

Concepção de um sistema de automação e monitoramento para equipamento utilizado em ensaios de trilhamento elétrico e erosão

Raphael Borges da Nobrega ^[1], Valmir do Nascimento Júnior ^[2], Ítalo Oliveira Medeiros ^[3], Edson Guedes da Costa ^[4], Ronimack Trajano de Souza ^[5]

[1] raphael.nobrega@ee.ufcg.edu.br. [2] valmir.junior@ee.ufcg.edu.br. [3] italo.medeiros@ee.ufcg.edu.br. [4] edson@dee.ufcg.edu.br. [5] ronimack@dee.ufcg.edu.br. Universidade Federal de Campina Grande – Departamento de Engenharia Elétrica.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo projetar e desenvolver de um sistema de controle e aquisição de dados empregando a plataforma *open source* Arduino para automatizar um equipamento responsável pela realização do ensaio de trilhamento elétrico e erosão proposto pela norma IEC 60587. O sistema desenvolvido permite selecionar resistores de proteção especificados pela norma a partir do valor de tensão informado pelo operador, monitorar a corrente de fuga que circula sobre cinco amostras ensaiadas simultaneamente e realizar a interrupção individual das amostras de forma automática caso a corrente de fuga exceda 60 mA por mais de dois segundos. Os valores de corrente de fuga são medidos, indiretamente, a partir da queda de tensão sobre resistores *shunt* de 50 Ω instalados em série com cada amostra. Os valores de tensão sobre os resistores *shunt* são condicionados por meio de um circuito de medição que permite adequar o nível de tensão às entradas analógicas do microcontrolador, isto é, entre 0 V e 5 V. No microcontrolador é realizado o tratamento do sinal de tensão obtido pelo circuito de medição, o cálculo do valor eficaz da corrente e o monitoramento do critério de parada da corrente de fuga. A calibração do circuito de medição da corrente de fuga foi realizada por meio da comparação com valores de tensão medidos por um osciloscópio digital para quatro diferentes formas de onda alternadas e valores até 5 V_{rms} , que corresponde a correntes de até 100 mA. Os resultados evidenciaram que o circuito proporcionou medições próximas aos valores medidos pelo osciloscópio, com erros inferiores a 11%. Para valores de corrente entre 30 mA e 80 mA, os erros foram inferiores a 6%.

Palavras-chave: Arduino. Corrente de fuga. Erosão. Polímeros. Trilhamento elétrico.

ABSTRACT

This paper aimed at the design and development of a data acquisition and control system using the Arduino open-source platform to automate equipment responsible for the IEC 60587 electrical tracking and erosion test. The developed system allows the selection of protection resistors specified by the standard from the voltage value informed by the operator, monitoring of the leakage current flowing over five samples simultaneously tested and automatically interrupts the samples if the leakage current exceeds 60 mA for more than two seconds. The leakage current values are measured indirectly from the voltage drop across 50 Ω shunt resistors installed in series with each sample. The voltage values on the shunt resistors are conditioned by a measuring circuit that allows the voltage level to be adjusted to the analog inputs of the microcontroller, ie, between 0 V and 5 V. The microcontroller treatment performs the voltage signal obtained by the measuring circuit, the calculation of the RMS value of the current and stop criterion monitoring the leakage current. The calibration of the leakage current measurement circuit was performed by comparing voltage values measured by a digital oscilloscope for four different alternate waveforms and values up to 5 V_{rms} , corresponding to currents up to 100 mA. The results showed that the circuit provided measurements close to the values measured by the oscilloscope, with errors below 11%. For current values between 30 mA and 80 mA, the errors were less than 6%.

Keywords: Arduino. Electrical tracking. Erosion. Leakage current. Polymers.

1 Introdução

Materiais poliméricos têm sido largamente utilizados como alternativa aos tradicionais materiais cerâmicos empregados na isolação dos equipamentos do sistema elétrico de potência. As principais causas estão associadas aos melhores desempenhos em regiões com altos níveis de poluição, às propriedades hidrofóbicas e à maior resistência ao vandalismo (FERREIRA, 2007; GERMANO, 2010). No entanto, as incertezas quanto ao tempo de vida útil e os mecanismos de falhas dos polímeros comprometem a confiabilidade desses materiais (THOMAZINI, 2009; SANTOS, 2016; XAVIER, 2017).

A isolação externa dos equipamentos elétricos está constantemente exposta a agentes ambientais (radiação UV, poluição, temperatura e umidade) que promovem o envelhecimento do material polimérico. Além disso, a exposição contínua aos esforços elétricos pode provocar a ocorrência de descargas superficiais na isolação e resultar na formação de um caminho condutivo permanente devido à carbonização do material (trilhamento) e à perda de massa (erosão) ao longo do tempo (SANTOS, 2016). A degradação do material polimérico reduz a capacidade de isolamento dos equipamentos e pode conduzir a falha na isolação.

Para proporcionar uma maior eficiência e a durabilidade do material polimérico empregado na isolação externa, diversos testes são realizados em laboratório a fim de identificar e evitar que materiais com propriedades inadequadas ou susceptíveis a falha sejam utilizados na isolação de equipamentos elétricos. Entre os testes, o método proposto pela norma IEC 60587 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007) permite avaliar a resistência dos materiais poliméricos aos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão. O método simula, de maneira acelerada e padronizada, os vários eventos envolvidos no processo, como poluição, umidade e estresse elétrico.

Para a realização do ensaio proposto na IEC 60587, alguns parâmetros são pré-definidos em função do nível de tensão aplicado, como a seleção de resistores de proteção e a taxa de gotejamento da solução contaminante (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007). Além disso, o monitoramento da corrente de fuga das amostras deve ser realizado durante todo o ensaio, por ser utilizado como um dos critérios de parada.

As técnicas de medição e monitoramento de parâmetros do circuito são diversas e variam, entre outros fatores, conforme o projeto, a capacidade de isolação dos equipamentos de medição e os custos associados. Em particular, a medição de correntes de fuga em laboratório pode ser realizada pela conexão direta do equipamento de medição em série com o circuito ou, indiretamente, por meio da utilização de transformadores de instrumentos, transdutores ou pela medição da queda de tensão sobre resistores *shunt*. Em geral, o método de medição pela queda de tensão sobre resistores *shunt* é bastante utilizado devido à baixa complexidade, à facilidade de montagem do arranjo, aos custos reduzidos e à possibilidade de medição de correntes em sistemas de alta tensão.

