

# Unidade de Condicionamento de Sinais para um Laboratório de Ensaio de Transformadores de Distribuição

Manuella L. Farias. Rodrigo O. de Miranda.  
Vitor C. Bender. Rafael C. Beltrame

*Universidade Federal de Santa Maria, Instituto de Redes Inteligentes  
Santa Maria, RS, Brasil, CEP 97105-900  
(Tel: (55) 3220-8924; e-mail: manuella@mail.ufsm.br)*

**Abstract:** This paper presents the design of a signal-conditioning unit (UCS), composed of two instrumentation circuits that read currents and voltages of transformer's tests. This unit will be part of the automation of the Medium Voltage Testing Laboratory of the Smart Grids Institute (INRI) of the Federal University of Santa Maria (UFSM). The work presents a description of steps to design the UCS applied to test single-phase and three-phase transformers, as well as the experimental validation. Basically, the UCS converts input signals of  $\pm 110$  V (from potential transformers) and  $\pm 5$  A (from current transformers) to output signals of  $\pm 10$  V (for a commercial data acquisition device).

**Resumo:** Este artigo apresenta o projeto de uma unidade de condicionamento de sinais (UCS), composta por dois circuitos instrumentação que leem correntes e tensões do ensaio de transformadores elétricos de distribuição. Essa unidade irá compor o sistema de automação do Laboratório de Ensaio em Média Tensão do Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O trabalho apresenta as etapas projeto da UCS empregada na medição de correntes e tensões de transformadores monofásicos e trifásicos, bem como traz resultados experimentais para validação do projeto. Basicamente, a UCS converte sinais de entrada de  $\pm 110$  V (proveniente de transformadores de potencial) e  $\pm 5$  A (proveniente de transformadores de corrente) em sinais de saída de  $\pm 10$  V, compatíveis com o dispositivo de aquisição de dados comercial empregado pelo laboratório.

**Keywords:** Power Transformer; Current transformer; Potential transformer; Industrial instrumentation; Signal conditioning; Automation.

**Palavras-chaves:** Transformador elétrico; Transformador de corrente; Transformador de potencial; Instrumentação industrial; Condicionamento de sinais; Automação.

## 1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são, em sua maioria, compostos pelas etapas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. No Brasil, o SEP é interligado, sendo um dos maiores do mundo devido à extensão territorial do país. O sistema interligado do Brasil é reconhecido pela continuidade e confiabilidade do serviço, além de prover eletricidade a baixo custo (Mohan, N. 2016). Assim, para garantir as características citadas, é essencial que os equipamentos empregados no SEP possuam um alto grau de confiabilidade e eficiência.

No contexto do SEP, transformadores elétricos são responsáveis pela conversão de uma tensão CA de determinada amplitude em outra tensão CA de amplitude distinta, e são empregados desde as unidades geradoras até o consumidor final, onde adéquam o nível da tensão ao consumo. Desse modo, esses equipamentos estão presentes em grande número ao longo do SEP e, por consequência, por seu papel fundamental na transmissão e na distribuição de energia elétrica, têm um impacto relevante na confiabilidade e na eficiência do sistema. Por isso, em 2014 estabeleceu-se que transformadores de distribuição de até 300 kVA, comercializados no Brasil, devem atender ao Programa

Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (Marchesan, A. P. 2018) (INMETRO. 2020). Assim, os transformadores de distribuição devem ser submetidos a ensaios de desempenho definidos pelas portarias do INMETRO com base no conjunto de normas ABNT NBR 5356 e ABNT NBR 5440 (BRASIL. 2013). Os referidos ensaios precisam ser realizados por laboratórios acreditados. A partir de 2014, a etiquetagem de transformadores se tornou compulsória, restringindo a comercialização de transformadores aos fabricantes e reformadores que integram o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) (Miranda, R. O. 2019).

Nesse contexto, destacam-se os laboratórios de ensaio de transformadores elétricos que, quando acreditados pelo INMETRO com base no conjunto de normas ABNT NBR ISO IEC 17025, podem prestar serviços ao PBE. O Laboratório de Ensaio em Média Tensão do Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) está trabalhando no sentido de obter sua acreditação.

