise inicial, é importante destacar que a plataforma SatNOGS disponibiliza uma documentação robusta, proporcionando maior praticidade na montagem dos componentes. Assim, os dispositivos recomendados foram ajustados para atender às necessidades deste projeto. A Figura 2 ilustra o esquema de um sistema de recepção de sinais e sua integração com o software da plataforma.

Figura 2 - Esquemático dos sistemas de uma estação rádio base.



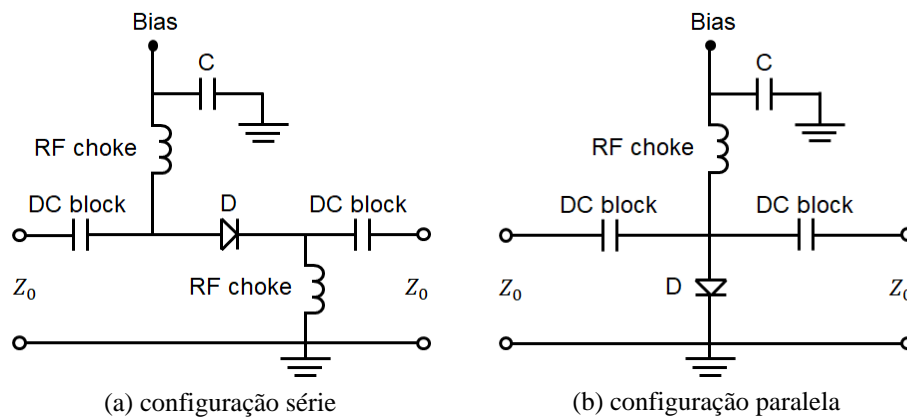
O sistema adotado para a recepção dos sinais de RF é composto por um arranjo (*array*) de três antenas Yagi-Uda, defasadas em  $120^\circ$  entre si, cujas potências são combinadas eletricamente com o uso de dois divisores de Wilkinson (Pozar, 2011). Essa configuração foi escolhida devido à capacidade de ampliar a cobertura da região de passagem do satélite, aumentando o período de tempo durante o qual os dados podem ser captados, o que é especialmente relevante para a coleta de dados contínuos, como imagens de satélites. Adicionalmente, o uso de um *array* de antenas com essa configuração é uma solução prática para sistemas que evitam empregar antenas com sistemas de rastreamento mecânico. Em muitos casos, a instalação de sistemas mecânicos de rotação, utilizados para ajustar a orientação da antena conforme o movimento do satélite, aumenta significativamente a complexidade e o custo da estrutura. Embora sistemas rotativos sejam uma alternativa viável para maximizar a recepção de sinais ao manter a antena constantemente alinhada com o satélite, essa abordagem envolve desafios técnicos e mecânicos que fogem ao escopo do trabalho em questão.

Em seguida, é necessário filtrar o sinal recebido utilizando um filtro do tipo passa-faixas com o objetivo de aumentar a relação sinal-ruído  $S/N$ , sendo  $S$  a potência do sinal desejado e  $N$  a potência do ruído.

A resposta em frequência desejada pode ser obtida por meio de circuitos em linha de transmissão, uma vez que são projetados com dimensões particulares para um comprimento de onda, associado, por sua vez, a uma frequência nominal. Contudo, seu comportamento não é ideal, o que permite, na prática, a passagem de uma banda de frequência sem perdas consideráveis.