Nesse contexto, Silva (2014) desenvolveu um circuito eletrônico de proteção e aquisição de dados para a realização de ensaio de trilhamento elétrico e erosão baseado na norma IEC 60112 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2009). Ainda que o arranjo experimental e a metodologia sejam diferentes da norma IEC 60587, o sistema permitia a medição da corrente de fuga por meio da queda de tensão sobre resistores *shunt*. O sistema de medição possuía acoplamento óptico formado por dois circuitos eletrônicos que permitiam a conversão do sinal elétrico em óptico e vice-versa. O sistema de aquisição foi composto por uma placa comercial da *National Instruments* e o *software* foi desenvolvido em *Labview®*.

Santos (2016) apresentou uma metodologia para montagem de um arranjo experimental em laboratório que possibilitava a realização do ensaio proposto pela IEC 60587 para avaliação do trilhamento elétrico e da erosão. O arranjo proposto permitia a avaliação de apenas uma amostra por ensaio e a seleção dos resistores de proteção era realizada de forma manual. O monitoramento da corrente de fuga foi realizado a partir da queda de tensão sobre um resistor *shunt* utilizando um microcontrolador Arduino. Na ocorrência de falhas, a interrupção da amostra foi realizada na parte de baixa tensão do circuito. No entanto, a medição da tensão sobre o resistor *shunt* foi realizada pela conexão direta à porta analógica do microcontrolador, isto é, sem a utilização de circuitos que permitissem o condicionamento do sinal. A proteção da porta analógica foi realizada apenas pela conexão de um *gap* em paralelo com o resistor *shunt*.

O presente trabalho tem como objetivo mostrar a arquitetura adotada no desenvolvimento de um circuito

dedicado ao controle e monitoramento de parâmetros do ensaio de trilhamento elétrico e erosão proposto pela norma IEC 60587. O sistema foi desenvolvido a partir da plataforma Arduino, escolhida pelo fato de ser *open source* e proporcionar baixo custo para o projeto. Além disso, o sistema permite o ensaio simultâneo de até cinco amostras com a interrupção individual na ocorrência de falhas, proporcionando maior flexibilidade aos estudos envolvendo materiais.

O texto encontra-se dividido nas seguintes seções: na seção 2 é realizada uma descrição dos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão; na seção 3 é apresentada a metodologia proposta pela norma IEC 60587 para a realização do ensaio de trilhamento elétrico e erosão; na seção 4 são apresentados o projeto e a concepção do sistema desenvolvido no presente trabalho; na seção 5 são especificados os métodos para avaliação do sistema; na seção 6 são apresentados os resultados obtidos; e na seção 7 são apresentadas as considerações finais.

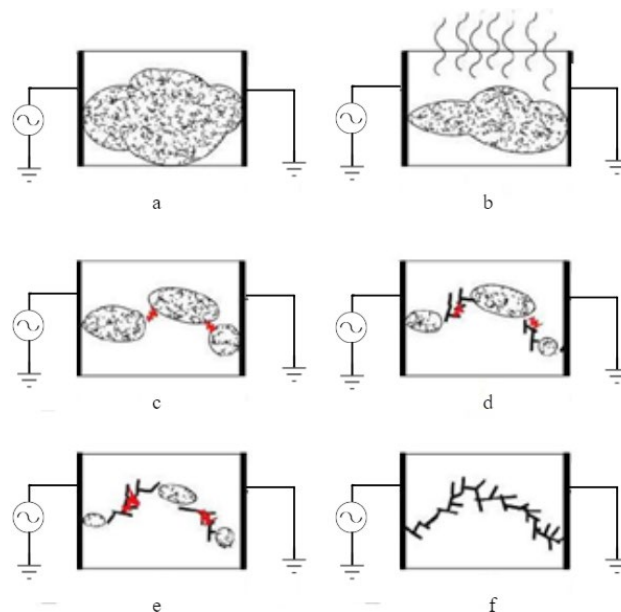
2 Trilhamento elétrico e erosão

O trilhamento elétrico consiste na formação de um caminho condutivo originado pela carbonização da superfície do material polimérico mediante a ação de descargas elétricas. A erosão corresponde à perda gradual de massa provocada pela ocorrência de descargas localizadas na superfície do material isolante (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2010).

A resistência do material isolante ao trilhamento elétrico depende das suas propriedades físico-químicas, das condições ambientais e da intensidade do campo elétrico aplicado (SALAMA; SALLAM, 1992). O processo evolutivo do trilhamento elétrico e da erosão no material polimérico pode ser dividido em seis etapas, conforme se pode visualizar na Figura 1.

Os processos naturais de umidificação e poluição superficial da isolação externa ocasionam a formação de uma camada condutiva, que reduz a resistência superficial e intensifica a circulação de correntes de fuga (Figura 1a). A intensificação das correntes de fuga provoca um aquecimento local e a evaporação da camada condutiva (Figura 1b). A não uniformidade do processo de evaporação da solução resulta na formação de bandas secas na superfície do material (Figura 1c). As bandas secas provocam a interrupção da corrente superficial e o aumento do campo elétrico entre as regiões úmidas (MALIK; AL-ARAINY; QURESHI, 1998).

Figura 1 – Processo de trilhamento elétrico e erosão



Fonte: Malik, Al-Arainy e Qureshi (1998)

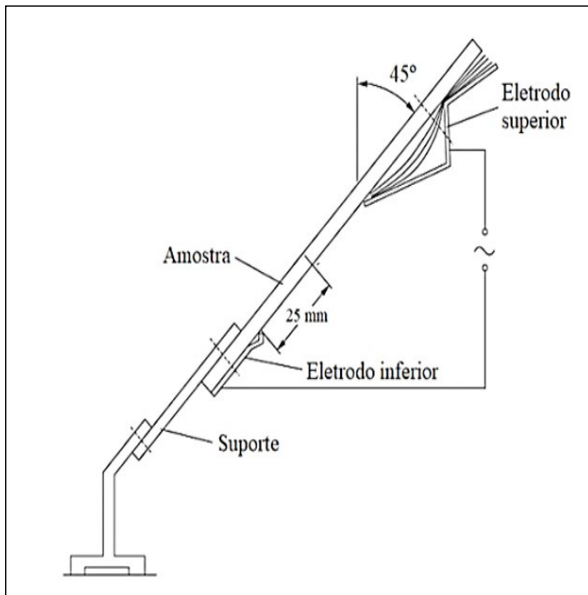
A intensificação do campo elétrico resulta na formação de descargas superficiais, que provocam uma elevação na temperatura superficial e ocasionam a formação de erosão e trilhas condutivas (Figura 1d). A propagação e o aumento dos caminhos condutivos, indicados na Figura 1e, podem ocasionar a ruptura completa da superfície do material polimérico (Figura 1f). Consequentemente, o material se comporta como um condutor elétrico (MALIK; AL-ARAINY; QURESHI, 1998).