Com a finalidade de garantir eficácia, confiabilidade e segurança na execução dos ensaios, propôs-se a automação do Laboratório de Ensaio em Média Tensão da UFSM, cujo esquema elétrico simplificado é apresentado na Fig. 1. Em

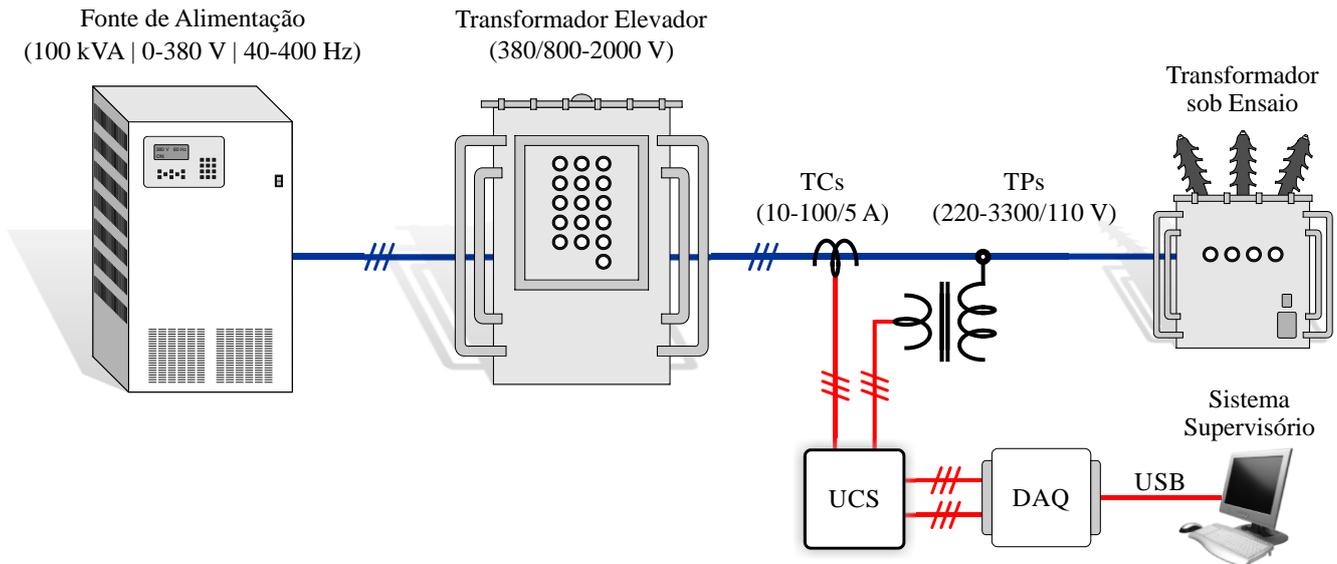


Fig. 1. Esquema elétrico simplificado do Laboratório de Média Tensão.

síntese, a “Fonte de Alimentação” fornece energia ao “Transformador Elevador” (com tensão de amplitude e frequência controladas), que eleva o nível de tensão para alimentar “Transformador sob Ensaio”. Os transformadores de potencial (TPs) e de corrente (TCs) reduzem os níveis de tensão e corrente, respectivamente, a fim de adequá-los aos instrumentos de medição. O presente trabalho aborda o projeto e a implementação dos circuitos de instrumentação de tensão e de corrente de baixo custo – das especificações e restrições de projeto até os resultados experimentais para validação.

## 2. PROJETO DA UCS

A unidade de condicionamento de sinais (UCS), representada na Fig. 1, serve de interface entre os TCs e TPs e o dispositivo de aquisição de dados (DAQ). A UCS proposta é composta de duas placas de instrumentação, uma para condicionamento dos sinais de corrente (com três canais) e outra para condicionamento dos sinais de tensão (também com três canais).

