

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO AUGUSTO DOS REIS CASTRO

**PROTÓTIPO DE CIRCUITO EMULADOR DE PONTEIRA PARA MEDIÇÃO DE
CORRENTE ELÉTRICA**

PATO BRANCO

2021

MARCELO AUGUSTO DOS REIS CASTRO

**PROTÓTIPO DE CIRCUITO EMULADOR DE PONTEIRA PARA MEDIÇÃO DE
CORRENTE ELÉTRICA**

Emulator probe circuit's prototype to measure electric current

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Carlos Marcelo de Oliveira Stein.

2021

PATO BRANCO



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARCELO AUGUSTO DOS REIS CASTRO

**PROTÓTIPO DE CIRCUITO EMULADOR DE PONTEIRA PARA MEDIÇÃO DE
CORRENTE ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR — Campus
Pato Branco).

Data de aprovação: 29/novembro/2021

Carlos Marcelo de Oliveira Stein
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná — UTFPR Campus Pato Branco

Diogo Ribeiro Vargas
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná — UTFPR Campus Pato Branco

Juliano de Pelegrini Lopes
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná — UTFPR Campus Pato Branco

PATO BRANCO

2021

RESUMO

Este trabalho documenta o processo de elaboração, dimensionamento, simulação e implementação de um circuito de baixo custo que visa emular uma ponta de prova para osciloscópio, possibilitando medições de corrente elétrica sem a necessidade de intervenção no circuito o qual a medição ocorra ou a aquisição de um dispositivo comercial para essa finalidade. Utiliza conceitos de eletrônica analógica e eletromagnetismo ao revisar dois circuitos propostos separadamente para operar com correntes contínua e alternada e fazer a integração entre eles. Abrange o teste de um sensor de fluxo magnético e a utilização de amplificadores operacionais, componentes passivos e um núcleo toroidal construído com uma liga de zinco e manganês. Apresenta, também, resultados de medições executadas com o circuito fisicamente construído e possíveis motivos para deficiências de funcionamento em algumas situações, propondo testes que podem ser executados em trabalhos similares.

Palavras-chave: instrumento de medição; osciloscópio; corrente contínua; corrente alternada.

ABSTRACT

This work documents the process of designing, sizing, simulating and implementing a low-cost circuit to emulate an oscilloscope probe, enabling measurements of electrical current with no need for intervention in the circuit being measured neither acquiring a commercial device for this purpose. It uses concepts of analog electronics and electromagnetism to review two circuits proposed separately to operate with direct and alternating currents and make the integration between them. It covers the testing of a magnetic flux sensor and the use of operational amplifiers, passive components, and a zinc and manganese toroidal core. It also presents results of measurements performed with the physically built circuit and possible reasons for issues in some situations, proposing tests that can be done in similar works.

Keywords: measuring instrument; oscillograph; direct current; alternating current.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Osciloscópio ICEL OS-2062C fazendo medições em bancada	14
Figura 2 - Diagrama de blocos de um sensor Hall	14
Figura 3 - Medição de corrente elétrica por resistor série	15
Figura 4 - Resultados da pesquisa de preços para pontas passivas de tensão	16
Figura 5 - Resultados da pesquisa de preços para ponteiras de corrente	17
Figura 6 - Ponteira de corrente de preço intermediário cotado em dólar	18
Figura 7 - Ponta de prova vista como um transformador	20
Figura 8 - Circuito magnético equivalente da ponta de prova	21
Figura 9 - Efeito Hall.....	22
Figura 10 – Circuito para análise em frequência em LTSpice	23
Figura 11 - Respostas dos circuitos com atenuação e compensação de entrada.....	23
Figura 12 - Compensador e entrada resisto-capacitiva do osciloscópio	24
Figura 13 - Divisor de tensão para geração de sinais de referência	25
Figura 14 - Esquema de fornecimento das correntes de teste	26
Figura 15 - Proposta original do circuito para medição de corrente alternada	28
Figura 16 - Circuito adaptado para medição de corrente alternada	29
Figura 17 - Proposta original do circuito para medição de corrente contínua	32
Figura 18 - Curva de resposta do sensor 49E alimentado com 5 V cc.....	32
Figura 19 - Circuito adaptado para medição de corrente contínua.....	34
Figura 20 - Conjunto somador e subtrator para junção das medições contínua e alternada	35
Figura 21 - Circuito para fornecimento de tensões de referência e calibração	37
Figura 22 - Circuito do emulador modelado em LTSpice	40
Figura 23 - Alteração no circuito da captação do sinal do 49E.....	43
Figura 24 - Esquemático utilizado para a construção da placa de circuito impresso no KiCad.....	47
Figura 25 - Medida de corrente pulsante de 10 Hz	54
Figura 26 - Medida de corrente pulsante de 100 Hz	55
Figura 27 - Medida de corrente pulsante de 1 kHz.....	55
Figura 28 - Medida de corrente pulsante de 10 kHz.....	56
Figura 29 - Medida de corrente pulsante de 50 kHz.....	56
Figura 30 - Novo arranjo para alimentação do sensor e referências zero	58
Figura 31 - Representação de resistor e enrolamento com componentes parasitas.....	60
Figura 32 - Circuito em LTSpice para verificação dos efeitos dos componentes parasitas.....	61
Figura 33 - Correntes nos resistores ideal e não-ideal a 120 Hz.....	61
Figura 34 - Correntes nos resistores ideal e não-ideal a 1 kHz.....	62
Figura 35 - Subida das correntes ideal e não-ideal a 120 Hz.....	62

Figura 36 - Subida das correntes ideal e não-ideal a 1 kHz.....	63
Figura 37 - Gráfico modelo para aferição de slew rate.....	63
Gráfico 1 - Resultados da primeira simulação do emulador no LTSpice.....	42
Gráfico 2 - Resultados de simulação no LTSpice após ajustes no circuito	44
Gráfico 3 - Resultados de simulação no LTSpice com ganho de 59 vezes.....	45
Gráfico 4 - Resultados de simulação no LTSpice com ganho de 61,5 vezes.....	46
Gráfico 5 - Resultados do teste do emulador com resistência alterada	50
Gráfico 6 - Resultados do teste do emulador com resistor de 330k Ω	52
Gráfico 7 - Resultados do teste do emulador com mudança na referência zero.....	52
Quadro 1 - Índice do circuito adaptado para medição de corrente alternada	29
Quadro 2 - Índice das equações para cálculo de R3.....	30
Quadro 3 - Índice do circuito adaptado para medição de corrente contínua	34
Quadro 4 - Índice do conjunto somador e subtrator	36
Quadro 5 - Índice do circuito gerador de tensões de referência.....	38
Quadro 6 - Índice do gráfico de validação do slew rate.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores teóricos de tensão de saída do sensor Hall.....	33
Tabela 2 – Resultados da primeira simulação do emulador no LTSpice.....	41
Tabela 3 – Resultados de simulação no LTSpice após ajustes no circuito	44
Tabela 4 – Resultados de simulação no LTSpice com ganho de 59 vezes	45
Tabela 5 – Resultados de simulação no LTSpice com ganho de 61,5 vezes	46
Tabela 6 – Resultados do teste do 49E alimentado com 4,5 V	49
Tabela 7 – Resultados do teste do emulador com resistência alterada	49
Tabela 8 – Resultados do teste do emulador com resistor de 330k Ω	51
Tabela 9 – Resultados do teste com mudança na referência zero.....	53
Tabela 10 – Medidas dos componentes utilizados para gerar correntes de teste	60

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Ohm (medida de resistência elétrica)
A	Ampère (medida de corrente elétrica)
V	Volt (medida de tensão elétrica)
W	Watt (medida de potência elétrica)
μ	Micro (milionésima parte, 10^{-6})

SUMÁRIO

1.1	Contexto histórico	13
1.2	Delimitação do problema	15
1.3	Objetivo geral	18
1.4	Objetivos específicos	18
1.5	Estrutura do trabalho	19
2	DESENVOLVIMENTO	20
2.1	Circuitos de medição	20
2.1.1	Medição de corrente alternada	20
2.1.2	Medição de corrente contínua	21
2.2	Circuitos de ajuste e calibração	22
2.2.1	Impedância de entrada.....	22
2.2.2	Amplificadores operacionais e circuitos relacionados	24
2.3	Fornecimento das correntes de teste	26
3	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO DO MEDIDOR	28
3.1	Corrente alternada	28
3.2	Corrente contínua	31
3.3	Soma de sinais e saída da ponteira	35
3.4	Compensação de impedância de entrada	36
3.5	Tensão de referência zero	37
3.6	Tensões de <i>offset</i> e calibração	37
3.6.1	Versão para simulação.....	38
3.6.2	Versão para o circuito físico	38
4	RESULTADOS TEÓRICOS, PRÁTICOS E AJUSTES	40
4.1	Simulação	40
4.1.1	Premissas de simulação.....	41
4.1.2	Resultados de simulação	41
4.1.3	Revisão da estrutura do circuito	42
4.1.4	Simulações com o novo arranjo	43
4.2	Circuito real	46
4.2.1	Premissas da medição	48
4.2.2	Teste sem medida para ajuste das calibrações	48
4.2.3	Medições de corrente contínua (com a resistência alterada)	49
4.2.4	Recalibrações e ajustes	50

4.2.5	Medições de corrente contínua com nova tensão de referência zero	52
4.2.6	Medições de corrente alternada	54
4.3	Registro dos limites de operação do emulador	56
5	CONCLUSÃO	58
5.1	Tensão de referência zero x sensor Hall	58
5.2	Núcleo ferromagnético	59
5.3	Geração das correntes de teste	59
5.4	Taxas de caimento de sinal	63
	REFERÊNCIAS.....	66
	APÊNDICE A - Lista de componentes passivos disponíveis	69
	APÊNDICE B - Cálculo de fluxo magnético previsto no núcleo do emulador 71	
	APÊNDICE C - Diretiva Spice para simulação do LM324	73
	ANEXO A - Placa do circuito do emulador modelada no Pcbnew (KiCad) 75	
	ANEXO B - Placa construída e utilizada nos testes	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto histórico

Ao longo da história, o ser humano percebeu a necessidade de quantificar tudo o que o rodeava, de forma a auxiliá-lo na resolução e controle de situações. Desde as mais simples, como saber se algum membro do grupo desapareceu, a outras mais elaboradas, quando do início das relações entre os povos e o comércio por escambo. Deu-se origem à contagem e quantificação relacionada a espaços — distância, área, volume —, energia e forças (potência, torque, pressão), entre outras. Quantificação similar ocorreu no fim do século XIX, após a descoberta da eletricidade e do eletromagnetismo, suas características e efeitos, resultando em unidades próprias incorporadas a um Sistema Internacional de Unidades (SI), entre as quais a corrente elétrica.

Paralelamente, enquanto o SI se consolidava, engenheiros e construtores começaram a procurar formas de otimizar os processos de produção e uso do que construíam, passando a fazer medições para estudos, surgindo daí a necessidade de dispositivos projetados com essa finalidade. Doebelin (1966), inclusive, aponta que muitos engenheiros mecânicos se envolvem nos projetos desses equipamentos, devido à relação de diversos fenômenos físicos — mesmo os elétricos — com situações mecânicas.

Entre os dispositivos de medição está o osciloscópio (Figura 1), feito para acompanhar respostas de um circuito elétrico em tempo real a partir de pontas de prova conectadas em seus terminais. Dentre os tipos de ponta de prova existentes, dois são descritos a seguir:

- ponta de tensão: pode ser ativa com componentes FET e/ou amplificadores diferenciais ou passiva, sendo essa última comumente utilizada por vir de fábrica com osciloscópios novos (RAIZA, 2020). A ponta passiva possui dois terminais, resistores para ajustes de ganho e capacitores para compensação de frequência (CAMPILHO, 2014), não necessita de fontes de alimentação e, devido à simplicidade construtiva decorrente dos componentes utilizados, costuma ter baixo custo de aquisição, com valores que serão comentados mais adiante;

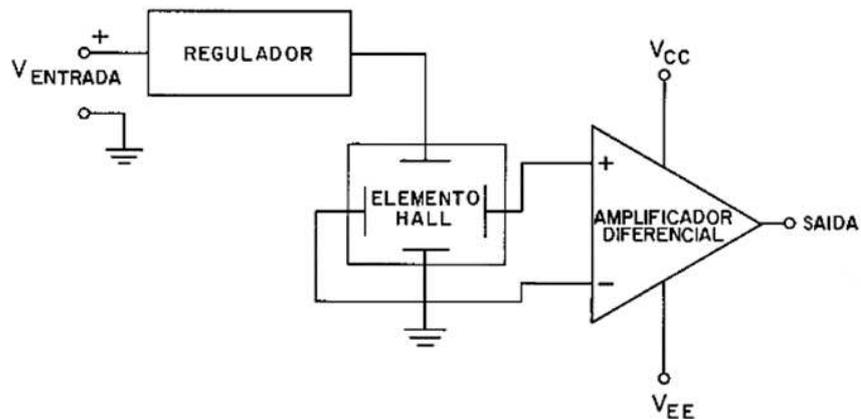
Figura 1 - Osciloscópio ICEL OS-2062C fazendo medições em bancada



Fonte: Autoria própria (2019)

- ponta (ou pinça) de corrente: foco deste estudo, possui estruturas para as duas possíveis condições de medição, sendo uma para correntes contínuas, por meio de uma tensão Hall (a ser explicada no Capítulo 2), e outra para correntes variantes no tempo, a partir do princípio do transformador de potência (ANGHEL, 2017). A primeira demanda alimentação à parte que, nos modelos comerciais, costumeiramente é feita por uma bateria de 9 V, pois sensores Hall precisam de fontes de tensão e corrente fixas, fazendo a medição a partir de um fluxo magnético incidente sobre um elemento Hall. O arranjo desse tipo de sensor é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama de blocos de um sensor Hall



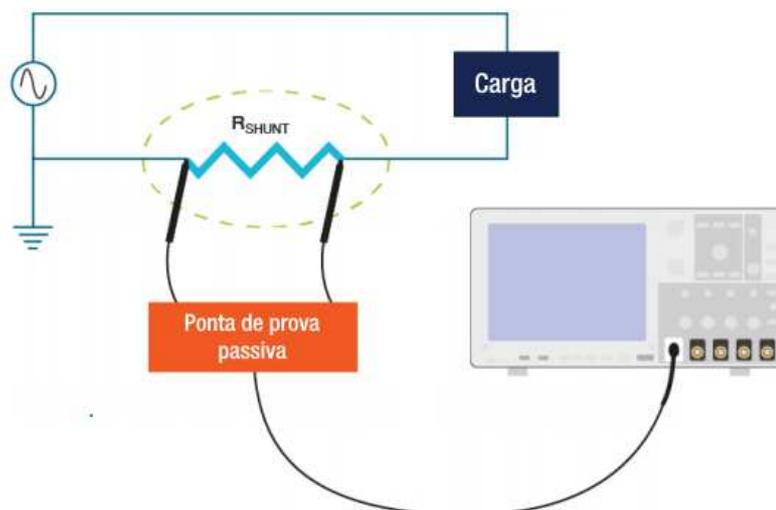
Fonte: Adaptado de Honeywell (2016)

Com mais componentes relacionados à instrumentação e necessitando de circuitos auxiliares, as pontas de corrente são construtivamente mais elaboradas e têm preços superiores aos cobrados por pontas passivas de tensão, sendo adquiridas apenas quando essas medições são constantes e necessárias.

1.2 Delimitação do problema

No Campus Pato Branco da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-PB), por exemplo, ponteiros para medição de corrente só estão disponíveis para uso de docentes e discentes vinculados ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica — PPGEE; ao mesmo tempo, acadêmicos da graduação têm pouco contato com o instrumento ou outros métodos de medição de corrente, como o resistor série (ou *shunt*) da Figura 3.

Figura 3 – Medição de corrente elétrica por resistor série



Fonte: Adaptado de Vinci (2021)

Esse método nem sempre é viável, contudo, devido a efeitos de carga do resistor série ou impossibilidade de abertura no ponto de medição, como em placas com componentes soldados, muitas vezes feitas ao longo do curso e em projetos de extensão da universidade, confirmando a necessidade de que haja pontas de prova de corrente disponíveis também para a graduação.

Caso a UTFPR-PB inicie um processo de aquisição, deve fornecer, além de justificativas e especificações técnicas, cotações que confirmem o preço previsto, atendendo ao Art. 15 da Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993 (Brasil, 1993). Para se ter ideia das diferenças de valores entre pontas passivas e de corrente, as Figuras 4 e 5 mostram resultados de pesquisas no Painel de Preços, site no qual o Governo Federal registra compras anteriores como balizadoras para novas licitações de compra de materiais.

Figura 4 – Resultado da pesquisa de preços para pontas passivas de tensão

FILTROS APLICADOS	Nome do Material (PDM)
Descrição Complementar	
<p>PONTA DE PROVA BNC-JACARÉ, PADRÃO DE CONEXÃO: BNC - JACARÉ PEQUENO. CABO INJETADO DE MÉDIA FLEXIBILIDADE. IMPEDÂNCIA: 50 OHMS ± 2.5 OHMS // 115PF, ATENUAÇÃO : 0.1DB/M [30MHZ]. 0.264DB/M [200MHZ], ISOLAÇÃO: 10000 KOHMS KM., DIÂMETRO EXTERNO DO CONDUTOR: 5.0MM ± 0.15MM, ABERTURA DO JACARÉ: 6MM., PONTA DE PROVA PASSIVA PARA OSCILOSCÓPIO, ATENUAÇÃO ÚNICA DE 10X, LARGURA DE FAIXA DE DC A 50MHZ (-3DB), CONEXÃO BNC, IMPEDÂNCIA DE ENTRADA DE 10MOHMS +/- 1.5%, CAPACITÂNCIA DE ENTRADA < 12 PF, MÁXIMA TENSÃO SINAL-TERRA NA ENTRADA PONTA PROVA BNC DE 300VRMS CAT II, DELAY DE PROPAGAÇÃO DE ~6.1NS, RISE TIME <7NS, COMPENSAÇÃO DE 15PF OSCILOSCÓPIO PARA 25PF, COMPRIMENTO 1,3M, ATENDE ÀS NORMAS DE SEGURANÇA UL61010-031; 2007, CAN/CSA C22.2 NO. 61010-031-07 E IEC61010-031; IEC 61010-031/A1:200 8, GARANTIA MÍNIMA DE 1 ANO ATESTADA ATRAVÉS DE CARTA DO FABRICANTE, REF. TEKT RONI X TPP0051., PONTA DE PROVA OSCILOSCÓPIO. PONTA DE PROVA PARA OSCILOSCÓPIOS COM ATENUAÇÃO 1:1 E 10:1 E RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE 100MHZ.- IMPEDÂNCIA DE ENTRADA: 10 MOHMS,- MÁXIMA TENSÃO DE ENTRADA: 600V.</p>	

RESULTADO 1

DADOS DA COMPRA

Identificação da Compra: 00020/2020
Número do Item: 00075
Objeto da Compra: Pregão Eletrônico - IRP para futura aquisição de Material elétrico, eletrônico e ferramentas para uso em aulas práticas.
Quantidade Ofertada: 10
Valor Proposto Unitário: R\$ 113,14
Valor Unitário do Item: R\$ 56,57
Código do CATMAT: 74004
Descrição do Item: PONTA PROVA OSCILOSCÓPIO, PONTA DE PROVA PARA INSTRUMENTO DE MEDIC
Descrição Complementar:
Unidade de Fornecimento: UNIDADE
Modalidade da Compra: Pregão
Forma de Compra: SISRP
Marca: BBC TECH
Data do Resultado: 24/11/2020

Fonte: Painel de Preços (2021)

Ainda que a universidade eventualmente pudesse fazer suas compras sem passar por pregão, as pontas de corrente comerciais são feitas por fabricantes de fora do Brasil (CARVALHO e MILLÉO, 2017), tendo de ser importadas por representações como Mouser Electronics, Digi-Key ou Newark (Farnell Brazil) com valores cotados em dólar, tornando o preço de compra variável e elevado, mesmo com isenção tributária conforme o Art. 1º da Lei nº 8.010, de 29 de março de 1990 (Brasil, 1990).