Diversos métodos de ensaio são propostos para a avaliação da resistência de um material aos fenômenos de trilhamento elétrico e de erosão. Em geral, os ensaios visam simular, de maneira acelerada e padronizada, os diversos eventos envolvidos no processo, como poluição, umidade e estresse elétrico. Atualmente, os procedimentos empregados para a realização dos ensaios de trilhamento elétrico e erosão são baseados nas recomendações da norma IEC 60587 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007). As normas NBR 10296 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) e ASTM D2303 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2013) descrevem procedimentos análogos aos constantes na IEC 60587 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007).

3 Metodologia proposta pela IEC 60587

O método para a avaliação da resistência ao trilhamento elétrico e à erosão proposto pela IEC 60587 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007) consiste no posicionamento de cinco corpos de prova retangulares (50 mm x 120 mm) com a superfície plana de ensaio voltada para baixo e inclinada de 45° da horizontal, conforme ilustrado na Figura 2. A fixação é realizada por meio de eletrodos com formas específicas, separados de 50 ± 0,5 mm.

Figura 2 – Vista lateral do arranjo para uma amostra no teste de trilhamento elétrico e erosão sob um plano inclinado



Fonte: Adaptado de International Electrotechnical Commission (2007)

Os corpos de prova são submetidos a tensões alternadas entre 1 kV e 6 kV na frequência industrial, enquanto uma solução contaminante é escoada uniformemente sobre a superfície de ensaio a uma taxa específica que está associada ao nível de tensão aplicado. A solução deve possuir uma resistividade de 3,95 Ωm, sendo composta por cloreto de amônio e agente molhante não iônico diluídos em água destilada em proporções especificadas na norma IEC 60587 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007).

O arranjo para o ensaio de trilhamento elétrico e erosão é configurado conforme o nível de tensão aplicado. Na norma IEC 60587 são especificados dois métodos para aplicação de tensão: tensão constante

de trilhamento e tensão de trilhamento em degraus. O primeiro método consiste em submeter os corpos de prova a uma tensão constante por um período de seis horas. O segundo método consiste na aplicação de uma tensão inicial, aumentada em degraus de 250 V para cada hora subsequente (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007).

Os dois métodos para a realização do ensaio de trilhamento e erosão sob um plano inclinado possuem critérios de parada. Assim, o ensaio deve ser constantemente monitorado, devendo ser interrompido se ocorrer alguma das situações listadas:

- a) a corrente de fuga em uma das amostras exceder 60 mA por mais de 2 segundos;
- b) o trilhamento exceder 25 mm de comprimento a partir do eletrodo inferior (Figura 2);
- c) a amostra apresentar um furo devido à erosão;
- d) inflamabilidade da amostra.

A ocorrência de alguma das falhas citadas anteriormente implica a reprovação de todo o lote de amostras do ensaio.

A avaliação do critério “a” pode ser realizada a partir do desenvolvimento de um sistema de controle para monitoramento da corrente de fuga de cada amostra. O sistema permite interromper automaticamente o circuito quando o critério de parada for atendido e registrar os valores medidos durante o ensaio.

A interrupção resultante da ocorrência dos demais critérios pode ser realizada de forma manual pelo operador ou a partir da implementação de técnicas ou da instalação de dispositivos específicos. Os critérios “b” a “d” estão fora do escopo deste trabalho.

4 Equipamento de trilhamento elétrico e erosão

Nesta seção, o princípio de funcionamento e a arquitetura do sistema proposto para automação do equipamento utilizado na realização de ensaios de trilhamento elétrico e erosão são descritos.

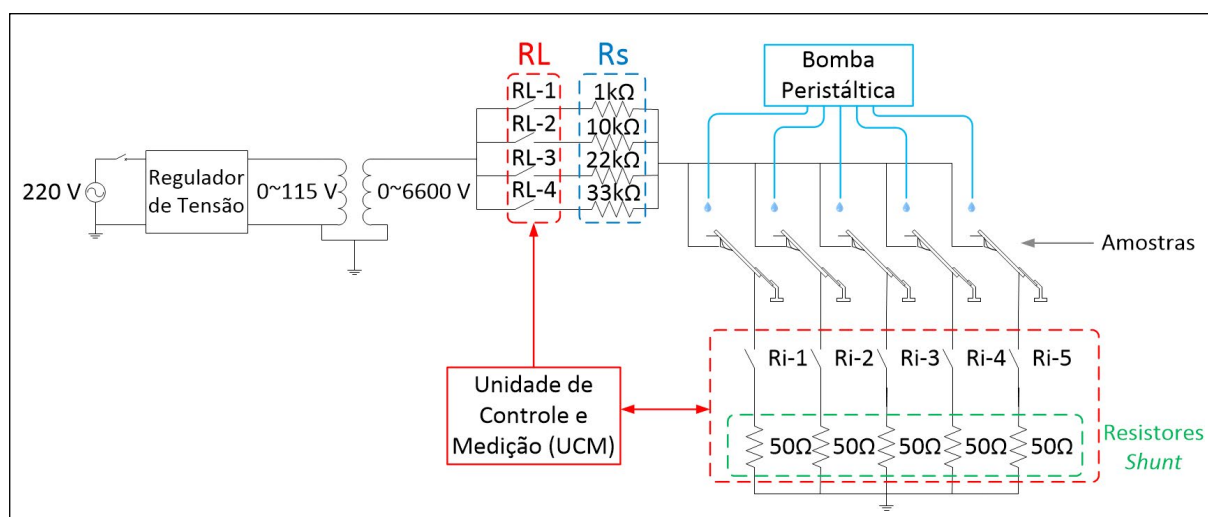
4.1 Arquitetura do sistema

O diagrama esquemático do circuito utilizado no equipamento projetado para a realização de ensaios de trilhamento elétrico e erosão pode ser visualizado na Figura 3.

