

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA – FESJ/UNESP  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

BRUNO GOMES DE OLIVEIRA

PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MEDIDOR DE CORRENTE LOGARÍTMICO  
PARA AS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DO ACELERADOR DE PARTICULAS SIRIUS

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

BRUNO GOMES DE OLIVEIRA

PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MEDIDOR DE CORRENTE LOGARÍTMICO  
PARA AS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DO ACELERADOR DE PARTICULAS SIRIUS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de  
Mesquita Filho” como requisito para obtenção  
de título de Bacharel em Engenharia Eletrônica  
e de Telecomunicações.

Orientador: Profa. Dra. Paula Ghedini Der  
Agopian

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

O48p

Oliveira, Bruno Gomes de

PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MEDIDOR DE CORRENTE LOGARÍTMICO PARA AS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DO ACELERADOR DE PARTICULAS SIRIUS / Bruno Gomes de Oliveira. – São João da Boa Vista, 2023  
45 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientadora: Paula Ghedini Der Agopian

1. Eletrônica. 2. Correntes elétricas. 3. Circuitos eletrônicos. 4. Amplificadores operacionais. 5. Radiação sincrotrônica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MEDIDOR DE CORRENTE  
LOGARÍTMICO PARA AS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DO ACELERADOR DE  
PARTÍCULAS SIRIUS**

Aluno: Bruno Gomes de Oliveira

Orientador: Profa. Dra. Paula Ghedini Der Agopian

Banca Examinadora:

- Paula Ghedini Der Agopian (Orientadora)
- Afonso José Prado (Examinador)
- Edgar Eduardo Benitez Olivo (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 94/2022)

São João da Boa Vista, 22 de junho de 2023

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha mãe, Rosana Galdino de Oliveira, por seu amor incondicional, apoio incansável e torcida inabalável pelo meu sucesso. Sua presença é meu maior apoio.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante essa jornada de graduação. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me guiar e me proporcionar força e sabedoria ao longo de todo o processo.

À minha mãe, Rosana Galdino de Oliveira, sou imensamente grato pelo amor, apoio incondicional e pelos constantes incentivos. Sua presença foi fundamental em cada etapa dessa trajetória.

Agradeço também à Ingridi Lemes Breves, que esteve ao meu lado nos momentos mais desafiadores, sempre me incentivando a seguir em frente. Sua companhia foi um verdadeiro pilar de apoio.

Expresso minha gratidão à minha orientadora, Paula Ghedini Agopian, pela sua dedicação, orientação e valiosas contribuições ao meu trabalho

Não posso deixar de mencionar meu coorientador e supervisor de estágio, Fernando Henrique Cardoso, que me proporcionou valiosas oportunidades de aprendizado e crescimento profissional. Agradeço também aos companheiros do Grupo de Instrumentação Eletrônica, cuja colaboração e troca de ideias enriqueceram meu trabalho.

Aos meus amigos do Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicação, agradeço pela amizade, pelos momentos compartilhados e pelo apoio mútuo ao longo dessa jornada acadêmica.

Agradeço especialmente aos meus amigos pessoais, Vitor Henrique Alberto e Lucas Gabriel Cardoso, pelo incentivo constante, pelo suporte emocional, o companheirismo ao longo de todo o curso, conversas, risadas, etc. Suas amizades verdadeiras foram um grande conforto para mim.

Agradeço aos meus orientadores de Iniciação Científica, Ivan Aritz Aldays Garde e Cyntia Wink Benedito de Oliveira, pela oportunidade de participar de um projeto de pesquisa tão enriquecedor. Suas orientações e conhecimentos contribuíram significativamente para o meu crescimento acadêmico.

Por fim, expresso minha gratidão aos professores da UNESP, cuja dedicação e conhecimentos transmitidos foram fundamentais para a minha formação acadêmica. Agradeço

por compartilharem seu saber e por contribuírem para o meu desenvolvimento como profissional.

A todos vocês, meu mais profundo agradecimento. Sem o apoio, a compreensão e a amizade de cada um, eu não teria sido capaz de concluir essa etapa tão importante da minha vida acadêmica. Sou grato por fazerem parte da minha jornada e por terem sido fontes de inspiração e motivação.

*“A tua palavra é lâmpada que ilumina os meus passos e luz que clareia o meu caminho.”*

*Salmo 191:105*

## RESUMO

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), localizado no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) é uma infraestrutura científica de última geração que abriga o Sirius, um equipamento de grande porte utilizado para gerar luz síncrotron. Essa luz é uma forma especial de radiação eletromagnética que abrange uma ampla faixa espectral, oferecendo versatilidade para análises em diversas áreas do conhecimento. No entanto, a medição precisa e estável das correntes elétricas geradas pelos fótons nas linhas de luz é essencial para o bom funcionamento dos experimentos. Atualmente, o LNLS utiliza um amperímetro de precisão com troca de escalas para realizar as medidas de corrente. No entanto, essa abordagem apresenta desvantagens, como a modificação brusca da relação sinal-ruído com a mudança do resistor de realimentação, comprometendo a qualidade das medidas. Para contornar esse problema, propõe-se o desenvolvimento de um picoamperímetro baseado em amplificador logarítmico para medir correntes de diferentes magnitudes sem a necessidade de troca de escalas. O amplificador logarítmico selecionado para o projeto é o ADL5304, conhecido por sua ampla faixa de medida, abrangendo correntes que variam de 1pA a 10mA. Esse dispositivo possui dois canais, permitindo não apenas a medição de uma corrente singular, mas também o cálculo do logaritmo da razão entre duas correntes, o que é útil em experimentos de absorção de raios-X. O trabalho consistiu na caracterização e prototipagem do picoamperímetro baseado no ADL5304, garantindo sua precisão, estabilidade e adequação às necessidades das linhas de luz do LNLS. Foram realizados testes de desempenho, análise de ruído e comparações com os amperímetros atualmente utilizados. Também foram exploradas soluções para contornar o problema da característica unipolar em medições de corrente. Ao longo do desenvolvimento são abordadas diferentes técnicas para mitigação de perdas na medição e redução de sensibilidade ao ruído, apresentando o projeto de hardware que atenda tais requisitos. O picoamperímetro baseado em amplificador logarítmico projetado neste trabalho é uma alternativa viável e de baixo custo em comparação com as soluções comerciais atualmente utilizadas. A sua implementação nas linhas de luz do LNLS poderá melhorar a precisão e estabilidade das medidas de corrente, contribuindo para o avanço da pesquisa científica.

**Palavras-chave:** Medição de correntes, Picoamperímetro, Amplificadores logarítmicos.

## ABSTRACT / RESUMEN

The National Synchrotron Light Laboratory (LNLS), located at the National Center for Energy and Materials Research (CNPEM), is a state-of-the-art scientific infrastructure housing Sirius, a large-scale equipment used to generate synchrotron light. This light is a special form of electromagnetic radiation that covers a wide spectral range, offering versatility for analysis in various fields of knowledge. However, precise and stable measurement of the electric currents generated by photons in the beamlines is essential for the proper functioning of experiments. Currently, LNLS uses a precision ammeter with scale switching to perform current measurements. However, this approach has disadvantages, such as abrupt changes in the signal-to-noise ratio with the change of the feedback resistor, compromising measurement quality. To overcome this problem, the development of a picoammeter based on a logarithmic amplifier is proposed to measure currents of different magnitudes without the need for scale switching. The selected logarithmic amplifier for the project is the ADL5304, known for its wide measurement range, covering currents ranging from 1pA to 10mA. This device has two channels, allowing not only the measurement of a single current but also the calculation of the logarithm of the ratio between two currents, which is useful in X-ray absorption experiments. The work consists of characterizing and prototyping the picoammeter based on the ADL5304, ensuring its precision, stability, and suitability for the needs of LNLS beamlines. Performance tests, noise analysis, and comparisons with the currently used ammeters will be carried out. Solutions will also be explored to overcome the unipolar characteristic issue in current measurements. Throughout the development, different techniques for loss mitigation in measurement and reduction of noise sensitivity are addressed, presenting a hardware project that meets these requirements. It is expected that the picoammeter based on the logarithmic amplifier designed in this work will be a viable and cost-effective alternative compared to the currently used commercial solutions. Its implementation in LNLS beamlines could improve the precision and stability of current measurements, contributing to the advancement of scientific research.

**Keywords:** Current measurement, Picoammeter, Logarithmic amplifiers.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Acelerador de Partículas UVX.....	15
Figura 2 - Centro de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) .....	16
Figura 3 - Fontes de luz síncrotron no mundo.....	17
Figura 4 - Vista do interior da blindagem do acelerador de partículas.....	18
Figura 5 - Principais partes do acelerador de partículas. (1)Linac, (2)Booster, (3)Anel de armazenamento e (4)Linhas de Luz. ....	18
Figura 6 - Localização das linhas de luz no prédio do Sirius. ....	21
Figura 7 - Estrutura para medidas de corrente nas linhas de luz.....	22
Figura 8 - Topologia para uma amplificador de transimpedância. ....	23
Figura 9 - Ruído RMS do picoamperímetro de transimpedância em diferentes escalas. ....	24
Figura 10 - Topologia de um amplificador logarítmico.....	26
Figura 11 - Estrutura simplificada de um circuito integrado ADL5304 .....	27
Figura 12 - Topologia para espelho de corrente precisa .....	28
Figura 13 - Teste em bancada da topologia proposta .....	28
Figura 14 - Gráfico de Linearidade e erro para o ADL5315 .....	30
Figura 15 - Kit de avaliação do ADL5304 e ADL5315 respectivamente.....	31
Figura 16 - Gráfico de tensão de saída por corrente de entrada .....	32
Figura 17 - Gráfico de tensão de saída por corrente de entrada de 100 fA a 10 pA.....	32
Figura 18 - Gráfico de erro relativo por corrente de entrada .....	33
Figura 19 - Gráfico de comparação de ruído RMS entre picoamperímetros.....	34
Figura 20 - Curva de frequência de corte em função da corrente de entrada.....	35
Figura 21 - Diagrama de blocos referente às diferentes configurações do circuito.....	36
Figura 22 - Região mais sensível do circuito do medidor de corrente logarítmico.....	39
Figura 23 – Conexões externas da placa projetada.....	40
Figura 24 - Vista da camada inferior da placa projetada.....	41
Figura 25 - Vista da camada superior do placa de circuito projetada.....	42
Figura 26 - Visão 3D do equipamento montado .....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LNLS	Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
CNPEM	Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
ABTLus	Associação Brasileira de Luz Síncrotron
LNBio	Laboratório Nacional de Biociências
LNBBr	Laboratório Nacional de Biorrenováveis
LNNano	O Laboratório Nacional de Nanotecnologia
ESRF	<i>European Synchrotron Radiation Facility</i>
Linac	Acelerador Linear
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
RMS	<i>Root Mean Square</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
BOM	<i>Bill of Material</i>
RF	Radio Frequências
CI	Circuito Integrado
UNESP	Universidades Estadual Paulista

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{OUT}$	Tensão de saída
$I_{IN}$	Corrente de entrada
$R_N$	Resistência de realimentação
$V_{BE}$	Tensão base-emissor
$V_T$	Tensão térmica
$I_C$	Corrente de coletor
$I_S$	Corrente de Saturação
$I_{REF}$	Corrente de Referência
$V_{OFS}$	Tensão de <i>Off-set</i>
$V_{LOG}$	Tensão do ADL5304
$k$	Constante de Boltzmann
$T$	Temperatura
$q$	Carga do elétron
$\pi$	Número Pi
$C_j$	Capacitância de junção
A	Ampere
V	Volt
mA	miliampere
nA	nanoampere
pA	picoampere
fA	femtoampere
$\Omega$	ohm
$k\Omega$	kiloohm
$M\Omega$	megaohm
$G\Omega$	gigaohm
$T\Omega$	teraohm
Hz	hertz
MHz	mega-hertz
GHz	giga-hertz

