

# PROPOSTA DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DE ENSAIO DE MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO E PERDAS EM CARGA EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

RODRIGO O. DE MIRANDA, MANUELLA L. FARIAS, ANA PAULA G. MACHESAN,  
TIAGO B. MARCHESAN, RAFAEL C. BELTRAME

*Univeridade Federal de Santa Maria – UFSM  
Instituto de Redes Inteligentes – INRI  
97105-900, Santa Maria – RS*

*E-mails: rodrigoom@mail.ufsm.br, manuella@mail.ufsm.br,  
anapaulagm@mail.ufsm.com, tiago@mail.ufsm.br, beltrame@gepoc.ufsm.br*

**Abstract**— This paper shows a proposal of an automation process of the distribution transformers tests in the Medium voltage laboratory of the Smart Grid Institute in the Federal University of Santa Maria, focusing the load loss test. It is explained the relevance of the subject, the standard description of the test, equipment presents in the laboratory, the used hardware and software to obtain the voltage and current data and the analysis of the results using values of commercial distribution transformers for the software tests.

**Keywords**— Automation, Medium Voltage, Power Transformers, Load-Loss Test, Data Acquisition.

**Resumo**— Este artigo propõe um sistema de automação para ensaios em transformadores de distribuição no Laboratório de Média Tensão do Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) com foco no ensaio de medição da impedância de curto circuito e perdas em carga. É mostrada a relevância do tema, descrição normativa, estrutura laboratorial para execução do ensaio, hardware e software para aquisição dos dados de tensão e corrente e finaliza-se com a análise dos resultados experimentais utilizando valores compatíveis com transformadores comerciais para os testes do software.

**Palavras-chave**— Automação, Média Tensão, Transformadores de Potência, Ensaio de Curto-Circuito, Aquisição de Dados

## 1 Introdução

A tendência global de projetar um mundo com maior eficiência energética e confiabilidade em seu sistema de energia elétrica incentivou a criação de novas políticas de regulação para os elementos que compõe a rede. Nessa categoria são inclusos os transformadores, máquinas fundamentais para a transmissão e distribuição de energia, uma vez que possuem a finalidade de adequar os níveis de tensão durante o caminho que leva da geração ao consumidor final (Ciulavu and Helerea, 2008)(Caldeira *et al.*, 2018).

A partir de janeiro de 2014, tornou-se compulsória a adesão ao Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) de transformadores de distribuição imersos em líquido isolante, com potência até 300 kVA, comercializados em território nacional (Ministério de Minas e Energia, 2013). A adesão ao PBE requer a realização de ensaios de conformidade nos transformadores, cujos procedimentos e limites para aprovação são estabelecidos pela ABNT NBR 5356 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010).

Os ensaios de rotina, mandatórios para a comercialização dos transformadores em território nacional, incluem: medição da resistência dos enrolamentos, medição da relação de transformação, medição da impedância de curto circuito e perdas em carga, medição das perdas em vazio e corrente de excitação, dentre outros. Mais especificamente, o ensaio de impedância de curto circuito tem a finalidade de medir as perdas nos condutores, podendo estes serem

feitos de cobre ou alumínio, a uma temperatura de referência. As perdas em carga somadas às perdas a vazio compõe o valor de perdas totais do transformador. Os valores de perdas a vazio e totais possuem valor limite no Brasil (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014), o transformador que tiver sua perdas medidas acima do limite, não poderá ser comercializado no país. Além das perdas, o ensaio determina a impedância de curto-circuito do transformador, um importante dado de placa.

Tendo em vista a recente obrigatoriedade de adesão ao PBE e o pequeno número de laboratórios acreditados pelo INMETRO para atender à indústria nacional (a saber, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás e Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo), muitos fabricantes de transformadores têm enfrentado grandes filas de espera para ensaiar sua linha de produtos. Desse modo, toda e qualquer medida que agilize a realização dos ensaios e a respectiva redação de relatórios deve ser buscada. Nesse contexto, se está implantando, junto ao Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), um Laboratório de Média Tensão para o ensaio de transformadores de distribuição à luz do PBE.