O circuito ilustrado na Figura 3 é composto por um regulador de tensão, um transformador elevador de tensão (115 V / 6.600 V), relés de média tensão RL e Ri, resistores Rs para proteção e limitação de corrente, amostras, bomba peristáltica, resistores *shunt* para medição e a unidade de controle e medição.

A seleção dos resistores Rs utilizados para limitação de corrente está associada ao nível de tensão aplicado no ensaio e é realizada por meio do acionamento dos relés de média tensão RL. A Tabela 1 ilustra o valor do resistor Rs que deve ser utilizado no ensaio de acordo com o nível de tensão aplicado às amostras.

Figura 3 – Representação da arquitetura do circuito projetado para o equipamento de trilhamento elétrico e erosão



Fonte: Elaboração própria

Tabela 1 – Resistência série utilizada, de acordo com o nível de tensão aplicado

Tensão	Resistência série (Rs)
1,00 kV – 1,75 kV	1 kΩ
2,00 kV – 2,75 kV	10 kΩ
3,00 kV – 3,75 kV	22 kΩ
4,00 kV – 6,00 kV	33 kΩ

Fonte: Adaptado de International Electrotechnical Commission (2007)

A medição da corrente de fuga é realizada, indiretamente, a partir da queda de tensão sobre resistores *shunt* de 50 Ω. Os sinais de tensão sobre os resistores *shunt* são enviados para a Unidade de Controle e Medição (UCM). Os relés de média tensão Ri são utilizados para a seleção individual das amostras que serão analisadas e para a interrupção do ensaio, caso ocorra falha.

Conforme a norma IEC 60587, a falha de uma amostra resulta na reprovação do lote ensaiado (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2007). No entanto, visando à realização

de pesquisas e estudos mais aprofundados, o sistema desenvolvido neste trabalho também permite a interrupção individual da corrente de cada amostra, possibilitando a interrupção do ensaio somente das amostras em que ocorreu a falha, sem comprometer a continuidade do ensaio para as demais amostras.

4.2 Unidade de Controle e Medição

A Unidade de Controle e Medição (UCM) é responsável pela seleção dos resistores de proteção, pela interrupção das amostras na ocorrência de falha, pelo monitoramento e processamento dos sinais de corrente de fuga e pela aquisição das medições. A arquitetura da UCM foi baseada no trabalho de Nascimento Júnior *et al.* (2019) e seu esquema é apresentado na Figura 4 (página seguinte).

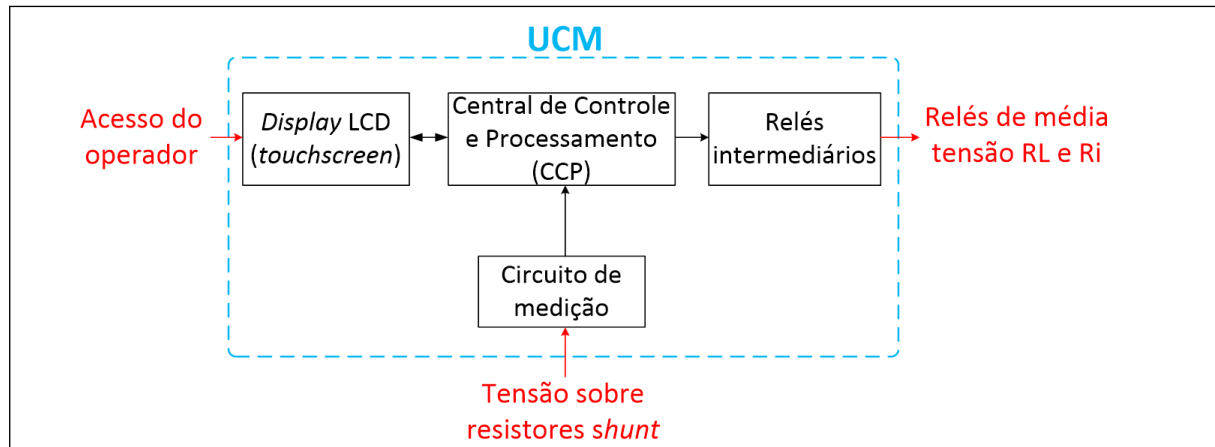
Basicamente, a UCM é composta por um LCD *touchscreen*, uma Central de Controle e Processamento (CCP), um módulo de relés intermediários e um circuito para medição da corrente de fuga. O LCD *touchscreen* permite a interface do equipamento com o usuário para ajustes dos parâmetros e o monitoramento dos valores de corrente de fuga em cada amostra sob ensaio. O

operador pode definir o método de ensaio, a tensão aplicada e as amostras que serão utilizadas.

A CCP é responsável pelo processamento dos sinais de corrente de fuga obtidos do circuito de medição e pelo acionamento dos relés de média tensão, RL e Ri, a partir de um módulo de relés intermediários.

Os relés intermediários são de baixa tensão e utilizados, exclusivamente, para chavear o sinal de comando das bobinas dos relés de média tensão RL e Ri. A CCP também realiza a verificação contínua do critério de parada para a corrente de fuga e comanda a interrupção da amostra na ocorrência de falha.

Figura 4 – Esquema da unidade de controle e medição



Fonte: Elaboração própria

A central de controle e processamento é composta pela placa Arduino Mega 2560 e por um dispositivo de armazenamento externo. A placa selecionada é baseada no microcontrolador ATmega2560, que possibilita flexibilidade e baixo custo para o desenvolvimento do sistema.

O Arduino Mega 2560 possui 54 pinos de entradas e saídas digitais e 16 pinos de entradas analógicas, o que proporciona um número suficiente de entradas e saídas para medição dos sinais de tensão sobre os resistores *shunt* e possibilita a conexão de periféricos como LCD e relés intermediários. Além disso, o microcontrolador selecionado possui uma memória de 256 kB e um conversor A/D de 10 bits, o que permite realizar o processamento dos sinais de corrente de fuga com precisão.

4.3 Circuito de medição da corrente de fuga

O circuito de medição permite que o sinal de tensão medido no resistor *shunt* seja condicionado para um nível de tensão adequado às entradas analógicas do microcontrolador, isto é, entre 0 V e 5 V. A arquitetura do circuito pode ser visualizada na Figura 5.