Os circuitos de condicionamento de ambas as placas de instrumentação são compostos de três estágios principais: sensoriamento, filtragem e proteção/amplificação. O estágio de sensoriamento é responsável por amostrar e adequar a amplitude do sinal, seja de corrente ou tensão. No circuito de instrumentação de corrente, o estágio de sensoriamento é responsável por realizar a conversão do sinal de corrente medido em um sinal de tensão, uma vez que o DAQ lê apenas sinais de tensão em seus canais A/D (conversor analógico/digital). Já no circuito de instrumentação de tensão, o sinal de tensão medido necessita apenas da redução de sua amplitude. O estágio de filtragem, realiza a atenuação de ruídos de alta frequência do sinal medido (principalmente os ruídos provenientes da modulação em alta frequência da “Fonte de Alimentação”). Finalmente, o estágio de proteção/amplificação é responsável por proporcionar o ganho necessário ao sinal bem como assegurar que o limite de tensão do canal A/D do DAQ não seja excedido.

Os canais de entrada da UCS devem ser compatíveis com as especificações dos transformadores de instrumentação seus canais de saída devem ser compatíveis com a faixa de operação dos conversores A/D do DAQ. O laboratório emprega TCs Yokogawa® 2241 (em entradas de 10 a 100 A e saída de 5 A) e TPs Yokogawa® 2261 (com entradas de 220 a 3300 V e saída de 110 V) (Yokogawa Test Measurement Corporation. 2000). Já o DAQ National Instruments® NI USB-6001 possui sete canais A/D que operam na faixa de  $\pm 10$  V, com resolução de 14 bits e taxa de amostragem de 20 kS/s compartilhada entre os canais (National Instruments. 2014).

### 2.1 Estágio de Sensoriamento

O circuito de condicionamento dos sinais de corrente deve receber correntes CA de até de 5 A (valor eficaz) e fornecer sinais correspondentes de até  $\pm 10$  V (valor de pico) na saída. Considerando a possibilidade de operação em sobrecarga do transformador sob ensaio, definiu-se uma margem de segurança de 20% na corrente medida, implicando em uma corrente CA de até 6 A (valor eficaz) ou  $\pm 8,485$  A (valor de pico).

Para a conversão dos sinais de corrente em tensão, empregaram-se resistores *shunt* de precisão Vishay® VCS101, com tolerância de 0,1% e potência máxima de 1 W (Vishay Precision Group. 2014). Devido à limitação de potência, são utilizados dois resistores de 100 m $\Omega$  por canal associados em paralelo, resultando em uma resistência equivalente  $R_{sh} = 50$  m $\Omega$ , conforme representado na Fig. 2. Para os níveis de corrente medidos, a tensão máxima resultante é de:

$$V_{sh} = 8,485 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 424,5 \text{ mV.} \quad (1)$$

Nessa configuração, a potência máxima dissipada por cada um dos resistores *shunt* é de:

$$P_{sh} = 100 \cdot 10^{-3} \cdot (6/2)^2 = 900 \text{ mW,} \quad (2)$$

respeitando a potência máxima especificada pelo fabricante.

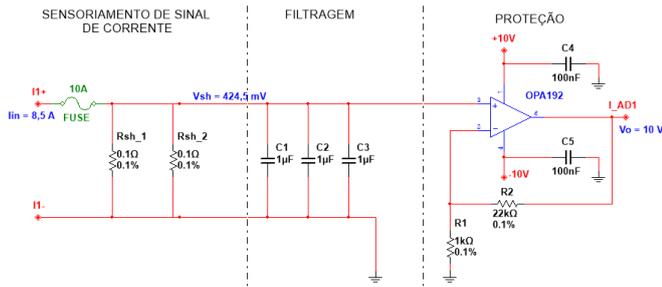


Fig. 2. Circuito de condicionamento dos sinais de corrente.

O circuito de condicionamento dos sinais de tensão deve receber tensões CA de até 110 V (valor eficaz), e fornecer sinais correspondentes de até  $\pm 10$  V (valor de pico) na saída. Novamente, considerando a possibilidade de operação em sobrecarga, definiu-se uma margem de segurança de 20% na tensão medida, implicando em uma tensão CA de até 132 V (valor eficaz) ou, aproximadamente,  $\pm 190$  V (valor de pico).