Assim, o objetivo deste trabalho é propor um sistema automatizado para a realização do ensaio de medição de impedância de curto circuito e perdas em carga. O processo de automação busca, entre outros aspectos, a eficiência operacional, entrega de resultados consistentes e de qualidade, redução de esforço

humano, economia de recursos e energia, precisão e segurança, evitando a exposição do metrologista à riscos existentes no trabalho com equipamentos de média tensão (Pillai, 2014). O artigo descreve o procedimento de ensaio, apresenta o sistema de aquisição de dados em desenvolvimento, o sistema supervisor para controle e exibição de resultados e finaliza com os testes preliminares do *software*.

## 2 Descrição do Ensaio de Medição de Impedância de Curto-Circuito e Perdas em Carga

O ensaio tem como objetivos determinar as perdas ôhmicas nos condutores (cobre ou alumínio) que compõe as bobinas de alta e baixa tensão do transformador. Além disso, o ensaio permite medir a impedância de curto-circuito (Oliveira, Cogo, Policarpo, 1983). A ABNT NBR 5356 determina que o teste deve ser realizado à frequência nominal, 60 Hz no Brasil, aplicando-se uma forma de onda de tensão senoidal e de valor suficiente para circular a corrente nominal nos terminais da bobina sob teste, normalmente o lado de alta tensão, mantendo os terminais outra bobina, normalmente o lado de baixa tensão, curto-circuitadas. Recomenda-se o lado de alta tensão para alimentação por apresentar menor nível de corrente. Usualmente, o nível de tensão aplicado neste ensaio é inferior à 10% do valor nominal do transformador (Oliveira, Cogo, Policarpo, 1983).

Deve-se anotar, simultaneamente, os níveis de corrente e tensão aplicados ao enrolamento, bem como a potência absorvida pelo transformador. Além disso, deve-se realizar a correção de potência devido às perdas nos instrumentos de medição, podendo-se obter essas perdas de duas formas: (i) desconectando-se o transformador sob ensaio e medindo-se apenas as perdas devido aos circuitos de instrumentação ou (ii) calculando-se as perdas através dos parâmetros dos instrumentos de medição. Uma vez obtidas as perdas nos instrumentos ( $P_{Instrum}$ ), essa é subtraída da perda medida durante o ensaio ( $P_{Medida}$ ) para se obter a potência realmente absorvida pelo transformador à temperatura ambiente ( $P_{Trafo,Ta}$ ), em watts (W), conforme definido em (1). Além disso, deve-se realizar a medição da temperatura do óleo do transformador antes e depois do ensaio, adotando a média aritmética entre as duas leituras como temperatura do ensaio ( $T_a$ ).

$$P_{Trafo,Ta} = P_{Medida} - P_{Instrum} \quad (1)$$

Como forma de padronizar os resultados, a ABNT NBR 5356 exige que se convertam as perdas medidas à temperatura ambiente para um valor de perdas à uma temperatura de referência. Todavia, essa conversão não é direta, visto que as perdas são divididas em perdas Joule e perdas suplementares, ambas possuindo comportamentos diferentes em relação à variação de temperatura.

Inicialmente, calculam-se as perdas Joule à temperatura ambiente ( $P_{Joule,Ta}$ ), dada pela corrente eficaz nominal do transformador, em Ampères ( $I_N$ ) e a

resistência à temperatura ambiente do enrolamento sob ensaio ( $R$ ), em Ohms, medida previamente à energização do transformador e considerando que o mesmo estava por, pelo menos, 3h desenergizado (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010), como apresentado pela equação (2).