Na Figura 5, o sinal de entrada é atenuado em 1/3 por meio de um divisor de tensão resistivo e adicionado

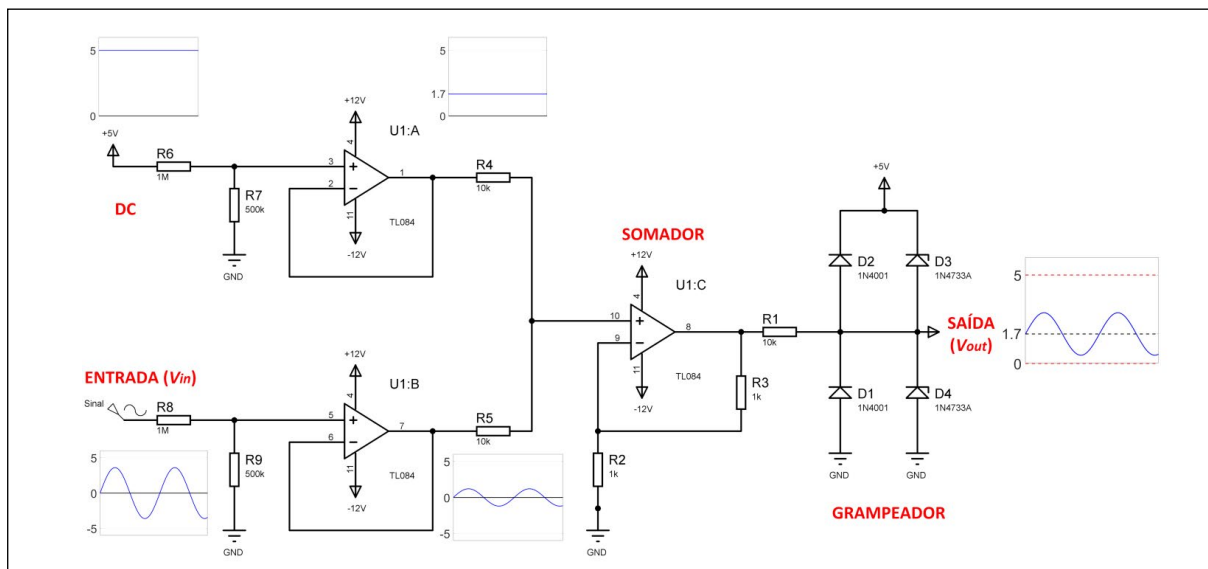
de um nível DC positivo com o objetivo de eliminar valores negativos. A adição do nível DC ao sinal é realizada por meio de um amplificador operacional configurado como somador.

O circuito foi projetado para permitir a medição de correntes inferiores a 100 mA com precisão. Para correntes superiores a 100 mA, o grampeamento da tensão no circuito de medição ocorre por meio de diodos instalados após o somador. O circuito grampeador permite limitar o nível de tensão da saída na ocorrência de sobretensões e proteger o microcontrolador.

Na Figura 6 é possível visualizar o comportamento do sinal de saída do circuito de medição para uma tensão senoidal com amplitude entre 7 V_p e -7 V_p aplicada na entrada do circuito. Para esse nível de tensão são medidos valores de corrente de fuga *rms* inferiores a 100 mA.

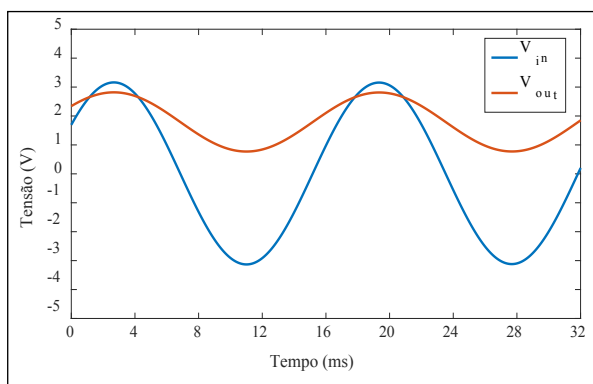
Quando se analisa a Figura 6, evidencia-se que o sinal de saída possui uma forma de onda proporcional ao sinal de entrada, sendo realizada apenas uma atenuação e adição de um nível DC. Assim, o sinal de saída apresenta níveis de tensão adequados à operação das portas analógicas do microcontrolador (entre 0 V e 5 V), o que possibilita a medição com precisão.

Figura 5 – Representação do circuito de aquisição e condicionamento da tensão sobre os *shunts*



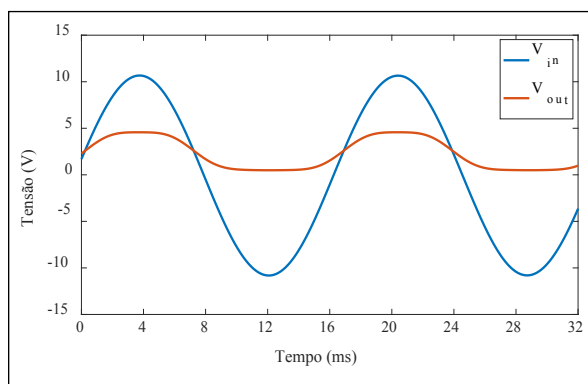
Fonte: Elaboração própria

Figura 6 – Sinais de entrada (V_{in}) e de saída (V_{out}) do circuito de medição para entrada em condições normais



Fonte: Elaboração própria

Figura 7 – Sinais de entrada (V_{in}) e de saída (V_{out}) do circuito de medição para condições de sobretensão na entrada



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 7 é ilustrado o comportamento do sinal de saída do circuito de medição após atuação do circuito grampeador, ocasionado pela aplicação de uma sobretensão na entrada do circuito de medição. Para tanto, uma tensão senoidal com amplitude superior a 7 V_p foi aplicada na entrada do circuito de medição. Nessa situação, os valores *rms* medidos para a corrente de fuga são superiores a 100 mA.

Quando se analisa a Figura 7, evidencia-se que a forma de onda do sinal de saída do circuito sofre distorções devido à atuação dos diodos utilizados para proteção do microcontrolador. Os diodos limitam a tensão na saída e, conseqüentemente, os valores calculados na CCP tenderão a apresentar maiores

erros quando comparados ao sinal original. Contudo, o grampeamento da tensão para valores de corrente de fuga superiores a 100 mA não representa uma limitação para o equipamento, pois a interrupção da amostra deve ocorrer caso a corrente de fuga exceda 60 mA por mais de dois segundos.