Para realizar a atenuação do sinal de tensão, projetou-se um circuito divisor resistivo. Para minimizar a corrente drenada pelo divisor, bem como limitar a potência dissipada, definiu-se uma impedância de, aproximadamente, 1 M $\Omega$ . Conforme a Fig. 3, para  $R_1$  foi realizada a associação em série de dois resistores ( $R_a$  e  $R_b$ ) de 485 k $\Omega$ , com precisão de 0,1%, totalizando uma resistência de 970 k $\Omega$ . Já para  $R_2$  foi utilizado um resistor de 5,1 k $\Omega$ , também com precisão de 0,1%.

## 2.2 Estágio de Filtragem

Ambos os circuitos de condicionamento contam com filtros passivos passa-baixas de primeira ordem, uma vez que os sinais de corrente e tensão medidos podem conter conteúdo harmônico proveniente da modulação por largura de pulso da “Fonte de Alimentação” do laboratório. Idealmente, a frequência de corte do filtro deve ser projetada na metade da frequência de amostragem do DAQ para evitar o fenômeno de *aliasing*, ou seja, em 10 kHz.

Porém, para o circuito de condicionamento dos sinais de corrente, definiu-se uma frequência de corte  $f_c = 1$  MHz para evitar um valor de capacitância elevado em paralelo com os resistores *shunt* (já que recomenda-se o uso de capacitores cerâmicos ou de filme em função de sua melhor resposta dinâmica). Então, com referência à Fig. 2 e a partir da obtenção da função de transferência do circuito, o capacitor de filtro  $C$  (nesse caso, composto pela associação em paralelo dos capacitores  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ ) é dado por:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_c \cdot R_{sh}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 3,1 \mu\text{F}. \quad (3)$$

Como solução comercial, optou-se por uma associação em paralelo de três capacitores de filme ( $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ ) de 1  $\mu\text{F}$ , resultando em uma capacitância de 3  $\mu\text{F}$ .

Já para o circuito de condicionamento dos sinais de tensão, definiu-se uma frequência de corte  $f_c = 10$  kHz. Então, com referência à Fig. 3 e a partir da obtenção da função de transferência do circuito (onde se assumiu que  $R_1 \gg R_2$ ), o capacitor de filtro  $C$  (nesse caso, composto pela associação em

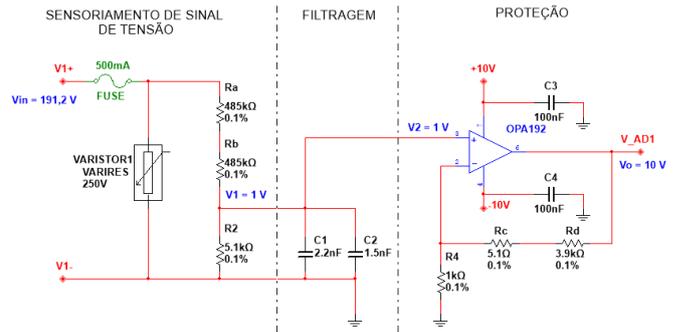


Fig. 3. Circuito de condicionamento dos sinais de tensão.

paralelo dos capacitores  $C_1$  e  $C_2$ ) é dado por:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_c \cdot R_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 5,1 \cdot 10^3} = 3,1 \text{ nF}. \quad (4)$$

Como solução comercial, realizou-se uma associação paralela de dois capacitores de filme ( $C_1$  e  $C_2$ ) de 2,2 nF e 1,5 nF, totalizando uma capacitância de 3,7 nF.