## SUMÁRIO

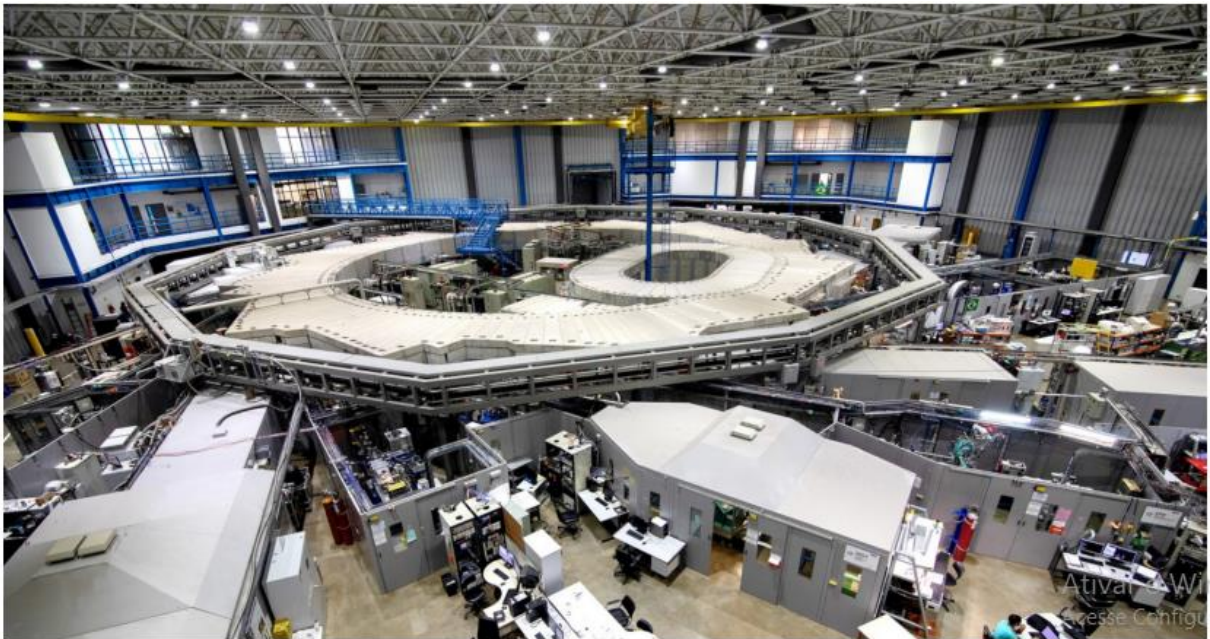
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1. CNPEM.....	15
1.2. LNLS .....	16
1.3. LUZ SÍNCROTRON .....	19
1.4. LINHAS DE LUZ.....	20
1.5. OBJETIVO DO TRABALHO .....	20
<b>2. CONCEITOS BÁSICOS</b> .....	22
2.1 MEDIDAS DE CORRENTE NAS LINHAS DE LUZ .....	22
2.2 AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDÂNCIA .....	23
2.3 AMPLIFICADOR LOGARÍTMICO .....	25
2.3.1 <i>CIRCUITO INTEGRADO ADL5304</i> .....	26
2.4 MEDIDA DE CORRENTE NEGATIVA.....	28
2.4.1 <i>CIRCUITO INTEGRADO ADL5315</i> .....	29
<b>3 METODOLOGIA E AVALIAÇÃO DOS PRIMEIROS RESULTADOS</b> .....	31
<b>4 ELABORAÇÃO E MODELAGEM DO PICOAMPERIMETRO</b> .....	36
4.1 FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO .....	36
4.2 FERRAMENTAS DE PROJETO.....	37
4.3 ESTRATÉGIAS PARA GARANTIR A INTEGRIDADE DO SINAL .....	38
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	44
5.1 PROJETOS FUTUROS .....	44
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	46

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CNPEM

O Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) é uma organização supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, cujo objetivo é impulsionar a inovação nas áreas de biociência, energia e materiais. Fundado em 1997 como Associação Brasileira de Luz Síncroton (ABTLus), o CNPEM é responsável pela construção e operação do Laboratório Nacional de Luz Síncroton (LNLS), que abriga a primeira fonte de Luz Síncroton do hemisfério sul, conhecida como acelerador de partículas UVX (CNPEM, 2011), ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Acelerador de Partículas UVX



Fonte: Imagem retirada de (CNPEM, 2021).

O CNPEM atualmente é composto por quatro importantes laboratórios nacionais. O Laboratório Nacional de Biociências (LNBio) concentra-se em projetos de pesquisa e desenvolvimento nas áreas de biociências e biotecnologia. O Laboratório Nacional de Biorrenováveis (LNBR) utiliza a biotecnologia para enfrentar os desafios científicos e tecnológicos voltados ao desenvolvimento econômico sustentável. O Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) realiza pesquisas avançadas em nano e microfabricação de materiais

aplicados em campos como energias alternativas, saúde e meio ambiente (CNPEM, 2021). Por fim, o LNLS, que será abordado nas próximas seções. A Figura 2 mostra a vista aérea do campus do CNPEM.

Figura 2 - Centro de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM)



Fonte: Imagem retirada de (CNPEM, 2021).

## 1.2. LNLS

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) desempenha um papel fundamental na operação do Sirius, um equipamento de grande porte que utiliza aceleradores de partículas para gerar luz síncrotron. O LNLS é uma infraestrutura científica de última geração, considerada a maior e mais complexa já construída no Brasil e uma das fontes de luz síncrotron mais avançadas do mundo (LNLS, 2021).

No momento, existem mais de 50 aceleradores de partículas conhecidos como síncrotrons espalhados por todo o mundo, em diferentes estágios de operação e desenvolvimento. Essas instalações de pesquisa são encontradas em 23 países ao redor do globo (LIGHTSOURCES, 2023). A Figura 3 ilustra essa distribuição global, destacando a ampla presença dos síncrotrons em diversas nações.

Dentre os síncrotrons em desenvolvimento ou em fase inicial de operação, apenas três se destacam como representantes da quarta geração dessa tecnologia de luz síncrotron. Além



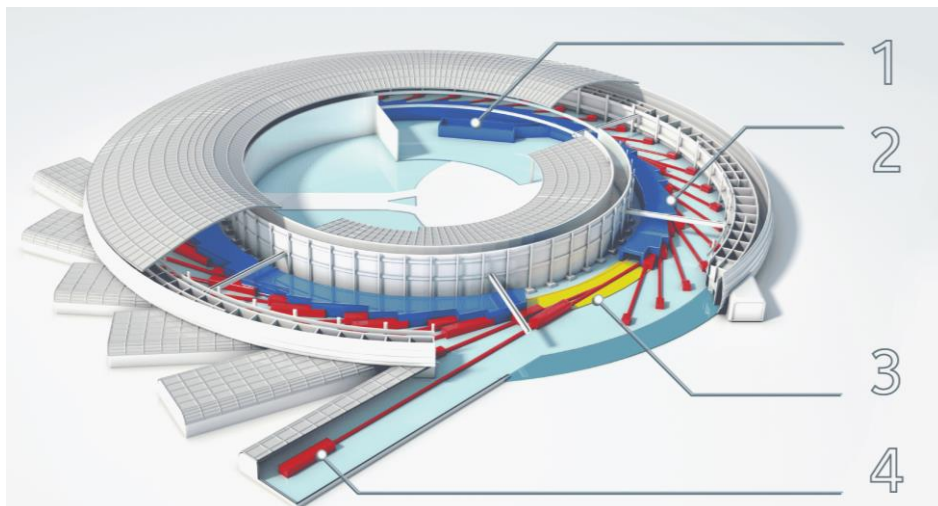
de luz. Esses componentes são o Acelerador Linear (Linac), o Acelerador Injetor (Booster), o Anel de Armazenamento e as Linhas de Luz. A Figura 5 indica a localização dos principais componentes na estrutura do acelerador de partículas.

Figura 4 - Vista do interior da blindagem do acelerador de partículas



Fonte: Imagem retirada de (CNPEM, 2021).

Figura 5 - Principais partes do acelerador de partículas. (1)Linac, (2)Booster, (3)Anel de armazenamento e (4)Linhas de Luz



Fonte: Imagem retirada de (LNLS, 2021).

O Acelerador Linear é responsável pela geração inicial dos elétrons. Nessa etapa, os elétrons são liberados a partir do aquecimento de uma liga metálica no dispositivo chamado Canhão de Elétrons. Em seguida, eles são acelerados a altas velocidades por meio de campos elétricos oscilantes, atingindo velocidades próximas à da luz.

Após passarem pelo Acelerador Linear, os elétrons são direcionados para o Acelerador injetor, um anel circular onde ocorre um processo de injeção e aceleração adicional. Durante esse estágio, os elétrons realizam centenas de milhares de voltas a cada segundo, aumentando gradualmente sua energia. Esse processo de aceleração contínua é essencial para alcançar a energia necessária para o próximo estágio.

No Anel de Armazenamento, também conhecido como Acelerador Principal, os elétrons são mantidos em órbitas estáveis por um longo período de tempo. Isso é possível graças ao uso de poderosos ímãs que geram campos magnéticos precisos, que atuam como guias para as partículas. Durante o percurso, os elétrons são submetidos a curvas controladas pelos campos magnéticos, o que resulta na emissão de radiação eletromagnética, conhecida como luz síncrotron. A luz síncrotron gerada é direcionada para as Linhas de Luz, onde ocorrem os experimentos científicos (LNLS, 2021).

### 1.3. LUZ SÍNCROTRON

A luz síncrotron é uma forma especial de radiação eletromagnética que se destaca por sua intensidade e por abranger uma ampla faixa espectral, que vai desde o infravermelho até os raios X. Essa abrangência espectral confere à luz síncrotron uma versatilidade excepcional para análises, uma vez que diferentes componentes espectrais podem ser explorados. Além disso, sua intensidade elevada possibilita a realização de experimentos extremamente rápidos, com resolução na escala de nanômetros (LNLS, 2021).

Essas características tornam a luz síncrotron uma ferramenta sofisticada e poderosa para o estudo de materiais, permitindo a revelação de propriedades moleculares e atômicas sob diferentes condições, como temperatura, pressão, vácuo, fluxo de gases, exposição a campos elétricos e magnéticos, entre outros.

Diversas áreas do conhecimento se beneficiam do uso da luz síncrotron em seus avanços científicos. Podemos citar, por exemplo, o estudo de solos e fertilizantes, o desenvolvimento de fármacos e catalisadores, o avanço de tratamentos para câncer, a pesquisa de materiais

avançados para baterias mais eficientes e a captação de energias renováveis, além de aplicações no setor de petróleo e gás natural. A luz síncrotron amplia as fronteiras do conhecimento e impulsiona a inovação em diversas áreas científicas e tecnológicas. (LNLS, 2021).

#### 1.4. LINHAS DE LUZ

Os feixes de luz síncrotron são direcionados para as estações experimentais conhecidas como linhas de luz, onde cientistas realizam análises detalhadas das características microscópicas dos materiais. Essas linhas de luz, batizadas com nomes da fauna e flora brasileira, abrigam instrumentação científica avançada necessária para a solução de problemas relevantes para o país.

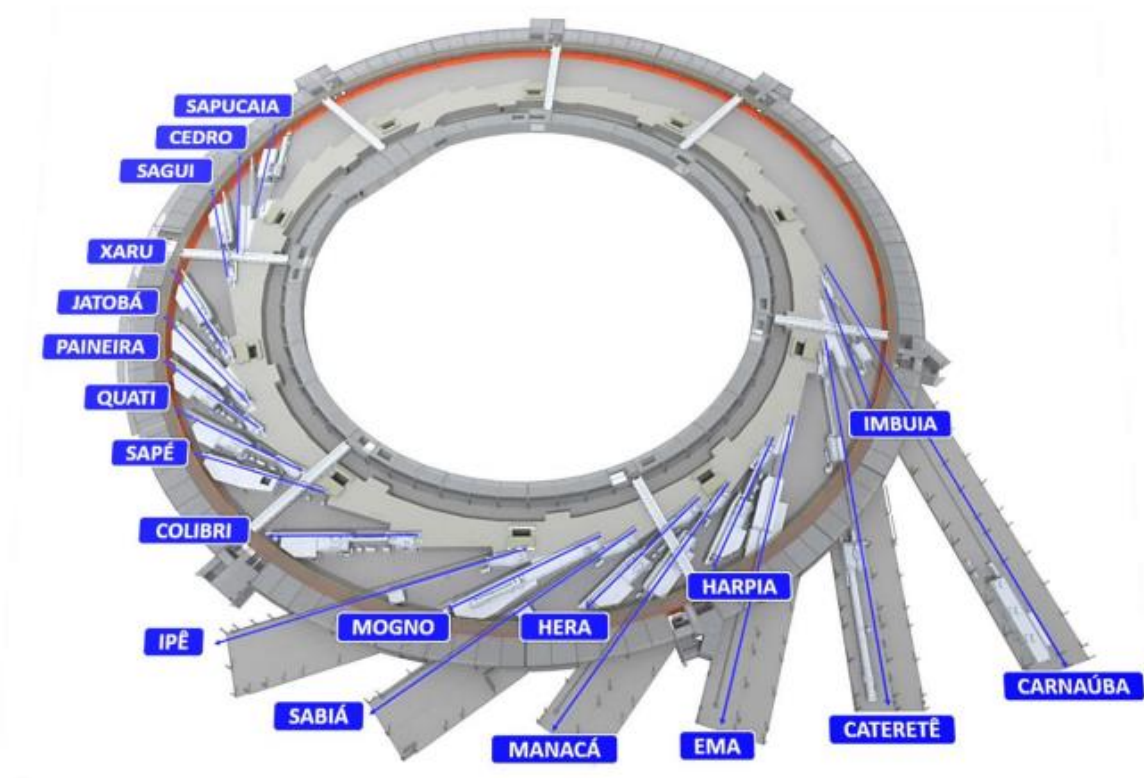
Por meio da interação entre a luz síncrotron e a amostra, é possível avaliar uma série de propriedades, como o tipo de átomo presente, o arranjo molecular, os estados químicos, a organização espacial e as propriedades elétricas e magnéticas, entre outras. Essa interação ocorre por meio de processos como absorção, reflexão e espalhamento da luz.