Figura 5 – Resultados da pesquisa de preços para ponteiras de corrente

FILTROS APLICADOS	Nome do Material (PDM)
Descrição Complementar PONTEIRAS DC/AC DE MEDIÇÃO DE CORRENTE COMPATÍVEL COM OSCILOSCÓPIO E CONEXÃO BNC. PONTEIRA DE CORRENTE DC E AC, COM CAPACIDADE DE MEDIDA DE NO MÍNIMO 100 A DE PICO. OPERAÇÃO DE MEDIDA NA FAIXA MÍNIMA DE FREQUÊNCIA DE 0 HZ A 100 KHZ. C APACIDADE DE MEDIÇÃO DE CORRENTES NO INTERVALO MÍNIMO DE 50 MA A 100 A DE PICO \, E VALOR EFICAZ MÍNIMO DE MEDIDA DE 60 A. DISPOSITIVO SENSOR DE EFEITO HALL. CONEXÃO DO TIPO ALICATE, SEM NECESSIDADE DE ABERTURA DE CIRCUITO PARA MEDIÇÃO. COMPATÍVEL COM OSCILOSCÓPIO OU EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO COM ENTRADA TIPO BNC. FAIXA DE VALORES DO SINAL DE SAÍDA PARA 10 MV/A CA/CC E 100MV/A	PONTA PROVA OSCILOSCÓPIO

RESULTADO 1

DADOS DA COMPRA

Identificação da Compra: 00028/2020
Número do Item: 00243
Objeto da Compra: Pregão Eletrônico - Aquisição de Materiais Elétricos para o IFRS
Quantidade Ofertada: 15
Valor Proposto Unitário: R\$ 4.480
Valor Unitário do Item: R\$ 3850
Código do CATMAT: 74004
Descrição do Item: PONTA PROVA OSCILOSCÓPIO, PONTA DE PROVA PARA INSTRUMENTO DE MEDIC
Descrição Complementar:
Unidade de Fornecimento: UNIDADE
Modalidade da Compra: Pregão
Forma de Compra: SISRP
Marca: PINTECH
Data do Resultado: 23/06/2021

RESULTADO 2

DADOS DA COMPRA

Identificação da Compra: 00048/2020
Número do Item: 00060
Objeto da Compra: Pregão Eletrônico - Aquisição de Equipamentos de Laboratórios para os Campi do IFRS
Quantidade Ofertada: 10
Valor Proposto Unitário: R\$ 6.112,13
Valor Unitário do Item: R\$ 5149,5
Código do CATMAT: 74004
Descrição do Item: PONTA PROVA OSCILOSCÓPIO, PONTA DE PROVA PARA INSTRUMENTO DE MEDIC
Descrição Complementar:
Unidade de Fornecimento: UNIDADE
Modalidade da Compra: Pregão
Forma de Compra: SISRP
Marca: KEYSIGHT
Data do Resultado: 09/12/2020

Fonte: Painel de Preços (2021)

Há ponteiras com preço reduzido em relação aos valores apresentados na Figura 5, com limites máximos inferiores de frequência e corrente, cujas cotações não foram encontradas no Painel de Preços. Como referências, considerando que o dólar teve preços de compra entre R\$ 5,14 e R\$ 5,64 nos meses de setembro e outubro de 2021 (BCB, 2021), a ponteira apresentada na Figura 6 custou entre R\$ 714,05 e R\$ 783,51 nesse período.

Figura 6 – Ponteira de corrente de preço intermediário cotado em dólar



Hantek CC-65 AC/DC Multimeter Current Clamp Meter with BNC Connector Up to 20 kHz 20mA to 65A DC

Visite a loja Hantek

★★★★★ 278 avaliações de clientes | 40 perguntas respondidas

Por: **US\$ 55,69** +US\$ 12,53 de envio

US\$ 83,23 Depósito de taxas de importação e envio para Brasil Detalhes

Marca	Hantek
Peso do produto	0,55 Libras
Dimensões do item C x L x A	7,68 x 1,3 x 2,76
Tipo de medição	Multimeter

Sobre este item

- Intervalo de frequência CA/DC: até 20 kHz
- Faixa de medição efetiva: 20 mA a 65 A
- Medição de circuito de energia e análise
- Medição do motor do conversor de frequência (ou outros eletrônicos)
- Medição de equipamentos eletrônicos de potência.

Envio e Detalhes da Taxa

Preço	US\$ 55,69
Envio AmazonGlobal	US\$ 12,54
Depósito estimado para imposto sobre a importação de produtos estrangeiros	US\$ 70,69
Total	US\$ 138,92

Fonte: Amazon (2021)

Com esse cenário, percebe-se a necessidade de elaborar uma alternativa de baixo custo e que possibilite aferições de corrente em circuitos que não possam ser alterados, do mesmo modo que os dispositivos comerciais.

1.3 Objetivo geral

Projetar um dispositivo para executar medições de corrente contínua e alternada que apresente resultados aferíveis em um osciloscópio, sem que seja necessária a abertura do circuito no ponto de medição.

1.4 Objetivos específicos

São dois os objetivos específicos deste trabalho, os quais:

- aferir o comportamento do sensor de corrente e o efeito transformador no núcleo ferromagnético;
- adequar o sinal obtido pelos métodos de medição da corrente para que se obtenha uma escala 1:1 entre corrente medida e tensão de saída do circuito.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho encontra-se organizado na seguinte sequência:

- capítulo 1 — Introdução: apresentação do problema de medição de corrente elétrica, resumo acerca dos instrumentos e métodos disponíveis para estudantes de graduação do Campus Pato Branco da UTFPR e das tratativas burocráticas quando da intenção de compra de pontas de prova comerciais;
- capítulo 2 — Fundamentação teórica: são estudadas duas propostas de circuitos de instrumentação para a ponta de prova, uma para medições em corrente contínua e outra em corrente alternada. Também é analisado um circuito que será utilizado para alimentação do sensor e geração de outras tensões que serão usadas na ponteira, bem como a integração de todas as partes para que se obtenha um protótipo para o emulador da ponteira;
- capítulo 3 — Desenvolvimento teórico do circuito emulador;
- capítulo 4 — Simulação em LTSpice do circuito desenvolvido e ajustes para refinamento dos resultados. No mesmo capítulo, posteriormente, são apresentadas a montagem e os testes, ajustes e resultados obtidos com a implementação do circuito físico;
- capítulo 5 — Conclusão, na qual são comentados os problemas percebidos durante a implementação e que são relativos a limitações dos componentes utilizados e do próprio arranjo do circuito físico, com proposição de possíveis soluções para eventuais atualizações da ponteira proposta por este trabalho.

2 DESENVOLVIMENTO

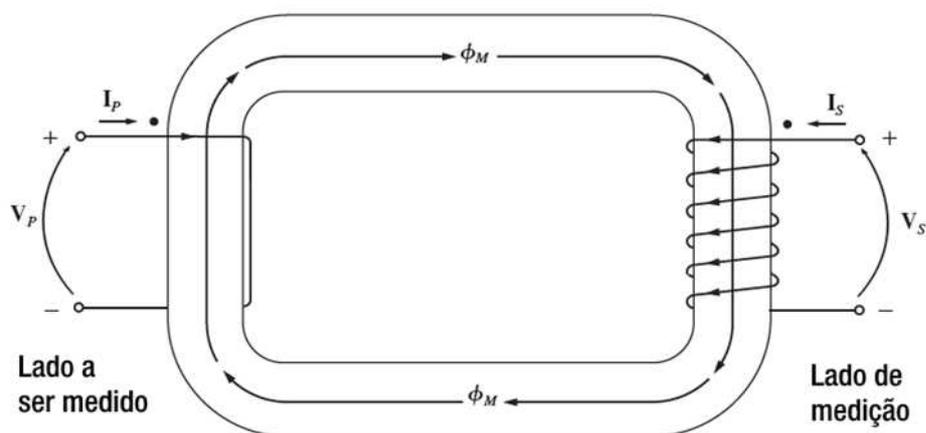
Neste capítulo serão analisados os circuitos utilizados para desenvolvimento e teste da ponta de prova, conforme já especificado no Capítulo 1.

2.1 Circuitos de medição

2.1.1 Medição de corrente alternada

A medição de corrente alternada pode ser realizada através do princípio de funcionamento de um transformador de potência elétrica no qual, segundo Chapman (2014), um fio com corrente produz campo magnético em seu entorno e, se essa corrente for variante no tempo e, por conseguinte, produzir fluxo magnético variável, irá induzir tensão em outra bobina que esteja enrolada nesse mesmo entorno. Esse efeito, referenciado como leis de Lenz e Faraday (RESNICK e HALLIDAY, 1984), quando ocorrendo na ponteira de medição, é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Ponta de prova vista como um transformador



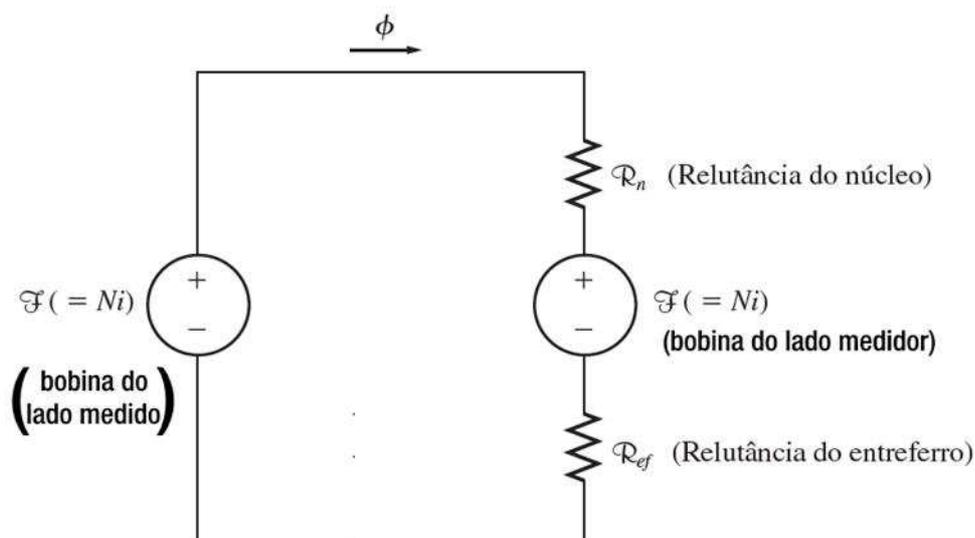
Fonte: Adaptado de Chapman (2014)

Além da corrente, o fluxo magnético do conjunto depende, também, de material e seção do núcleo utilizado e do espaçamento decorrente do corte que possibilita a abertura do instrumento (e permite a entrada do fio com a corrente que será medida) e a colocação do componente de monitoramento da corrente contínua

que, partindo da premissa que um transformador não opera sob essa condição (ANGHEL, 2017), se torna indispensável.

O circuito eletromagnético equivalente, resultante das espiras de entrada e saída e das relutâncias dos espaços entre as duas partes do núcleo, segue o arranjo da Figura 8.

Figura 8 – Circuito magnético equivalente da ponta de prova



Fonte: Adaptado de Chapman (2014)

Considerando que a bobina do lado medidor esteja ligada a uma carga, quando da medição de corrente alternada, a tensão induzida gerada pela variação de fluxo magnético deve incidir sobre essa carga, podendo ser captada por um circuito de instrumentação que será abordado no Capítulo 3.

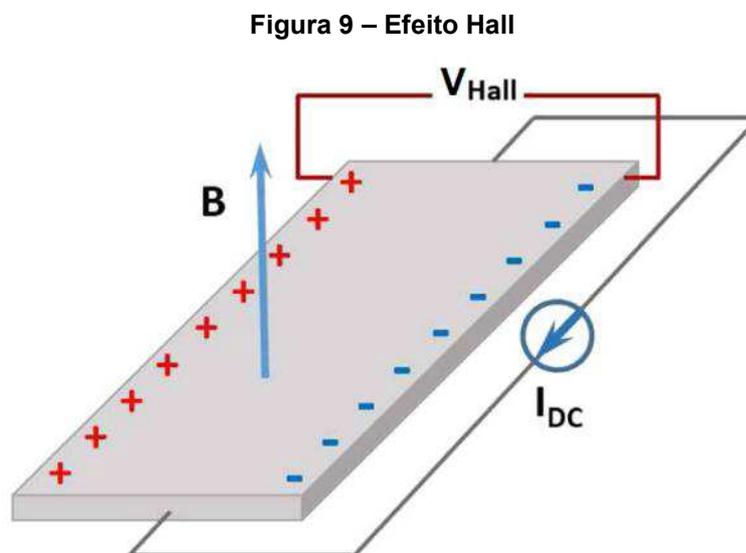
E ainda, quando da medição de corrente contínua, é possível estimar o fluxo magnético incidente no núcleo considerando que, sob essa condição, não haverá tensão induzida, e esse fluxo torna-se dependente exclusivamente das relutâncias e da bobina do lado medido. A estimativa de fluxo é apresentada no Apêndice B.

2.1.2 Medição de corrente contínua

Demanda um circuito integrado que meça a parcela não variante do fluxo magnético, decorrente da corrente contínua injetada pelo lado a medir, no núcleo anteriormente mencionado. Essa identificação se dá através de tensão induzida por deslocamento de portadores de carga, quando um fio com corrente elétrica se

encontra imerso em campo magnético, situação mencionada na literatura como efeito Hall (RESNICK e HALLIDAY, 1984) e ilustrada na Figura 9.

A tensão Hall é então regulada no próprio circuito integrado e proporcional ao fluxo magnético e, por conseguinte, à corrente medida.



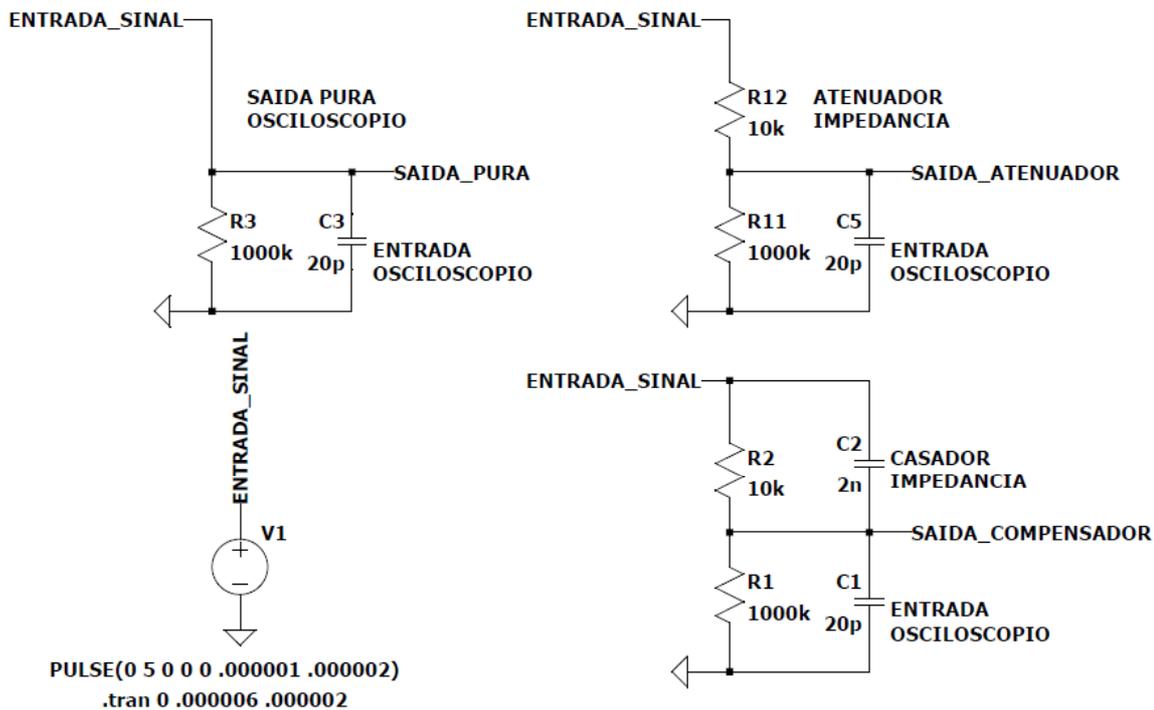
Fonte: Adaptado de Schubert, Kühne, Darakchieva & Hoffmann (2016)

2.2 Circuitos de ajuste e calibração

2.2.1 Impedância de entrada

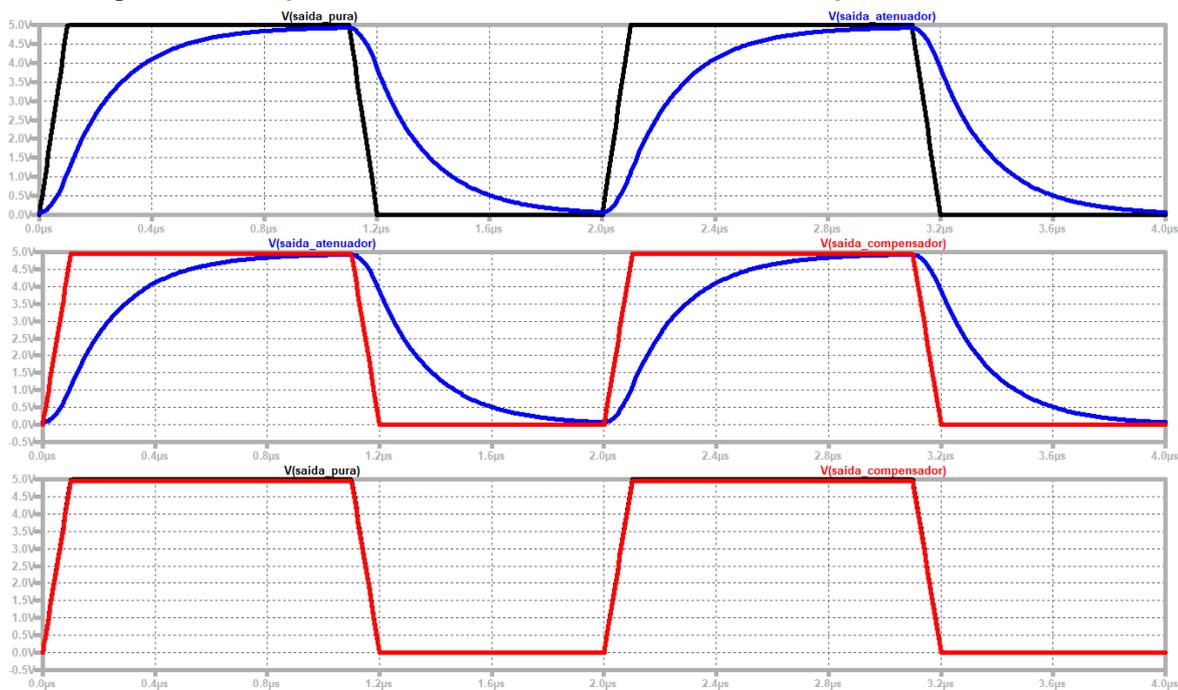
A impedância de entrada de um osciloscópio tem característica resistiva e capacitiva que, observada em uma análise de frequência, resulta em uma filtragem adicional que causa alterações de ganho (atenuações) e fase (atrasos de propagação) em consonância com o quão elevada for a frequência do sinal medido. Tanto a resistência quanto a capacitância de entrada são fornecidas nas folhas de dados e manuais de uso dos osciloscópios; no caso dos dois modelos disponíveis na universidade, em torno de $1\text{ M}\Omega$ e 20 pF , respectivamente (TEKTRONIX, 2005; ICEL, 2011). As Figuras 10 e 11 mostram simulações com um exemplo de resposta, feito com esses valores, em LTSpice.

Figura 10 - Circuito para análise em frequência em LTSpice



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 11 – Respostas dos circuitos com atenuação e compensação de entrada



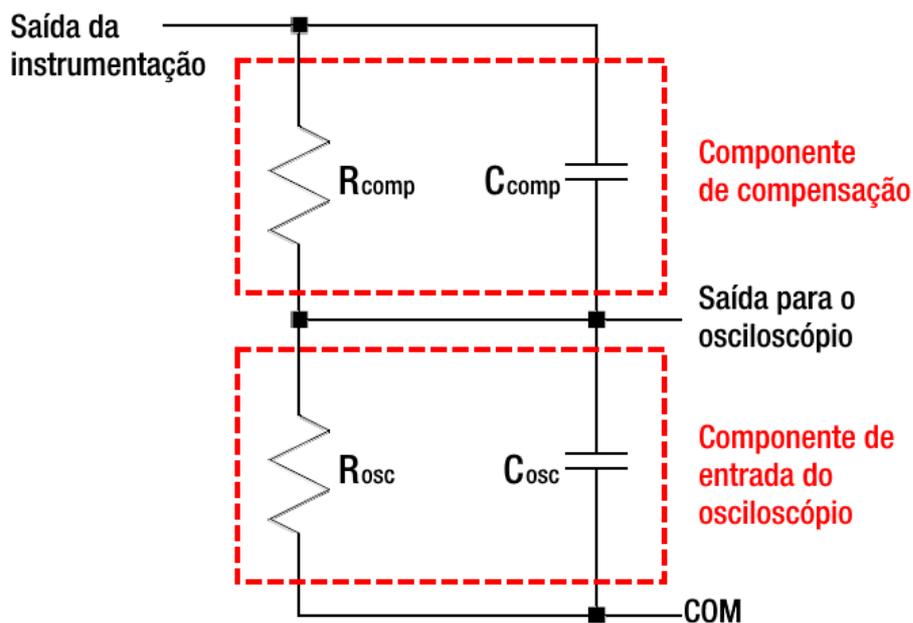
Fonte: Autoria própria (2021)

Nesse exemplo, tem-se três comparativos:

- no gráfico mais acima, entre um sinal medido diretamente pelos terminais do osciloscópio (em preto) e a mesma medição colocando-se um resistor para uma atenuação de 1% do sinal (em azul);
- no gráfico central, entre as medidas feitas sem (em azul) e com (em vermelho) um capacitor colocado em paralelo ao resistor de atenuação, calculado para aproximar as impedâncias do osciloscópio e do atenuador;
- no gráfico mais abaixo, entre as medidas feitas somente com o osciloscópio e com o compensador.

Assim sendo, para fins de refinamento — e também seguindo os circuitos sugeridos para a montagem da ponteira —, será adotado o uso de um circuito compensador, também resisto-capacitivo, tal como o da Figura 12.