## 2.3 Estágio de Proteção e Amplificação

No estágio proteção e amplificação dos circuitos de condicionamento utiliza-se amplificadores operacionais *rail-to-rail* Texas Instruments® OPA192 devido às suas características de desempenho, como baixos *offset* ( $\pm 5 \mu\text{V}$ ) e *drift* ( $\pm 0,2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) de tensão, elevada banda-passante (10 MHz) (Texas Instruments. 2020) e baixo custo. Além disso, a operação *rail-to-rail* permite excursionar seu sinal de saída linearmente entre os níveis de alimentação, escolhidos especificamente para proteger as entradas A/D do DAQ ( $\pm 10$  V).

Conforme apresentado na Fig. 2, no circuito de condicionamento dos sinais de corrente, o amplificador operacional foi empregado em configuração não-inversora, proporcionando a proteção requerida bem como uma amplificação do sinal sensoriado, sem, no entanto, ocasionar inversão de fase. Nessa configuração, pode-se demonstrar facilmente que o ganho de tensão é dado por:

$$\frac{V_o}{V_{sh}} = 1 + \frac{R_1}{R_2}. \quad (5)$$

O nível máximo de  $V_{sh}$  é 424,5 mV, que deve corresponder a um nível de 10 V em  $V_o$ . Atribuindo-se  $R_1 = 1$  k $\Omega$ , através de (5) obtém-se  $R_2 = 22,55$  k $\Omega$ . Adotou-se o valor comercial de 22 k $\Omega$ , com precisão de 0,1%.

Analogamente, no circuito de condicionamento dos sinais de tensão apresentado na Fig. 3, pode-se demonstrar que o ganho de tensão é dado por:

$$\frac{V_o}{V_2} = 1 + \frac{R_3}{R_4}. \quad (6)$$

O nível máximo de  $V_2$  é 1 V, que deve corresponder a um nível de 10 V em  $V_o$ . Atribuindo-se  $R_3 = 1$  k $\Omega$ , através de (6) obtém-se  $R_4 = 9$  k $\Omega$ . Empregou-se a associação série de dois resistores ( $R_c$  e  $R_d$ ) de valores 3,9 k $\Omega$  e 5,1 k $\Omega$ , com precisão de 0,1%.