Atualmente, o LNLS possui 14 linhas de luz em funcionamento e 8 em fase de construção, cada uma projetada para atender a uma ampla variedade de estudos científicos. É importante ressaltar que o número de linhas de luz está em constante crescimento e, no futuro, espera-se alcançar um total de até 38 linhas de luz, ampliando ainda mais a capacidade e as possibilidades de pesquisa no laboratório. A Figura 6 mostra a disposição de algumas linhas de luz operantes e outras em planejamento dispostas ao redor do Sirius.

#### 1.5. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso (TCC) é testar, caracterizar e prototipar um picoamperímetro bipolar capaz de medir correntes de diferentes magnitudes sem a necessidade de troca de escalas, visando contribuir para a aquisição de dados nas linhas de luz do Sirius. O picoamperímetro desenvolvido será avaliado em termos de desempenho, precisão e estabilidade, buscando atender às necessidades específicas das linhas de luz. Além disso, serão exploradas soluções para contornar o problema da característica unipolar em medições de corrente. O objetivo final é fornecer uma alternativa viável e de baixo custo para a medição precisa e confiável das correntes nas linhas de luz do Sirius, melhorando assim a qualidade e confiabilidade dos dados adquiridos nesse ambiente científico.

Figura 6 - Localização das linhas de luz no prédio do Sirius



Fonte: Imagem retirada de (LNLS, 2021).

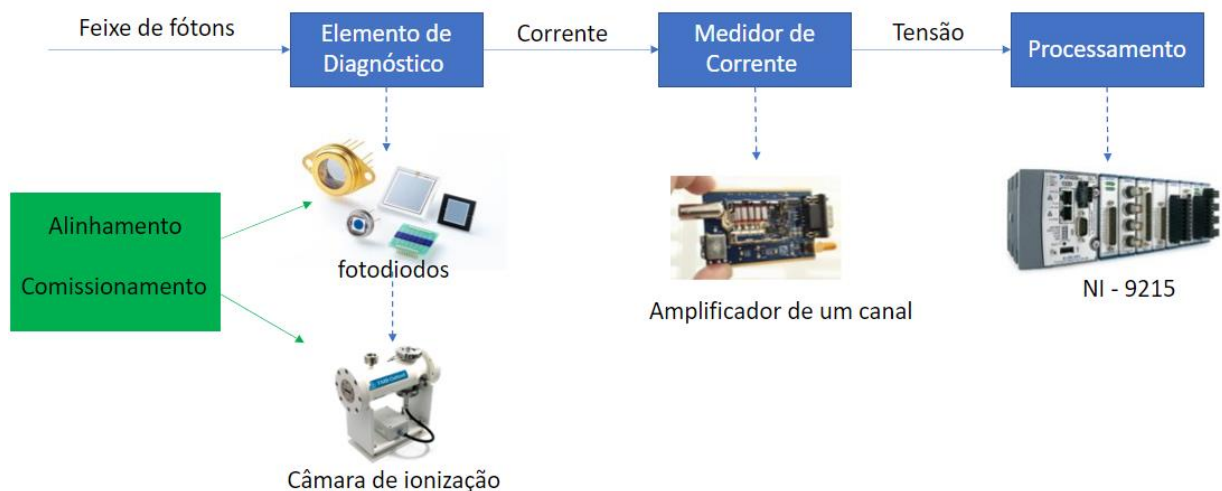
## 2. CONCEITOS BÁSICOS

### 2.1 MEDIDAS DE CORRENTE NAS LINHAS DE LUZ

Nas linhas de luz do Sirius, quando os fótons do feixe interagem com uma variedade de materiais, ocorre a geração de correntes elétricas de baixa intensidade. Essas correntes são utilizadas por dispositivos de diagnóstico para medir diversos parâmetros do feixe, como fotodiodos, medidores de posição, câmaras de ionização, lábios de fendas, entre outros. Atualmente, estima-se que mais de duzentos canais de medidas de diferentes instrumentos sejam empregados em experimentos, alinhamento do feixe e comissionamento da linha.

A leitura desses sinais exige altos níveis de precisão e estabilidade, bem como a capacidade de integração com os sistemas de controle da linha de luz. Ao longo do tempo, diversas soluções comerciais foram implementadas no LNLS, embora tenham como principal desvantagem o alto custo por canal. No entanto, a maioria dos *setups* de medição utiliza um amperímetro de precisão desenvolvido internamente no próprio LNLS. Esse instrumento utiliza um amplificador de transimpedância de um canal para amplificar e converter o sinal de corrente em uma tensão correspondente. Posteriormente, o valor da tensão é digitalizado por um dispositivo de aquisição de dados comercial, que realiza a sincronização dessas informações com vários outros sinais provenientes da linha de luz. A Figura 7 exemplifica a estrutura de aquisição de medidas de corrente de forma simplificada.

Figura 7 - Estrutura para medidas de corrente nas linhas de luz



Fonte: Autoria própria.

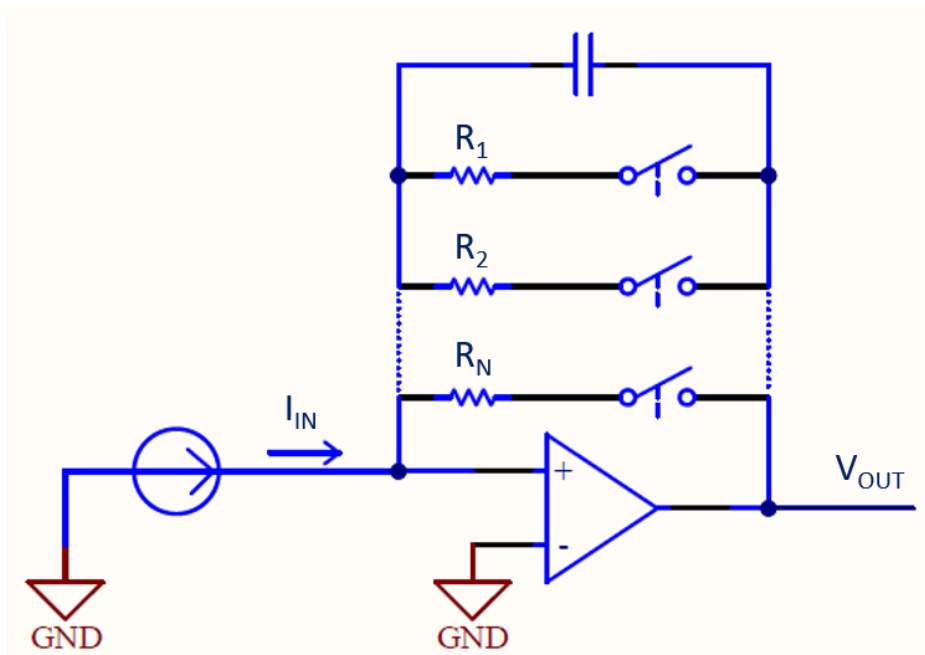
## 2.2 AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDÂNCIA

O amperímetro de alta precisão utilizado atualmente no LNLS emprega a topologia conhecida como transimpedância, que consiste em utilizar uma resistência na malha de realimentação de um amplificador operacional. Esse circuito com realimentação resistiva converte a corrente de entrada em uma tensão de saída, seguindo (1), onde  $I_{IN}$  é a corrente de entrada,  $R_N$  a resistência de realimentação e  $V_{OUT}$  a tensão de saída.

$$V_{OUT} = I_{IN} \times R_N \quad (2)$$

Os amplificadores operacionais são cuidadosamente selecionados para apresentar alta impedância de entrada, baixas tensões de offset e baixa queda de tensão (conhecida como "burden voltage"). Dessa forma, pode-se considerar que toda a corrente de entrada passa pelo resistor de realimentação. Conseqüentemente, a tensão de saída varia proporcionalmente à corrente de entrada. No entanto, em baixas intensidades de corrente, a precisão da medida é comprometida, enquanto em valores muito altos, o dispositivo entra em saturação, sendo incapaz de fornecer a tensão correspondente. Para lidar com essa questão, quando há a necessidade de medir correntes de diferentes magnitudes, é realizada a troca de escalas. A Figura 8 apresenta a estrutura de um amplificador de transimpedância de ganho configurável a partir do acionamento de chaves em série com diferentes resistências de realimentação.

Figura 8 - Topologia para uma amplificador de transimpedância

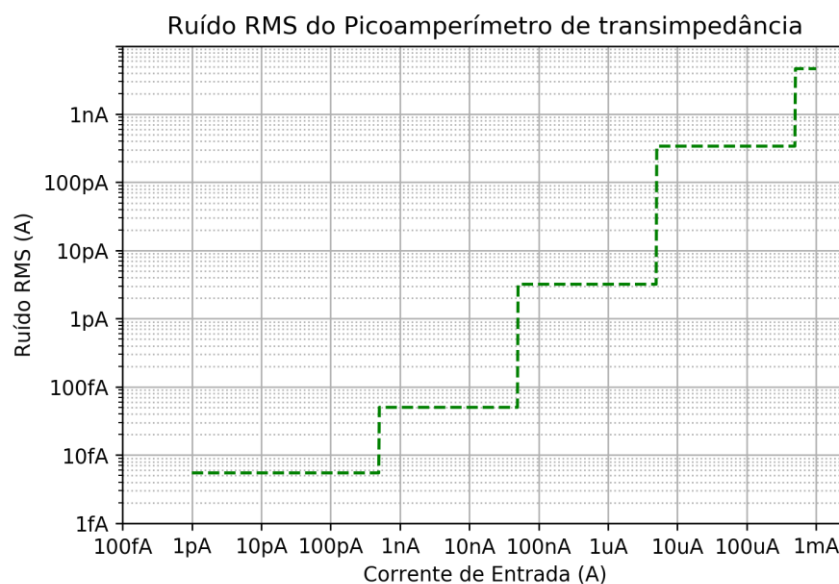


Fonte: Autoria própria.

O amplificador de transimpedância projetado no LNLS possui 5 escalas, cada uma com um resistor de realimentação de valor distinto: 10 G $\Omega$ , 100 M $\Omega$ , 1 M $\Omega$ , 10 k $\Omega$  e 680  $\Omega$  (TANIO, 2021). Ao trocar o resistor, o ganho da malha de realimentação varia de acordo com o valor do resistor associado. Para isolar eletricamente uma escala da outra, são utilizados relés de alta isolamento (com mínimo de 1 T $\Omega$ ) em série com o resistor de realimentação, acionados por entradas digitais.

Esse dispositivo é capaz de oferecer boa precisão e desempenho em termos de ruído, sendo uma topologia amplamente utilizada em equipamentos comerciais de bancada. No entanto, a troca de escalas apresenta uma desvantagem significativa. A sensibilidade teórica dos instrumentos de medição é determinada pelo ruído gerado pelas resistências presentes no circuito, pois a energia térmica provoca o movimento de elétrons, resultando em sinais elétricos indesejados conhecidos como ruído térmico ou ruído de Johnson (KEITHLEY, 2013). Assim, o ruído de Johnson é uma parcela relevante do ruído no equipamento durante uma medição. Quando há a necessidade de medir correntes que variam em ordem de grandeza, a troca de escalas se torna indesejável, pois modifica bruscamente a relação sinal-ruído com a mudança do resistor de realimentação, comprometendo a qualidade da medida, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Ruído RMS do picoamperímetro de transimpedância em diferentes escalas



Fonte: Autoria própria.