Figura 12 – Compensador e entrada resisto-capacitiva do osciloscópio



Fonte: Autoria própria (2021)

2.2.2 Amplificadores operacionais e circuitos relacionados

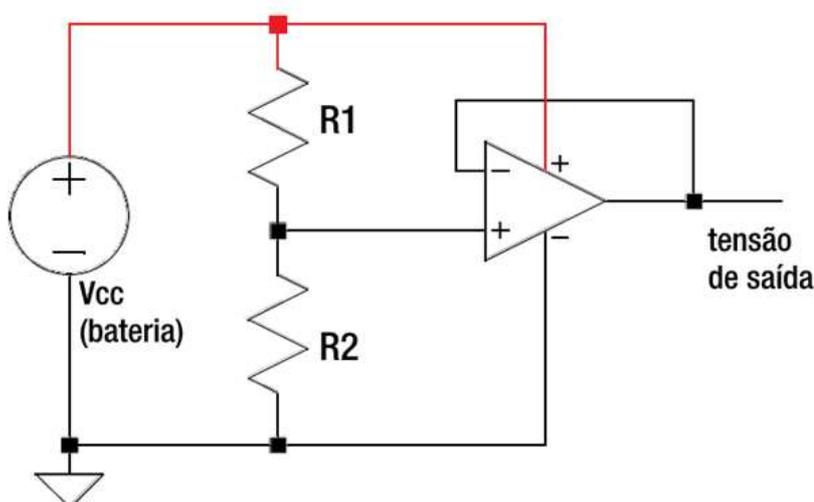
Este trabalho utiliza circuitos com amplificadores operacionais, aproveitando duas características:

- a impedância entre os terminais de entrada, tipicamente em um intervalo entre 10^7 e $10^{12} \Omega$ (MANCINI, 2002), que permite um isolamento entre os componentes de captura e o condicionamento do sinal da medição;
- a faixa de frequência de trabalho, de 1 MHz no caso do LM324 (PHILLIPS, 1995), que permite que a ponteira finalizada tenha comportamento previsível em todos os testes aos quais for submetida.

A utilização desses amplificadores e de sensores de tensão Hall (ver Figura 2 e item 2.1.2 deste trabalho) torna necessária a inclusão de fontes de alimentação no sistema, como em ponteiras comerciais, nas quais são utilizadas baterias de 9 V.

Essa tensão deve ser elevada o suficiente a fim de permitir margens de escala maiores, restritas pela alimentação dos amplificadores, para os circuitos de instrumentação. Além disso, podendo a ponta de prova medir sinais de corrente alternada — com valores negativos, inclusive —, precisa-se que a saída também acompanhe essa característica; logo, a tensão base da fonte deve ser distribuída em partes que representem as medidas positivas e negativas para que os sinais sejam adequados aos amplificadores, o que é viável a partir da geração de sinais de referência através de divisores de tensão, seguindo o modelo da Figura 13, combinada com o condicionamento das entradas para excursionar em torno dessas referências.

Figura 13 – Divisor de tensão para geração de sinais de referência



Fonte: Autoria própria (2021)

O circuito será utilizado para a geração de duas tensões, as quais:

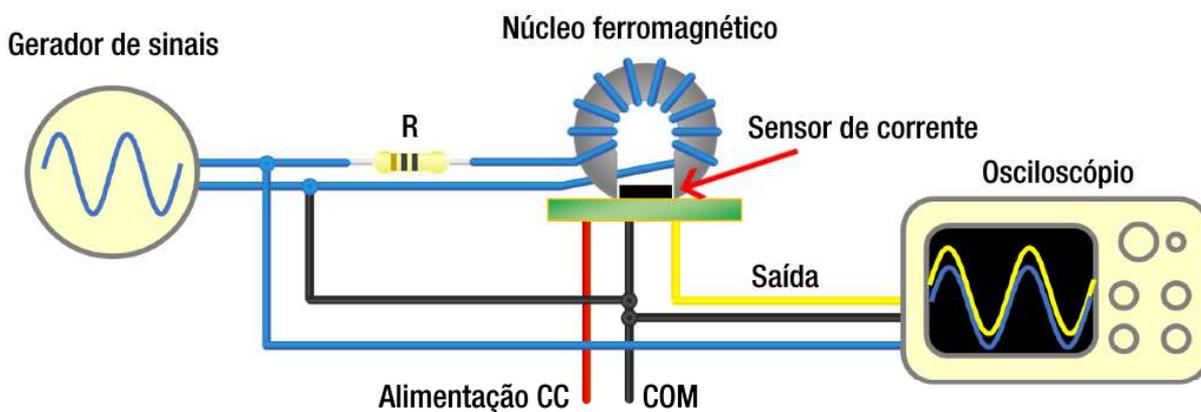
- uma referência zero de medição, que também será utilizada para alimentar o sensor Hall;
- uma referência zero para o sensor Hall, a ser detalhada no Capítulo 3.

2.3 Fornecimento das correntes de teste

Como não há equipamentos disponíveis na universidade que permitam correntes alternadas de elevada amplitude (superiores a 1 A) e o desenvolvimento de conversores chaveados para essa aplicação não faz parte do escopo de projeto, a forma encontrada para gerar correntes de teste foi adaptar a reprodução de um experimento prático, documentado para o teste de outro circuito integrado que atua pelo mesmo princípio de indução de fluxo magnético comentado no item 2.1.2. Esse experimento permite a emulação de correntes maiores que 1 A e a utilização de um equipamento disponível no laboratório da universidade (uma fonte geradora de funções) e serve tanto para os testes em separado dos sensores Hall e do núcleo ferromagnético quanto para os testes da ponta de prova pronta.

Como é possível observar na Figura 14, tem-se um resistor para limitar a corrente de saída do gerador, que circula por um fio enrolado em um núcleo e, devido às leis comentadas no item 2.1.1, induz uma corrente no enrolamento que está do outro lado do núcleo e ligado aos circuitos de medição.

Figura 14 – Esquema de fornecimento das correntes de teste



Fonte: Adaptado de Shabaz (2017)

O mesmo circuito será aproveitado também para emular as medições de corrente contínua, com a ressalva do uso de uma fonte em vez do gerador de sinais, que não dispõe de programações com saídas contínuas.

O dimensionamento de cada um dos circuitos e a integração entre eles para a montagem do protótipo do emulador serão abordados no Capítulo 3.

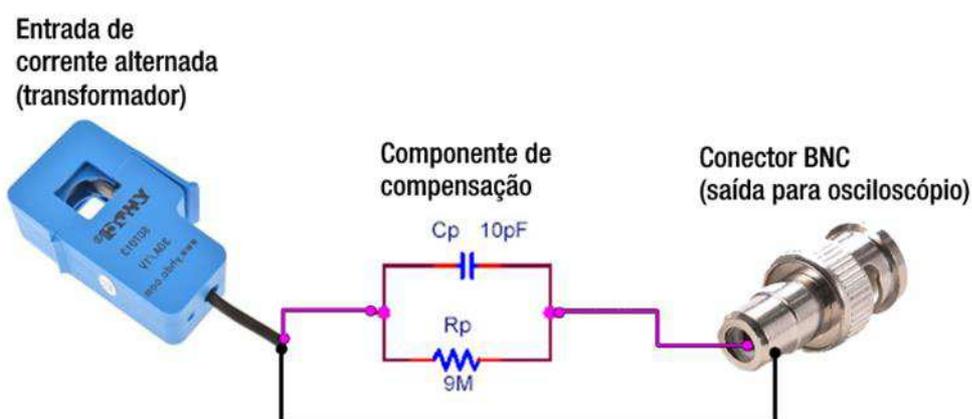
3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO DO MEDIDOR

Este capítulo detalha dois circuitos de medição e as adaptações feitas a fim de determinar os limites mínimo e máximo de corrente medida.

3.1 Corrente alternada

O circuito ilustrado na Figura 15 foi proposto por Anghel (2017) para as medições de corrente alternada. Embora não possua nenhuma representação da conversão da corrente medida para tensão, um vídeo publicado juntamente com o artigo mostra a utilização de um sensor SCT-013-015, com escala 15 A : 1 V (YHDC, s.d.).

Figura 15 – Proposta original do circuito para medição de corrente alternada



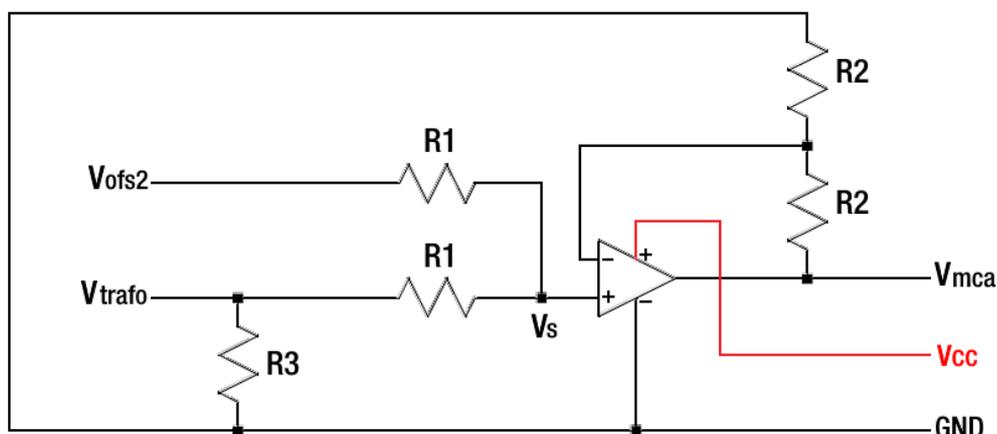
Fonte: Adaptado de Anghel (2017)

Não havendo esse componente à disposição para o trabalho e, mantendo-se a necessidade dessa conversão, foi proposta a inserção de uma carga resistiva para a captação do sinal medido referente à corrente alternada.

Além disso, devido ao uso de amplificadores *single supply* e uma eventual aplicação da ponta de prova em sinais com ciclos negativos, e considerada parte da faixa de saída disponível para a representação desses sinais, faz-se necessária a adição de um equivalente a uma tensão de referência zero (detalhada no item 2.2.2), suficiente para garantir que toda a faixa esperada de sinal negativo seja captada.

O circuito responsável pelas correntes alternadas, então, se configura da maneira apresentada na Figura 16 e os elementos do Quadro 1.

Figura 16 – Circuito adaptado para medição de corrente alternada



Fonte: Autoria própria (2021)

Quadro 1 – Índice do circuito adaptado para medição de corrente alternada

Referência	Condição
V_{trafo}	Tensão de saída do enrolamento secundário
V_{ofs2}	Tensão de referência zero
V_s	Tensão no terminal positivo do amplificador
V_{mca}	Tensão de saída da medição de corrente alternada
V_{cc}	Alimentação positiva dos amplificadores
GND	Alimentação negativa dos amplificadores
R_1, R_2, R_3	Impedâncias de valor a calcular

Fonte: Autoria própria (2021)

Os componentes escolhidos para uso no circuito foram dimensionados em três etapas. A primeira consiste em um circuito somador, no qual a tensão no terminal positivo do amplificador é determinada pela Equação 1.

$$V_s = V_{ofs2} - R_1 \times \left(\frac{V_{ofs2} - V_{trafo}}{2 \times R_1} \right) = 0,5(V_{ofs2} + V_{trafo}) \quad (1)$$

Como R_1 não interfere nos cálculos, teoricamente, seu valor é de livre escolha para uso. Porém, buscando minimizar desvios dos sinais vindos da medida do secundário, optou-se por utilizar componentes com resistência elevada frente a R_3 — que será calculado adiante —, assim, sendo escolhidos resistores de 33 k Ω .

A segunda etapa corresponde a um amplificador não inversor de sinal, onde a tensão decorrente da Equação 1 é reajustada através da Equação 2 que, nesse caso, visa apenas corrigir o efeito gerado pelo somador.

$$V_{mca} = \left(1 + \frac{R_2}{R_2}\right) \times V_s = 2 \times V_s \quad (2)$$

R_2 , assim como R_1 , não interfere no cálculo e pode também ser escolhido livremente, desde que com atenção relacionada à dissipação de potência (cálculo similar será feito com R_3). Assim, optou-se por resistores de 2,2 k Ω .

A terceira etapa se relaciona com os terminais do enrolamento para medição de corrente alternada, sendo colocada uma resistência R_3 diminuta em relação a R_1 e R_2 , visando dirimir interferências no restante do conjunto e obter uma escala 1:1 entre a corrente induzida pela medição e a tensão a ser condicionada pela ponteira (situação representada na Equação 6), situação detalhada nas Equações 3 a 7, com índices referenciados na Figura 7 (página 20) e no Quadro 2.

$$(N_p \times I_p) = (N_s \times I_s) \quad (3)$$

$$N_p = 1; I_s = \frac{I_p}{N_s} \quad (4)$$

$$V_{trafo} = R_3 \times I_s = R_3 \times \frac{I_p}{N_s} \quad (5)$$

$$V_{trafo} = I_p \quad (6)$$

$$R_3 = N_s \quad (7)$$

Quadro 2 – Índice das equações para cálculo de R_3

Referência	Condição
N_p	Número de espiras do enrolamento primário
N_s	Número de espiras do enrolamento secundário
I_p	Corrente elétrica no enrolamento primário (corrente medida)
I_s	Corrente elétrica no enrolamento secundário
V_{trafo}	Tensão obtida pela captação da medição de corrente alternada

Fonte: Autoria própria (2021)

Ao contrário de R_1 e R_2 , R_3 não pode ser escolhido de forma randômica pois tem seu valor atrelado diretamente ao número de espiras no enrolamento secundário, e existem outras três situações a se observar:

- a ideia inicial de se medir correntes (I_p) até 5 A, induzindo correntes I_s que, caso se pretenda que sejam da ordem de mA, exigem um número elevado de espiras;
- as dimensões físicas do núcleo utilizado, que deve receber o enrolamento secundário e ter espaço suficiente para a passagem do fio primário, no qual a corrente elétrica está sendo medida, limitando o número de espiras;
- a corrente induzida no enrolamento e o risco de se gerar potências superiores à capacidade nominal de quaisquer dos resistores disponíveis para uso (ver Apêndice A).

Tendo essas situações em vista, principalmente a última, além da relação apresentada na Equação 7, deve ser calculada também uma potência P_{res} sobre R_3 nas medições mínimas e máximas de corrente, resultando nas Equações 8 e 9.

$$P_{res} = R_3 \times (I_s)^2 = R_3 \times \left(\frac{I_p}{N_s}\right)^2 = I_p^2 \times \left(\frac{R_3}{N_s^2}\right) = \left(\frac{I_p^2}{N_s}\right) = \left(\frac{I_p^2}{R_3}\right) \quad (8)$$

$$P_{res} = \left(\frac{5^2}{N_s}\right) = \frac{25}{N_s} = \frac{25}{R_3} \quad (9)$$

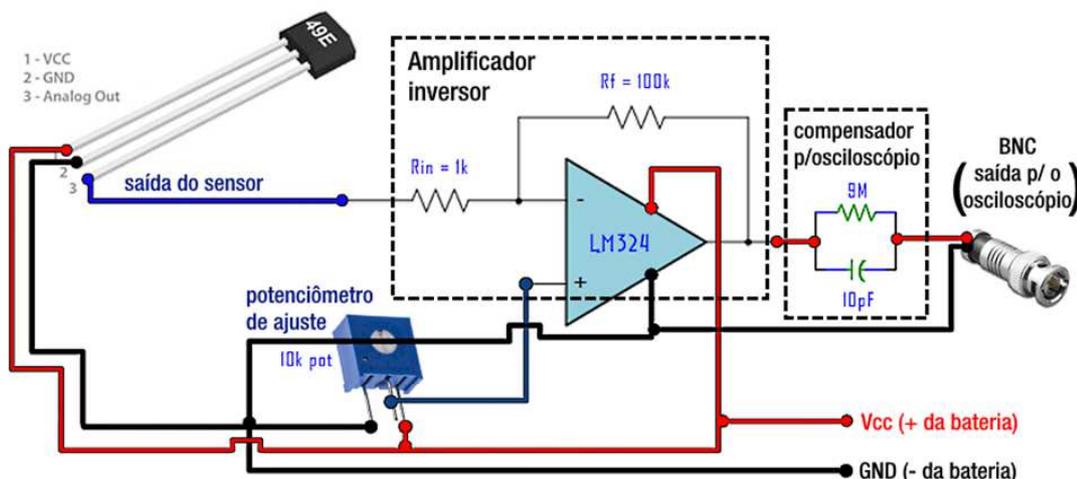
Para atender todas as condições foi escolhido um resistor de 15 Ω . Assim, a potência máxima exigida para R_3 é de aproximadamente 1,7 W; devido à indisponibilidade de resistores dessa faixa de potência, optou-se pelo uso de um resistor de 20 W. Por fim, a partir do dado da Equação 7, tem-se um enrolamento de 15 espiras para o secundário.

3.2 Corrente contínua

Conforme definido no Capítulo 2, um sensor Hall foi utilizado — um 49E, com sensibilidade entre 1,5 e 2 mV/G (SUNROM, 2008), valores utilizados como parâmetro na análise teórica.

No entanto, devido ao baixo campo magnético induzido, mesmo nas mais elevadas correntes previstas para medição, faz-se necessário um ganho de sinal, cujo circuito para essa finalidade está destacado na Figura 17, à direita do 49E.

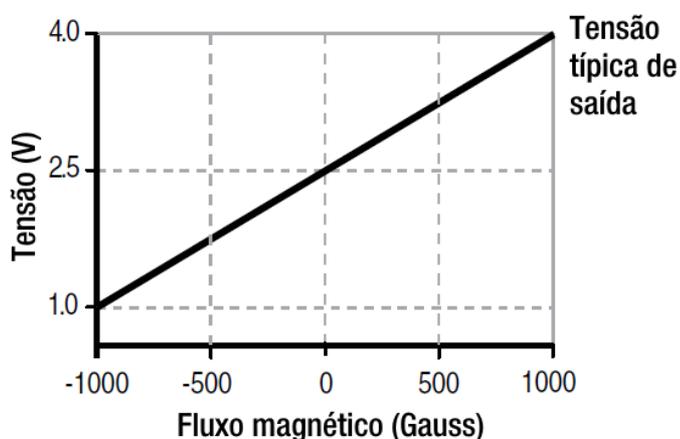
Figura 17 – Proposta original do circuito para medição de corrente contínua



Fonte: Adaptado de Anghel (2017)

Além da elevação na intensidade do sinal, no entanto, uma regulação de tensão de entrada também é exigida, pois o sensor apresenta uma tensão de saída para a condição de fluxo magnético nulo — equivalente à não medição de corrente — que, se posicionada na entrada do amplificador, impede a utilização de um ganho elevado (podendo saturar a saída dos amplificadores que compõem o circuito), resultando na perda de parte da margem de escala da medição. Essa regulação consiste na subtração entre a medida do sensor e sua tensão de referência zero, identificável por testes em bancada ou na folha de dados do 49E, que apresenta o diagrama da Figura 18.

Figura 18 – Curva de resposta do sensor 49E alimentado com 5 V cc



Fonte: Adaptado de Honeywell (2015)

As alterações no circuito da Figura 17, nessa questão, dizem respeito ao modo de injeção da tensão, o uso do subtrator e o ganho utilizado.

O ganho de cem vezes proposto parte do princípio que não é usada uma fração da margem de saída para sinais negativos, pois o cálculo de fluxo previsto no conjunto (ver Apêndice B) retorna uma saída máxima próxima de 90 mV (equivalente à medida de 5 A) e, se o amplificador for considerado ideal, à saída do ganho tem-se uma saída máxima de 9 V, a tensão de alimentação da bateria.

O uso de parte da faixa de saída para medidas com valores negativos demanda a já comentada tensão de referência zero que, estando em um dos terminais de saída da medição, permite a representação de sinais inferiores a 0 V, ainda que o circuito não utilize amplificadores *dual supply*. Com essa tensão sendo idealmente metade da tensão de alimentação, no intuito de igualar as escalas de medição positiva e negativa, tem-se que a máxima inicial de 90 mV do sensor deve agora entregar uma saída máxima de 4,5 V, somando aos 4,5 V da referência zero e atingindo os 9V máximos de alimentação e amplificadores. Há ainda o dado equivalente à medida de -5 A (-90 mV): deve ser aplicado um ganho suficiente para anular a tensão V_{ofs2} . O ganho passa a ser, então, pelo menos metade do proposto. A Tabela 1 reúne valores possíveis de saída do sensor com a tensão de fluxo nulo e as tensões centrais do sistema.

No entanto, o uso dos amplificadores reduz a tensão máxima real na saída (no caso do LM324, para aproximadamente 90% da tensão de alimentação); com isso, tem-se mais uma razão para recalculer o ganho.

Tabela 1 – Valores teóricos de tensão de saída do sensor Hall

Tensão (V)	Condição
2,41	Saída do sensor para fluxo equivalente à corrente de -5 A
2,455	Saída do sensor para fluxo equivalente à corrente de -2,5 A
2,5	Saída do sensor para fluxo nulo (0 A)
2,545	Saída do sensor para fluxo equivalente à corrente de 2,5 A
2,59	Saída do sensor para fluxo equivalente à corrente de 5 A
4,5	Tensão de referência zero
9	Tensão máxima teórica dos amplificadores (tensão de alimentação)

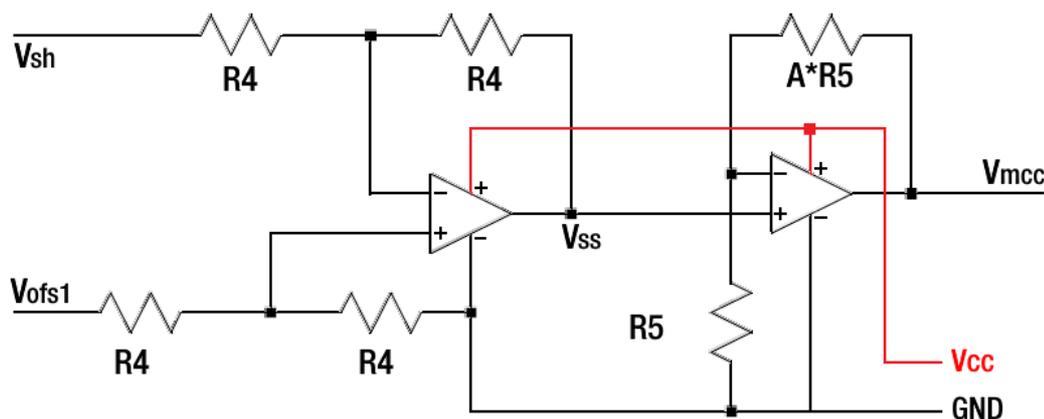
Fonte: Autoria própria (2021)

Vale considerar que os amplificadores ainda apresentam uma tensão mínima de saída para cada estágio, e o uso de um subtrator seguido de um multiplicador induz à geração de um sinal que reduz a faixa de valores possíveis da tensão de saída do medidor e, por consequência, da faixa de medição.