$$P_{Joule,Ta} = I_N^2 \cdot R \quad (2)$$

Em seguida, calculam-se as perdas suplementares à temperatura ambiente ( $P_{Suplemen,Ta}$ ):

$$P_{Suplemen,Ta} = P_{Trafo,Ta} - P_{Joule,Ta} \quad (3)$$

As perdas Joule variam com a temperatura e são corrigidas para uma temperatura de referência ( $T_{Ref}$ ), conforme (4). A constante  $k$  pode assumir os valores descrito na Tabela 1, dependendo do material do condutor.

$$P_{Joule,Tref} = P_{Joule,Ta} \cdot \frac{k + T_{ref}}{k + T_a} \quad (4)$$

Tabela 1. Valores de  $k$

	Condutor	
	Alumínio	Cobre
$k$	225	235

Similarmente, a correção das perdas suplementares é dada por (5).

$$P_{Suplemen,Tref} = P_{Suplemen,Ta} \cdot \frac{k + T_a}{k + T_{ref}} \quad (5)$$

Finalizando, a perda total nos condutores para a temperatura de referência é a soma da perda suplementar e da perda Joule, como mostrado em (6).

$$P_{Trafo,Tref} = P_{Joule,Tref} + P_{Suplemen,Tref} \quad (6)$$

Este ensaio também permite a obtenção da impedância de curto-circuito ( $z$ ) do transformador, em Ohms, referida ao enrolamento sob tensão, através do nível de tensão eficaz aplicado ao enrolamento, expresso em Volts ( $V_z$ ) e  $I_N$ , conforme (7). A impedância  $z$  é constituída pelas componentes resistiva ( $r$ ) e reativa ( $x$ ), calculadas em (8) e (9).

$$z = \frac{V_z}{I_N} \quad (7)$$

$$r = \frac{P_{Trafo,Ta}}{I_N^2} \quad (8)$$

$$x = \sqrt{z^2 - r^2} \quad (9)$$

Como a impedância de curto-circuito é usualmente expressa em porcentagem, as grandezas são normalizadas a uma base, conforme (10), (11) e (12). Nesse caso, as bases são a tensão eficaz nominal do enrolamento ( $V_{Base}$ ), expresso em Volts e potência nominal do transformador ( $S_{Base}$ ), expressa em Volt-Ampères.

$$z_{\%} = \frac{V_z}{V_{Base}} \cdot 100 \quad (10)$$

$$r_{\%} = \frac{P_{Trafo,Ta}}{S_{Base}} \cdot 100 \quad (11)$$

$$x_{\%} = \sqrt{z_{\%}^2 - r_{\%}^2} \quad (12)$$

Entretanto, a componente resistiva da impedância varia com a temperatura e precisa ser corrigida à temperatura de referência, enquanto que a componente reativa permanece constante. Desse modo, a componente resistiva à temperatura de referência é dada por (13), em Ohms, ou por (14), em valor percentual.

$$r_{Tref} = \frac{P_{Trafo,Tref}}{I_N^2} \quad (13)$$

$$r_{\%,Tref} = \frac{P_{Trafo,Tref}}{S_{Base}} \cdot 100 \quad (14)$$

Assim, a impedância de curto-circuito corrigida à temperatura de referência pode ser calculada por (15), em Ohms, e (16), em valor percentual.