A Figura 9 apresenta o ruído RMS para cada uma das escalas do amperímetro. É possível perceber que a valor do ruído RMS sofre descontinuidade a medida que se aumenta a corrente

de entrada devido a troca de escalas, resultando na descontinuidade na medida. Com o objetivo de buscar uma possível alternativa às metodologias atuais de medição de corrente, o projeto visa a construção de um picoamperímetro que seja capaz de medir correntes de diferentes magnitudes, abrangendo desde picoampere até dezenas de miliampere, sem a necessidade de troca de escalas. Para alcançar esse objetivo, propõe-se o desenvolvimento de um medidor de corrente baseado na relação logarítmica entre a corrente e a tensão na junção de um dispositivo semiconductor, utilizando uma topologia conhecida como amplificador logarítmico.

### 2.3 AMPLIFICADOR LOGARÍTMICO

O amplificador de transimpedância logarítmico é um circuito eletrônico translinear que utiliza amplificadores operacionais para gerar uma tensão de saída proporcional ao logaritmo da corrente de entrada. Sua implementação envolve a inclusão de um dispositivo semiconductor, como um diodo ou transistor bipolar, na malha de realimentação do amplificador operacional (FOX, 2001). Ao utilizar a função logarítmica, é possível comprimir a faixa dinâmica dos sinais encontrados no sistema, eliminando a necessidade de troca de escalas.

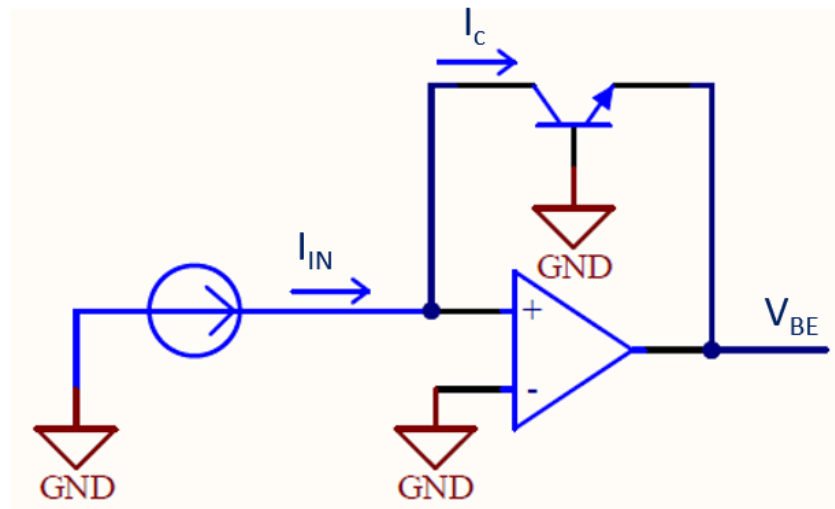
A implementação com diodo na realimentação resulta em uma tensão de offset na saída que acompanha as flutuações na entrada, enquanto a aplicação com transistor bipolar de base aterrada não apresenta essa limitação. Em (3) é descrita a função de tensão base-emissor  $V_{BE}$  em função da tensão térmica  $V_T$ , corrente de coletor  $I_C$  e corrente de saturação  $I_S$ .

$$V_{BE} = V_T \times \log_{10} \left( \frac{I_C}{I_S} \right) \quad (4)$$

O tipo de transistor (PNP ou NPN) determina se o circuito funciona como gerador ou coletor de corrente. Essa topologia tradicionalmente opera com sinais contínuos e possui largura de banda que pode se estender até unidades de mega-hertz (MAXIM INTEGRATED, 2005). A Figura 10 ilustra a estrutura padrão de um amplificador logarítmico com transistor na malha de realimentação.

Nesse contexto, o objetivo do projeto é realizar testes, caracterização e prototipagem de um picoamperímetro bipolar, capaz de medir correntes de diferentes magnitudes sem a necessidade de troca de escalas. Além disso, um dos desafios enfrentados no projeto é lidar com a característica unipolar em medições de corrente e encontrar soluções adequadas para contornar esse problema.

Figura 10 - Topologia de um amplificador logarítmico



Fonte: Autoria própria.

### 2.3.1 CIRCUITO INTEGRADO ADL5304

Após uma análise minuciosa das opções disponíveis no mercado, foi eleito o amplificador logarítmico ADL5304 como a escolha ideal para o projeto em questão. Esse modelo se destaca por apresentar uma ampla faixa de medida, abrangendo correntes que variam de 1 pA a 10 mA, resultando em um impressionante faixa dinâmica de 200 dB. Além disso, uma característica vantajosa é a incorporação de dois canais no dispositivo, permitindo não apenas a medição de uma corrente singular, mas também o cálculo do logaritmo da razão entre duas correntes (ANALOG DEVICES, 2011). Essa opção revela-se extremamente útil em experimentos que envolvem a absorção de raios-X.

O funcionamento do ADL5304 baseia-se na utilização de dois amplificadores logarítmicos, cada um operando em um canal distinto. Ao final, os valores de tensão obtidos em cada canal são subtraídos, conforme demonstrado na Figura 11.

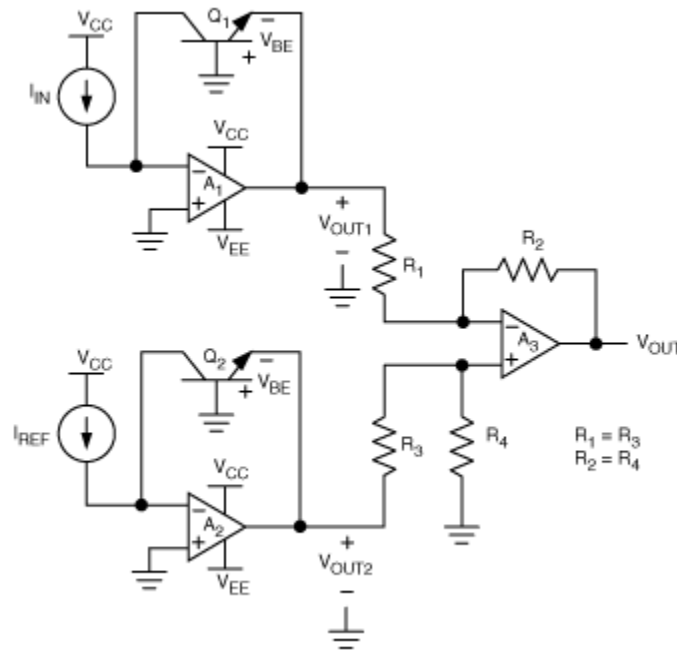
O circuito integrado possui dois canais baseados na topologia de amplificador logarítmico, os sinais de tensão resultantes ( $V_{BE1}$  e  $V_{BE2}$ ), são direcionados para as entradas de um amplificador de diferenças, resultando na saída  $V_{OUT}$  em (5). Pode-se simplificar a subtração de dois logaritmos em uma expressão que depende do logaritmo da razão entre as duas correntes de entrada  $I_{IN}$  e  $I_{REF}$ , como mostra (6) e (7).

$$V_{OUT} = V_{BE1} - V_{BE2} \quad (8)$$

$$V_{OUT} = V_T \times \ln\left(\frac{I_{IN}}{I_S}\right) - V_T \times \ln\left(\frac{I_{REF}}{I_S}\right) \quad (9)$$

$$V_{OUT} = V_T \times \ln\left(\frac{I_{IN}}{I_{REF}}\right) \quad (10)$$

Figura 11 - Estrutura simplificada de um circuito integrado ADL5304



Fonte: Imagem retirada de (MAXIM INTEGRATED, 2005).

Porém, a tensão térmica  $V_T$  é descrita por  $\frac{kT}{q}$ , ou seja, depende diretamente da temperatura  $T$ , introduzindo alta variação na tensão  $V_{OUT}$ . A variação da temperatura é então neutralizada através de um divisor analógico, que efetivamente introduz uma variável proporcional à temperatura  $T$  para a compensação. Além disso, é realizando um mudança de base no logaritmo, de forma que ao final a magnitude de  $V_T$  é ajustada a um valor estável de 0,2 V como mostra (11) e (12). Por fim é adicionado uma tensão de continua ( $V_{OFS}$ ) ajustada em 1,5 V, resultando na tensão  $V_{LOG}$  representada em (13).

$$V_{OUT} = V_T \times \ln 10 \times \ln\left(\frac{I_{IN}}{I_{REF}}\right) + V_{OFS} \quad (14)$$

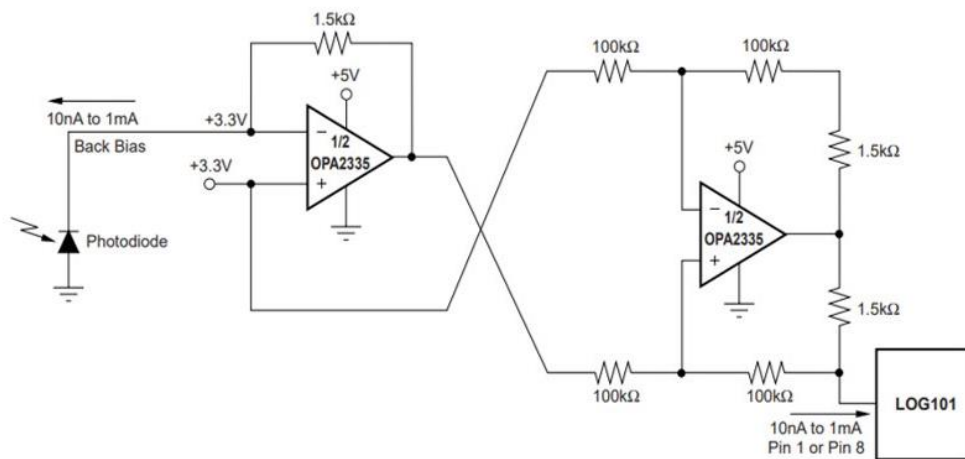
$$V_{LOG} = 0,2 \times \log_{10}\left(\frac{I_{IN}}{I_{REF}}\right) + 1,5 \quad (15)$$

O ADL5304 dispõe de uma fonte de corrente precisa de 100 nA, que pode ser utilizada como referência  $I_{REF}$  em medições envolvendo apenas um canal. Para avaliar o desempenho desse circuito integrado, utilizou-se a placa de avaliação desenvolvida pelo próprio fabricante.

## 2.4 MEDIDA DE CORRENTE NEGATIVA

Com o objetivo de enfrentar o desafio de medir correntes negativas utilizando um amplificador logarítmico, foram estudadas e testadas diversas topologias de inversores de corrente. Uma dessas topologias é ilustrada pela Figura 12, que emprega amplificadores operacionais em um espelho de corrente preciso. Essa configuração foi montada em uma bancada experimental utilizando os componentes disponíveis para verificar seu funcionamento. Embora tenha apresentado resultados satisfatórios para correntes acima de algumas dezenas de miliampere, verificou-se que essa estrutura tornava-se complexa e onerosa para correntes menores.

Figura 12 - Topologia para espelho de corrente precisa  
(TEXAS INSTRUMENTS, 2004)



Fonte: Imagem retirada de (TEXAS INSTRUMENTS, 2004).

Figura 13 - Teste em bancada da topologia proposta



Fonte: Autoria própria.

Uma abordagem que permitiria reduzir as correntes de fuga seria utilizar amplificadores de alta precisão com baixa corrente de polarização. No entanto, essa opção aumentaria consideravelmente a complexidade e o custo do projeto, levando à sua exclusão. Entre as opções disponíveis no mercado, o circuito ADL5315 que, demonstrou ser bastante adequado.