O circuito para a medição de corrente contínua passa a ser, então, estruturado em conformidade com os índices do Quadro 3 e a Figura 19.

A saída da instrumentação de corrente contínua passa a ser, em condições de R_4 e R_5 ideais, representada pelas Equações 10 e 11.

Figura 19 – Circuito adaptado para medição de corrente contínua



Fonte: Autoria própria (2021)

$$V_{ss} = V_{ofs1} - V_{sh} \quad (10)$$

$$V_{mcc} = \left(1 + \frac{A \times R_5}{R_5}\right) \times V_{ss} \quad (11)$$

Quadro 3 – Índice do circuito adaptado para medição de corrente contínua

Referência	Condição
V_{sh}	Tensão de saída do sensor
V_{ofs1}	Tensão de referência zero do sensor
V_{ss}	Tensão de saída do circuito somador
V_{mcc}	Tensão de saída da medição de corrente contínua
V_{cc}	Tensão de alimentação positiva dos amplificadores
GND	Tensão de alimentação negativa dos amplificadores
R_4, R_5	Impedâncias de valor arbitrário
A	Multiplicador para ganho do amplificador

Fonte: Autoria própria (2021)

A escolha de um mesmo valor para todos os resistores (R_4) do circuito subtrator foi proposital, a fim de se obter ganho unitário em V_{ss} e permitir, assim como ocorreu com R_1 e R_2 , a livre escolha dos resistores para a aplicação — 10 k Ω .

Apesar de R_5 também ser aparentemente de livre escolha, o componente de ganho faz com que assim não o seja, pois deve haver combinações possíveis dentre os resistores do Apêndice A. Visando diminuir o número de componentes utilizados e obter um ganho da saída do sensor de aproximadamente 50 vezes, foram escolhidos resistores de 4,7 e 180 k Ω , respectivamente, para R_5 e $A \cdot R_5$.

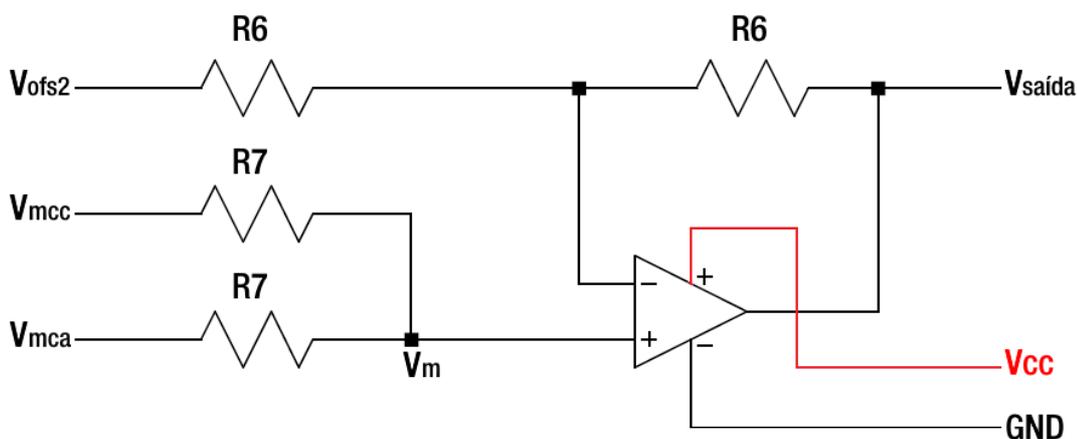
3.3 Soma de sinais e saída da ponteira

Trata-se de um circuito proposto por este trabalho, já que os circuitos anteriormente apresentados operam em regimes de sinal contínuo e alternado separadamente.

Essa soma demanda atenção apenas em uma condição, decorrente do sinal de *offset* utilizado na aferição de corrente alternada. Se, por um lado, não pode ser anulado sob pena de perda de parte do sinal, por outro, deve ser moderado para que, na união com a amostra contínua, não sature a saída do amplificador que faz parte do conjunto somador.

Para isso, então, considerando que a corrente contínua “nula” gera uma tensão positiva como entrada na soma, pode-se ajustar a retirada do *offset* ou, ainda, calibrar a saída equivalente dessa situação de forma a parear com essa tensão, permitindo sua total retirada. Esse segundo modo, adaptado ao somador, segue o arranjo mostrado na Figura 20, seguindo referências do Quadro 4.

Figura 20 – Conjunto somador e subtrator para junção das medições contínua e alternada



Fonte: Autoria própria (2021)

Quadro 4 – Índice do conjunto somador e subtrator

Referência	Condição
V_{ofs2}	Tensão de referência zero
V_{mcc}	Tensão de saída da medição de corrente contínua
V_{mca}	Tensão de saída da medição de corrente alternada
V_m	Tensão no terminal positivo do amplificador
$V_{saída}$	Tensão resultante da soma das medições contínua e alternada
V_{cc}	Positivo da alimentação dos amplificadores
GND	Negativo da alimentação dos amplificadores
R_6, R_7	Impedâncias de valor a calcular

Fonte: Autoria própria (2021)

A saída da ponteira apresenta uma tensão resultante das Equações 12 e 13.

$$V_m = V_{mcc} - R_7 \times \left(\frac{V_{mcc} - V_{mca}}{2 \times R_7} \right) = 0,5(V_{mcc} + V_{mca}) \quad (12)$$

$$V_{saída} = V_m - R_6 \times \left(\frac{V_{ofs2} - V_m}{2 \times R_6} \right) = (2 \times V_m) - V_{ofs2} \quad (13)$$

A liberdade de escolha de resistores surge novamente com R_6 e R_7 , sendo escolhidos para estes, respectivamente, 2,2 e 33 k Ω .

3.4 Compensação de impedância de entrada

O ramo de compensação de impedância, mencionado no tópico 2.2.1 e destacado nas figuras 12, 15 e 17, é calculado através da Equação 14, em que R_{comp} e C_{comp} representam os componentes adicionados para compensação, enquanto R_{osc} e C_{osc} representam a impedância de entrada equivalente do osciloscópio.

$$(R_{comp} \times C_{comp}) = (R_{osc} \times C_{osc}) \quad (14)$$

Selecionando componentes disponíveis na lista do Apêndice A, os valores propostos passam de 9 M Ω para 220 Ω e de 10 pF para 100 nF. A atenuação de sinal contínuo prevista com a utilização desses componentes decorre de um efeito divisor de tensão entre a entrada do osciloscópio e o resistor utilizado na compensação, representado no cálculo da Equação 15.

$$Atenuação(\%) = 100 \times \left(\frac{R_{comp}}{R_{osc}} \right) = 100 \times \left(\frac{220}{10^7} \right) = 0,022\% \quad (15)$$

3.5 Tensão de referência zero

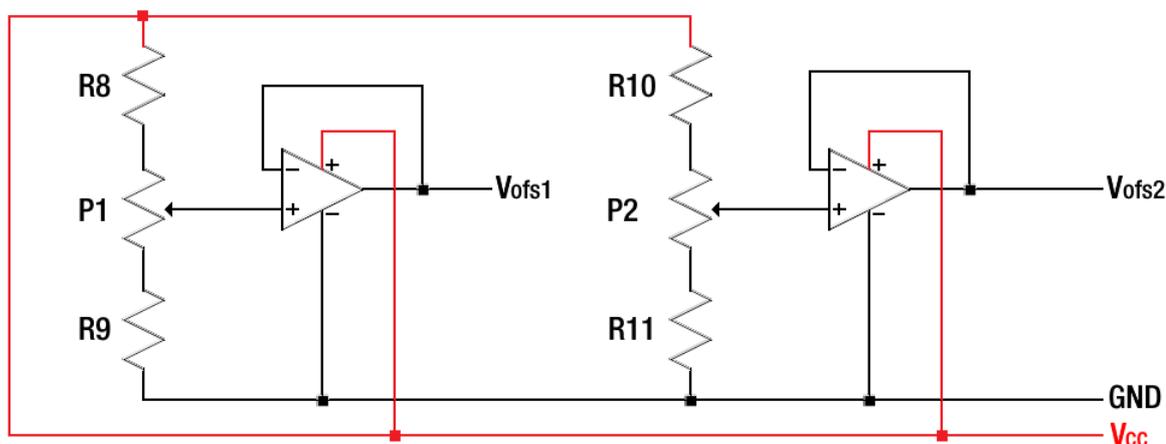
Sendo a ponta de prova um componente de dois terminais e um destes aplicado para a obtenção de uma diferença de potencial, bastaria que sua tensão fosse centrada no intervalo possível de tensões de saída, em vez de se utilizar a tensão de alimentação negativa do circuito. Isso permite deslocar a margem de medição de 0 a 9 V para um intervalo entre -4,5 e 4,5 V, por exemplo, delimitando a medição de corrente para os mesmos valores em ampères, se considerada e obtida a escala 1:1 quando do emulador pronto.

Essa tensão deve ser fixa, e será gerada pelo circuito a ser comentado no item 3.6.

3.6 Tensões de *offset* e calibração

Todos os circuitos listados até aqui, à exceção do abordado no item 3.4, propõem o uso de tensões fixas à parte, atreladas a apenas uma fonte de alimentação e que trazem a necessidade de um circuito cuja finalidade é garantir a disponibilidade dessas tensões. O circuito proposto para a geração das referências segue como apresentado na Figura 21 (e referenciado no Quadro 5).

Figura 21 – Circuito para fornecimento de tensões de referência e calibração



Fonte: Autoria própria (2021)

Quadro 5 – Índice do circuito gerador de tensões de referência

Referência	Condição
V_{ofs1}	Tensão de referência zero do sensor
V_{ofs2}	Tensão de referência zero
V_{cc}	Tensão de alimentação positiva dos amplificadores
GND	Tensão de alimentação negativa dos amplificadores
R_8, R_9, R_{10}, R_{11}	Impedâncias de valor a calcular
P_1, P_2	Potenciômetros de ajuste

Fonte: Autoria própria (2021)

3.6.1 Versão para simulação

Os potenciômetros P_1 e P_2 foram considerados de resistência nula na análise para simulação. Assim, foram calculados valores para resistores fixos que entregassem tensões próximas às previstas em projeto, inicialmente em 2,5 V para V_{ofs1} e 4,5 V para V_{ofs2} , a partir das Equações 16 e 17.

$$V_{ofs1} = R_9 \times \left(\frac{V_{cc}}{R_8 + R_9} \right) = 9 \times \left(\frac{R_9}{R_8 + R_9} \right) \cong 2,5 \quad (16)$$

$$V_{ofs2} = R_{11} \times \left(\frac{V_{cc}}{R_{10} + R_{11}} \right) = 9 \times \left(\frac{R_{11}}{R_{10} + R_{11}} \right) \cong 4,5 \quad (17)$$

Os resistores escolhidos para uso com os cálculos e os componentes do Apêndice A em R_8, R_9, R_{10} e R_{11} são, respectivamente, de 330, 330, 133 e 47 k Ω .

3.6.2 Versão para o circuito físico

Para o projeto do circuito físico são utilizados os potenciômetros P_1 e P_2 , sendo um para cada referência, pois ajustes finos podem ser necessários quando do funcionamento do emulador.

Os valores dos componentes necessários para se obter V_{ofs1} e V_{ofs2} são definidos através de análises de limites mínimos e máximos, nos quais as tensões de projeto estejam dentro das faixas de ajuste, calculáveis pelas Equações 18 a 21.

$$V_{ofs1}(\text{minimo}) = R_9 \times \left(\frac{V_{cc}}{(R_8 + R_9 + P_1)} \right) \quad (18)$$

$$V_{ofs1}(maximo) = (R_9 + P_1) \times \left(\frac{V_{cc}}{(R_8 + R_9 + P_1)} \right) \quad (19)$$

$$V_{ofs2}(minimo) = R_{11} \times \left(\frac{V_{cc}}{(R_{10} + R_{11} + P_2)} \right) \quad (20)$$

$$V_{ofs2}(maximo) = (R_{11} + P_2) \times \left(\frac{V_{cc}}{(R_{10} + R_{11} + P_2)} \right) \quad (21)$$

Os valores de tensão de projeto e de resistores escolhidos são comentados no item 4.2.2.

O circuito completo do emulador da ponta de prova, com integração entre os circuitos, os testes e ajustes realizados serão abordados no Capítulo 4.

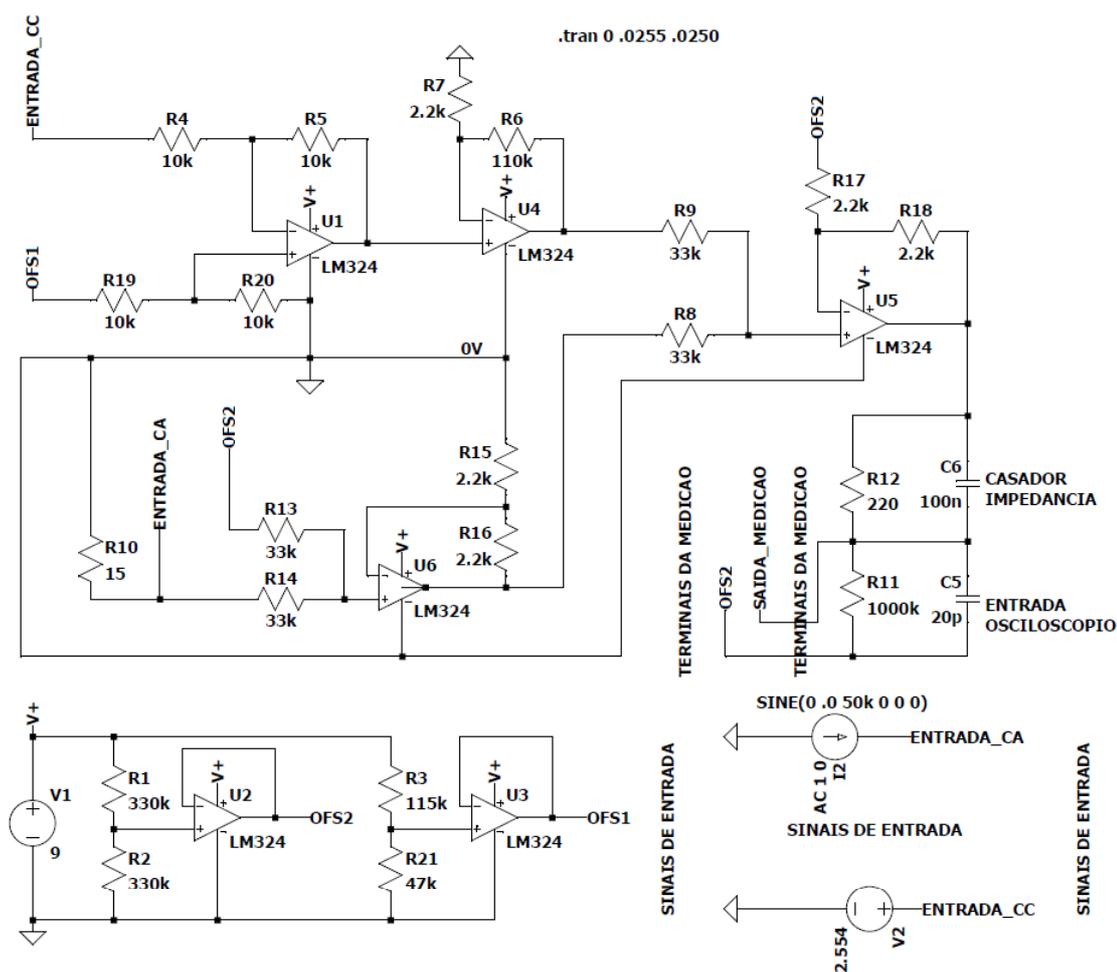
4 RESULTADOS TEÓRICOS, PRÁTICOS E AJUSTES

Este capítulo trata dos resultados obtidos através de simulação do emulador em LTSpice e de testes feitos com o circuito físico, bem como ajustes a fim de aproximar resultados teórico e prático das medições realizadas.

4.1 Simulação

Visando obter uma prévia do que seriam os resultados da ponta de prova construída e analisar eventuais necessidades de correção do circuito, foram simuladas situações de medição de sinal contínuo e alternado. O circuito do emulador, modelado para essa finalidade, é ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Circuito do emulador modelado em LTSpice



Fonte: Autoria própria (2021)

4.1.1 Premissas de simulação

O comportamento previsto, tanto do sensor de fluxo magnético quanto do enrolamento secundário no núcleo do emulador, foi simulado por componentes ativos, sendo os quais:

- Fonte de tensão contínua, ajustada para valores dentro de um intervalo determinado a partir do gráfico da figura 18 e dos cálculos de fluxo do Apêndice B;
- Fonte de corrente alternada, conectada diretamente ao resistor em paralelo, ajustada para valores calculados a partir das correntes que seriam induzidas em conformidade com as Equações 3 a 7.

Para a simulação, além das condições citadas, foram utilizados componentes do programa sem alterações de configuração (tolerância, capacitância entre terminais) e uma diretiva Spice para o amplificador, disponibilizada no Apêndice C.

4.1.2 Resultados de simulação

Foram realizadas as primeiras simulações do circuito, executando exclusivamente medições de corrente contínua. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 2 e no Gráfico 1.

Tabela 2 – Resultados da primeira simulação do emulador no LTSpice

Corrente (A)	Tensão sensor Hall (V)	Saída subtrator (V)		Saída pós ganho (V)	Saída medição (V)	Medição terminais (V)
		Calculado	Real			
-3	2,446	0,166	0,167	7,460	7,442	-2,957
-2	2,464	0,148	0,149	7,416	7,411	-2,913
-1	2,482	0,130	0,131	6,710	6,712	-2,207
0	2,500	0,112	0,115	5,848	5,850	-1,345
1	2,518	0,094	0,098	5,029	5,032	-0,526
2	2,536	0,076	0,084	4,277	4,279	0,226
3	2,554	0,058	0,071	3,609	3,612	0,894

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 1 - Resultados da primeira simulação do emulador no LTSpice



Fonte: Autoria própria (2021)

Foi possível observar uma linearidade da tensão de saída do circuito em relação à tensão de entrada equivalente à corrente medida; no entanto, com ressalvas nos limites inferior e superior das medidas: enquanto no limite inferior as respostas ficaram restritas pela saturação do amplificador (percebida nos resultados da coluna de saída pós ganho), no limite superior o problema se estende a partir do subtrator, onde as tensões real e medida nesse ponto diferiram crescentemente, interferindo nos resultados.

4.1.3 Revisão da estrutura do circuito

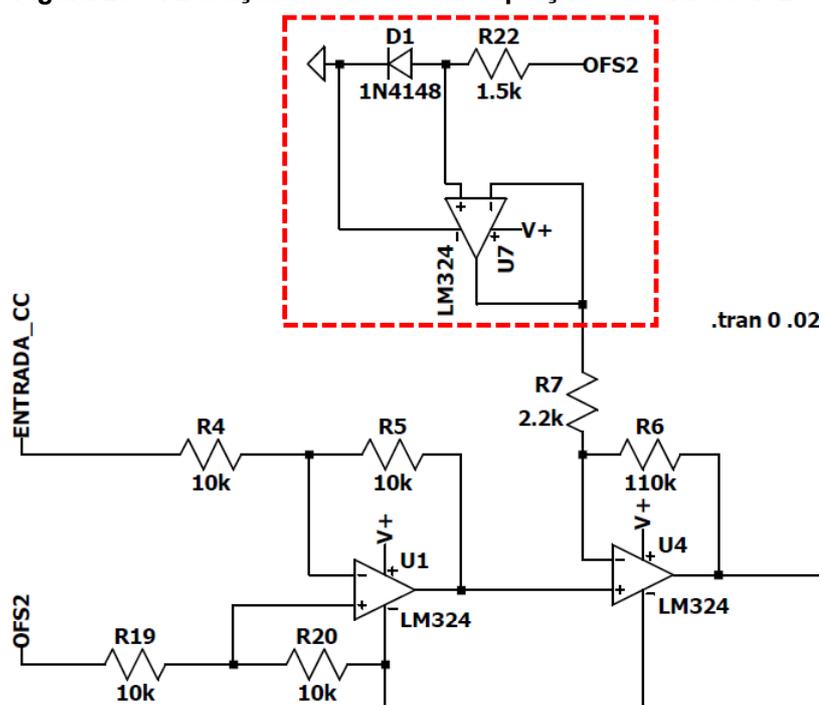
Com as observações relacionadas ao primeiro teste, fez-se necessária uma revisão no circuito de medição de corrente contínua.