4.4 Tratamento e armazenamento dos dados

Os sinais de tensão sobre os resistores *shunt*, condicionados no circuito de medição, são processados na CCP para o monitoramento da corrente de fuga. Para a determinação do valor eficaz da tensão, a

compensação do sinal de saída é realizada a partir da aplicação do procedimento oposto ao empregado para o circuito de medição, descrito na seção anterior. O sinal condicionado é subtraído do valor da tensão do nível DC e o resultado é multiplicado por um fator 3 para compensar a atenuação do sinal no divisor resistivo do circuito de medição. O valor eficaz da tensão é calculado usando a Equação 1:

$$v_{RMS}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt} \quad (1)$$

em que: v_{RMS} é a tensão eficaz, em volt (V); T é o período, em segundos (s); $v(t)$ é a tensão, em volt (V).

No microcontrolador utilizado, a taxa de leitura máxima de um sinal analógico é de, aproximadamente, 10.000 leituras por segundo (ARDUINO, 2019). Assim, para o cálculo da tensão eficaz do sinal medido sobre o resistor *shunt*, são utilizados 166 pontos de medição para cada período do sinal, considerando a frequência industrial de 60 Hz.

O valor eficaz da corrente de fuga em cada amostra é obtido pela aplicação direta da lei de Ohm, razão entre os valores da tensão eficaz e da resistência *shunt*. O tempo de processamento dos sinais de tensão e de medição da corrente de fuga para as cinco amostras tem uma duração de, aproximadamente, 1 segundo. Os valores eficazes da corrente de fuga são armazenados em uma memória externa a cada três medições realizadas. Para cada medição, o critério de parada da corrente é verificado, conforme especificado na norma IEC 60587. O critério de parada é atingido se a corrente de fuga na amostra atingir $60 \text{ mA} \pm 10\%$ ou superior e se esse valor persistir por 2 ou 3 segundos.

4.5 Interface gráfica

A programação da interface gráfica foi desenvolvida na linguagem C++, no próprio IDE (*Integrated Development Environment*) do Arduino, sendo utilizadas bibliotecas presentes no próprio *software*, adicionadas das bibliotecas referentes ao LCD. O procedimento básico para criação da interface consiste em exibir na tela as informações requeridas e botões que permitam obter as respostas do usuário.

Para formação dos botões, regiões especificadas a partir das coordenadas dos vértices do polígono responsável pela forma do botão são definidas. Cada interação do operador com o LCD retorna o ponto exato onde houve um toque na tela, permitindo definir se houve ou não o acionamento externo de um botão.

Na Figura 8 é ilustrada uma das telas da interface, que permite selecionar as amostras que serão testadas.

Figura 8 – Tela de seleção das amostras que serão submetidas à tensão



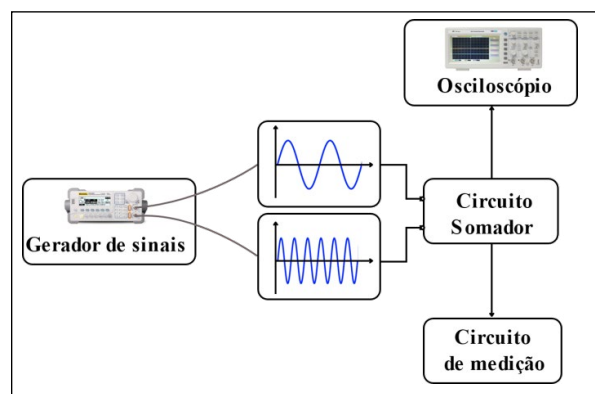
Fonte: Elaboração própria

5 Avaliação do circuito de medição

A calibração do circuito de medição foi avaliada pelo método comparativo, tendo como referência um osciloscópio digital calibrado. Para os testes de calibração, quatro diferentes sinais de tensão foram adotados: senoidal, dente de serra e duas formas de onda com distorção harmônica total (THD) de 20% e 25%. As duas últimas formas de onda foram obtidas por meio da soma de sinais senoidais com diferentes frequências. Os sinais de tensão foram aplicados com valores de até $5 V_{rms}$, que correspondem à queda de tensão medida sobre os resistores *shunt* para correntes de até 100 mA.

Na Figura 9 é ilustrado o diagrama esquemático do arranjo utilizado para realização das medições.

Figura 9 – Diagrama esquemático para avaliação do circuito de medição

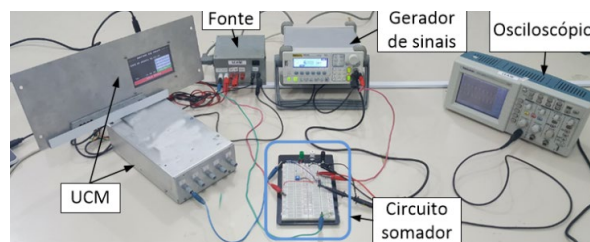


Fonte: Elaboração própria

O circuito ilustrado na Figura 9 é composto por um gerador de sinais DG 1022 RIGOL, um osciloscópio digital Tektronix TDS 2012, um circuito somador e o circuito de medição desenvolvido. O gerador de sinais foi utilizado para a geração do sinal dente de serra e de sinais senoidais com diferentes frequências. O circuito somador foi utilizado para realizar a soma entre sinais senoidais com frequência de 60 Hz e sinais senoidais com frequências superiores, com o objetivo de obter os sinais com forma de onda apresentando distorção harmônica total de 20% e 25%. Os valores eficazes dos sinais de tensão foram medidos por meio do osciloscópio digital (referência) e do circuito de medição.

serra e formas de onda com 20% e 25% de distorção, respectivamente.

Figura 11 – Montagem experimental realizada para testes de validação da UCM

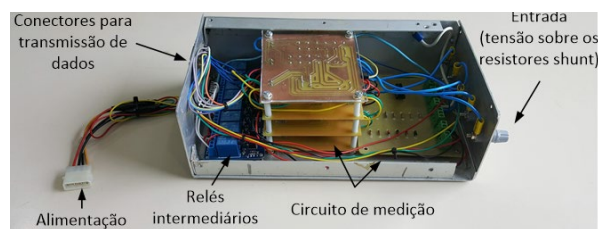


Fonte: Elaboração própria

6 Resultados

O circuito de medição e os relés intermediários foram acondicionados em uma caixa metálica que contém bornes de entrada para medição da queda de tensão sobre os resistores *shunt*. Além disso, conectores foram instalados na caixa para a comunicação com o LCD, a CCP e o comando dos relés de média tensão. Na Figura 10 é possível visualizar os componentes acondicionados no interior da caixa metálica.