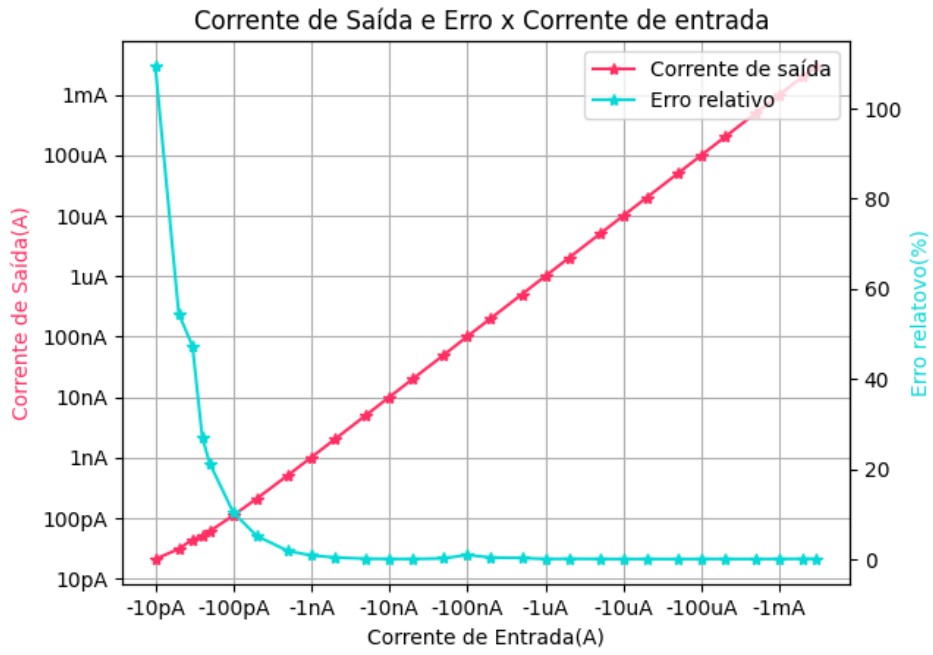
#### *2.4.1 CIRCUITO INTEGRADO ADL5315*

O circuito tem a função de inverter a polaridade da corrente de entrada, preservando a integridade do sinal. Ele é especificado para uma faixa de medição de 100 pA a 10 mA, mantendo boa linearidade para essa faixa de corrente de entrada, em outras palavras a corrente na entrada é replicada na saída com polaridade oposta. Esse circuito integrado comumente é utilizado em conjunto com amplificadores logarítmicos, o que o torna relevante para os testes com o ADL5304 devido ao seu baixo custo e faixa de operação (ANALOG DEVICES, 2017). Outra vantagem é o encapsulamento em circuito integrado, aumentando a robustez contra ruído, reduzindo possíveis fugas de corrente e reduzindo consideravelmente o tamanho do circuito quando comparado com componentes independentes conectados em conjunto.

O primeiro teste realizado consistiu na avaliação da linearidade e do erro relativo, com o objetivo de analisar o desempenho do espelho de corrente na faixa de 1 pA a 10 mA. Esse teste envolveu a medição da corrente de saída em relação à corrente de entrada, como mostrado no gráfico de linearidade apresentado na Figura 14.

No caso de um componente ideal, esperaríamos um comportamento perfeitamente linear. No entanto, observa-se que, para correntes abaixo de uma dezena de picoampere, o erro relativo entre a entrada e a saída é consideravelmente alto, tornando inviável a utilização desse componente nessa faixa de corrente. No entanto, o componente ainda apresenta uma boa linearidade acima de 100 pA e uma ampla faixa dinâmica, o que o torna a opção escolhida para a implementação.

Figura 14 - Gráfico de Linearidade e erro para o ADL5315

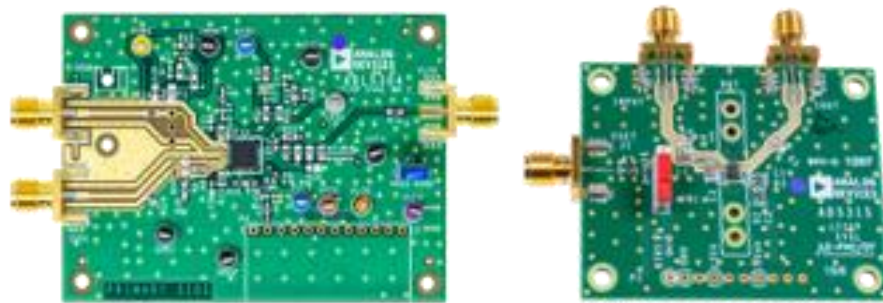


Fonte: Autoria própria.

### 3 METODOLOGIA E AVALIAÇÃO DOS PRIMEIROS RESULTADOS

Após realizar os testes com o espelho de corrente, procedeu-se à caracterização do conjunto por meio de dois kits de avaliação fornecidos pelo fabricante. Esses kits foram utilizados para mensurar a linearidade, a resposta em frequência e o ruído intrínseco da eletrônica. A Figura 15 mostra os kits de avaliação utilizados.

Figura 15 - Kit de avaliação do ADL5304 e ADL5315 respectivamente



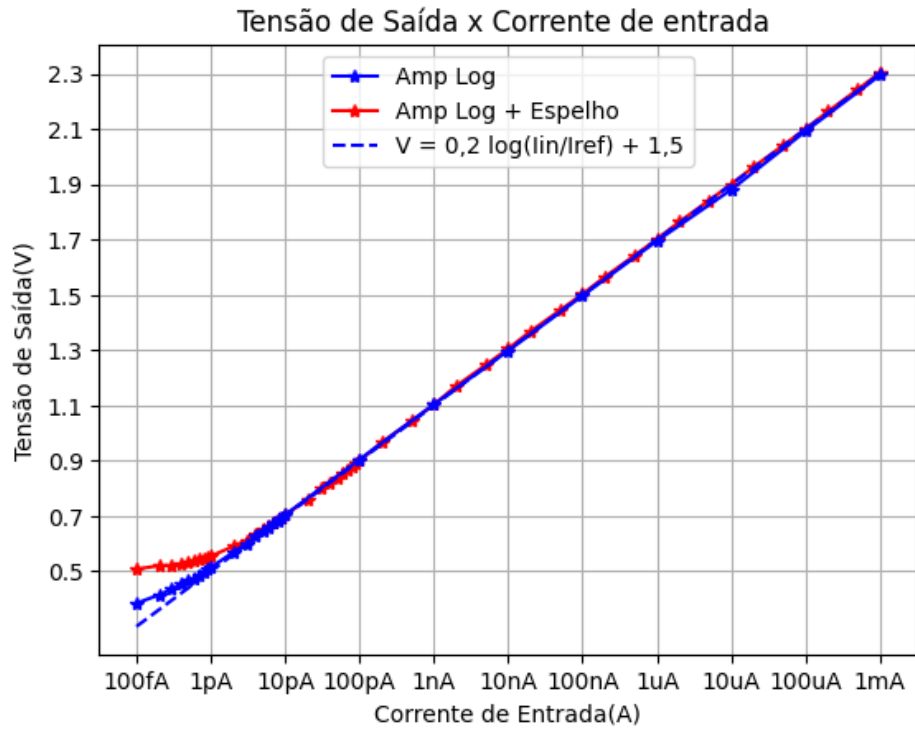
Fonte: Imagem retirada de (ANALOG DEVICES, 2021).

Durante os testes, um sinal de excitação foi aplicado na entrada do circuito. Para avaliar a resposta em frequência, utilizou-se um gerador de sinais modelo T3AFG200 da Teledyne. Já para medir o ruído, empregou-se uma fonte de tensão de alta precisão da Keithley, modelo 2280S-32-6, em conjunto com um resistor de alto valor como fonte de corrente. Os resultados foram analisados utilizando um osciloscópio com 1 GHz de banda passante, modelo MSO9104A da Agilent e um equipamento de aquisição de dados comercial.

Ao examinar a linearidade, constatou-se que a inclusão do espelho de corrente provoca um afastamento da resposta medida em relação à resposta esperada dada em (16), como pode ser observado nos gráficos de tensão de saída ilustrados na Figura 16 e Figura 17.

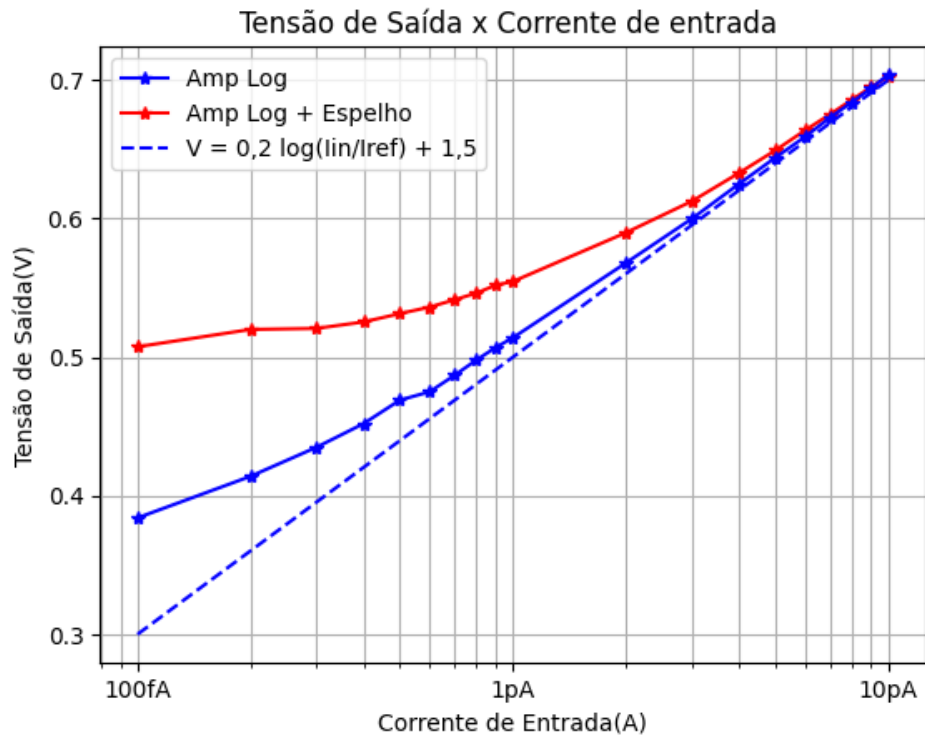
Ao analisar o gráfico de erro percentual, verificou-se um aumento considerável do erro relativo percentual abaixo de 10 pA, chegando a cerca de 70 %. Isso pode limitar o uso do circuito para correntes inferiores a 10 pA. No entanto, a configuração que utiliza apenas o ADL5304 apresenta boa linearidade e baixo erro relativo até a ordem de unidades de picoampere. Abaixo desse valor, o erro aumenta consideravelmente, conforme demonstrado no gráfico de erro relativo na Figura 18.

Figura 16 - Gráfico de tensão de saída por corrente de entrada



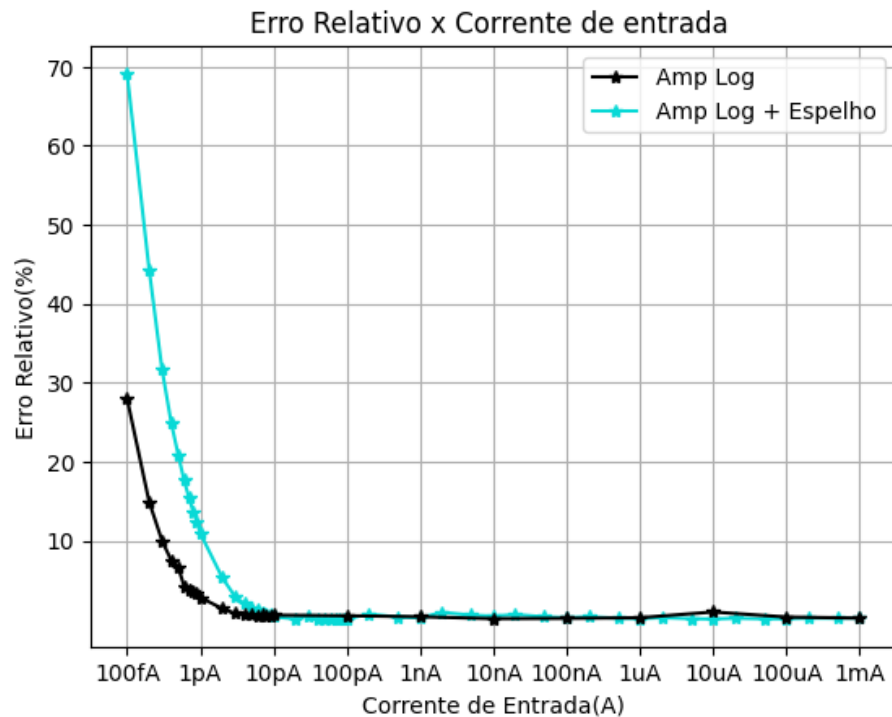
Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Gráfico de tensão de saída por corrente de entrada de 100 fA a 10 pA



Fonte: Autoria própria.

Figura 18 - Gráfico de erro relativo por corrente de entrada



Fonte: Autoria própria.

Após essa etapa, foram realizadas medições do ruído RMS do amplificador logarítmico com espelho de corrente para diferentes ordens de grandeza de corrente de entrada. Esses resultados foram comparados com os valores do ADL5304 e com o ruído estimado no amplificador de transimpedância utilizado no LNLS, conforme ilustrado na Figura 19.