Além das condições percebidas anteriormente, em uma análise nó a nó na ponteira utilizando tensão de entrada igual a V_{ofs2} , percebeu-se a diferença de tensões do subtrator estar relacionada com o restante do circuito — principalmente V_{ofs1} , que chega ao amplificador à jusante do subtrator através do caminho de impedâncias R_{13} , R_{16} , R_8 , R_9 , R_6 e R_7 , nesta ordem, conforme a Figura 22.

Portanto, o ponto fundamental desse retrabalho diz respeito à captação da resposta do sensor. Considerando a tensão mínima de saída do amplificador e, ao mesmo tempo, a necessidade de se obter um melhor isolamento da resposta do 49E em relação ao restante do circuito, o amplificador passa a ser também subtrator, no qual a saída do estágio anterior tem retirada de si uma tensão de aproximadamente 600 mV, obtida através da polarização direta de um diodo a partir de um ramo de V_{ofs2} , conforme destacado na Figura 23.

Devido a essa segunda subtração, V_{ofs2} é acrescido dos 600 mV que serão subtraídos com o diodo sendo que, para isso, são alterados os resistores correlatos — R_3 e R_{21} da Figura 22 ou R_8 e $C \cdot R_8$ da Figura 21.

Figura 23 – Alteração no circuito da captação do sinal do 49E



Fonte: Autoria própria (2021)

O resistor R_{22} de 1,5 k Ω da Figura 23 foi escolhido por meio de testes feitos no LTSpice para se conseguir uma corrente que garantisse ao 1N4148 a tensão de polarização que é utilizada no trabalho.

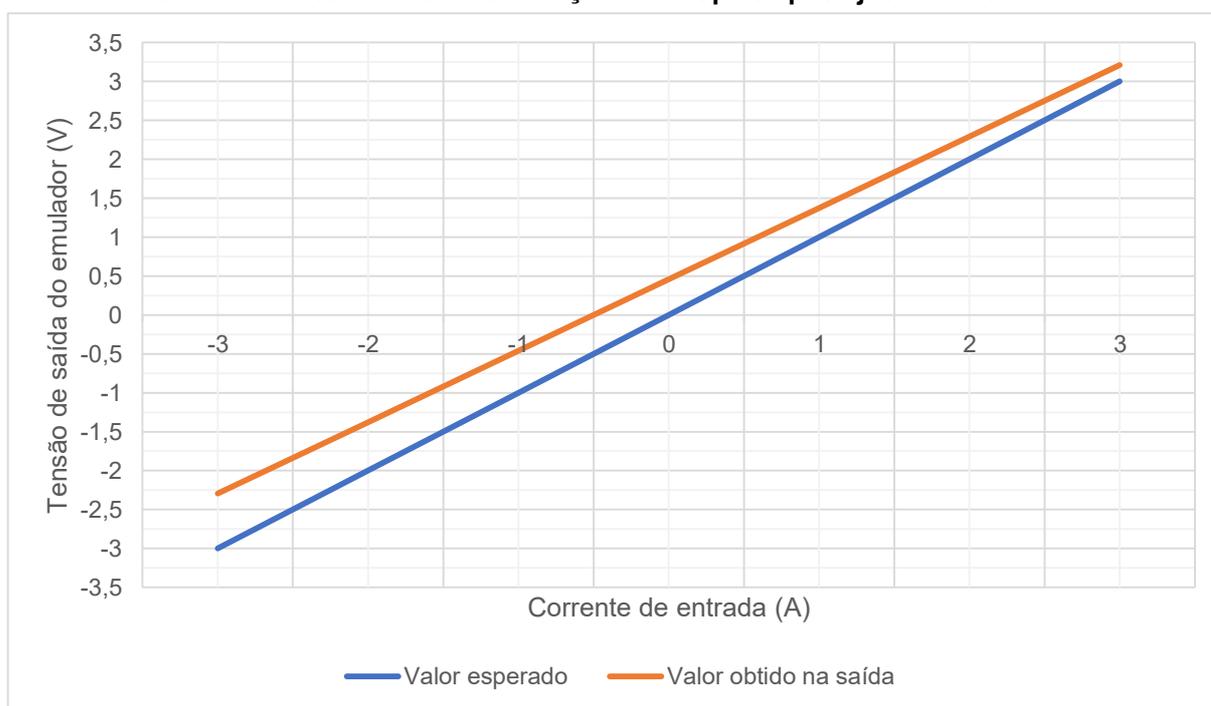
4.1.4 Simulações com o novo arranjo

Foram, então, realizadas simulações com o circuito alterado nas condições citadas anteriormente. Os resultados estão registrados na Tabela 3 e no Gráfico 2.

Tabela 3 – Resultados de simulação no LTSpice após ajustes no circuito

Corrente (A)	Tensão sensor Hall (V)	Saída subtrator (V)		Saída pós ganho (V)	Saída medição (V)	Medição terminais (V)
		Calculado	Real			
-3	2,446	0,713	0,714	6,796	6,798	-2,295
-2	2,464	0,695	0,696	5,878	5,880	-1,377
-1	2,482	0,677	0,678	4,961	4,963	-0,460
0	2,500	0,659	0,660	4,043	4,046	0,457
1	2,518	0,641	0,642	3,126	3,128	1,375
2	2,536	0,623	0,624	2,209	2,211	2,292
3	2,554	0,605	0,606	1,291	1,294	3,209

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 2 - Resultados de simulação no LTSpice após ajustes no circuito

Fonte: Autoria própria (2021)

Com a margem de excursão do sinal ampliada em relação à obtida com o arranjo anterior, sobretudo em relação às medições de correntes elétricas positivas, percebeu-se acertada a decisão de reelaborar a captação do sinal de saída do 49E, restando somente recalibrar os ganhos do amplificador do segundo estágio, a fim de aproximar os valores de corrente medida e de tensão de saída e obter uma escala próxima de 1:1 entre eles.

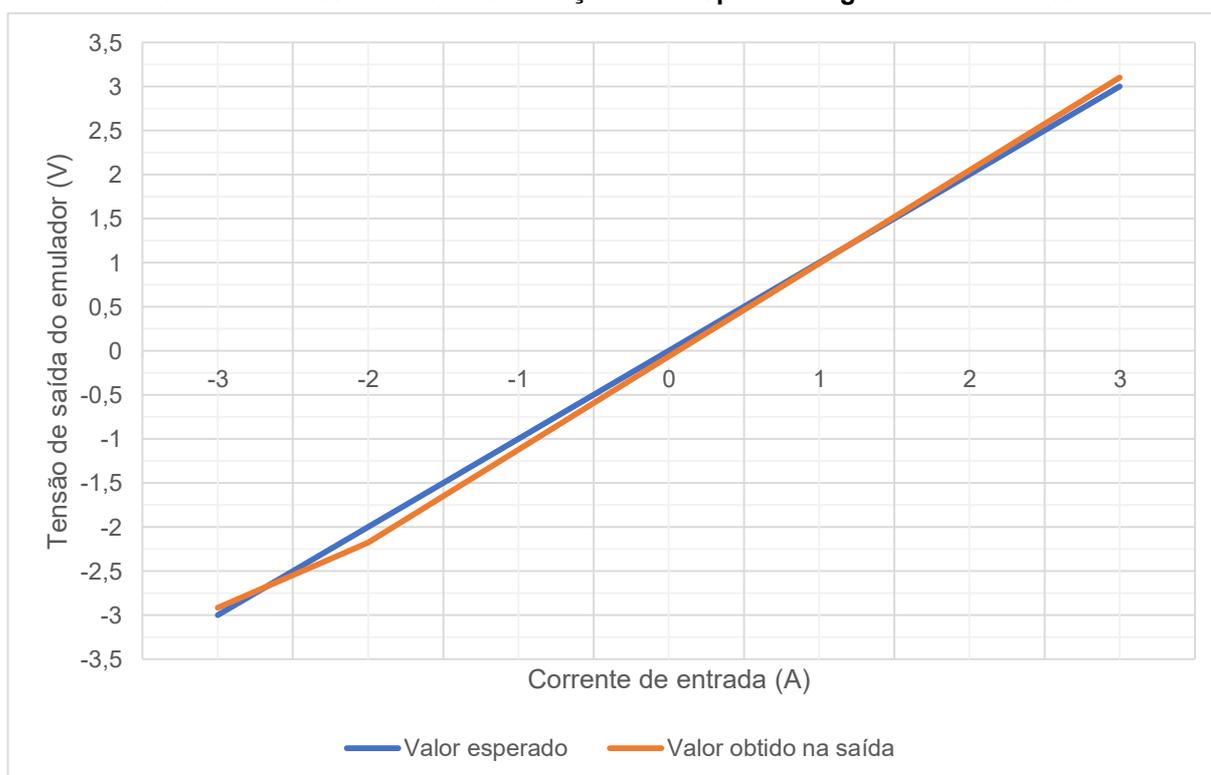
Tendo em vista os resistores disponíveis (ver Apêndice A), foram testados os circuitos com os seguintes ajustes de ganho:

- 51 (1+110/2,2), com resultados apresentados na Tabela 3;
- 59 (1+127/2,2), na Tabela 4 (e Gráfico 3);
- 61,5 (1+133/2,2), na Tabela 5 (e Gráfico 4).

Tabela 4 – Resultados de simulação no LTSpice com ganho de 59 vezes

Corrente (A)	Tensão sensor Hall (V)	Saída subtrator (V)		Saída pós ganho (V)	Saída medição (V)	Medição terminais (V)
		Calculado	Real			
-3	2,446	0,713	0,714	7,425	7,419	-2,916
-2	2,464	0,695	0,696	6,679	6,681	-2,178
-1	2,482	0,677	0,678	5,622	5,624	-1,121
0	2,500	0,659	0,660	4,566	4,568	-0,065
1	2,518	0,641	0,642	3,510	3,512	0,991
2	2,536	0,623	0,624	2,453	2,456	2,047
3	2,554	0,605	0,606	1,397	1,400	3,103

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 3 - Resultados de simulação no LTSpice com ganho de 59 vezes

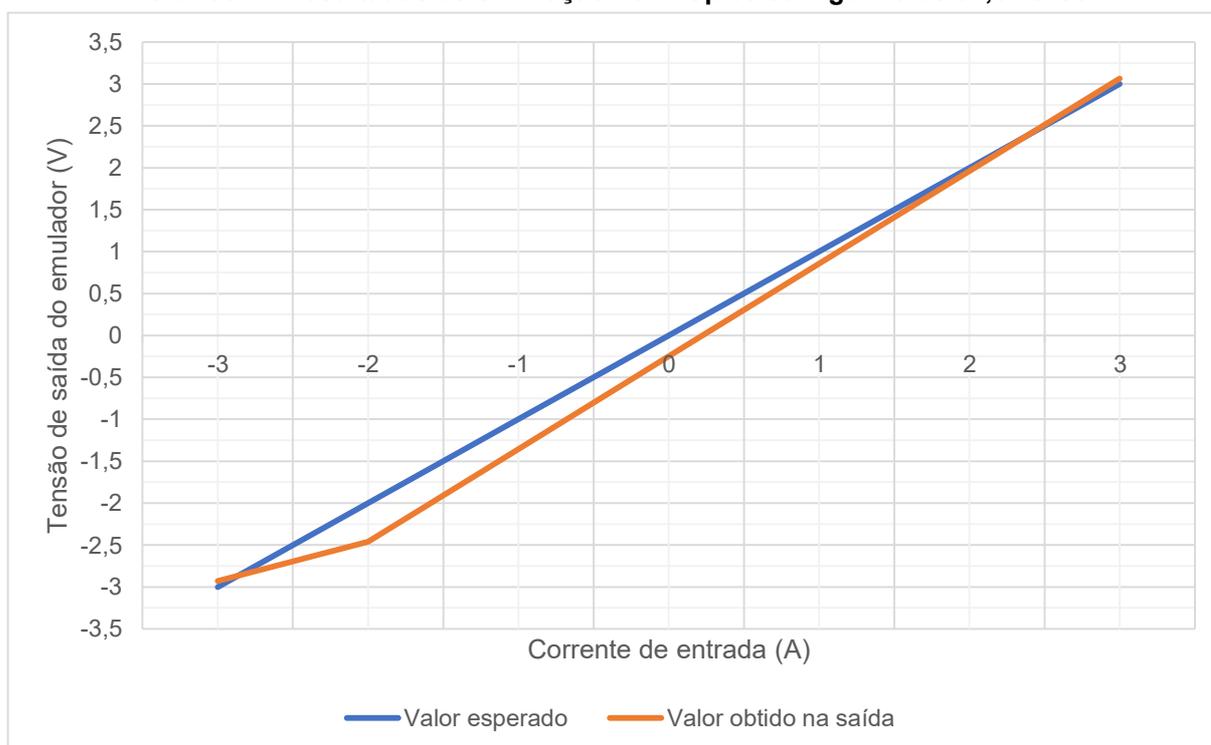
Fonte: Autoria própria (2021)

Buscando reduzir o número de resistores utilizados no circuito, o ganho passou por um reescalamento de aproximadamente 61,5 ($1+133/2,2$) para 55,5 ($1+180/3,3$). Considerando que até aqui não foram consideradas as tolerâncias de fábrica dos resistores utilizados, todos em 5%, e que com isso poderiam haver erros entre corrente de entrada e tensão de saída nas medições práticas, não foram feitas novas simulações em LTSpice, deixando ajustes a realizar conforme os primeiros resultados com a ponta de prova construída.

Tabela 5 – Resultados de simulação no LTSpice com ganho de 61,5 vezes

Corrente (A)	Tensão sensor Hall (V)	Saída subtrator (V)		Saída pós ganho (V)	Saída medição (V)	Medição terminais (V)
		Calculado	Real			
-3	2,446	0,713	0,714	7,442	7,431	-2,928
-2	2,464	0,695	0,696	6,961	6,963	-2,460
-1	2,482	0,677	0,678	5,856	5,858	-1,355
0	2,500	0,659	0,660	4,750	4,753	-0,250
1	2,518	0,641	0,642	3,645	3,647	0,856
2	2,536	0,623	0,624	2,540	2,542	1,961
3	2,554	0,605	0,606	1,434	1,437	3,066

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 4 - Resultados de simulação no LTSpice com ganho de 61,5 vezes

Fonte: Autoria própria (2021)

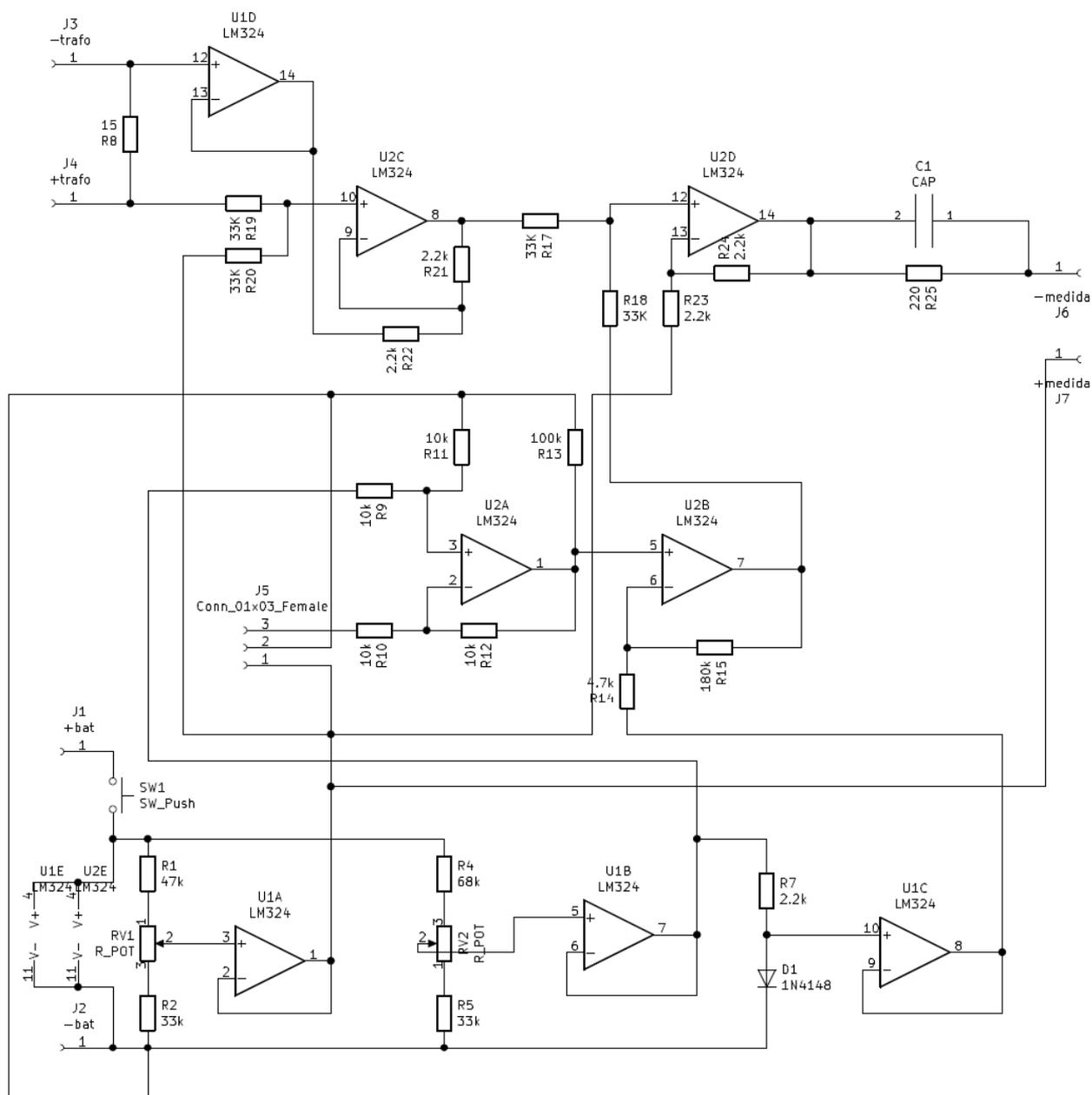
4.2 Circuito real

Tendo o circuito simulado obtido um resultado próximo da escala 1:1 entre corrente medida e tensão de saída, foi então construído fisicamente e colocado à prova para aferir como as condições percebidas no circuito simulado se repetiriam e o que mudaria nos resultados, contanto que agora passariam a incidir as tolerâncias nominais dos resistores e demais componentes utilizados. A montagem do circuito contendo os ajustes feitos no item 4.1.3 e uma combinação de potenciômetros para as tensões V_{ofs1} e V_{ofs2} — comentadas no item 3.6.2 (página 37) — segue o diagrama

da Figura 24, construído no *software* KiCad para a pré-elaboração da placa de circuito impresso implementada para o emulador.

Por erro de montagem, no entanto, em vez de uma resistência de 3,3 k Ω , foi utilizada uma de 4,7 k Ω , fazendo o ganho inicialmente calculado reduzir de aproximadamente 55 ($1+180/3,3$) para cerca de 40 ($1+180/4,7$) vezes, e as primeiras aferições foram realizadas com o circuito contendo essa falha.

Figura 24 – Esquemático utilizado para a construção da placa de circuito impresso no KiCad



Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.1 Premissas da medição

O circuito utilizado para o fornecimento das correntes de teste foi o mesmo especificado na Figura 14, sendo uma resistência de 47Ω e a corrente passando vinte vezes no enrolamento. As correntes testadas serão apresentadas juntamente com os resultados.

4.2.2 Teste sem medida para ajuste das calibrações

Foram feitos testes iniciais, sem medição de corrente, para calibragem das tensões de referência zero (V_{ofs1} e V_{ofs2}) e aferição da necessidade de ajustes antes de se iniciar as sequências de medidas, nos quais puderam ser registrados os limites mínimo e máximo dessas tensões devido ao uso de potenciômetros em seus circuitos, sendo eles:

- de 3,24 a 4,32 V para V_{ofs2} ;
- de 2,64 a 3,52 V para V_{ofs1} .

Para quaisquer valores dessas tensões, a medida de saída do emulador registrada no nó a montante da compensação de impedância permanecia em 7,6 V, dando a entender que a saída da medição estava saturada desde um dos amplificadores. Tendo em vista que a faixa possível de V_{ofs1} permitia ajuste para uma tensão inicialmente projetada de aproximadamente 3,1 V — 2,5 V do fluxo nulo segundo o *datasheet* do 49E e 600 mV do ajuste com diodo do item 4.1.3 —, e que somente então foi percebida a relação entre as tensões de alimentação e saída do sensor Hall (e lembrado que V_{ofs2} o alimenta), foram feitos, então, testes com o 49E fora do emulador, a fim de verificar os níveis de tensão reais e o que poderia ser feito no circuito para a correção dessa saturação.

Foi utilizado um segundo núcleo ferromagnético, similar ao instalado no circuito da ponteira, um arranjo como o da Figura 13 com um banco de resistores equivalendo a uma impedância de 50Ω e vinte espiras no enrolamento do lado a ser medido. Os resultados estão na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do teste do 49E alimentado com 4,5 V

Corrente injetada (A)	Corrente na espira (A)	Tensão sensor (V)
0,00	0,00	2,23
0,02	0,40	2,24
0,04	0,80	2,26
0,06	1,20	2,27
0,08	1,60	2,27
0,10	2,00	2,28
0,12	2,40	2,29
0,14	2,80	2,30
0,16	3,20	2,31

Fonte: Autoria própria (2021)

Com uma tensão de fluxo nulo inferior à esperada e em torno de 50% da utilizada na alimentação do sensor, como na folha de dados, essa seria ainda menor quando utilizada na ponta de prova, onde o sensor é alimentado com aproximadamente 4 V. Com isso e a faixa possível de valores de V_{ofs1} , optou-se por substituir um dos resistores do ramo correspondente (R_4 da Figura 23, de 68 para 100 k Ω), permitindo agora um intervalo de tensões entre 2,08 e 2,71 V.