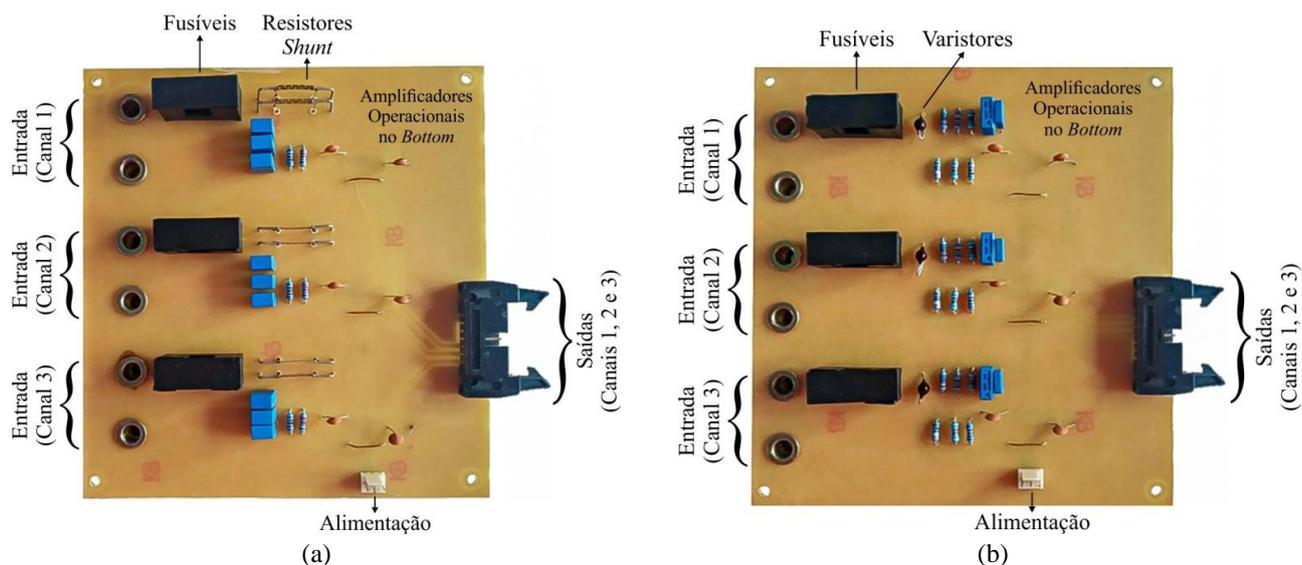


Fig. 4. Placas de circuito impresso da UCS. (a) Circuito de condicionamento dos sinais de corrente. (b) Circuito de condicionamento dos sinais de tensão.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As placas de circuito impresso da UCS (em sua versão protótipo) para os circuitos de condicionamento dos sinais de corrente e tensão são apresentadas na Fig. 4 (a) e (b), respectivamente. Salienta-se que, como medidas adicionais de proteção foram empregados fusíveis, para limitação de corrente, e varistores, para limitação de tensão.

A validação da UCS foi realizada sob condições ambientais controladas (temperatura e umidade), empregando-se um analisador de qualidade de energia Zimmer<sup>®</sup> LMG670, com certificado de calibração vigente (IPT n° 177695-101). Basicamente, os ensaios consistiram na aplicação de níveis de corrente e tensão definidos nos canais de entrada da UCS (excursionando por toda a faixa de medição) e na medição dos níveis de tensão resultantes nos respectivos canais de saída. Uma vez realizadas as medições, verificou-se o ganho e a linearidade de cada canal da UCS.

#### 3.1 Circuito de Condicionamento dos Sinais de Corrente

O circuito de condicionamento dos sinais de corrente foi aferido através aplicação de uma corrente CC na entrada de cada canal ( $I_{in}$ ) e pela medição da tensão correspondente na saída ( $V_o$ ). Como o circuito possui três canais de entrada, um para cada fase do sistema, aferiu-se um canal por vez. De modo a excursionar por toda a faixa de medição, aplicaram-se níveis de corrente de -8,5 A até 8,5 A, incrementando-os em degraus de 1 A. A Tabela 1 apresenta os níveis de  $I_{in}$  aplicados e de  $V_o$  medidos para o Canal 1.

Com os dados coletados para os três canais, realizou-se uma regressão linear a partir da interpolação dos pontos. As equações obtidas, apresentadas na Tabela 2, são fundamentais na programação do sistema supervisorio que realizará o monitoramento dos ensaios a partir dos dados adquiridos pelo DAQ. Conforme se observa na Tabela 2, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi igual a 1,00 para os três canais, evidenciando o efetivo comportamento linear do circuito.

Apenas com o intuito de realizar uma avaliação qualitativa do ganho, da fase introduzida pelo filtro e da presença de ruídos eletromagnéticos, o Canal 1 foi submetido a uma corrente CA de frequência 60 Hz, conforme se observa na Fig. 5. A corrente de entrada ( $I_{in}$ ) foi 3,39 A (valor eficaz), a tensão correspondente de saída ( $V_o$ ) foi 4,05 V (valor eficaz), e o ganho resultante ( $V_o/I_{in}$ ) foi 0,8362, muito próximo do valor de projeto (0,8485). Além disso, na frequência de interesse (60 Hz) não se observa a introdução de fase e nem a presença de ruído eletromagnético.

#### 3.2 Circuito de Condicionamento dos Sinais de Tensão

De modo análogo, o circuito de condicionamento dos sinais de tensão foi aferido através da aplicação de uma tensão CC na entrada de cada canal ( $V_{in}$ ) e pela medição da tensão correspondente na saída ( $V_o$ ). Novamente, aferiu-se cada um dos três canais por vez. De modo a excursionar por toda a faixa de medição, aplicaram-se níveis de tensão de -190 V até 190 V, incrementando-os em degraus de 25 V. A Tabela 3 apresenta os níveis de  $V_{in}$  aplicados e de  $V_o$  medidos para o Canal 1.