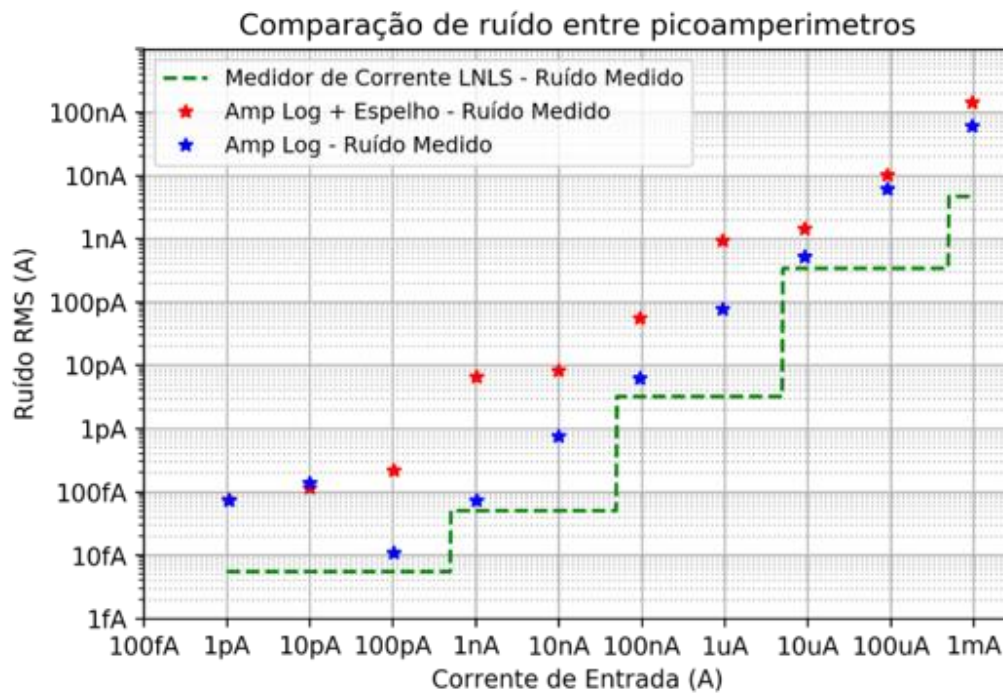
No gráfico da Figura 19, é possível observar que o amplificador de transimpedância apresenta níveis de ruído RMS distintos para diferentes escalas, sendo influenciado principalmente pelo ruído térmico da resistência de feedback. Nos pontos do amplificador logarítmico, o nível de ruído RMS aumenta de forma linear com a intensidade da corrente injetada na entrada, indicando uma relação sinal-ruído estável. Com a inclusão do espelho de corrente, observa-se uma deterioração na performance de ruído. No entanto, esse ruído (para correntes acima de 100 pA) representa apenas 0,01 % da intensidade da corrente medida, o que não é um limitante para algumas aplicações.

Em relação à resposta em frequência, o amplificador logarítmico possui uma banda passante que aumenta conforme a amplitude do sinal de entrada, seguindo uma relação linear descrita em (8) para correntes de entrada de 1 pA até 10 nA, como mostra a Figura 20. A

frequência de corte  $f_{3dB}$  aumenta com a corrente de entrada  $I_{IN}$  e cai para valores de baixa corrente devido a capacitância de junção  $C_j$  e a diminuição da transcondutância.

$$f_{3dB} = \frac{qI_{IN}}{2\pi kTC_j} \quad (8)$$

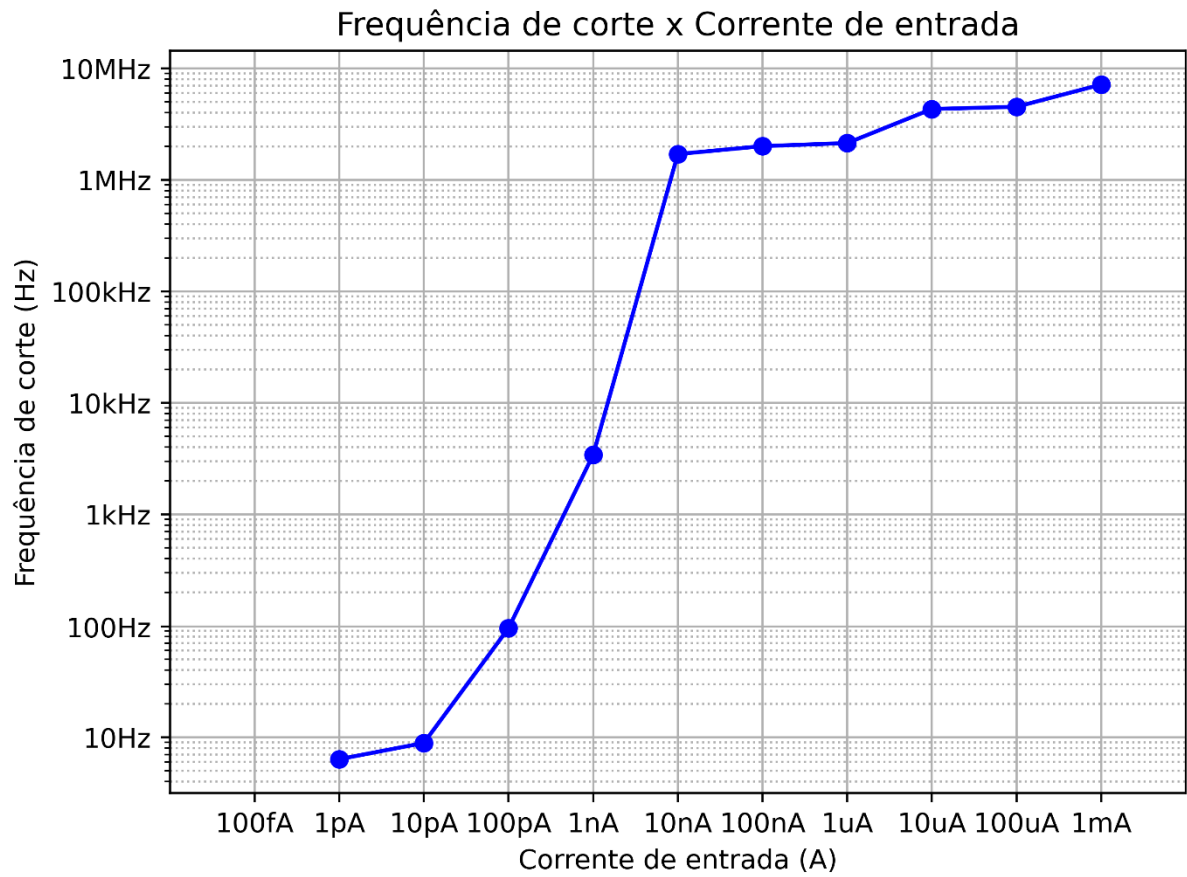
Figura 19 - Gráfico de comparação de ruído RMS entre picoamperímetros



Fonte: Autoria própria.

Quando a amplitude atinge 10 nA, a frequência de corte tende a estabilizar devido à presença de um capacitor de filtragem na saída do circuito. Portanto, para correntes mais altas, acima de 10 nA, a banda passante é limitada a unidades de mega-hertz. É importante ressaltar que, apesar de apresentar um desempenho ligeiramente inferior em termos de ruído, o amplificador logarítmico possui bandas passantes mais amplas, o que pode ser vantajoso em algumas aplicações rápidas nas linhas de luz. Após avaliação preliminar, validou-se o conceito da aplicação. Espera-se obter um desempenho mais expressivo com o conjunto dos circuitos integrados em uma placa de circuito projetada para minimizar as perdas e resistente a interferências.

Figura 20 - Curva de frequência de corte em função da corrente de entrada



Fonte: Autoria própria.

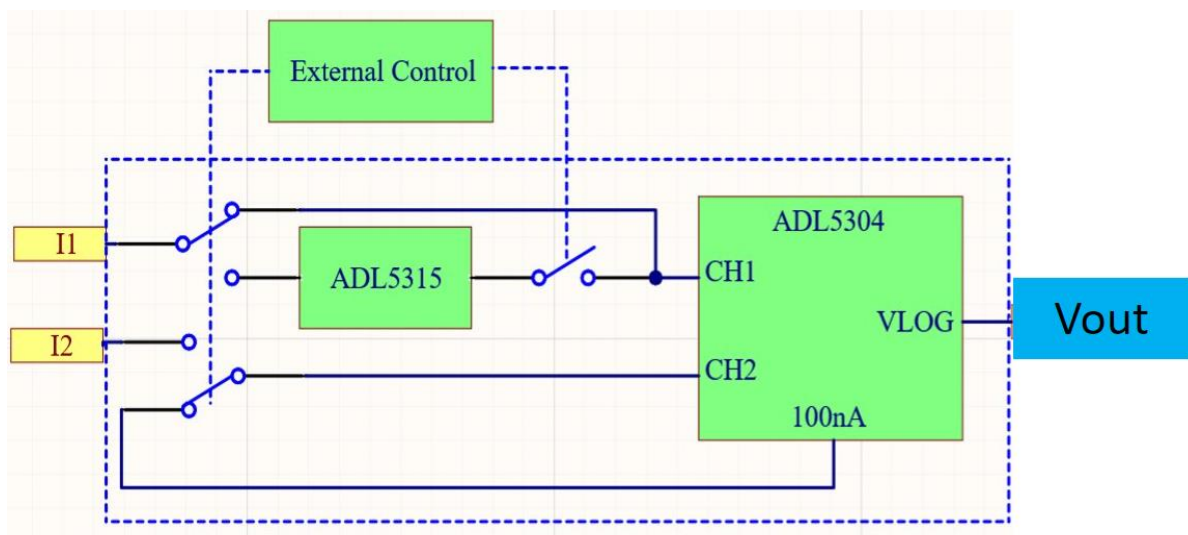
## 4 ELABORAÇÃO E MODELAGEM DO PICOAMPERIMETRO

Após a avaliação dos circuitos escolhidos, a tarefa foi projetar uma placa de circuito impresso. Nesta etapa foram definidos os modos de operação do sistema, ferramentas de projeto, bem como boas práticas para construção de circuito de correntes de baixa intensidade, como o uso relés de alta isolamento, estratégias de *guard* e *shielding* para minimizar interferência eletromagnética, técnicas de redução de interferência eletromagnética e compatibilidade eletromagnética, etc.

### 4.1 FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO

A Figura 21 apresenta o diagrama em blocos do funcionamento da placa de circuito impresso, projetada para alterar entre três configurações, sendo medidas de corrente positiva no canal 1, medida de corrente negativa no canal 1 e razão logarítmica entre duas correntes positivas utilizando a referência interna ou o valor de corrente do canal 2. A alteração dessas configurações será feita por entradas digitais controladas externamente. Esse sinais são direcionados aos pinos de controle de acionamento de relés, responsáveis pelas conexões dos diferentes caminhos de corrente.

Figura 21 - Diagrama de blocos referente às diferentes configurações do circuito



Fonte: Autoria própria.

A placa de circuito impresso do equipamento foi concebida com um projeto de 4 camadas, sendo duas camadas externas para a distribuição dos sinais e duas camadas internas para a alimentação e referências de tensão. Essa abordagem visa simplificar a distribuição dos sinais por meio de trilhas e vias, além de reduzir as dimensões da Placas de Circuito Impresso (*Printed Circuit Board*, PCB).

#### 4.2 FERRAMENTAS DE PROJETO

A ferramenta de projeto utilizada é o Altium, software amplamente utilizado no projeto de PCBs, fornecendo recursos essenciais para engenheiros eletrônicos. Desde a captura esquemática até a fabricação final da placa, o Altium desempenha um papel fundamental. Os passos e a importância do Altium no projeto de PCBs incluem:

- 1) Captura esquemática: permite criar esquemas eletrônicos precisos, estabelecer conexões e verificar a correção do esquema, definindo a base do projeto. Nessa etapa são projetados os diferentes componentes e representação das ligações elétricas entre eles.
- 2) Biblioteca de componentes: nesse caso a organização possui um vasto banco de dados com diferentes componentes, encapsulamentos, modelos 2D para o layout de placa, modelos 3D, números de produto, links para folhas de dados, fornecedores, entre outras características. Os componentes não existentes são desenhados em software CAD e adicionados na biblioteca com suas respectivas informações. Essa abordagem acelera o processo de projeto e assegura a seleção correta dos componentes.
- 3) Layout do PCB: trata-se do posicionamento dos componentes, traçado das trilhas de conexão e verificação do roteamento, otimizando o layout e garantindo o desempenho adequado.
- 4) Gerenciamento de camadas: permite definir e controlar as camadas da PCB, separando planos de alimentação, trilhas de sinal e camadas de aterramento para garantir a integridade e o isolamento adequados.
- 5) Análise de integridade do sinal: após o roteamento das trilhas e posicionamento dos componentes é possível a identificação de falhas, como ligações não criadas ou indevidas e avaliação de características elétricas, como ruídos, atrasos e impedâncias, garantindo a qualidade do sinal no sistema.