No mesmo contexto, está em fase de desenvolvimento um circuito com a funcionalidade de permitir/bloquear a passagem de sinais de RF. Sua funcionalidade explora o uso de diodos PIN, componente que permite o controle e chaveamento em circuitos de micro-ondas, direcionando fluxos de potência e sinais, como também permite projetar atenuadores e diversos circuitos operando em elevadas frequências (Caleffo, 2021, Caleffo & Corraera e Caleffo, 2023). O diodo PIN opera como uma chave aberta ou desligada no estado reverso, já no estado direto, como uma chave fechada ou ligada. No estado reverso, o diodo PIN pode ser modelado pela capacitância de junção de valor reduzido que gera uma impedância relativamente alta em frequências de micro-ondas, enquanto que, no estado direto, a corrente de polarização constante remove a capacitância de junção, permitindo obter um baixo valor de impedância entre os terminais do diodo. O modelo elétrico equivalente na operação de estado direto é um circuito RL (resistor-indutor) (Microsemi-Watertown, 1998). A Figura 3 ilustra os circuitos de duas chaves a diodo PIN, nas configurações série e paralela, para permitir o chaveamento e controle do sinal recebido, no qual, optou-se pela configuração paralela no presente trabalho por conferir perdas por inserção reduzidas e melhor isolamento, em relação a configuração série (Caleffo, 2021).

Figura 3 - Chaves a diodo PIN: (a) configuração série; e (b) configuração paralela.



Para aplicar a tensão de polarização é necessária à utilização de filtros de polarização, empregando componentes discretos como *chokes* de RF, indutores específicos para circuitos de micro-ondas, e capacitores de bloqueio CC, *DC blocks*, e componentes distribuídos usando linhas de transmissão. O uso de linhas de transmissão permite uma banda estreita de operação, conferindo a passagem de sinal na banda de interesse e uma característica de filtro passa-faixa.

Com o sinal já devidamente filtrado, a próxima etapa é a amplificação, realizada por meio de um *Low-Noise Amplifier* (LNA), amplificador de baixo ruído, dispositivo crucial em sistemas de RF e micro-ondas, projetado especificamente para amplificar sinais de baixa potência, acrescentando pouco ruído e preservando a qualidade do sinal de interesse.

Um fator importante para a eficiência de um LNA é sua figura de ruído  $NF$ , determinada pela Equação 1, uma medida que quantifica a degradação da relação sinal-ruído e permite a determinação da quantidade de ruído adicional introduzido durante a amplificação

$$NF = 10 \log \left[ \frac{(S_i/N_i)}{(S_o/N_o)} \right] = 10 \log (S_i/N_i) - 10 \log (S_o/N_o), \quad (1)$$

sendo  $S_i/N_i$  a relação sinal-ruído na entrada do LNA e  $S_o/N_o$  a relação sinal-ruído na saída do LNA. Valores baixos de figura de ruído são altamente desejáveis, pois indicam que o amplificador é capaz de amplificar o sinal sem comprometer significativamente sua qualidade.

Para maximizar o desempenho de um LNA, é essencial posicioná-lo o mais próximo possível das antenas. Isso ocorre porque as linhas de transmissão, transições e conectores são fontes de atenuação de sinal e introdução de ruído. Essas perdas podem se tornar significativas quando amplificadas posteriormente no sistema. Ao instalar o LNA próximo à antena, minimiza-se a quantidade de ruído coletado pelos cabos antes da amplificação, garantindo que o amplificador atue sobre o sinal mais puro possível. Sua importância para a exploração espacial e para tecnologias de micro-ondas é inquestionável, sendo um componente crucial na recepção de sinais de satélites.

O estágio final do processamento do sinal é realizado por um *Software Defined Radio* (SDR), dispositivo que permite a manipulação de sinais analógicos por meio de controle via *software*, conferindo alta flexibilidade e otimização de custos. Este dispositivo, de formato compacto, viabiliza uma ampla gama de aplicações em sistemas de eletrônica embarcada, sendo um componente essencial no desenvolvimento deste projeto. No contexto de monitoramento de satélites, suas principais funções incluem a filtragem, amplificação, demodulação e conversão de sinais analógicos em digitais, permitindo sua integração com outros softwares para processamentos subsequentes. A escolha do RTL-SDR é fortemente recomendada pela plataforma SatNOGS, contando com fóruns virtuais e blogs que detalham seu funcionamento e aplicação.