De modo similar, realizou-se uma regressão linear a partir da interpolação dos pontos medidos para os três canais. As equações obtidas são apresentadas na Tabela 4. Conforme se observa na Tabela 4, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi igual a 1,00 para os três canais, evidenciando o efetivo comportamento linear do circuito.

Com o objetivo de realizar uma avaliação qualitativa do ganho, da fase introduzida pelo filtro e da presença de ruídos, o Canal 1 foi submetido a uma tensão CA de frequência 60 Hz, conforme se observa na Fig. 6. A tensão de entrada ( $V_{in}$ ) foi 81,30 V (valor eficaz), a tensão correspondente de saída ( $V_o$ ) foi 4,23 V (valor eficaz), e o ganho resultante ( $V_o/V_{in}$ ) foi 0,05222, muito próximo do valor de projeto (0,05228). Novamente, na frequência de interesse (60 Hz) não se observa a introdução de fase e nem a presença de ruído eletromagnético.

**Tabela 1. Ensaio do circuito de condicionamento dos sinais de corrente (Canal 1).**

$I_{in}$ (A)	$V_o$ (V)
8,48	10,08
7,49	8,92
6,51	7,75
5,51	6,57
4,52	5,39
3,51	4,18
2,50	2,98
1,50	1,78
0,00	0,00
-1,50	-1,79
-2,50	-2,79
-3,50	-4,17
-4,51	-5,38
-5,51	-6,56
-6,52	-7,76
-7,51	-8,94
-8,49	-10,1

**Tabela 2. Regressão linear do circuito de condicionamento dos sinais de corrente.**

Canal	Equação	$R^2$
1	$V_o = 1,190 I_{in} + 0,000224$	1,00
2	$V_o = 1,186 I_{in} + 0,004118$	1,00
3	$V_o = 1,183 I_{in} + 0,001012$	1,00

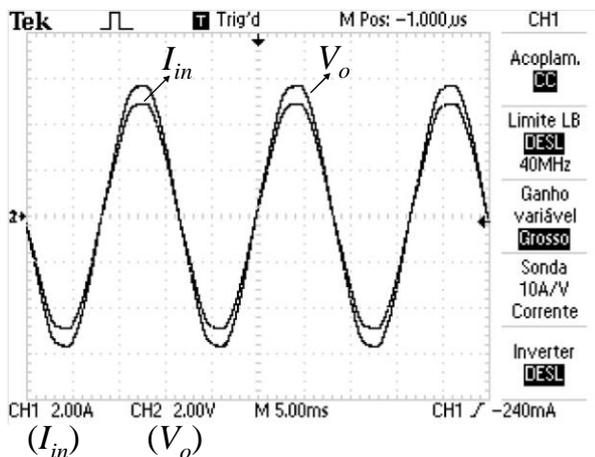


Fig. 5. Formas de onda dos sinais de entrada ( $I_{in}$ ) e saída ( $V_o$ ) do circuito de condicionamento dos sinais de corrente (Canal 1).

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a especificação, o projeto, a implementação e a validação experimental de uma UCS para emprego na automação de ensaios em transformadores elétricos no Laboratório de Ensaios em Média Tensão do Instituto de Redes Inteligentes da Universidade Federal de Santa Maria. A UCS desenvolvida realiza a interface entre os sinais de corrente e tensão, respectivamente, de TCs e TPs de medição, com um dispositivo de aquisição de

**Tabela 3. Ensaio do circuito de condicionamento dos sinais de tensão (Canal 1).**

$V_{in}$ (V)	$V_o$ (V)
-190,97	-10,02
-175,01	-9,19
-149,95	-7,87
-125,01	-6,57
-100,05	-5,25
-75,00	-3,94
-49,99	-2,63
-25,00	-1,31
0,00	0,00
24,80	1,30
49,96	2,62
75,07	3,94
99,98	5,25
124,92	6,57
149,96	7,87
174,92	9,19
190,90	10,03