$$z_{Tref} = \sqrt{r_{Tref}^2 + x^2} \quad (15)$$

$$z_{\%,Tref} = \sqrt{r_{\%,Tref}^2 - x_{\%}^2} \quad (16)$$

### 3 Sistema de Aquisição de Dados Proposto

#### 3.1 Descrição do Circuito

O laboratório de média tensão possui uma fonte de alimentação trifásica emuladora de rede CA de 150 kVA para alimentar os transformadores a serem ensaiados. A Figura 1 ilustra o esquema de ligação para a execução do ensaio e obtenção dos dados. As setas em preto representam os cabos de alimentação que saem da fonte emuladora de rede e são conectados à um transformador elevador. Os cabos passam pelo transformador de corrente (TC) e alimentam o transformador sob ensaio. No mesmo ponto de conexão estão os cabos para medição do nível de tensão, através do transformador de potencial (TP). As setas na cor amarela representam o sinal de saída do TP/TC, onde nível de tensão/corrente enviados possuem valores eficazes de 110 V e 5 A, respectivamente. Esses sinais são condicionados pela placa de instrumentação, a qual atenua esses valores para a faixa de trabalho do conversor analógico-digital do dispositivo de aquisição de dados (DAQ), de -10 a 10 V de pico, sendo esta saída representada pela seta de cor verde. Salienta-se que a corrente enviada pelo TC é convertida em um nível de tensão através de resistores shunt e de estágios de amplificação. O DAQ empregado (NI USB-6001) possui uma resolução de 14 bit e taxa de amostragem máxima de 20 kS/s. É importante destacar que a taxa de amostragem é dividida pelo número de canais utilizados, ou seja, para dois canais, a taxa cai para 10 kS/s. A seta de cor azul mostra a comunicação do DAQ com a plataforma PC por uma porta USB, através da qual são transmitidos os dados de tensão e corrente instantâneos, necessários para a execução dos cálculos vistos na seção 2.

#### 3.2 Descrição do Software

No ambiente de programação LabVIEW desenvolveu-se a interface gráfica do programa, que compreende (i) o ambiente de cadastro do transformador sob ensaio e (ii) o ambiente de monitoramento e análise de resultados do ensaio. No ambiente de cadastro, usuário informa os dados de placa do transformador: cliente, número de série, data de fabricação, número de fases, potência nominal, material dos enrolamentos, tensão nominal no lado de alta para cada tap, tensão nominal no lado de baixa, impedância percentual, peso e volume. Após o cadastro do transformador parte-se para a aba de análise, ligando-se a fonte CA para alimentar o transformador sob ensaio e sensoriando os níveis de tensão e corrente através do TP e TC instalados no circuito.

#### 3.3 Tratamento dos Dados

Para tratar os dados enviados pelo DAQ, o LabVIEW utiliza o bloco DAQmx, onde são configuradas a taxa de amostragem e o número de amostras armazenado no buffer. O cálculo da potência medida se dá através de  $v(k)$  e  $i(k)$ , que são os níveis instantâneos de corrente e tensão na amostra  $k$  (Vicente, 2006) (17). São empregadas 166 amostras em um ciclo de 60 Hz, considerando que são utilizadas duas entradas do DAQ, uma para tensão e outra para corrente, permitindo uma taxa de amostragem máxima de 10 kS/s.

$$P_{medida} = \frac{1}{166} \sum_{k=1}^{166} v(k) \cdot i(k) \quad (17)$$

A potência realmente absorvida pelo transformador ( $P_{Trafo}$ ) é calculada a partir da subtração das perdas associadas ao circuito de instrumentação que, neste caso, é facilmente obtida a partir do conhecimento do nível de tensão aplicado no ensaio e da resistência interna do circuito de sensoriamento. O valor de  $P_{Trafo}$  é então enviado aos blocos que realizam os cálculos apresentados nas equações (2) à (6), resultando assim nas perdas corrigidas à temperatura de referência (usualmente, 75°C).

Para o cálculo da impedância de curto circuito são necessários os valores de tensão eficaz de ensaio e corrente nominal eficaz. Essas grandezas são calculadas através do bloco RMS, do LabVIEW, que executa os cálculos conforme (18) e (19). Com esses valores, os demais blocos inseridos no programa executam sequencialmente as equações (7) a (16), fornecendo como resultado a impedância percentual.

$$V_z = \sqrt{\frac{1}{166} \sum_{k=1}^{166} v(k)^2} \quad (18)$$

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{166} \sum_{k=1}^{166} i(k)^2} \quad (19)$$