O acoplamento das antenas foi feito em uma estrutura mecânica, ilustrada na Figura 4. Será acoplada ao suporte uma caixa de alumínio, capaz de blindar ruídos externos para os combinadores de potência e para o LNA.

Figura 4 – Estrutura mecânica responsável por sustentar as três antenas de recepção.

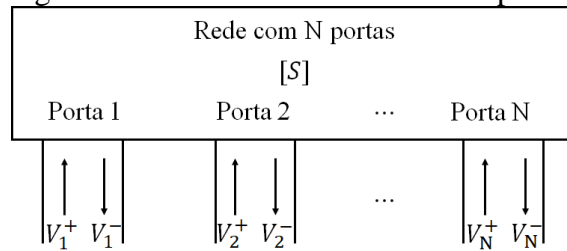


## Resultados e Discussão

Com o conhecimento prévio dos componentes fundamentais de uma estação rádio base, a etapa seguinte consistiu na caracterização elétrica para verificar o desempenho de cada dispositivo. Essa fase foi crucial para garantir que todos os componentes operem conforme especificado e integrem-se de maneira eficiente ao sistema. Para realizar essa análise, foi utilizado um *Vector Network Analyzer* (VNA) E5063A da Keysight. O VNA permite avaliar os parâmetros da matriz de espalhamento, matriz  $[S]$ , que descrevem o comportamento de sinais de RF nas interfaces de entrada e saída dos dispositivos.

A Figura 5 ilustra uma rede de micro-ondas de  $N$  portas, onde  $V_n^+$  é a amplitude da onda de tensão incidente e  $V_n^-$  é a amplitude da onda de tensão refletida na  $n$ -ésima porta.

Figura 5 – Rede de micro-ondas de  $N$  portas.



A matriz  $[S]$ , é definida como sendo a razão entre ondas de tensão incidente e refletida (Pozar, 2011), e tem dimensão em função da quantidade da rede de micro-ondas

$$[V^-] = [S][V^+], \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix}, \quad (3)$$

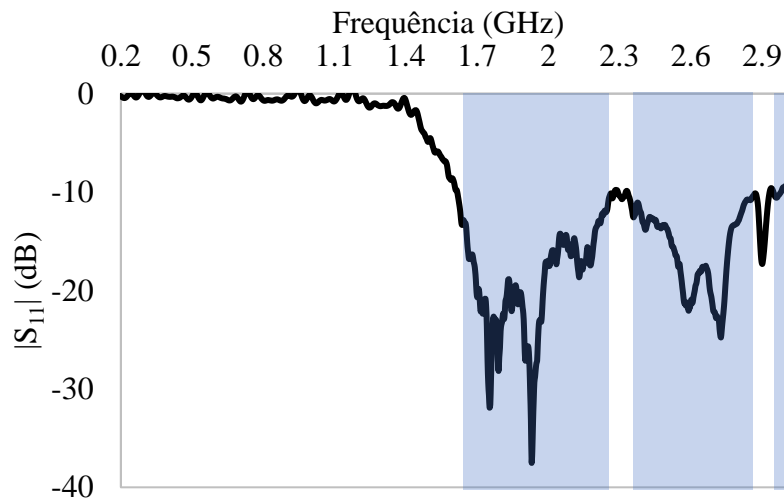
sendo  $S_{ij}$  um elemento específico de  $[S]$

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0, k \neq j}. \quad (4)$$

Nesse contexto, o parâmetro  $S_{ii}$  é o coeficiente de reflexão na porta  $i$  considerando as demais portas casadas. O parâmetro  $S_{ij}$  está associado à transmissão de sinal da porta  $i$  para a porta  $j$ . Tendo conhecimento da natureza da matriz de espalhamento e dos parâmetros  $S$  dos dispositivos de micro-ondas, o passo subsequente consistiu na utilização do VNA para caracterizar tais parâmetros em cada dispositivo.