Feita a substituição, o circuito foi ligado e teve as tensões de referência zero calibradas e registradas, para só então executar novas medidas.

4.2.3 Medições de corrente contínua (com a resistência alterada)

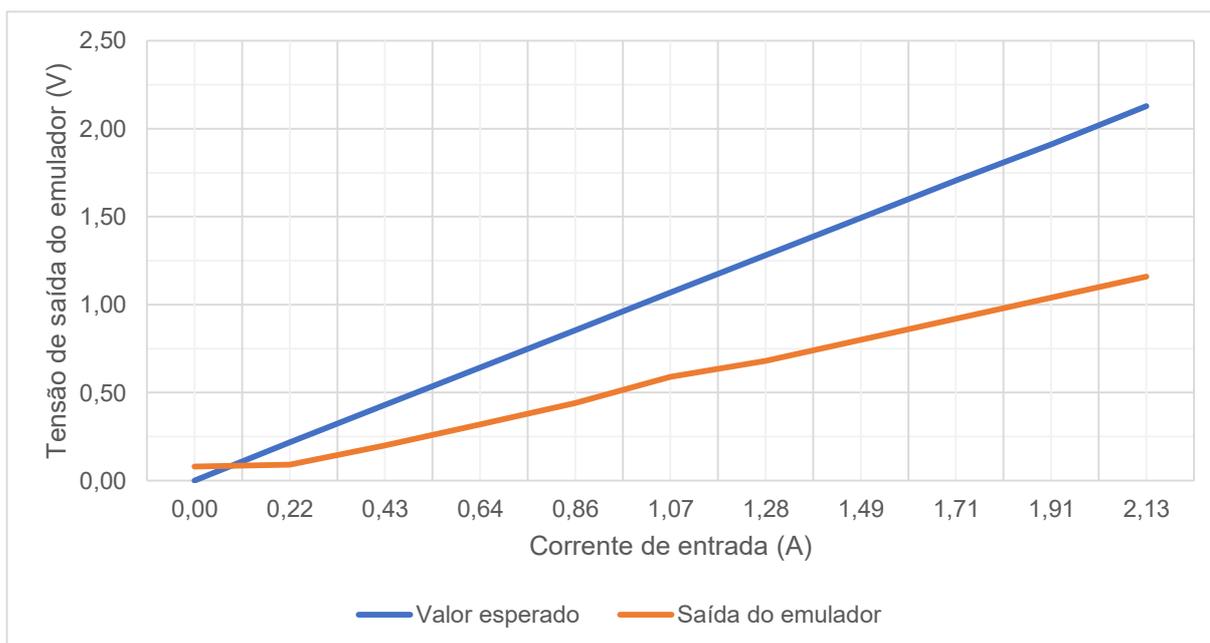
Em seguida, foram extraídos resultados de saída para cada corrente medida, os quais documentados na Tabela 7, ilustrados no Gráfico 5.

Tabela 7 – Resultados do teste do emulador com resistência alterada

Corrente de entrada		Tensão de saída (V)	ERRO (%)	Excursão de sinal	
Injetada (A)	Na espira (A)			I espira	V saída
0,00	0,00	0,08	3759900,00	2,13	1,08
0,01	0,22	0,09	-58,53		
0,02	0,43	0,20	-53,47		
0,03	0,64	0,32	-50,20		
0,04	0,86	0,44	-48,56		
0,05	1,07	0,59	-44,76		
0,06	1,28	0,68	-46,91		
0,07	1,49	0,80	-46,44		
0,09	1,71	0,92	-46,08		
0,10	1,91	1,04	-45,57		
0,11	2,13	1,16	-45,48		

Dados da medição — V_{ofs2} : 4,02 V; Tensão do 49E sem fluxo: 2,08 V.

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 5 - Resultados do teste do emulador com resistência alterada

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.4 Recalibrações e ajustes

A partir da análise do circuito da ponteira e da Tabela 7, puderam ser percebidos erros desde a saída do 49E. Os resultados obtidos mostraram a necessidade de recálculo do ganho do sistema devido, sobretudo, à resistência alterada (ver página 46).

Até o momento do recálculo do ganho, o engano comentado no início do item 4.2 ainda não havia sido percebido, o que fez com que o resistor de 4,7 k Ω permanecesse no circuito e, em vez deste, fosse substituído o de 180 k Ω , por um componente de outro valor obtido através das Equações 22 a 24.

$$reajuste = \left(\frac{I_{espira}}{V_{saída}} \right) = \left(\frac{2,13}{1,08} \right) = 1,97 \quad (22)$$

$$reajuste \times \left(1 + \frac{180(k\Omega)}{4,7(k\Omega)} \right) = \left(1 + \frac{R_{novo}(k\Omega)}{4,7(k\Omega)} \right) \quad (23)$$

$$R_{novo} = 76,4 \times 4,7 = 359,1(k\Omega) \quad (24)$$

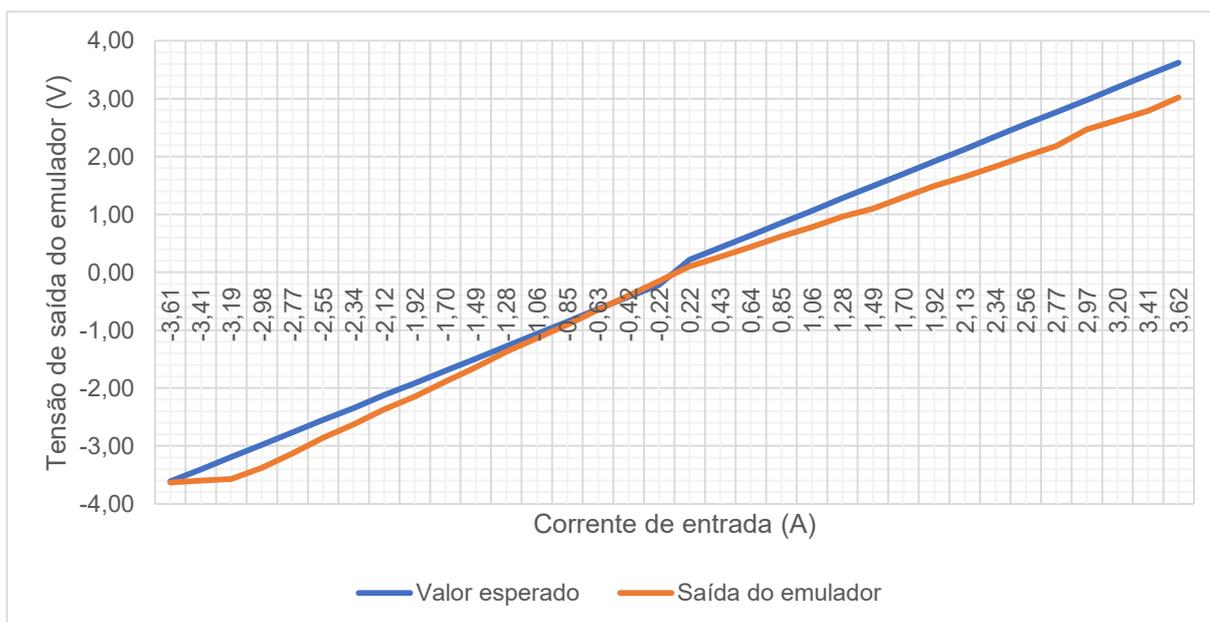
Com R_{novo} e a tabela de componentes do Apêndice A, a resistência foi elevada de 180 para 330 k Ω . Após isso, novas medidas foram feitas, com resultados apresentados na Tabela 8 e no Gráfico 6.

Tabela 8 – Resultados do teste do emulador com resistor de 330kΩ

Corrente de entrada		Tensão de saída (V)	ERRO (%)	Excursão de sinal	
Injetada (A)	Na espira (A)			I espira	V saída
-0,18	-3,61	-3,63	0,48	-3,40	-3,48
-0,17	-3,41	-3,60	5,62		
-0,16	-3,19	-3,57	11,86		
-0,15	-2,98	-3,38	13,31		
-0,14	-2,77	-3,13	13,16		
-0,13	-2,55	-2,86	12,02		
-0,12	-2,34	-2,63	12,17		
-0,11	-2,12	-2,37	11,84		
-0,10	-1,92	-2,15	12,03		
-0,09	-1,70	-1,89	11,04		
-0,07	-1,49	-1,64	9,80		
-0,06	-1,28	-1,37	7,32		
-0,05	-1,06	-1,14	7,59		
-0,04	-0,85	-0,90	5,75		
-0,03	-0,63	-0,65	2,52		
-0,02	-0,42	-0,40	-5,05		
-0,01	-0,22	-0,15	-30,88		
0,01	0,22	0,10	-53,92	3,40	2,92
0,02	0,43	0,27	-36,55		
0,03	0,64	0,44	-31,07		
0,04	0,85	0,62	-27,15		
0,05	1,06	0,78	-26,39		
0,06	1,28	0,96	-25,05		
0,07	1,49	1,10	-26,14		
0,09	1,70	1,30	-23,63		
0,10	1,92	1,49	-22,36		
0,11	2,13	1,65	-22,45		
0,12	2,34	1,83	-21,95		
0,13	2,56	2,01	-21,54		
0,14	2,77	2,18	-21,18		
0,15	2,97	2,47	-16,96		
0,16	3,20	2,63	-17,70		
0,17	3,41	2,79	-18,15		
0,18	3,62	3,02	-16,60		

Dados da medição — Vofs2: 4,02 V; Tensão do 49E sem fluxo: 2,04 V.

Fonte: Autoria própria (2021)

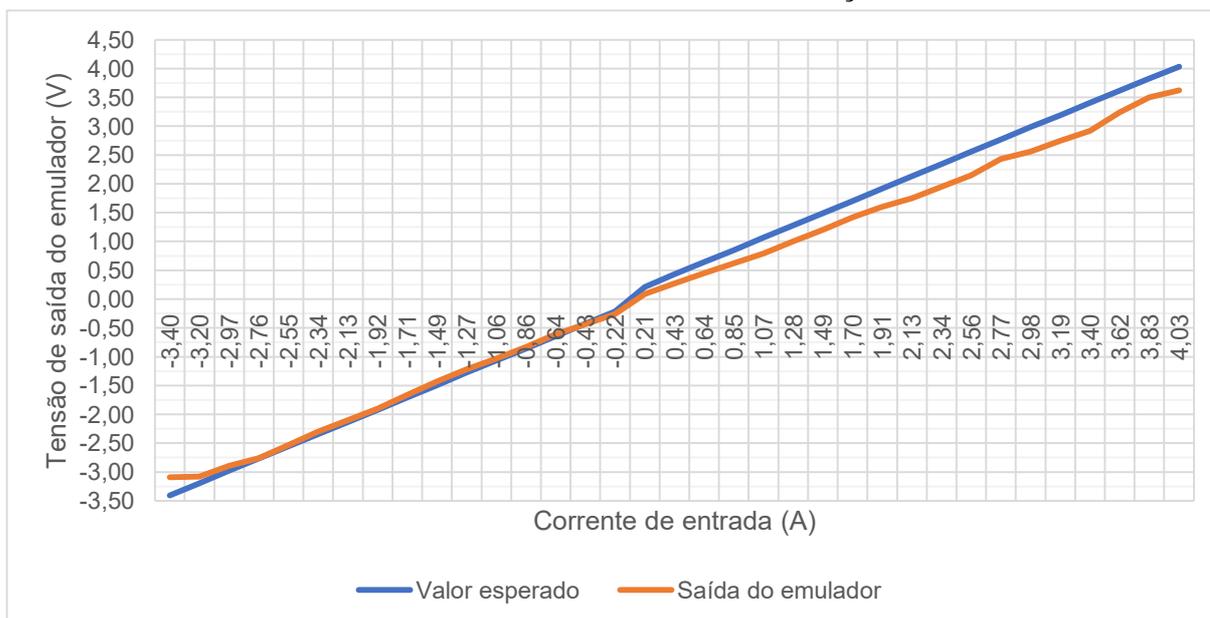
Gráfico 6 - Resultados do teste do emulador com resistor de 330k Ω 

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.5 Medições de corrente contínua com nova tensão de referência zero

Ao comparar as excursões positiva e negativa das tensões de saída da ponta de prova, percebeu-se uma desigualdade que poderia ser corrigida alterando a referência zero. Assim sendo, foi feito um teste com essa tensão reduzida em aproximadamente 200 mV, com resultados mostrados no Gráfico 7 e na Tabela 9.

Gráfico 7 - Resultados do teste do emulador com mudança na referência zero



Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 9 – Resultados do teste com mudança na referência zero

Corrente de entrada		Tensão de saída (V)	ERRO (%)	Excursão de sinal	
Injetada (A)	Na espira (A)			I espira	V saída
-0,17	-3,40	-3,09	-9,23	-3,19	-2,83
-0,16	-3,20	-3,08	-3,62		
-0,15	-2,97	-2,89	-2,84		
-0,14	-2,76	-2,76	-0,06		
-0,13	-2,55	-2,53	-0,91		
-0,12	-2,34	-2,30	-1,91		
-0,11	-2,13	-2,10	-1,50		
-0,10	-1,92	-1,90	-1,22		
-0,09	-1,71	-1,66	-2,72		
-0,07	-1,49	-1,43	-4,26		
-0,06	-1,27	-1,22	-4,11		
-0,05	-1,06	-1,03	-3,18		
-0,04	-0,86	-0,83	-3,44		
-0,03	-0,64	-0,61	-5,07		
-0,02	-0,43	-0,44	3,40		
-0,01	-0,22	-0,26	19,80		
0,01	0,21	0,09	-57,70	3,82	3,53
0,02	0,43	0,27	-37,18		
0,03	0,64	0,45	-29,97		
0,04	0,85	0,62	-26,78		
0,05	1,07	0,79	-26,04		
0,06	1,28	1,00	-21,93		
0,07	1,49	1,20	-19,43		
0,08	1,70	1,42	-16,37		
0,10	1,91	1,60	-16,44		
0,11	2,13	1,75	-17,91		
0,12	2,34	1,95	-16,68		
0,13	2,56	2,15	-16,07		
0,14	2,77	2,43	-12,28		
0,15	2,98	2,56	-14,18		
0,16	3,19	2,75	-13,83		
0,17	3,40	2,92	-14,23		
0,18	3,62	3,24	-10,42		
0,19	3,83	3,50	-8,61		
0,20	4,03	3,62	-10,26		

Dado da medição — V_{ofs2}: 3,83 V; Tensão do 49E sem fluxo: 1,83 V.

Fonte: Autoria própria (2021)

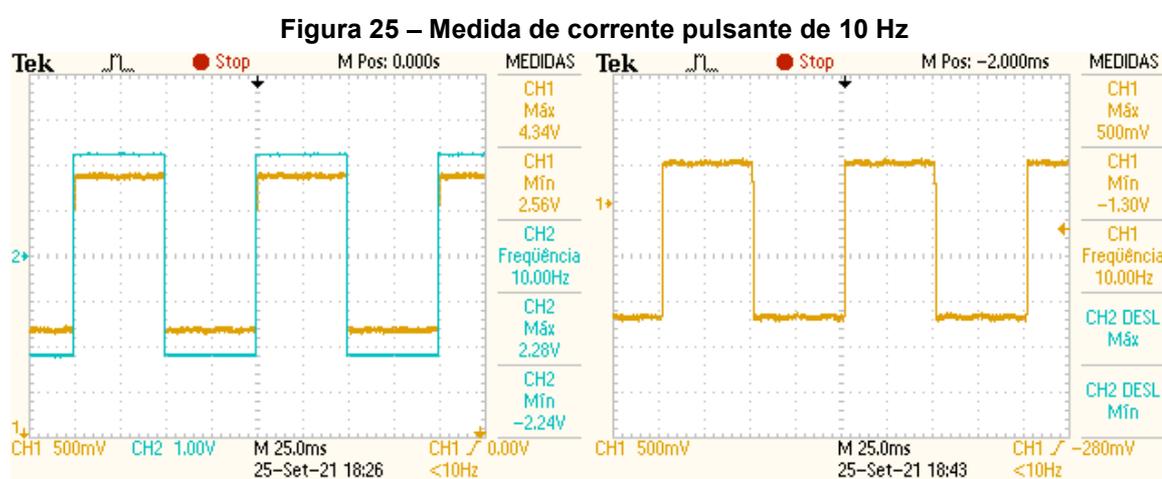
O ajuste em V_{ofs2}, contudo, não foi suficiente para balancear as medidas positiva e negativa, por motivos que serão abordados no Capítulo 5.

4.2.6 Medições de corrente alternada

A partir dos resultados obtidos com os testes de medição de corrente contínua, o circuito teve sua configuração conservada e foram feitos testes para medições de corrente alternada.

Buscando observar o comportamento do emulador em relação às frequências de sinal e utilizando o mesmo princípio proposto na Figura 14 e no item 4.2.1, um mesmo sinal simulando uma corrente em pulsos quadrados variando de aproximadamente +1 A para -1 A foi injetado em frequências entre 10 e 50000 Hz. As saídas, registradas com um osciloscópio Tektronix TDS2000, são apresentadas nas Figuras 25 a 29.

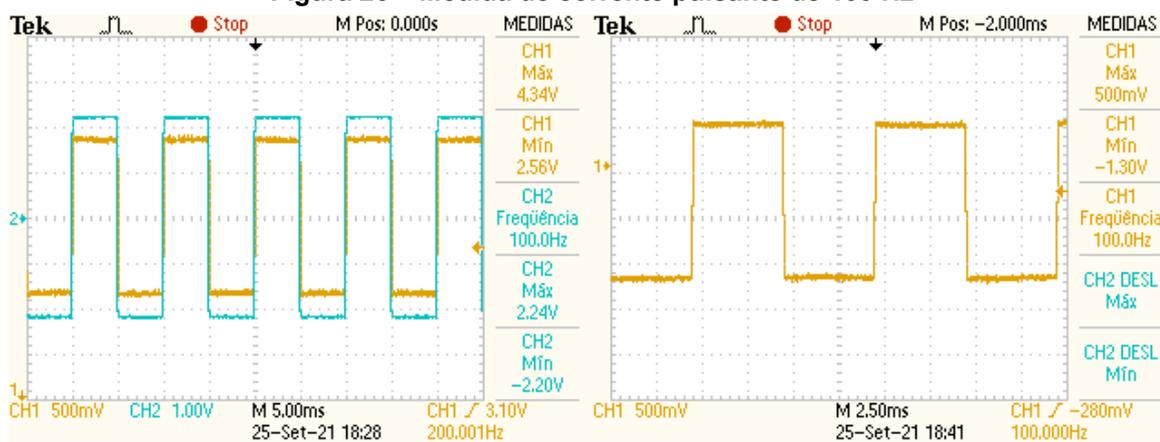
Os resultados à direita apresentam a medição entre os terminais de saída do emulador. À esquerda, em azul, a tensão utilizada para injetar a corrente a ser medida; em laranja, a variação da saída no terminal não-neutro em relação à alimentação negativa do circuito.



Fonte: Autoria própria (2021)

As medidas em frequências baixas de sinal alternado apresentam um desvio similar ao ocorrido nas obtidas com corrente contínua, em que a regulação somente de V_{ofs2} seria suficiente para corrigir os resultados — o que não foi possível devido à ligação dessa tensão com a alimentação do sensor Hall.

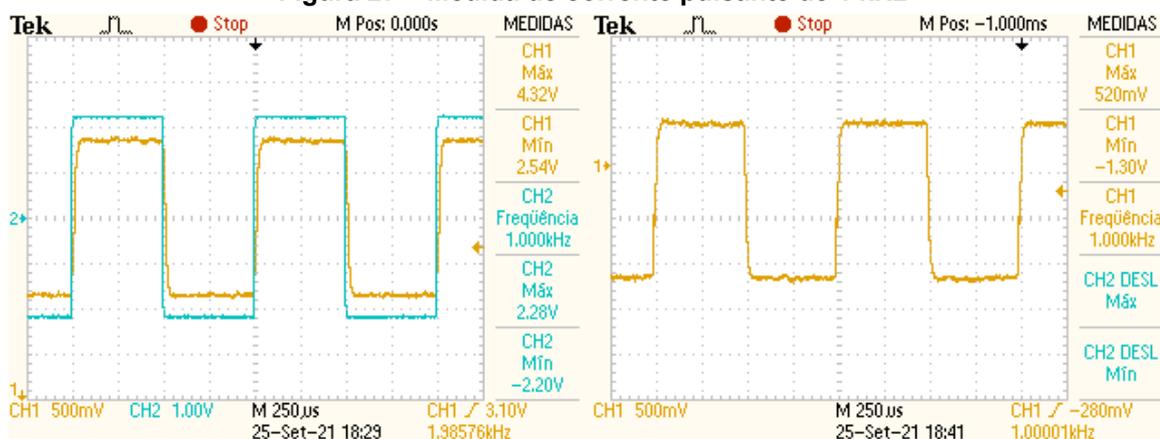
Figura 26 – Medida de corrente pulsante de 100 Hz



Fonte: Autoria própria (2021)

A excursão de sinal aparentemente ocorre dentro do previsto, quando observado que o sinal em azul gera correntes entre -0,95 e 0,97 A na bobina do lado medido (uma margem de 1,92 A, portanto), enquanto as tensões medidas nos terminais do emulador têm uma margem de cerca de 1,8 V.