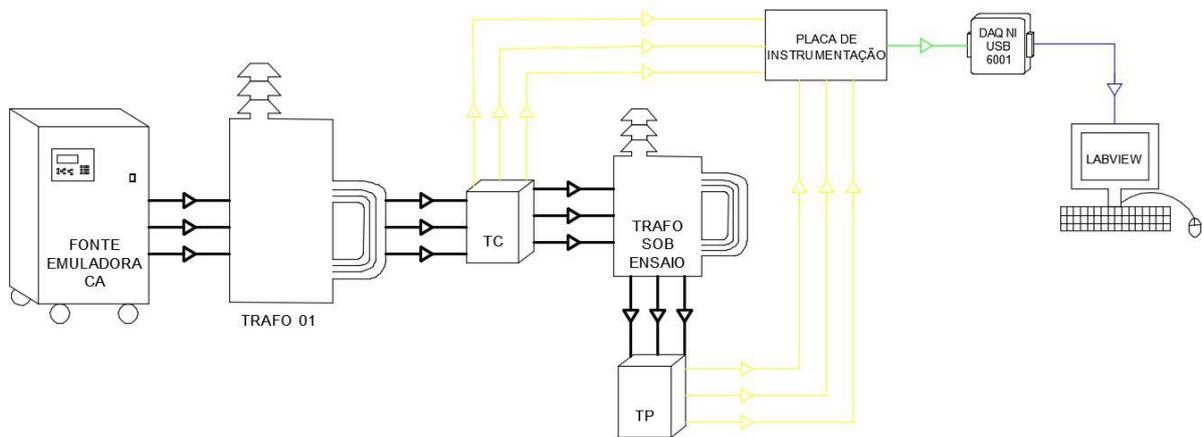


Figura 1. Esquema de ligação do sistema de aquisição de dados do ensaio

#### 4 Resultados Preliminares

Para realizar o teste do programa desenvolvido em ambiente LabView, foram utilizados como base os dados de um transformador de distribuição comercial com as características descritas na Tabela 2, para a validação dos cálculos, foi inserido um gerador de funções que emula os sinais vindos da placa de instrumentação.

A interface para a execução do ensaio é constituída de duas abas. Na Figura 2 são mostrados os detalhes da aba de cadastro, onde devem ser inseridos os dados de placa do transformador. A Figura 3 ilustra a interface completa do sistema de monitoramento de ensaio, onde são visualizados os gráficos da forma de onda instantânea de tensão e de corrente. À esquerda está a seção destinada para a inclusão de informações necessárias para a realização dos cálculos, sendo elas: a temperatura de ensaio, a constante do material, o valor medido da resistência a frio, e as informações de tensão nominal e potência nominal do transformador. Na área central são observados os cursores de cor vermelha e verde, que indicam o nível atual de corrente no transformador e o nível desejado, respectivamente, auxiliando o metrologista a controlar o nível de tensão aplicado no transformador sob ensaio.

Tabela 2. Dados do transformador a ser emulado

Tensão Nominal de Alta	11,4 kV
Tensão Nominal de Baixa	220/127 V
Potência Nominal	755 kVA
Número de fases	Monofásico
Resistência à frio	23,35 $\Omega$
Tipo de material do condutor	Cobre

Ao lado dos cursores estão presentes indicadores digitais que mostram os valores eficazes de tensão, de corrente (atual e de ensaio) e, abaixo destes, são apresentados os resultados das perdas e o valor da impedância de curto-circuito corrigidos a temperatura de referência. Finalizando, a parte mais à direita apresenta os mostradores que indicam a frequência e a relação de transformação a qual estão configurados o TC e o TP.

Para verificar se os resultados obtidos estavam coerentes com a teoria, os cálculos foram realizados fora do ambiente de programação. A comparação é apresentada na Tabela 3. Observando-se os valores obtidos, é verificado um erro de 2,39% entre as perdas calculadas e as perdas medidas via *software* e 0,02% para os resultados de impedância de curto circuito, corroborando que a forma utilizada para obtenção dos sinais, tratamento das informações e cálculo das variáveis de interesse estão de acordo com o que foi apresentado na seção 2. Ainda, variando-se a amplitude dos sinais fornecidos pelo gerador de funções, os resultados de perdas e impedância foram atualizados em tempo real pelo programa. Entretanto, em caso de um transformador real, esse valor de perdas estaria acima do limite máximo de aceitação, que é de 1110 W para as perdas totais, que é a soma das perdas medidas no ensaio a vazio e as perdas em carga (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

Figura 2. Interface de cadastro do transformador.