Primeiramente, as antenas foram dimensionadas com base na frequência de operação dos transmissores HRPT, em torno de 1,7 GHz. Usualmente, considera-se como banda de operação de uma antena valores de  $|S_{11}|$  iguais ou inferiores a -10 dB, sendo esta uma métrica fundamental para avaliar o desempenho de antenas em termos de reflexões de sinal. A Figura 6 ilustra  $|S_{11}|$  em dB em função da frequência em GHz.

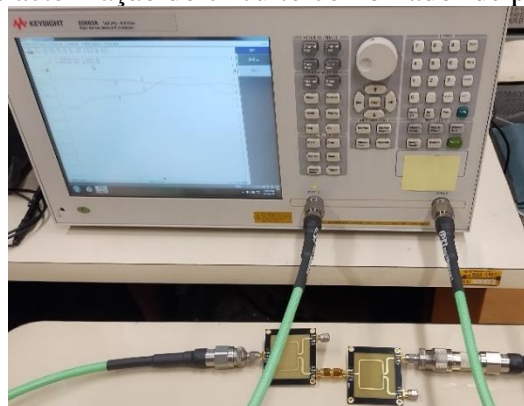
Figura 6 –  $|S_{11}|$  da antena Yagi-Uda caracterizada.



Na Figura 6, a banda de 10 dB está marcada na cor azul, onde o módulo do parâmetro  $S_{11}$  é igual a -20,69 dB na frequência de 1,7 GHz, demonstrando que a antena possui desempenho apropriado. No entanto, observa-se que, para frequências abaixo da faixa de 1,7 GHz, a antena apresentou uma elevada perda de retorno, indicando um desempenho desfavorável fora de sua banda de operação principal. Isso é comum em antenas projetadas para uma frequência específica, pois sua impedância é otimizada para minimizar as reflexões e maximizar a eficiência em uma faixa de frequência restrita, o que pode resultar em um desempenho degradado fora dessa faixa. Em resumo, a análise de  $|S_{11}|$  demonstra que a antena é eficiente na frequência de 1,7 GHz e adequada para a recepção de sinais HRPT.

Continuando no diagrama ilustrado pela Figura 2, após caracterizar a antena, é verificado o desempenho dos divisores de potência, responsáveis por combinar os sinais recebidos pelas três antenas. Neste contexto, foram considerados dois divisores de Wilkinson conectados em cascata. Nessa configuração, houve uma saída e três entradas, onde cada entrada foi conectada a uma antena. A Figura 7 ilustra a caracterização dos dois divisores, sendo o lado direito as três entradas e a esquerda a saída, a ser conectada ao LNA. As portas que não estão conectadas ao VNA estão casadas com cargas de 50  $\Omega$ .

Figura 7 – Caracterização do circuito combinador de potência.



A Figura 8 ilustra os parâmetros  $|S_{ij}|$  de um único divisor e a Figura 9 ilustra os parâmetros de espalhamento dos dois divisores conectados em cascata; ambos os gráficos são referentes a dados experimentais, sendo as curvas em azul  $|S_{21}|$  e as curvas na cor preta  $|S_{11}|$ .

Figura 8 –  $|S_{ij}|$  em função da frequência de um único divisor.