- 6) Geração de arquivos de fabricação: facilita a preparação da PCB para a fabricação, criando automaticamente os arquivos necessários, como Gerber e BOM (*Bill of Material*), economizando tempo e evitando erros.

Em resumo, o Altium é uma poderosa plataforma que desempenha um papel crucial no projeto de PCBs, proporcionando recursos abrangentes e garantindo resultados de alta qualidade.

#### 4.3 ESTRATÉGIAS PARA GARANTIR A INTEGRIDADE DO SINAL

Dado o requisito de medição de correntes de baixa magnitude, é essencial projetar cuidadosamente a placa de circuito para minimizar características que possam causar vazamento de corrente e comprometer as medições. Foram adotadas várias técnicas e estratégias para alcançar esse objetivo, detalhadas a seguir.

Uma abordagem crucial é a implementação de planos de guarda. Esses planos definem regiões da placa com o mesmo potencial elétrico ao longo de sua extensão, reduzindo as correntes de fuga induzidas entre trilhas e superfícies com potenciais diferentes. Essa estratégia é aplicada em torno dos componentes críticos para as medições, como os amplificadores logarítmicos e os espelhos de corrente.

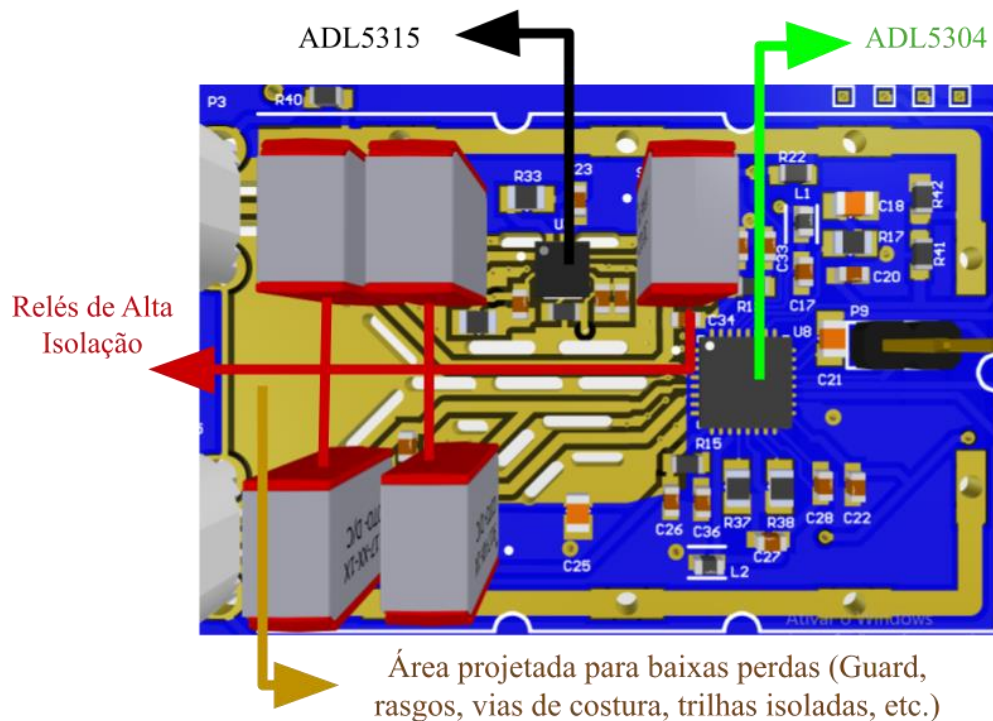
Além disso, os planos de guarda são replicados nas diferentes camadas da PCB, garantindo que todas as camadas tenham o mesmo potencial elétrico, o que minimiza a transferência de carga entre elas. Para melhorar o isolamento das trilhas que conduzem os sinais de corrente, também são utilizados rasgos ao redor desses caminhos. O ar, sendo um bom isolante, reduz as chances de desvio de corrente. No entanto, é importante aplicar essa técnica com cuidado, pois pode afetar a resistência mecânica da PCB. Além disso, são utilizadas vias de interconexão que atravessam a PCB, interligando as camadas com o mesmo potencial em torno das trilhas. Essas vias, conhecidas como vias de costura, contribuem para a estabilidade e integridade dos sinais.

O equipamento desenvolvido apresenta uma funcionalidade versátil, permitindo ao usuário alternar entre diferentes modos de operação. Para possibilitar essa alternância, a PCB é projetada para direcionar os caminhos das correntes conforme as configurações definidas. Essa mudança é realizada por meio de relés de alta isolamento, que possuem camadas de materiais com alta resistência, proporcionando uma melhor isolamento do sinal em comparação com os relés convencionais.

O controle dos relés é realizado por meio de sinais digitais nos pinos designados, seguindo uma abordagem similar aos relés convencionais. Essas estratégias são implementadas para garantir um funcionamento confiável, permitindo a troca dos caminhos de corrente conforme necessário e mantendo a integridade dos sinais e a adequada isolamento entre os diferentes circuitos.

Um aspecto crucial é garantir que os caminhos de corrente sigam as rotas mais curtas e não se cruzem com outros sinais, independentemente da camada da PCB. Para evitar possíveis interferências, o revestimento de verniz comumente encontrado nas camadas externas da placa, é removido em torno do plano de guarda. Essa medida é adotada para evitar a indução de correntes indesejadas nas superfícies da PCB, sendo substituído por uma camada de verniz para proteção. Além disso, uma blindagem metálica, conhecida como *shield* RF, é aplicada sobre os componentes críticos da PCB, visando bloquear interferências eletromagnéticas externas. Essa camada reveste os componentes mais sensíveis na região de *guard* da placa ilustrada na Figura 22.

Figura 22 - Região mais sensível do circuito do medidor de corrente logarítmico



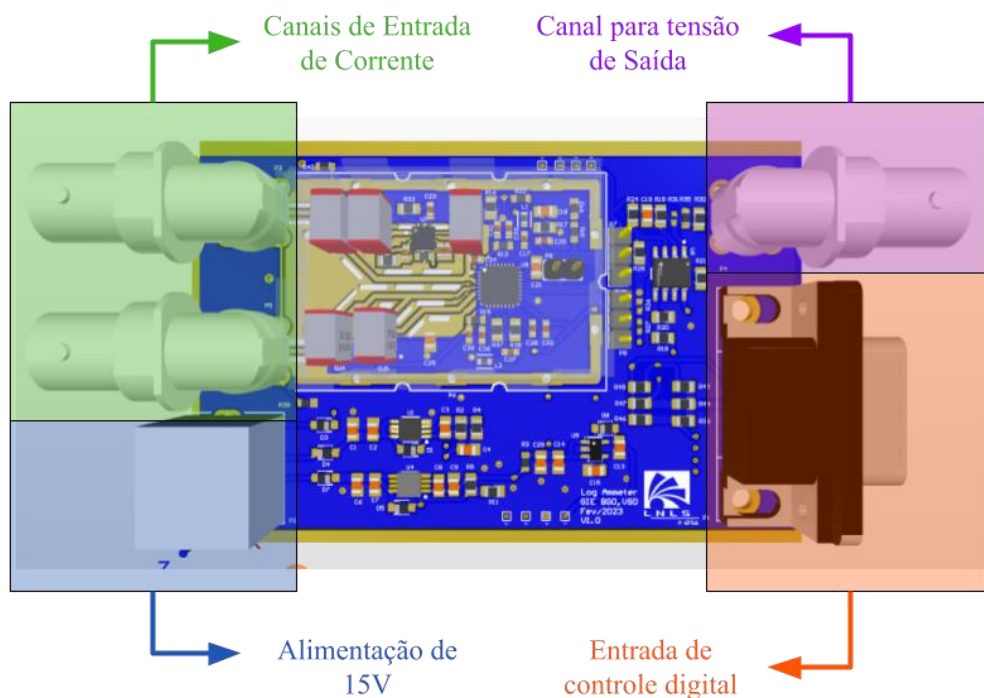
Fonte: Autoria própria.

A configuração dos conectores foi desenvolvida levando em consideração os diferentes requisitos de entrada e saída do sistema. No caso dos dois canais de leitura de corrente e da saída logarítmica de tensão, optou-se por utilizar conectores BNC de placa devido à sua eficiente blindagem contra interferências eletromagnéticas. Esses conectores também garantem a compatibilidade com os equipamentos presentes nas instalações das linhas de luz, já que muitos *setups* de medição de corrente utilizam cabos coaxiais BNC.

Para a alimentação geral do circuito, emprega-se um conector mini DIN de placa com 6 pinos, que fornece uma tensão de 15 V, -15V e 5V ao circuito.

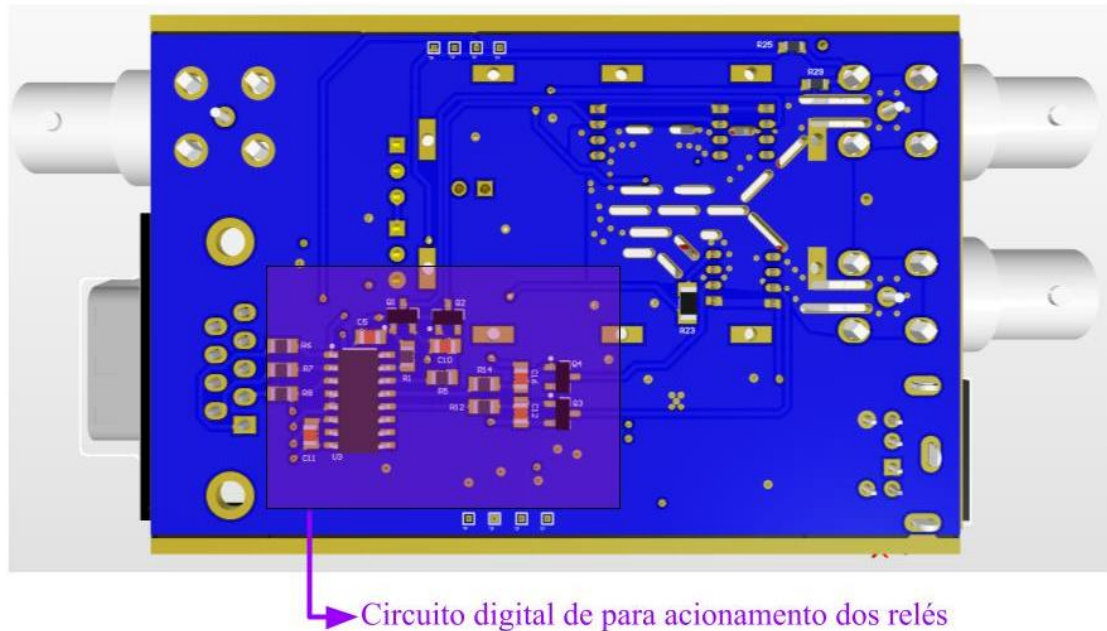
O controle das diferentes configurações do circuito é realizado por meio de uma conexão DB9. Essa conexão permite a integração com um dispositivo eletrônico para interface e controle remoto de equipamentos. Alternativamente, é possível utilizar um conector DB9 macho, conectando os pinos apropriados para estabelecer as conexões com os sinais digitais (0 V e 5 V), permitindo a configuração local sem a necessidade de outros equipamentos ou cabeamento. A Figura 23 apresenta a vista superior da placa destacando os conectores escolhidos e a Figura 24 mostra a visão inferior destacando os componentes responsáveis pelo gerenciamento do sinal digital de acionamento dos relés.