Figura 27 – Medida de corrente pulsante de 1 kHz



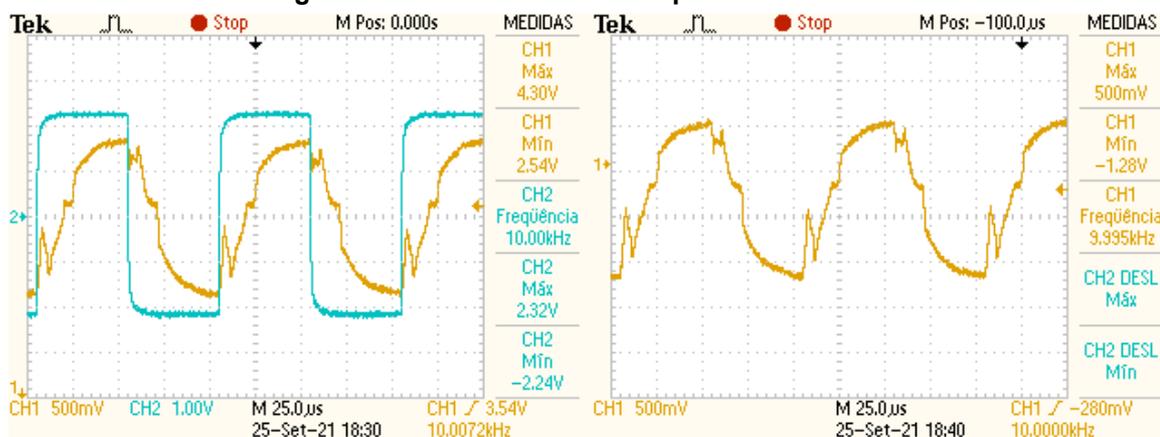
Fonte: Autoria própria (2021)

A medida a 1 kHz apresenta uma situação que remete ao exemplo simulado na Figura 10 (página 25), dando indícios que o conjunto resisto-capacitivo de compensação do item 3.4 precisaria ser ajustado para manter a tensão de saída da ponteira nas mesmas características que a corrente originalmente em medição. No entanto, como esse ajuste não estava previsto no projeto do circuito, os componentes utilizados eram de valor fixo, e as medidas se seguiram nessa condição.

Além disso, não foi averiguada a compensação dos cabos utilizados entre os terminais do emulador e a entrada do osciloscópio, sendo percebida somente quando da revisão dos resultados obtidos ao observar os gráficos azuis das figuras, referentes

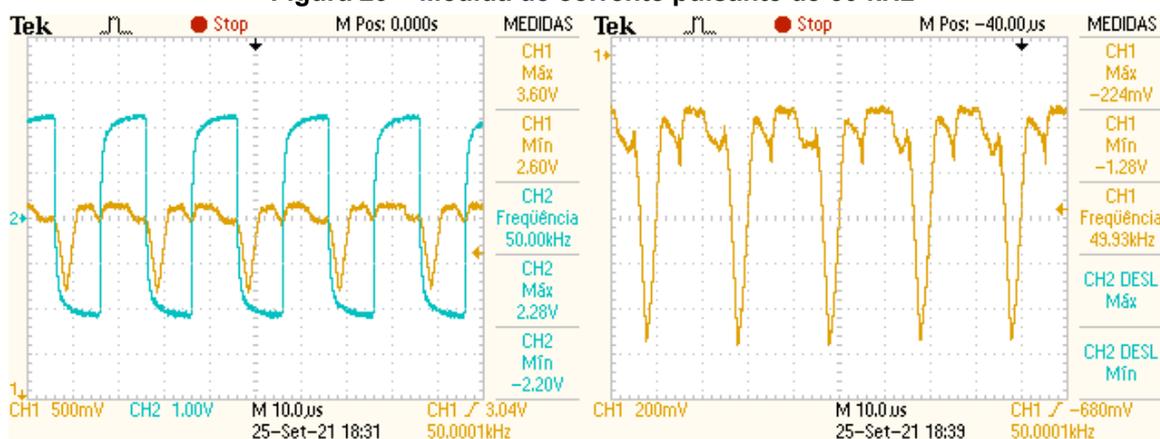
à medição da tensão no resistor de $47\ \Omega$ utilizado para gerar as correntes de teste. A descompensação é aparente nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 – Medida de corrente pulsante de 10 kHz



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 29 – Medida de corrente pulsante de 50 kHz



Fonte: Autoria própria (2021)

4.3 Registro dos limites de operação do emulador

Conforme os resultados apresentados no item 4.2, é possível afirmar que o emulador permite medições de corrente contínua em um intervalo de valores entre -3 e 3 A, com alguma margem para mais nas correntes negativas ou positivas, considerando as tensões de saída nos terminais do emulador e a excursão de sinal entre a não- medição de corrente e as medições máxima e mínima, restritas tanto pela saturação quanto pela propagação das tensões mínimas (de *offset*) de entrada dos amplificadores utilizados no circuito.

Não é possível, no entanto, determinar um limite de frequência de sinal a ser medido pelo emulador. Ainda que as medições feitas até 1 kHz apresentem resultados satisfatórios, existe a possibilidade de as correntes de teste terem sofrido distorções a serem comentadas no item 5.3 do trabalho. Não tendo sido utilizado outro circuito ou equipamento para a geração de correntes em frequências superiores, não foi possível avaliar até que ponto os problemas ocorreram pela corrente de referência ou pelo funcionamento da ponteira.

5 CONCLUSÃO

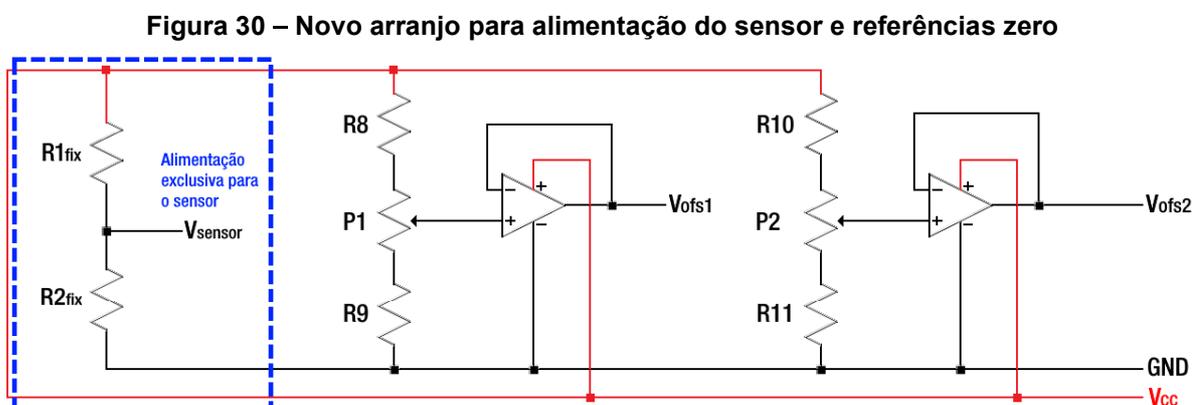
Este capítulo levanta apontamentos que podem vir a ser utilizados com a finalidade de melhorar as respostas do emulador ou como justificativas para os problemas de funcionamento, sobretudo nas medições de corrente alternada. Apontamentos que, devido a questões de tempo e escopo do trabalho, não foram aprofundados.

5.1 Tensão de referência zero x sensor Hall

Uma alternativa para essa questão seria tornar a alimentação do 49E independente de V_{ofs2} pois, como observado entre os resultados (sobretudo nas Tabelas 8 e 9), por ter sido aplicada também com essa função, interferiu diretamente nos resultados de medição.

A calibração dessa tensão tornava necessária uma segunda calibração, em V_{ofs1} , ao mesmo tempo em que não era eficiente em igualar as margens de escala positiva e negativa dentro da faixa possível de tensões de saída da ponteira.

Considerando a corrente nominal consumida em seu funcionamento — entre 4,2 e 8 mA, segundo a folha de dados —, um divisor resistivo da ordem de $k\Omega$ poderia ser adicionado aos terminais de alimentação, sendo dimensionado para entregar uma tensão fixa ao sensor e, a partir do comportamento do 49E nessa condição, fazer, nesta ordem, a calibração das referências zero do sensor e do circuito. A configuração se daria como na Figura 30.



Fonte: Autoria própria (2021)

5.2 Núcleo ferromagnético

Outra questão falha passível de análise diz respeito ao enrolamento colocado no núcleo para atuar como um transformador de corrente nas medições de sinal alternado, em relação às suas conexões no circuito que, conforme analisadas no item 4.1.3, interferiram no projeto do circuito de captação da corrente contínua.

Com um terminal do enrolamento conectado em V_{ofs2} e apenas um terminal recebendo as tensões induzidas, o resistor de 15Ω estaria em curto-circuito durante os testes com corrente contínua, condição esperada nessas medições, as quais o 49E atenderia. No entanto, ao não terem sido mensuradas as indutâncias em frequência do enrolamento, também não foram estimadas as impedâncias resultantes do conjunto com o resistor e, portanto, não se sabe a partir de que frequências a saída alternada passaria a depender mais do enrolamento que do sensor Hall.

Uma hipótese a se descartar também envolve as respostas em frequência. O efeito pelicular, no qual uma corrente elétrica, dependendo da sua frequência, deixaria de transitar por toda a área do condutor (BARBI, ILLA FONT e ALVES, 2002) e diminuiria os limites máximos nas aferições de sinal alternado, acaba não sendo percebido por conta das ligações comentadas anteriormente, mas também por não ter sido observado no enrolamento de teste, sendo que ambos foram feitos com cabos de transmissão de dados em que inúmeros fios de cobre, com reduzido diâmetro, compunham a área de condução de corrente.

5.3 Geração das correntes de teste

Outra condição que pode ser considerada com relação às inconsistências nas medições de sinal alternado tem relação direta com os componentes utilizados para a geração das correntes de teste.

Apesar de terem sido utilizados somente um resistor de 20 W e o fio do enrolamento secundário, esses componentes apresentaram características de indutância e capacitância não aferidas antes da execução dos testes físicos. Essas características, obtidas com um medidor de indutância e capacitância (LCR) após todos os testes do trabalho, estão documentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Medidas dos componentes utilizados para gerar correntes de teste

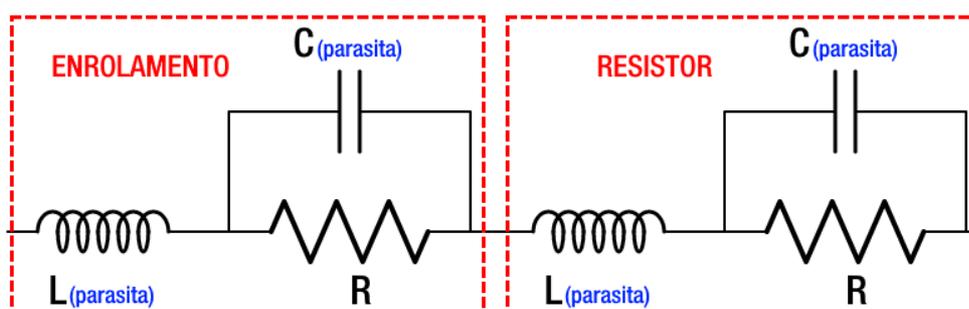
Componente	Medida	120 Hz	1 kHz
Resistor	Resistência	46,49 Ω	46.51 Ω
	Indutância	14 μH	6,1 μH
	Capacitância	101.2 nF	32,91 nF
Enrolamento	Resistência	0,283 Ω	0,403 Ω
	Indutância	48 μH	27,1 μH
	Capacitância	692,6 μF	220 μF

Fonte: Autoria própria (2021)

Essas não-idealidades decorrem das características construtivas dos componentes:

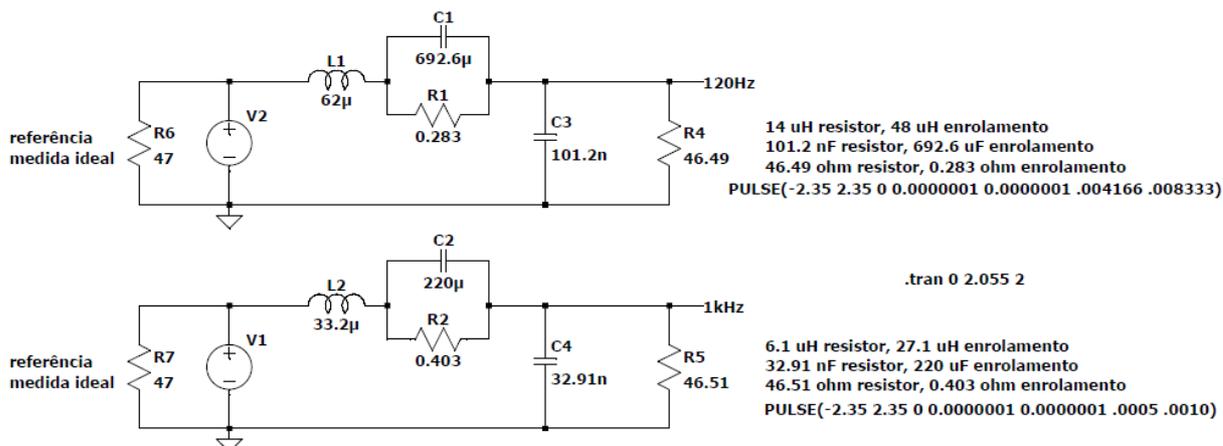
- o resistor utilizado, também de 20 W e similar ao resistor de 15 Ω do emulador, é composto de cerâmica e de um enrolamento interno (MATTEDE, 201-), resultando em capacitância e indutância adicionais ao componente (MCALLISTER, 201-);
- o enrolamento tem uma resistência intrínseca do material condutor, ainda que o cabo utilizado seja formado por inúmeros fios em paralelo, e foi construído em torno de um núcleo de zinco e manganês, com permeabilidade magnética superior à do ar (ver Anexo B) e possibilitando a circulação de campos magnéticos mais elevados, resultando também em uma indutância característica.

Visando identificar diferenças entre resultados esperados e obtidos, foi feita uma simulação em LTSpice com os valores dos componentes nas duas frequências medidas com o LCR, tendo o resistor e o enrolamento sido simulados na Figura 32, seguindo o diagrama da Figura 31.

Figura 31 – Representação de resistor e enrolamento com componentes parasitas

Fonte: Adaptado de McAllister (201-)

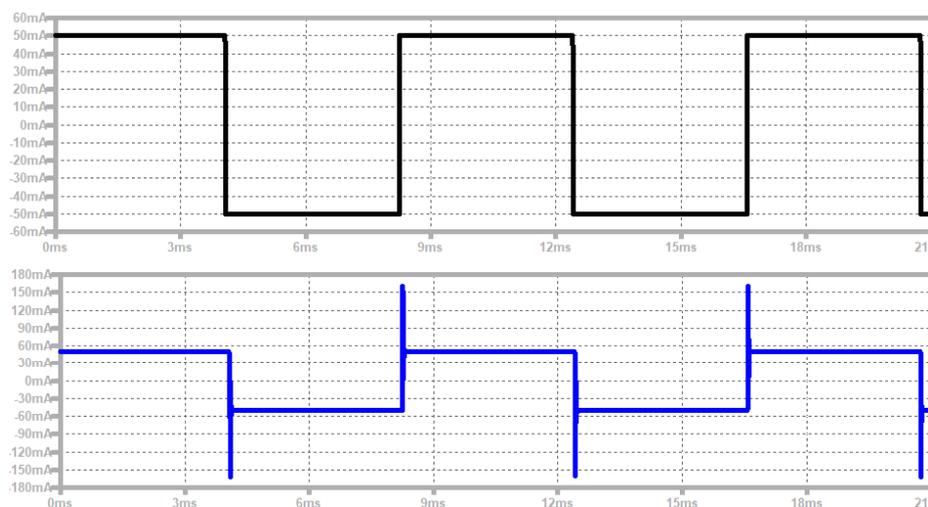
Figura 32 – Circuito em LTSpice para verificação dos efeitos dos componentes parasitas



Fonte: Autoria própria (2021)

As simulações foram feitas com sinais quadrados similares aos usados nos testes de corrente alternada ($\pm 2,35$ V, que resultariam nas correntes de ± 1 A nas medições com o emulador), porém, nas frequências de 120 e 1200 Hz, tendo sido verificadas nas Figuras 33 e 34 as correntes esperadas (em preto) e efetivas (em azul) de acordo com a representação dos componentes na frequência equivalente.

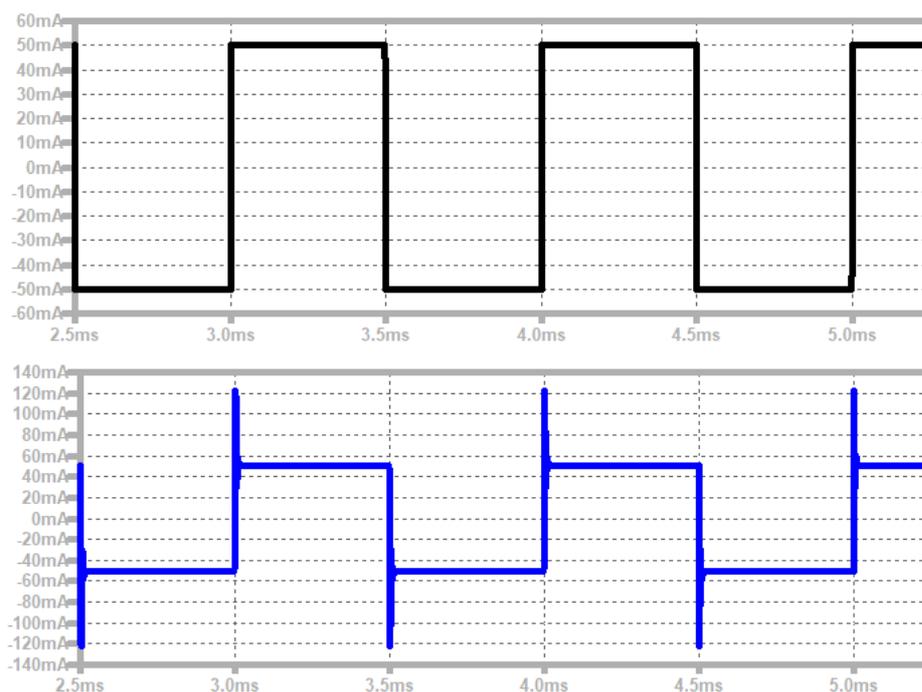
Figura 33 – Correntes nos resistores ideal e não-ideal a 120 Hz



Fonte: Autoria própria (2021)

Em ambos os resultados é observada uma oscilação da saída em torno das transições, devido à resposta do conjunto indutivo e capacitivo à mudança do sinal, mas com rápido amortecimento, mantendo-se a fidelidade de reprodução do sinal no restante do tempo.

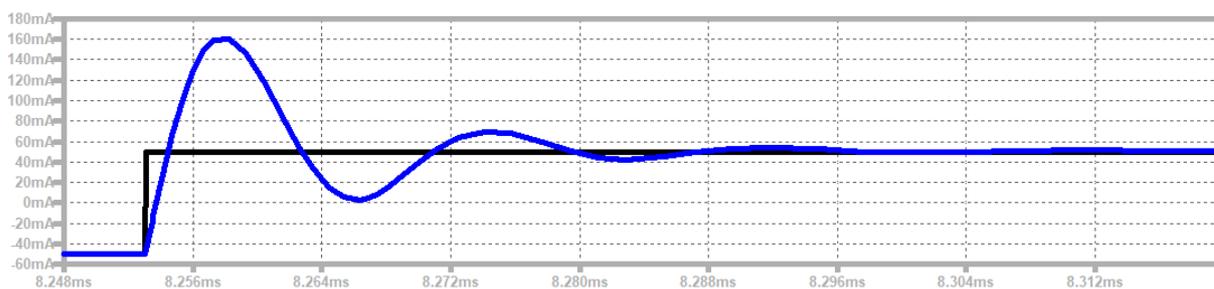
Figura 34 – Correntes nos resistores ideal e não-ideal a 1 kHz



Fonte: Autoria própria (2021)

Com o aumento da frequência, contudo, o volume de oscilações e o tempo de amortecimento se reduzem, como pode ser observado nas Figuras 35 e 36, sugerindo um limite crescente de subida do sinal acompanhando a frequência, similar ao percebido nas medidas práticas da tensão sobre o resistor de 47 Ω (gráfico azul nas Figuras 27, 28 e 29 do trabalho).