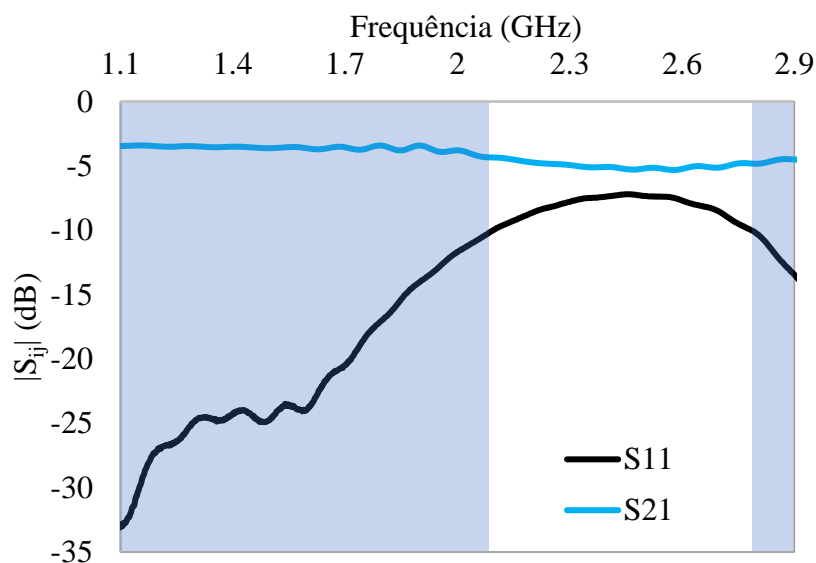
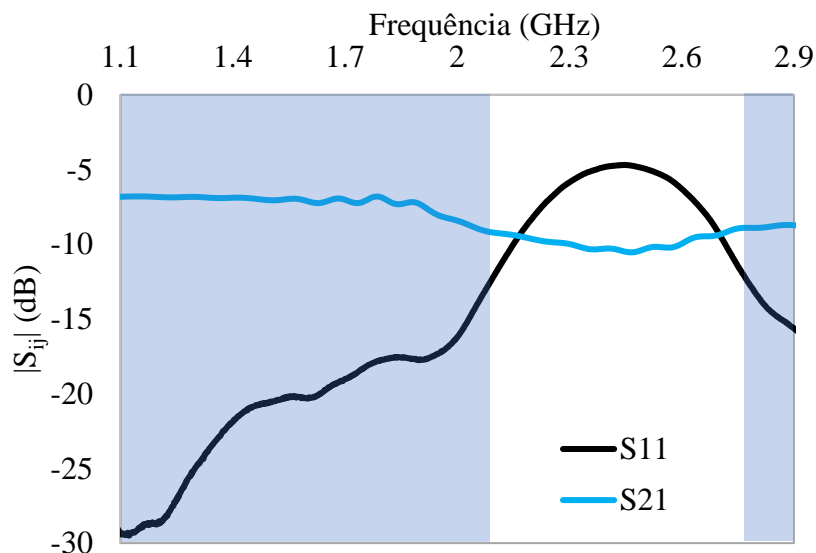


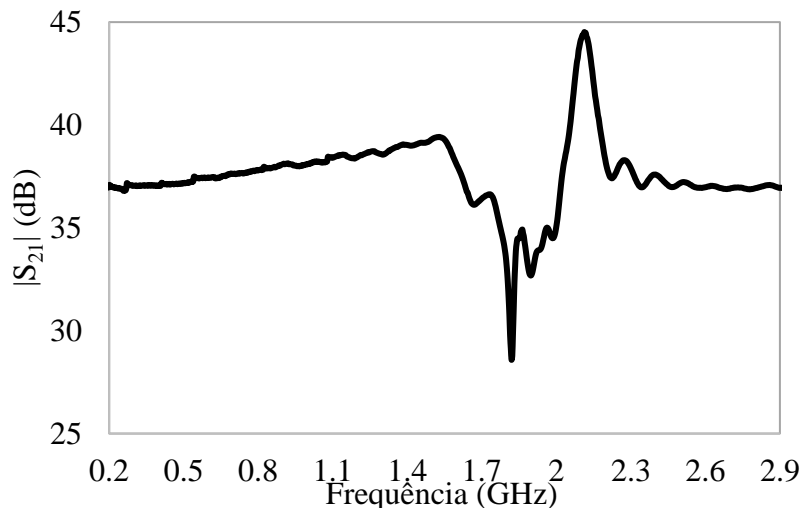
Figura 9 –  $|S_{ij}|$  em função da frequência do circuito combinador de potência.