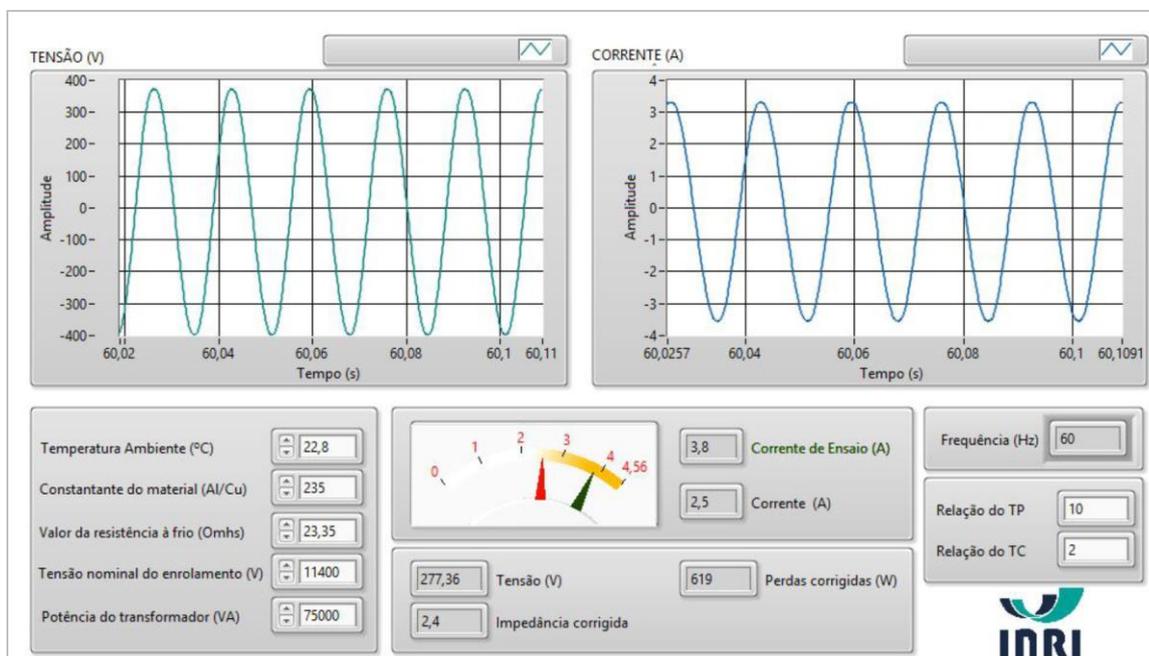


Figura 3. Interface de supervisão do ensaio

## 5 Conclusões

A obrigatoriedade de participação dos transformadores de distribuição no PBE gerou uma grande demanda dos fabricantes a nível nacional para a realização de ensaios em seus transformadores. Considerando a existência de poucos laboratórios habilitados a realizar tais testes, é de extrema importância que novos centros de média tensão sejam construídos a fim de dar vazão à essa fila de equipamentos. Em 2019, a tolerância com o nível de perdas totais em transformadores de distribuição será reduzida em uma categoria, ou seja, os transformadores que tem etiqueta de eficiência nível “E” não poderão ser mais comercializados (ANEEL, 2018), demonstrando o impacto que essa categoria de equipamentos possui no setor de distribuição e nas políticas de eficiência energética implantadas pelo governo brasileiro. Contudo, além da construção de instalações para a realização de ensaios, e garantir que o procedimento seja realizado em concordância com as respectivas normas, deve se atentar também à redução do tempo de execução e a interferência humana no processo,