Figura 23 – Conexões externas da placa projetada



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Vista da camada inferior da placa projetada



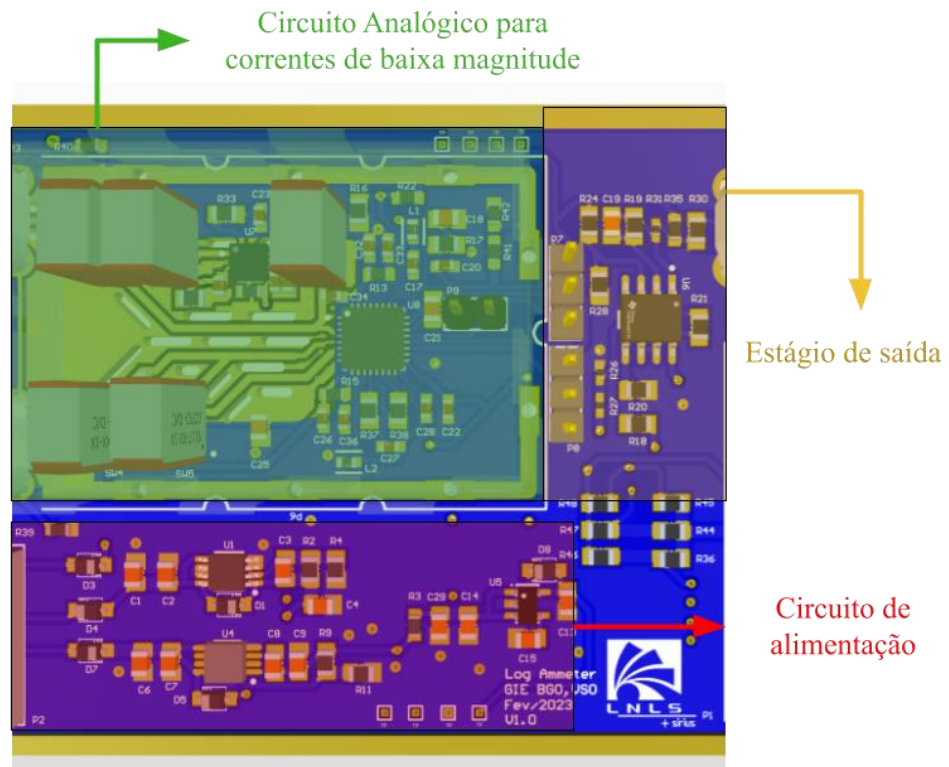
Fonte: Autoria própria.

No circuito, foi adotado um isolamento entre os sinais analógicos e os sinais digitais. O circuito analógico é subdividido em três partes: a região mais sensível, pela qual flui o sinal de corrente de baixa magnitude; a região responsável pelo estágio de saída da tensão amplificada pelo amplificador logarítmico e o circuito responsável pelos sinais de alimentação da placa.

O estágio de saída tem como objetivo ajustar a tensão de saída dentro de uma faixa definida, geralmente de 0 a 10 V. Isso é alcançado por meio do controle do chip ADL5304, utilizando conexões nas barras de pinos ou um circuito diferenciador. Essa topologia emprega amplificadores operacionais para aplicar níveis de offset e ganho ao sinal.

A tensão de alimentação de 15 volts é ajustada por reguladores lineares de baixo ruído (LDO - Low Drop Out) para fornecer as tensões de 5 V, 10.4 V e -10.4 V. Esses potenciais são distribuídos para as diferentes partes do circuito, utilizando planos definidos nas camadas internas da placa. É importante ressaltar que esses reguladores lineares oferecem melhor resposta ao ruído em comparação aos reguladores de tensão chaveados. Os sinais de 5 V são destinados aos CIs ADL5304, ADL5315 e ao circuito digital de controle. Já os sinais de 10.4 V e -10.4 V são direcionados ao estágio de saída do circuito. A Figura 25 destaca as diferentes regiões na camada superior da placa de circuito.

Figura 25 - Vista da camada superior do placa de circuito projetada

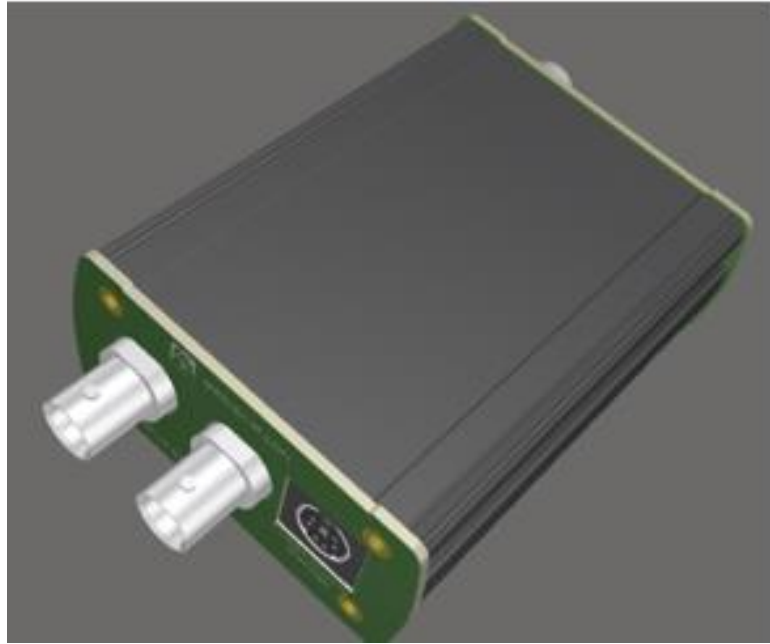


Fonte: Autoria própria.

Foi selecionada uma caixa metálica para encapsular o medidor de corrente desenvolvido em conjunto com dois painéis feitos de placa de circuito impresso, tendo duas funções principais: prevenir interferências eletromagnéticas externas e evitar a contaminação do circuito. É importante destacar que partículas de poeira, gordura corporal ou resíduos provenientes do fluxo de solda podem criar potenciais na superfície da placa, podendo levar a fugas de corrente. A caixa metálica foi dimensionada para ter o tamanho mínimo necessário para acomodar os componentes, otimizando o tamanho do equipamento. A visão do modelo 3D do equipamento projetado é ilustrado na Figura 26.

Essas estratégias combinadas garantem um projeto de placa de circuito impresso que minimiza as interferências, reduz as correntes de fuga e mantém a integridade dos sinais, atendendo aos requisitos de medição de correntes de baixa magnitude com precisão e confiabilidade.

Figura 26 - Visão 3D do equipamento montado



Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÕES

O projeto de desenvolvimento da placa picoamperimétrica para utilização nas linhas de luz do Sirius apresentou resultados promissores. A placa foi concebida com o objetivo de superar os desafios associados à medição de correntes elétricas em diferentes faixas de magnitude, eliminando a necessidade de troca de escalas. O uso da topologia de amplificador logarítmico proporcionou medições contínuas e precisas, garantindo maior confiabilidade nos experimentos realizados no Sirius.

A abordagem adotada permitiu a medição direta da razão logarítmica, dispensando a necessidade de microprocessadores ou hardware externo para realizar a conversão. Além disso, a topologia selecionada ofereceu uma ampla faixa dinâmica, atendendo às exigências das pesquisas científicas conduzidas nas linhas de luz. A utilização de um circuito espelho de corrente possibilitou o emprego do amplificador logarítmico para a medição de correntes bipolares.

A placa de circuito, desenvolvida por meio de software, contempla diversas configurações para garantir sua funcionalidade independente da polaridade da corrente. O layout cuidadosamente projetado assegura a preservação do sinal, resultando em um excelente nível de confiabilidade das medições realizadas nas linhas de luz. Espera-se no futuro realizar a fabricação e montagem e por fim analisar o desempenho do hardware em ambientes de teste.

### 5.1 PROJETOS FUTUROS

No momento, o projeto encontra-se em fase de análise e aguarda a aprovação do financiamento necessário para a fabricação. Assim que a aprovação for obtida, será realizado um processo de cotação junto a fabricantes de placas de circuito impresso para a seleção do fornecedor mais adequado. A PCI será enviada ao fabricante selecionado para a produção da placa.

Uma vez que a placa esteja pronta, será iniciada a montagem do primeiro protótipo do medidor de corrente logarítmico. Nessa etapa, os componentes eletrônicos serão cuidadosamente soldados na placa, seguindo as especificações do projeto. Essa montagem inicial permitirá verificar a integração dos componentes e identificar possíveis ajustes ou melhorias necessárias.

Após a montagem de protótipo, o equipamento passará por uma fase de caracterização. Serão realizados testes sensibilidade, resposta em frequência, resolução, faixa de operação e outras características relevantes para o desempenho do medidor de corrente logarítmico.

Uma vez que a caracterização esteja concluída e o protótipo tenha sido aprovado, o equipamento será levado para as linhas de luz, onde serão realizados testes e avaliações adicionais. Essas linhas de luz são ambientes controlados, geralmente presentes em laboratórios de pesquisa, onde é possível medir e analisar o comportamento do equipamento sob condições específicas. Qualquer ajuste ou aprimoramento identificado durante essa fase será implementado para garantir um produto final de alta qualidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANALOG DEVICES. Analog Devices. High Speed , 200 dB Range , Logarithmic Converter, ADL5304., 2011. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5304.pdf>>. Acesso em: 2023 maio 30.

ANALOG DEVICES. Precision Wide Range (3 nA to 3 mA), High-Side Current Mirror, ADL5315, 2017. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5315.pdf>>. Acesso em: 2024 maio 30.

ANALOG DEVICES. s. User Guide | EVAL-ADL5304 EVAL-ADL5304., 2021. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/ug-339.pdf>>. Acesso em: 2023 maio 30.

CNPEM. cnpem.br. **ABTLuS completa 14 anos e mira novas áreas de pesquisa**, 2011. Disponível em: <<https://cnpem.br/en/abtlus-completa-14-anos-e-mira-novas-areas-de-pesquisa/>>. Acesso em: 30 maio 2023.

CNPEM. Site Oficial. **cnpem.br**, 2021. Disponível em: <<https://cnpem.br/>>. Acesso em: 2023 maio 30.

FORCK, P. Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics. **Joint University Accelerator School**, mar. 2011. p. 0–152.

FOX, A. Log Amp Basics, v. 03, p. 2-5, 2001.

GRAYDON, O. Synchrotron sources accelerate. **Nature Photonics**, v. 9, n. 5, p. 281, 2015.

KEITHLEY. Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements. **Low Level Measurements**, n. 7.

LIGHTSOURCES. Light sources of the world. **lightsources.org**, 2023. Disponível em: <<https://lightsources.org/lightsources-of-the-world/>>. Acesso em: 2023 maio 30.

LNLS. Site Oficial. **lnls.cnpem.br**, 2021. Disponível em: <<https://lnls.cnpem.br/sirius/>>. Acesso em: 2023 maio 30.

MAXIM INTEGRATED. Integrated DC Logarithmic Amplifiers - Application Note - Maxim. **Engineering Journal**, 2005. 3-10. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/technical-articles/integrated-dc-logarithmic-amplifiers.html>>.

PETROFF, Y. Radiação de Síncrotron no Brasil UVX e Sirius. **Ciência e Cultura**, 2017, v. 69, n. 3, p. 18-22.

RICH, A. Shielding and Guarding, 1983, p. 8-13, 1983. Disponível em: <[https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/41727248an\\_347.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/41727248an_347.pdf)>. Acesso em: 2023 maio 30.

TANIO, L. Y. C. F. H. D. M. M. **A MULTIRANGE LOW NOISE TRANSIMPEDANCE AMPLIFIER**. IPAC 2021 - 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas: [s.n.]. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. AN-311 Theory and Applications of Logarithmic Amplifiers, 1991. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/an/snoa575b/snoa575b.pdf>>. Acesso em: 2023 maio 30.

TEXAS INSTRUMENTS. Precision LOGARITHMIC AND LOG RATIO AMPLIFIER, 2004. Disponível em: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/log101.pdf?ts=1686645490720&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLOG101%253Futm\\_source%253Dgoogle%2526utm\\_medium%253Dcpc%2526utm\\_campaign%253Dasc-null-null-GPN\\_EN-cpc-pf-google-wwe%2526utm\\_content%253DLO](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/log101.pdf?ts=1686645490720&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLOG101%253Futm_source%253Dgoogle%2526utm_medium%253Dcpc%2526utm_campaign%253Dasc-null-null-GPN_EN-cpc-pf-google-wwe%2526utm_content%253DLO)>. Acesso em: 30 maio 2023.

WONG, V. Counting Electrons: Making Ultra-high Sensitivity Femtoamp Measurements, 2017. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/education/education-library/webcasts/counting-electrons-making-ultra-high-sensitivity-femtoamp-measurements.html>>. Acesso em: 2023 maio 30.

XU, W. L. Y. M. A. S. P. P. L. W. S. The complexity of thermoelectric materials: why we need powerful and brilliant synchrotron radiation sources? **Materials Today Physics**, v. 6, p. 68-82, ago. 2018.