De acordo com a caracterização realizada, um único divisor de Wilkinson apresentou perda por inserção de 3,55 dB em 1,7 GHz, o que está de acordo com resultados teóricos. De maneira ideal, espera-se uma queda de 3 dB na potência do sinal de entrada para cada saída, ou seja, uma redução de 50% no valor da potência. O valor incremental de 0,55 dB é devido a descasamentos de impedância devidos aos conectores e ao substrato dielétrico utilizado, que possui tangente de perdas diferentes de zero, o que afeta consideravelmente a operação do dispositivo em frequências superiores a 1 GHz. Em relação aos divisores conectados em cascata, foi observada perda por inserção de 7,03 dB em 1,7 GHz, demonstrando que as relações de queda de potência foram preservadas. Em ambas as situações, foram observadas perdas de retorno melhores que 19 dB.

De acordo com o exposto, a combinação de sinais de três antenas acarretará em uma redução na potência recebida via ar. Para compensar tal efeito, um LNA foi empregado e tem como principal objetivo aumentar o nível de potência do sinal de interesse, acrescentando o mínimo possível de ruído. A Figura 10 apresenta o parâmetro  $|S_{21}|$  obtido experimentalmente.

Figura 10 –  $|S_{21}|$  em função da frequência do LNA.



De acordo com os dados obtidos com o VNA, o amplificador de baixo ruído apresentou  $|S_{21}|$  igual a 36,43 dB em 1,7 GHz, abaixo dos 40 dB apresentados pelo fabricante, mas suficiente para compensar as perdas inseridas pelos combinadores de potência e cabos.

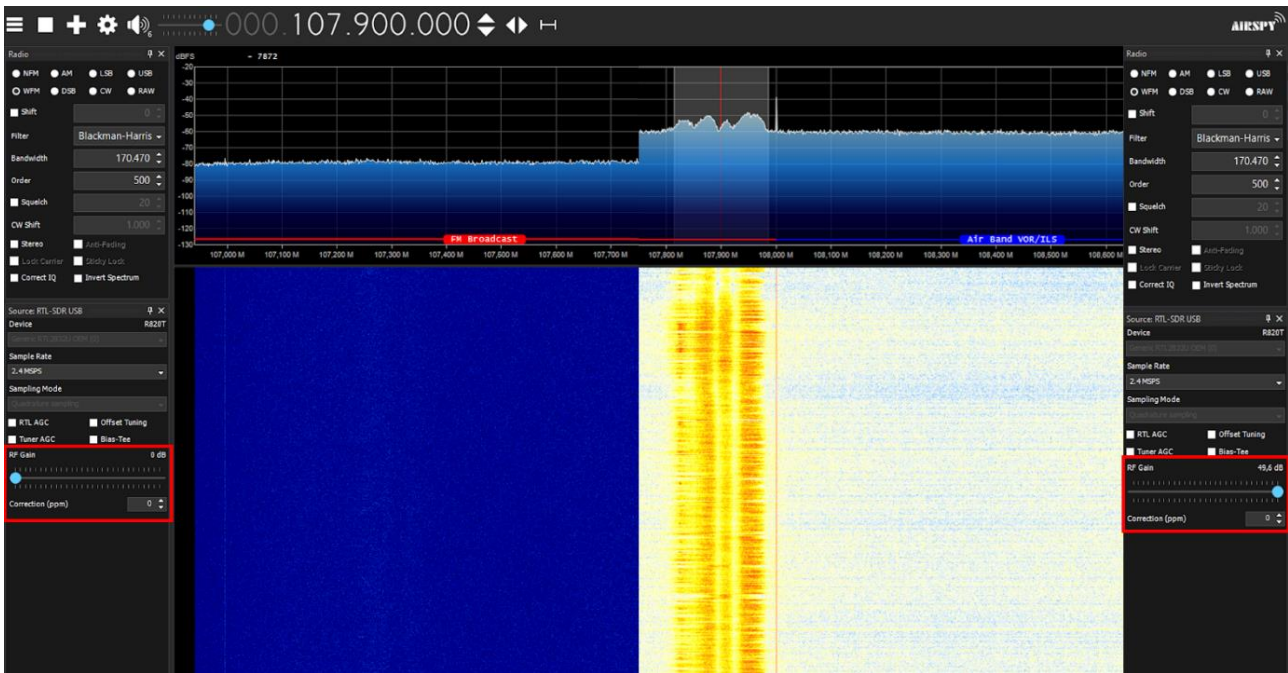
De maneira geral, as caracterizações das antenas, divisores/combinadores de potência e LNA, apresentaram resultados satisfatórios, demonstrando que a integração de todos esses componentes permite a recepção de sinais via ar na frequência de interesse, em torno de 1,7 GHz, de modo apropriado, sem comprometer de forma significativa a qualidade do sinal recebido. É importante ressaltar que todos os componentes a serem utilizados na estação rádio base tiveram de ser caracterizados, pois trabalhar em frequências acima de 1 GHz requer cuidados consideráveis. Após a amplificação do sinal pelo LNA e a transmissão via cabos, o SDR é o próximo dispositivo da estação rádio base.