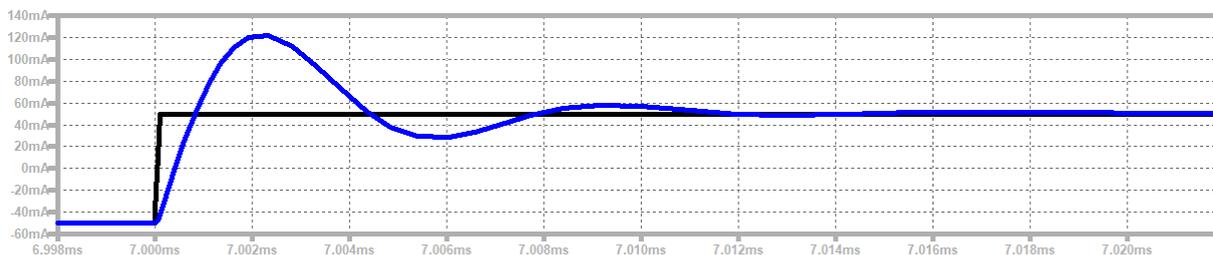
Figura 35 – Subida das correntes ideal e não-ideal a 120 Hz



Fonte: Autoria própria (2021)

Com a impossibilidade de se medir os valores de resistência, indutância e capacitância em frequências mais elevadas devido às limitações do medidor LCR, não é possível determinar o quão distorcida a corrente de teste estava nas medições a 10 e 50 kHz, mas pode-se dizer que, considerando que a corrente máxima de subida diminui à medida da elevação da frequência, a tendência é de que essa corrente estivesse distorcida.

Figura 36 – Subida das correntes ideal e não-ideal a 1 kHz



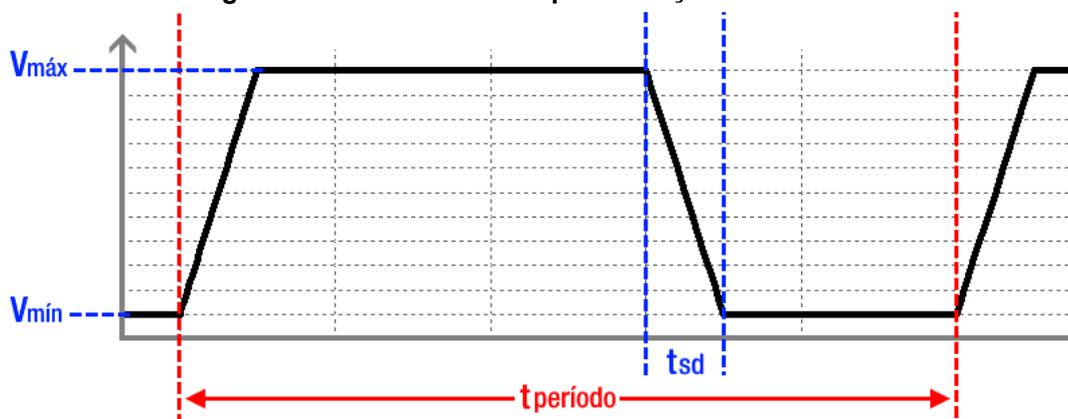
Fonte: Autoria própria (2021)

5.4 Taxas de resposta de sinal

Outra condição que pode ter interferido nas medidas em corrente alternada está diretamente relacionada com o amplificador utilizado. O artigo que propunha os circuitos de instrumentação sugeria o uso de amplificadores com maior velocidade de resposta de tensão — *slew rate* — ao dizer que “o LM324, que é um tanto ruim, mas (...) era o único que eu tinha por enquanto, até que amplificadores novos chegassem” (ANGHEL, 2017). O *slew rate* de folha de dados do LM324, por exemplo, é próximo de $0,4 \text{ V}/\mu\text{s}$ (ST, 2005).

Uma análise teórica pode ser utilizada para verificar a suficiência desse valor, a partir da Figura 37 e do Quadro 6.

Figura 37 – Gráfico modelo para aferição de *slew rate*



Fonte: Autoria própria (2021)

Quadro 6 – Índice do gráfico de validação do *slew rate*

Referência	Condição
V_{min}	Tensão mínima de saída do amplificador
V_{max}	Tensão máxima de saída do amplificador
$t_{período}$	Tempo relativo ao período do sinal medido
t_{sd}	Tempo de subida ou descida entre as tensões mínima e máxima

Fonte: Autoria própria (2021)

As premissas para a análise são:

- $t_{período}$ o tempo de ciclo da frequência de sinal mais alta que se pretende medir com a ponta de prova;
- t_{sd} de no máximo 10% de $t_{período}$ (condição representada na Equação 25), considerando um caso crítico em que o amplificador não seja capaz de acompanhar um sinal medido com t_{sd} o mais próximo possível de zero;
- o uso do *slew rate* (SR) das folhas de dados para verificação.

$$t_{sd} = 0,1 \times t_{período} \quad (25)$$

Com essas premissas, o amplificador deve permitir uma excursão de sinal igual ou superior à pretendida para o emulador, condição verificável pela Equação 26.

$$(SR \times t_{sd}) \geq (V_{max} - V_{min}) \quad (26)$$

Considerando a medição de uma corrente variante de -1 a 1 A testada no item 4.2.6 (que retornou uma excursão $V_{max}-V_{min}$ de cerca de 2 V na saída do amplificador) e as premissas destacadas, tem-se um t_{sd} de 5 μ s e, por conseguinte, um $t_{período}$ de 50 μ s, resultando em uma máxima frequência possível de ser medida, nessas condições e desprezadas todas as não idealidades do emulador e das correntes de teste, de 20 kHz.

Utilizando ainda a Equação 26 e a excursão máxima de aproximadamente 6,5 V obtida nas medições registradas nos itens 4.2.4 e 4.2.5, supondo um sinal quadrado capaz de gerar essas tensões no amplificador, ter-se-ia um t_{sd} de 1,56 μ s e um $t_{período}$ de 15,63 μ s, limitando as medições de corrente em pulsos de até 6,4 kHz.

Por fim, para elevar a frequência máxima passível de medição de um sinal com essa excursão para 100 kHz, atendendo às premissas pontuadas, o *slew rate* do amplificador deve ser superior a 6,5 V/ μ s — o do TL084, por exemplo, segundo suas folhas de dados, varia entre 8 e 13 V/ μ s (TEXAS INSTRUMENTS, 1992).

A velocidade de resposta aparentemente baixa do LM324 acaba por limitar as condições nas quais a medição do sinal alternado acompanha o sinal real. O TL084 foi testado nas simulações do emulador no LTSpice, contudo, o uso desse amplificador demandaria circuitos para a geração das alimentações positiva e negativa, pois seu comportamento quando alimentado com tensão *single supply* era prejudicado.

A princípio, entendeu-se que utilizar um amplificador *single supply*, gerar uma tensão de referência à parte e manter a alimentação negativa de alimentação do circuito simplificaria o projeto da ponta de prova, mas a substituição por outro amplificador similar de maior velocidade poderia, então, aprimorar as medições de sinal em frequência realizadas com a ponteira.

REFERÊNCIAS

AMAZON. Hantek CC-65 AC/DC Multimeter Current Clamp Meter with BNC Connector Up to 20 kHz 20mA to 65A DC. **Página inicial**. Disponível em: <https://www.amazon.com/Hantek-CC-65-Multimeter-Current-Connector/dp/B06W2KFZLW>. Acesso em: 30 nov. 2021.

ANGHEL, Andrei Gabriel. **DC non invasive current clamp for oscilloscope DIY**. ELECTRONOBS. Disponível em: http://www.electrionoobs.com/eng_circuitos_tut12.php. Acesso em: 17 set. 2019.

BARBI, Ivo; FONT, Carlos Henrique Illa; ALVES, Ricardo Luiz. **Projeto físico de indutores e transformadores**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1984.

BCB (Banco Central do Brasil). Cotações e boletins. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes>. Acesso em: 30 nov. 2021.

BRASIL. **Lei n. 8.010, de 29 de março de 1990**. Dispõe sobre importações de bens destinados à pesquisa científica e tecnológica, e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 1990. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1989_1994/L8010.htm. Acesso em: 14 set. 2019.

BRASIL. **Lei n. 8.666, de 21 de junho de 1993**. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 1993. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/18666cons.htm. Acesso em: 13 set. 2019.

CAMPILHO, Aurélio. **Instrumentação Eletrônica: Técnicas e métodos de medição**. 2ª Edição. Portugal: FEUP Edições, 2014.

CARVALHO, Alexandre F.; MILLÉO, Lucas M. **Desenvolvimento de sensor de corrente elétrica a partir de um sensor de Efeito Hall**. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnólogo em Automação Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

DARAKCHIEVA, Vanya; HOFMANN, Tino; KÜHNE, Philipp; SCHUBERT, Mathias. Optical Hall effect — model description: tutorial. **Journal of the Optical Society of America A**, Nova York, v. 33, n. 8, p. 1553-1568, jul. 2016.

DOEBELIN, Ernest O. **Measurement systems: application and design**. Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc. 1966.

HALLIDAY, Daniel; RESNICK, Robert. **Fundamentos de física vol.3: eletromagnetismo**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1984.

HONEYWELL. **Hall Effect Sensing and Application**. Freeport: Honeywell Inc., 2016. Disponível em: <https://sensing.honeywell.com/hallbook.pdf>. Acesso em: 19 set. 2019.

HONEYWELL. “SS39ET/SS49E/SS59ET series — Linear Hall-effect sensor ICs”. SS49E datasheet. Fev. 2012.

ICEL. **Manual de instruções dos osciloscópios digitais OS-2062CEL (60MHz) e OS-2102CEL (100MHz)**. Disponível em: <http://www.icel-manaus.com.br/manual/OS-2000CEL%20Manual%20out%202011%20-%20site.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2021.

MANCINI, Ron. **Op amps for everyone**. Dallas: Texas Instruments, 2002. E-book. Disponível em: https://web.mit.edu/6.101/www/reference/op_amps_everyone.pdf. Acesso em: 8 out. 2021.

MATTEDE, Henrique. Resistores fixos. MUNDO DA ELÉTRICA. Disponível em <https://www.mundodaeletrica.com.br/resistores-fixos/>. Acesso em: 9 dez. 2021.

MCALLISTER, Willy. **Elementos reais de circuitos**. KHAN ACADEMY. Disponível em <https://pt.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/circuit-elements/a/ee-real-world-circuit-elements>. Acesso em: 10 dez. 2021.

PAINEL DE PREÇOS. **Compra 00020/2020**. Disponível em: <https://paineldepresos.planejamento.gov.br/graficos/detalhe?idSeq=1690139&painel=MATERIAIS>. Acesso em 05 nov. 2021.

PAINEL DE PREÇOS. **Compra 00028/2020**. Disponível em: <https://paineldepresos.planejamento.gov.br/graficos/detalhe?idSeq=1764931&painel=MATERIAIS>. Acesso em 05 nov. 2021.

PAINEL DE PREÇOS. **Compra 00048/2020**. Disponível em: <https://paineldepresos.planejamento.gov.br/graficos/detalhe?idSeq=1876490&painel=MATERIAIS>. Acesso em 05 nov. 2021.

PHILIPS (NXP Semiconductors). “LM124/224/324/324A/SA534/LM2902 Low power quad op amps”. LM324 datasheet. Nov. 1995.

RAISA. **Ponta de prova para osciloscópio, você precisa saber!** Disponível em: <https://www.raisa.com.br/ponta-de-prova-para-osciloscopio-voce-precisa-saber>. Acesso em: 29 out. 2021.

SEC Electronics Inc. SS49E Linear Hall effect sensor. SS49E datasheet. Mar. 2008.

SHABAZ. **Building a fluxgate magnetometer based current probe**. Disponível em: <https://www.element14.com/community/community/project14/diytestequipment/blog/2017/08/22/building-a-fluxgate-magnetometer-based-current-probe>. Acesso em: 8 abr. 2021.

ST. LM124-LM224-LM324 Low power quad operational amplifiers. LM324 datasheet. Jun. 2005 [Última atualização jan. 2016].

TEKTRONIX. **TDS1000 and TDS2000 series digital storage oscilloscopes 071-1076-02**. Disponível em: <https://www.tek.com/oscilloscope/tds1002-manual/tds1000-tds2000-series-service-manual>. Acesso em: 16 abr. 2021.

TEXAS Instruments. TL080, TL081, TL082, TL084, TL081A, TL082A, TL084A, TL081B, TL082B, TL084B, TL082Y, TL084Y JFET-input operational amplifiers. TL084 datasheet. Fev. 1977 [Última atualização set. 1992].

VINCI, Andrea. **How to measure current with an oscilloscope.** TEKTRONIX. Disponível em: <https://www.tek.com/blog/how-can-an-oscilloscope-measure-current>. Acesso em: 30 out. 2021.

APÊNDICE A - Lista de componentes passivos disponíveis

Tabela A1 – Componentes disponíveis para uso no trabalho

Resistores 1/4 W			
1	1k	100k	1M
2,2	1,5k	180k	
4,7	2,2k	330k	
10	4,7k	470k	
22	10k	680k	
47	15k	1M	
100	27k		
220	33k		
330	47k		
470	68k		
680			
Resistores adicionais			
15	20W		
47	20W		
10k	potenciômetro		
Capacitores eletrolíticos 25V			
0,47u	4,7u	47u	470u
1u	10u	100u	
2,2u	22u	220u	
Capacitores cerâmicos			
102	103	104	-
Amplificadores operacionais			
TL082	TL084	LM358	LM324
Diodos			
1N4007		1N4148	

Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE B - Cálculo de fluxo magnético previsto no núcleo do emulador

Este cálculo baseia-se nas teorias de fluxo magnético gerado por uma corrente envolta em um núcleo, sendo também o princípio de funcionamento de um transformador. Conforme o circuito representado na Figura 7 (página 22 do trabalho), considerando um fluxo magnético contínuo e que, portanto, não induz tensão no enrolamento de medição posicionado no mesmo núcleo em que o fluxo foi induzido, tem-se o cálculo a partir da Equação A1.

$$I_{medida} = (R_{núcleo} + R_{ar}) \times \lambda_{induzido} \quad (A1)$$

Em que $R_{núcleo}$ e R_{ar} são determinados pelas características físicas (dimensões) e magnéticas (coeficientes de magnetização) do núcleo e dos espaços de ar abertos pela serragem que permite a abertura da ponta de prova e a inserção do sensor Hall. R é determinado pela Equação A2 e aplicado nas Equações de A3 a A5 com os dados da Tabela A1.

O fluxo deve ser convertido para intensidade de campo magnético, a fim de que se consiga medir a resposta do sensor que, na folha de dados, é dada em mV/G.

$$R = \frac{l}{(\mu_0 \times \mu_r \times S)} \quad (A2)$$

Tabela A2 – Valores para uso na Equação A5

Coeficiente	Condição	Valor	Unidade
μ_0	Coeficiente de permeabilidade magnética do ar		
μ_r	Multiplicador para permeabilidade magnética da liga de zinco-manganês	2000	adimensional
l_{ar}	Comprimento da faixa de ar do enrolamento	0,0015	m
$l_{núcleo}$	Comprimento da faixa da liga de zinco-manganês	0,0875	m
S	Seção transversal do núcleo ferromagnético	0,000096	m ²
I_{medida}	Corrente medida, valor máximo	5	A

Fonte: Autoria própria (2021)

$$I_{medida} = \lambda_{induzido} \times \left[\left(\frac{l_{núcleo}}{\mu_0 \times \mu_r \times S} \right) + \left(\frac{l_{ar}}{\mu_0 \times S} \right) \right] = \left(\frac{\lambda_{induzido}}{S} \right) \times \left(\frac{l_{núcleo}}{\mu_0 \times \mu_r} + \frac{l_{ar}}{\mu_0} \right) \quad (A3)$$

$$\left(\frac{\lambda_{induzido}}{S} \right) = B_{(Tesla)}; 10^4 \times \left(\frac{\lambda_{induzido}}{S} \right) = B_{(Gauss)} \quad (A4)$$

$$B_{(Gauss)} = 10^4 \times \left[\frac{\mu_0 \times I_{medida}}{\left(\frac{l_{núcleo}}{\mu_r} + l_{ar} \right)} \right] \quad (A5)$$

Com os valores aplicados, chegou-se a uma indução máxima de até 40,7 G, o que levaria a uma tensão de saída do 49E de até 81,4 mV (considerados os limites máximos de saída do *datasheet*).

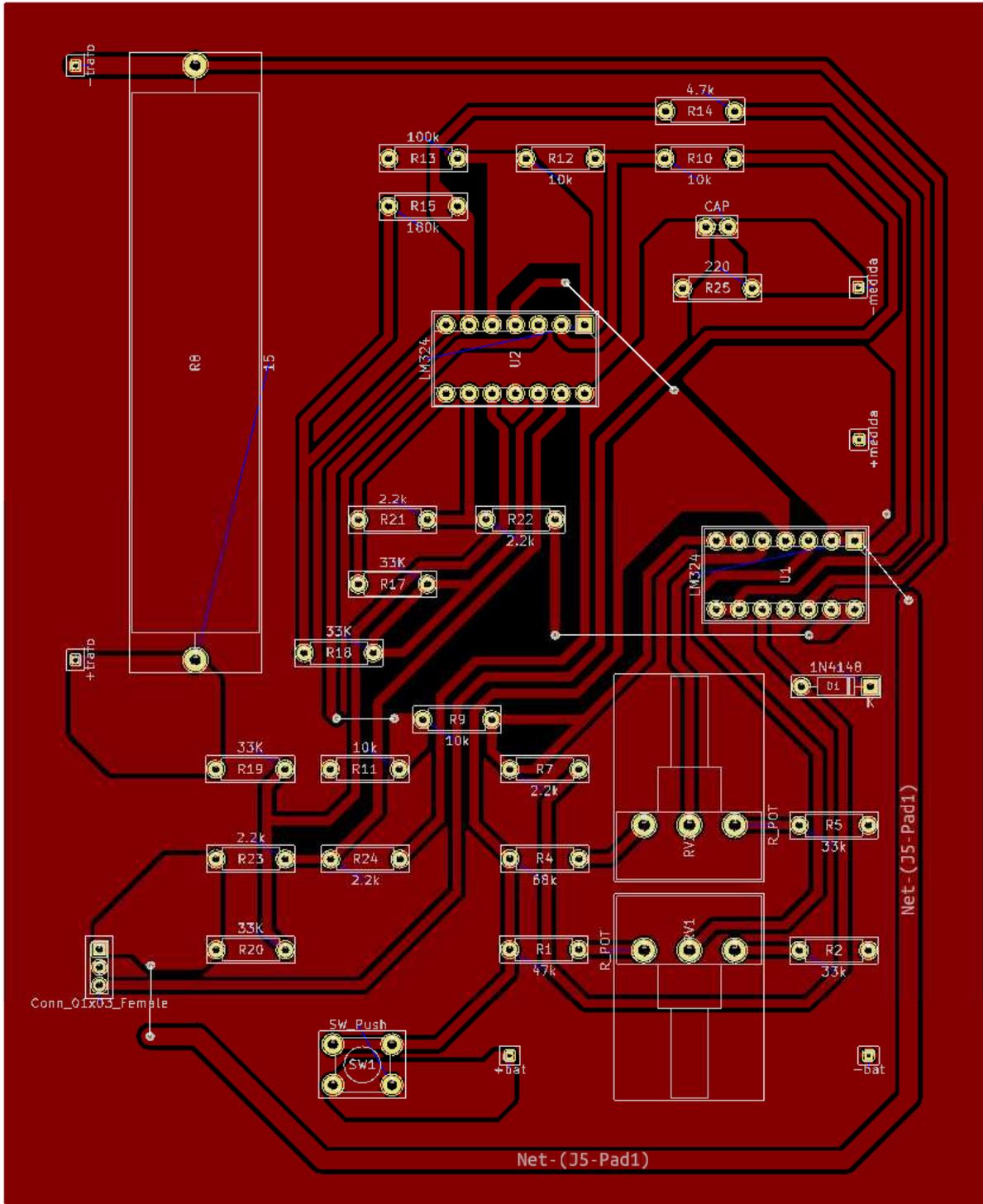
APÊNDICE C - Diretiva Spice para simulação do LM324

```

* fetched on 2015/3/15 from http://www.ti.com/lit/zip/sloj043
* LM324 OPERATIONAL AMPLIFIER "MACROMODEL" SUBCIRCUIT
* CREATED USING PARTS RELEASE 4.01 ON 09/08/89 AT 10:54
* (REV N/A)          SUPPLY VOLTAGE: 5V
* CONNECTIONS:      NON-INVERTING INPUT
*                   | INVERTING INPUT
*                   | | POSITIVE POWER SUPPLY
*                   | | | NEGATIVE POWER SUPPLY
*                   | | | | OUTPUT
*                   | | | | |
.SUBCKT LM324      1 2 3 4 5
*
C1  11 12 5.544E-12
C2  6  7 20.00E-12
DC  5 53 DX
DE  54 5 DX
DLP 90 91 DX
DLN 92 90 DX
DP  4 3 DX
EGND 99 0 POLY(2) (3,0) (4,0) 0 .5 .5
FB  7 99 POLY(5) VB VC VE VLP VLN 0 15.91E6 -20E6 20E6 20E6 -20E6
GA  6 0 11 12 125.7E-6
GCM 0 6 10 99 7.067E-9
IEE 3 10 DC 10.04E-6
HLIM 90 0 VLIM 1K
Q1  11 2 13 QX
Q2  12 1 14 QX
R2  6 9 100.0E3
RC1 4 11 7.957E3
RC2 4 12 7.957E3
RE1 13 10 2.773E3
RE2 14 10 2.773E3
REE 10 99 19.92E6
RO1 8 5 50
RO2 7 99 50
RP  3 4 30.31E3
VB  9 0 DC 0
VC 3 53 DC 2.100
VE  54 4 DC .6
VLIM 7 8 DC 0
VLP 91 0 DC 40
VLN 0 92 DC 40
.MODEL DX D(IS=800.0E-18)
.MODEL QX PNP(IS=800.0E-18 BF=250)
.ENDS

```

ANEXO A - Placa do circuito do emulador modelada no Pcbnew (KiCad)



ANEXO B - Placa construída e utilizada nos testes