Tabela 3. Dados calculados e obtidos via software

Perdas corrigidas ( <i>software</i> )	1455 W
Perdas corrigidas calculadas	1421 W
Impedância percentual ( <i>software</i> )	3,61 W
Impedância percentual calculada	3,59 W

evitando riscos ao operador e proporcionando maior velocidade e fluidez no serviço. O trabalho apresentou uma proposta de aquisição de dados de tensão e corrente durante um ensaio de medição de impedância de curto circuito e perdas em carga, mostrando o tratamento dos sinais para fornecer os valores de perdas corrigidas à uma temperatura de referência e impedância percentual. Através do software, cálculos que eram antes feitos a mão ou com auxílio de calculadoras são realizados pelo próprio programa, bastando ao metrologista inserir no *software* os dados presentes na placa do transformador os resultados obtidos de ensaios anteriormente realizados, como a medição de resistência a frio. Desta forma, o sistema projetado uma variável de erro do procedimento de ensaio, tornando-o mais rápido e possibilitando ao executor se concentrar em apenas observar os níveis de tensão e corrente os quais estão sendo fornecidos para o transformador sobre teste, através dos gráficos da forma de onda e dos visores com os valores eficazes de tensão e corrente. Detalhes como estes agilizam a obtenção dos resultados para o valor de impedância de curto-circuito e das perdas em carga, além de gerar maior confiabilidade e proporcionar maior segurança ao corpo técnico do laboratório para a execução do ensaio, que também constituem de um fator importante para aceitação do laboratório perante as normas de qualidade laboratorial (International Organization for Standardization, 2005).

Nas próximas etapas desse estudo serão incluídas placas de instrumentação para a realização dos testes em transformadores reais; serão adicionados mais dois DAQs, com intuito de realizar o mesmo teste em transformadores trifásicos; será implantado um banco de dados dos transformadores ensaiados, possibilitando consultar resultados anteriores, comparar o produto dos fabricantes e realizar estimativas em relação aos materiais que compõe os transforma-

dores; por fim, será adicionada uma nova aba para execução e supervisão do ensaio de medição das perdas a vazio e corrente de excitação.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Secretaria do Desenvolvimento Econômico, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – SDTEC (Convênio DCIT 30/2017; Processo 12-16.00/17-3), à CAPES (processo no. 23038.000776/2017-54), ao CNPq (processo 465640/2014-1), ao INCTGD, à CEEE e a FAPERGS (17/2551-0000517-1) pelo aporte financeiro.

### **Referências Bibliográficas**

ANEEL (2018) ‘Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição’, Revisão 5, p. 27.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010) ‘ABNT NBR 5356:2007 Transformadores de Potência’. ABNT, p. 95.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) ‘ABNT 5440:2014 - Transformadores para redes aéreas de distribuição — Requisitos’. ABNT, p. 52.

Caldeira, B. F. *et al.* (2018) ‘Testing and Diagnostics of Distribution Transformers Losses in the Presence of Harmonics’, *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. IEEE, pp. 1–6.

Ciulavu, C. and Helerea, E. (2008) ‘Tests on Power Transformers’, (32), pp. 190–195.

International Organization for Standardization (2005) ‘Norma Brasileira: ABNT NBR ISO/IEC 17025’, pp. 1–31. doi: 01.080.10; 13.220.99.

Ministério de Minas e Energia (2013) ‘PORTARIA INTERMINISTERIAL No 104’, p. 7.

Oliveira, J. Cogo, J. Policarpo, J. (1984). *Transformadores: Teoria e ensaios*. São Paulo, Edgard Blucher LTDA.

Pillai, A. S. (2014) ‘A Power-aware Multiprocessor Based Laboratory Automation and Resource Management System’.

Vicente, J. M. E. (2006) ‘Uma Contribuição à Automação de Ensaio em Transformadores de Potência em Média Tensão’. Available at: <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0030359.pdf>.