As funcionalidades do SDR também foram avaliadas, utilizando o software SDR# (SDR Sharp), amplamente empregado por radioamadores devido à sua versatilidade e ampla gama de ajustes. O software permite a modificação de diversos parâmetros que impactam diretamente a qualidade da recepção de sinais, como largura de banda, filtros de frequência e ajuste fino de ganho, tornando-o uma ferramenta poderosa para operar com diferentes dispositivos SDR.

A Figura 11 destaca algumas das principais funcionalidades do software, com ênfase na capacidade de ajuste de ganho do dispositivo RTL-SDR V3. Na parte superior da imagem, o eixo horizontal diz respeito à frequência de observação, enquanto o eixo vertical, à potência de recepção. No espectrograma, o eixo horizontal corresponde à mesma frequência da parte superior, já na vertical, observa-se o decorrer do tempo.



Figura 11 - A esquerda, um espectrograma sem ganho adicional e a direita, o mesmo espectrograma com ganho máximo do dispositivo.



Pela escala de cores no espectrograma, onde os tons escuros correspondem a baixas potências e os claros, potências mais elevadas, percebe-se que a potência, até mesmo do ruído, teve ganho considerável. Isso porque o LNA interno do dispositivo teve seu valor configurado para garantir o maior ganho (49,6 dB).

## Conclusões

O presente trabalho de iniciação científica apresentou uma possibilidade de desenvolver uma estação rádio base de baixo custo e bom desempenho em frequências acima de 1 GHz. Foram analisados e caracterizados dispositivos essenciais para recepção de sinais via ar, oriundos de grandes distâncias, com particular interesse na frequência de 1,7 GHz. A integração entre todos os dispositivos foi considerada, levando em conta requisitos como casamento de impedância, perda de potência, fabricação de estrutura mecânica, aquisição de componentes do exterior, caracterização elétrica e simulação computacional. Todos os dispositivos analisados que fazem parte da estação rádio base demonstraram bons resultados, considerando os conceitos teóricos da área de micro-ondas e radiofrequência, permitindo a concepção de uma rádio base de baixo custo a ser finalizada em um curto período de tempo.

## Referências Bibliográficas

- Caleffo, R. C. (2016). *Estudo e aplicação de guias de ondas integrados ao substrato em frequências de micro-ondas*. Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo.
- Caleffo, R. C. (2021). *Estruturas passivas sintonizáveis em tecnologia SIW no espectro de micro-ondas*. Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Caleffo, R. C., & Correra, F. (2021). A novel and compact 3.5 GHz tunable bandpass filter in SIW technology with shunt-inductive discontinuities switched by pin diode switches. *Microwave and Optical Technology Letters*.
- Caleffo, R. C., & Correra, F. (2023). Determining a Perturbation Factor to Design Tunable Resonant Cavities in SIW Technology. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*.
- Microsemi-Watertown. (1998). *The pin diode circuit designers' handbook*. Watertown.
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering* (4<sup>o</sup> ed.). New York: John Wiley & Sons.