Figura 10 – Fotografia dos componentes acondicionados no interior da caixa metálica



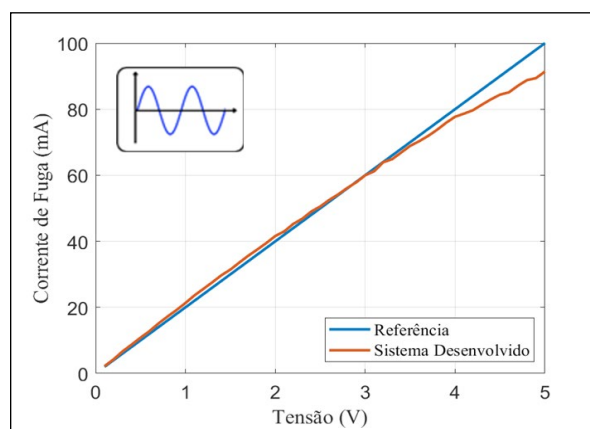
Fonte: Elaboração própria

A precisão do circuito de medição foi avaliada para quatro diferentes formas de onda. Na Figura 11 é apresentado o arranjo experimental utilizado para avaliação do circuito de medição.

O sinal aplicado na entrada do circuito de medição foi obtido a partir de um gerador de sinais. Uma corrente de referência foi obtida dividindo-se a tensão *rms* de entrada pelo valor do resistor *shunt* (50 Ω).

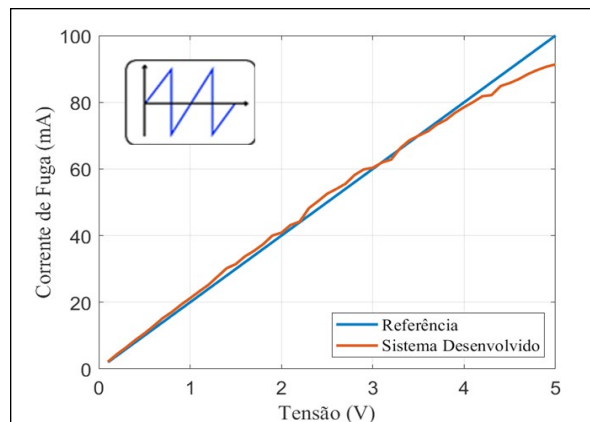
Nas Figuras 12 a 15 são ilustrados os valores da corrente de fuga medidos por meio do circuito de medição e, indiretamente, pelo osciloscópio para tensões com formas de onda senoidal, dente de

Figura 12 – Comparativo entre as correntes de fuga eficazes para entrada senoidal



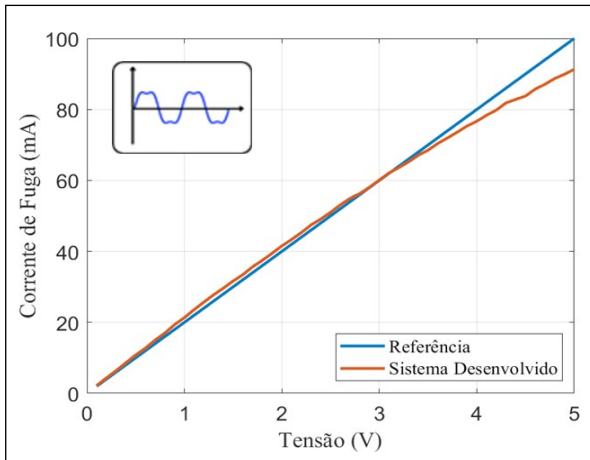
Fonte: Elaboração própria

Figura 13 – Comparativo entre as correntes de fuga eficazes para entrada com formato dente de serra



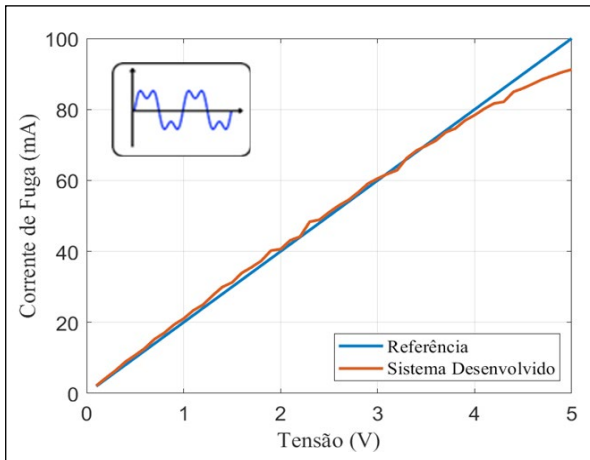
Fonte: Elaboração própria

Figura 14 – Comparativo entre as correntes de fuga eficazes para entrada com THD de 20%



Fonte: Elaboração própria

Figura 15 – Comparativo entre as correntes de fuga eficazes para entrada com THD de 25%

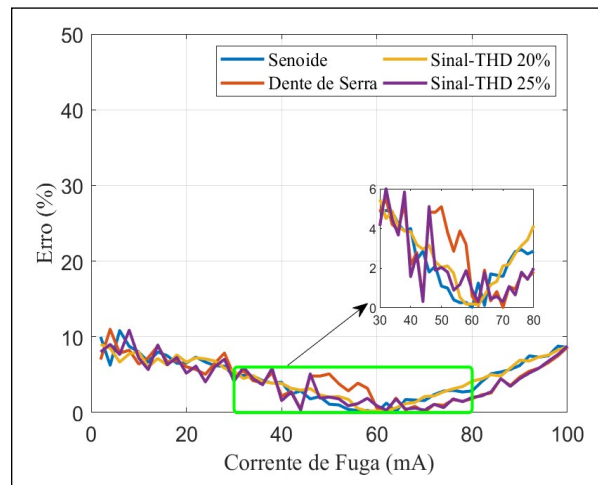


Fonte: Elaboração própria

Quando se analisam os gráficos ilustrados nas Figuras 12 a 15, evidencia-se que os valores de corrente de fuga medidos pelo sistema desenvolvido são bastante próximos aos valores medidos pelo osciloscópio, para valores até 80 mA. Para valores de corrente de fuga superiores a 80 mA, a medição realizada pelo sistema desenvolvido tende a divergir dos valores medidos pelo osciloscópio. Quando a tensão se aproxima de 5 *V_{rms}*, os diodos do circuito de condicionamento realizam o grampeamento do sinal medido, limitando a tensão de entrada do microcontrolador. Desse modo, próximo a 5 *V_{rms}*, a corrente medida foi menor que a de referência.