**Tabela 4. Regressão linear do circuito de condicionamento dos sinais de tensão.**

Canal	Equação	$R^2$
1	$V_o = 0,05228 I_{in} + 0,0013220$	1,00
2	$V_o = 0,05243 I_{in} + 0,0037650$	1,00
3	$V_o = 0,05251 I_{in} + 0,0008451$	1,00

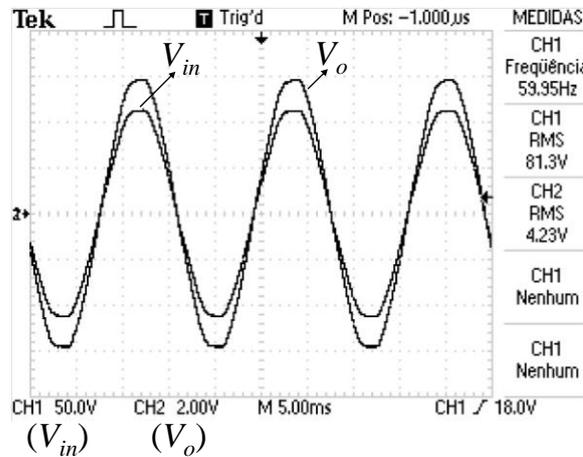


Fig. 6. Formas de onda dos sinais de entrada ( $V_{in}$ ) e saída ( $V_o$ ) do circuito de condicionamento dos sinais de tensão (Canal 1).

dados (DAQ). Desse modo, optou-se por dividir a UCS em dois circuitos distintos, cada um com três canais independentes: circuito de condicionamento dos sinais de corrente e circuito de condicionamento dos sinais de tensão.

A partir da validação experimental, observou-se que a UCS, apesar do baixo custo de implementação, alcançou o desempenho esperado, com comportamento linear, sem introdução de fase na faixa de frequências de interesse (60 Hz) e livre de ruídos eletromagnéticos.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) (código de financiamento 001), e pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT-GD) (CNPq processo nº 465640/2014-1, CAPES processo nº 23038.000776/2017-54 e FAPERGS processo nº 17/2551-0000517-1).

## REFERÊNCIAS

- ABNT. (2005). *NBR ISO/IEC 17025: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT. (2010). *NBR 5356: Transformadores de potência – requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT. (2014). *NBR 5440: Transformadores para redes aéreas de distribuição – requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Brasil. (2013). *Portaria interministerial nº 104, de 22 de março de 2013*. Ministério de Minas e Energia, Brasília.
- INMETRO. (2020a). *PBE: Programa brasileiro de etiquetagem*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Brasília. Disponível em: <<http://www2.inmetro.gov.br/pbe>>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- INMETRO. (2020b). *Avaliação da conformidade*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Brasília. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/ac.asp?iacao=imprimir>>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- Marchesan, A. P. (2018). Proposta de sistema supervisorio de aquisição de dados para realização de ensaio de medição de perdas a vazio e corrente de excitação. In *Anais do 11º Seminário de Eletrônica de Potência e Controle*, 8 p.
- Miranda, R. O. (2019). *Contribuição à instalação de um laboratório de ensaios em transformadores de distribuição no Instituto de Redes Inteligentes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Mohan, N. (2016). *Sistemas elétricos de potência – curso introdutório*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Ltda., Rio de Janeiro.
- National Instruments. (2014). *USB-6001: Low-Cost DAQ USB Device*. Disponível em: <<https://www.ni.com/pdf/manuals/374369a.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- Texas Instruments. (2020). *OPAx192 36-V: Precision, rail-to-rail input/output, low offset voltage, low input bias current op amp*. Disponível em: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa192.pdf?ts=1592851040748&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPA192](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa192.pdf?ts=1592851040748&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPA192)>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- Vishay Precision Group. (2014). *VCS101: High precision bulk metal foil power current sensing resistors*. Disponível em: <<https://br.mouser.com/datasheet/2/428/vcs-4101.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- Yokogawa Test Measurement Corporation. (2000). *Portable Instruments*. Disponível em: <<https://cdn.tmi.yokogawa.com/1/2699/files/BU2000-E.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2020.