Na Figura 16 encontram-se ilustrados os erros percentuais calculados para cada medição realizada. Consta-se que o erro entre as medições realizadas pelo sistema desenvolvido e pelo osciloscópio para o intervalo de 30 mA a 80 mA (região verde) foi inferior a 6%.

Figura 16 – Erros referentes às medições da corrente de fuga eficaz para as diversas formas de onda de entrada



Fonte: Elaboração própria

Para valores de corrente de fuga inferiores a 30 mA e entre 80 mA e 100 mA, verifica-se uma tendência de aumento dos erros percentuais. Contudo, os valores foram inferiores a 11%. Para valores inferiores a 30 mA, o valor mais alto do erro justifica-se por pequenas variações na medição. Além disso, para baixos valores de tensão, o valor absoluto da corrente de fuga medido é muito baixo. Embora o sistema apresente uma medição próxima do valor de referência, conforme ilustrado nos gráficos das Figuras 12 a 15, o percentual de erro calculado é alto. O aumento do erro entre 80 mA e 100 mA deve-se ao grampeamento da tensão realizado pelos diodos do circuito de condicionamento.

De acordo com a IEC 60587, a corrente do critério de parada deve ser medida com uma precisão de 60 mA ± 10%. Com o sistema projetado, a corrente medida foi de 59,98 mA para a entrada senoidal quando o valor de referência foi de 60 mA, indicando um erro próximo de 0,33%. O maior erro obtido para a corrente de referência de 60 mA foi para a entrada com THD de 25%, para a qual o valor medido foi de 60,53 mA.

7 Considerações finais

Neste trabalho, a arquitetura para desenvolvimento do sistema de controle de um equipamento projetado para realização de ensaios de trilhamento elétrico e erosão foi apresentada. O projeto representa uma alternativa aos equipamentos de alto custo oferecidos no mercado e pode ser utilizado tanto para a prestação de serviços à comunidade externa como para a capacitação técnico-científica de alunos.

O equipamento atende aos critérios estabelecidos pela IEC 60587 para a avaliação e classificação de materiais poliméricos destinados a aplicações no isolamento elétrico. Além disso, o equipamento possui recurso dinâmico de interrupção de ensaio individual por amostra, o que permite realizar análises mais criteriosas e aprofundadas do material para fins de pesquisa acadêmica.

O sistema de controle e medição proposto foi baseado na utilização da plataforma Arduino, tendo em vista o custo-benefício e o atendimento a requisitos mínimos para medição. O sistema possibilitou a medição da corrente de fuga de forma precisa para valores inferiores a 100 mA, com erros inferiores a 11% para quatro diferentes formas de onda avaliadas. Além disso, o sistema permite o armazenamento dos dados para a realização de análises posteriores do desempenho do material isolante.

O circuito de medição proposto neste trabalho foi idealizado para a realização de medições de correntes de fuga até 100 mA. Embora exista uma tendência de aumento dos erros para valores superiores a 100 mA devido à limitação da tensão para proteção do microcontrolador, esse fato não representa uma grande limitação para o equipamento, pois a interrupção da amostra deve ocorrer caso a corrente de fuga exceda 60 mA por mais de dois segundos.

Como trabalhos futuros, o arranjo pode ser aperfeiçoado a partir da utilização de componentes com maior precisão e de uma proteção eletrônica com acoplamento óptico para medição da corrente de fuga, com utilização de fibras ópticas. Além disso, espera-se adaptar a tecnologia proposta para dispositivos móveis com o propósito de permitir o acompanhamento do ensaio a distância e/ou o acesso remoto ao equipamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em especial ao Laboratório

de Alta Tensão (LAT), pela disponibilização do ambiente, material e assistência para desenvolvimento do equipamento.

Os autores agradecem à Coordenadoria de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Copele) – UFCG pelo apoio e incentivo à pesquisa.

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por fomentar esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D2303**: Standard test method for liquid-contaminant, inclined-plane packing and erosion of insulating materials. West Conshohocken: ASTM, 2013.

ARDUINO. **analogRead()**. 2019. Disponível em: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/analog-io/analogread/>. Acesso em: 14 out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10296**: Material isolante elétrico – avaliação de sua resistência ao trilhamento elétrico e erosão sob severas condições ambientais. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

FERREIRA, T. V. **Estudo do trilhamento de núcleo em isoladores poliméricos**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

GERMANO, A. D. **Análise da degradação de isolamentos poliméricos**. 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. **IEC 60050-212**: International Electrotechnical Vocabulary – Part 212: electrical insulating solids, liquids, and gases. Genebra: IEC, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. **IEC 60112**: Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials. Genebra: IEC, 2009.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. **IEC 60587**: Electrical insulating materials used under severe ambient conditions: test methods for evaluating resistance to tracking and erosion. Genebra: IEC, 2007.

MALIK, N. H.; AL-ARAINY, A. A.; QURESHI, M. I. **Electrical insulation in power systems**. Nova York: Marcel Dekker, 1998.

NASCIMENTO JUNIOR, V. *et al.* Sistema de controle e monitoramento para equipamento de trilhamento elétrico e erosão. *In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED DIELECTRICS AND APPLICATIONS (IWADA)*, 3., 2019, Campina Grande. **Proceedings** [...] Campina Grande: UFCG, 2019.

SALAMA, M. M. A.; SALLAM, M. M. A mathematical model for tracking time calculation for polymeric materials. *In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION*, 1992, Baltimore, EUA. **Conference Record** [...] Baltimore, EUA: IEEE, 1992.

SANTOS, K. O. **Equipamento para ensaios de trilhamento e erosão em isolamentos poliméricos**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SILVA, R. F. **Trilhamento elétrico sobre materiais poliméricos pela análise da energia absorvida devido as descargas elétricas superficiais**. 2014. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

THOMAZINI, D. **Classificação da hidrofobicidade em isoladores elétricos poliméricos de alta tensão**. 2009. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

XAVIER, J. A. R. **Ajustamento de técnica de monitoração remota de poluição em cadeias de isoladores a partir de aferições laboratoriais**. 2017. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

