



República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial



(21) BR 102021025159-0 A2

(22) Data do Depósito: 15/12/2021

(43) Data da Publicação Nacional:
27/06/2023

(54) Título: TÉCNICA PARA CLASSIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

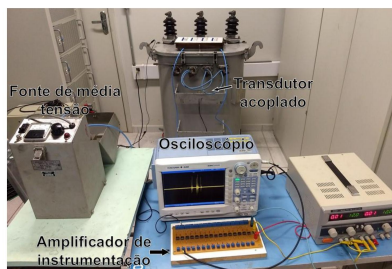
(51) Int. Cl.: G01R 31/62; G08C 17/02; B06B 1/06.

(52) CPC: G01R 31/62; G08C 17/02; B06B 1/06.

(71) Depositante(es): UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO.

(72) Inventor(es): BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO; AMANDA BINOTTO; ANDRÉ LUIZ ANDREOLI.

(57) Resumo: TÉCNICA PARA CLASSIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES. A presente invenção se refere a uma nova técnica de monitoramento e diagnóstico de descargas elétricas em transformadores, utilizando sensores de emissão acústica, técnicas de análise de dados e sistemas inteligentes. A técnica apresentada é capaz de avaliar a severidade e a evolução de falhas em transformadores, bem como classificá-las. A técnica também pode ser utilizada para o diagnóstico e monitoramento de outros tipos de falhas e outros tipos de dispositivos como máquinas rotativas, cabos e dispositivos de proteção de sistemas elétricos.



TÉCNICA PARA CLASSIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

Campo da invenção:

[001] Os transformadores desempenham um papel de significativa importância no sistema elétrico de potência de um país e falhas totais nessas máquinas elétricas podem gerar ônus financeiro devido a seu alto custo, comprometer os índices de qualidade do fornecimento de energia elétrica, bem como a produtividade industrial. Por esse motivo, sistemas com o objetivo de se diagnosticar falhas insipientes nos transformadores vem sendo desenvolvidas com intuito de garantir eficácia no fornecimento de energia e otimizar gastos com manutenções pontuais e planejadas. O objetivo é evitar que falhas acometam o transformador e ocasionem falta de energia elétrica, manutenções de alto custo ou mesmo a perda total do transformador.

[002] Neste contexto, o desenvolvimento de sensores e técnicas de processamento digital de sinais aplicados à identificação da condição de operação do transformador torna-se primordial, uma vez que esses dispositivos, tanto em meio urbano quanto nas subestações podem sofrer inesperados esforços térmicos, mecânicos, elétricos ou ambientais. Nos estágios antecedentes à falha total do transformador é comum se detectar descargas elétricas devido à deterioração do isolamento da máquina elétrica.

[003] Neste contexto, a presente invenção refere-se a uma nova técnica que permite a classificação e o diagnóstico de evolução de falhas em transformadores por

meio de transdutores piezelétricos de baixo custo, técnicas de processamento digital de sinais e sistemas inteligentes. Apenas um único transdutor piezelétrico de baixo custo é necessário para a execução deste invento.

[004] A técnica apresentada é capaz de avaliar a evolução de uma falha no decorrer do tempo e classificar seu tipo. A identificação do nível de severidade de um dano é fundamental para uma precisa avaliação do instante de manutenção, tendo em vista que descargas elétricas se iniciam de forma incipiente e evoluem no decorrer do tempo devido à emissão de radiação ultravioleta, que outorga uma deterioração dos materiais de isolação por efeito cumulativo. Já a classificação do tipo de falha também tem importância prática pois pontos distintos requerem diferentes ações de manutenção.

[005] O invento também pode ser aplicado a outros tipos de avarias em transformadores ou para diagnosticar descargas em outros tipos de máquinas elétricas.

Estado da técnica:

[006] O desejo por sistemas de monitoramento em transformadores tem avançado nos últimos anos. Este anseio vem dos setores da indústria e da pesquisa. Pelo método científico, o monitoramento e detecção de falhas significa conquistar um novo patamar no controle de prevenção de falhas destas máquinas. Do ponto de vista industrial, sistemas controlados fornecem uma visão ampla do funcionamento da máquina elétrica e economia em suas manutenções. Além disso podem evitar o significativo ônus financeiro ocasionado por possível perda total do

transformador. É desejável que os sistemas de monitoramento e consequentemente o diagnóstico de falhas insipientes em transformadores seja efetuado por metodologias minimamente invasivas (VELÁSQUEZ, R. M. A., **Support vector machine and tree models for oil and kraft degradation in power transformers**, Engineering Failure Analysis, v. 127, p. 105488, 2021). Neste contexto, o desenvolvimento de sensores e técnicas de processamento digital de sinais aplicados à identificação da condição de operação do transformador torna-se primordial, uma vez que esses dispositivos, tanto em meio urbano quanto nas subestações podem sofrer inesperados esforços térmicos, mecânicos, elétricos ou ambientais (FUHR, J.; ASCHWANDEN, T., **Identification and localization of pd-sources in power-transformers and power-generators**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 24, p. 17 - 30, 2017). Esses fatores críticos podem induzir uma lenta degradação das propriedades físico-químicas dos materiais isolantes que compõe o transformador, culminando com sua parada ou falha total. Nos estágios antecedentes à falha total do transformador é comum se detectar a ocorrência de descargas elétricas (parciais ou totais) (FUHR, J.; ASCHWANDEN, T., **Identification and localization of pd-sources in power-transformers and power-generators**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 24, p. 17 - 30, 2017), (STONE, G. **Partial discharge. vii. practical techniques for measuring pd in operating equipment**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 7, p. 9-19, 1991), (CASTRO, B. A. et al. **Assessment of macro fiber composite sensors for measurement of acoustic partial**

discharge signals in power transformers. IEEE Sensors Journal, v. 17, p. 6090-6099, 2017.). De acordo com os estudos de Murugan e Ramasamy (2019) estima-se que 73,11 % dessas falhas em transformadores ocorrem em seu sistema de isolamento, nos enrolamentos ou nas buchas isoladoras (MURUGAN, R.; RAMASAMY, R., **Understanding the power transformer component failures for health index-based maintenance planning in electric utilities,** Engineering Failure Analysis, v. 96, p. 274 - 288, 2019).

[007] Nos casos das descargas elétricas que incidem em sistemas de isolamento e nos enrolamentos, as mesmas podem ocorrer pela degradação dos materiais dielétricos de espiras, formando um curto-circuito temporário ou permanente (SIKORSKI, W. **Development of acoustic emission sensor optimized for partial discharge monitoring in power transformers.** Sensors, v. 19, p. 1865, 2019). Essa degradação pode estar relacionada a operações em sobrecarga, falhas na impregnação do material isolante nos condutores ou mesmo contaminação do óleo. As descargas também podem se suceder como consequência de uma concentração local de campo em um meio dielétrico degradado, sendo comum em isoladores contaminados, parafusos mal fixados, em óleo vegetal ou mineral contaminado com gotículas de ar ou água etc. (CHRISTINA, A. et al. **Causes of transformer failures and diagnostic methods-a review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, p. 1442-1456, 2018). Baseado nessa problemática, a presença ou não de descargas está totalmente relacionada com a qualidade do isolamento do transformador e o monitoramento dessas avarias pode antever paradas

inesperadas ou mesmo a perda total da máquina devido a degradação de seu sistema de isolamento.

[008] As descargas elétricas, quando ocorrem, produzem ondas eletromagnéticas, calor, radiação luminosa, ondas acústicas, favorecendo ainda mais a degradação do sistema de isolamento do transformador (BARTLEY, W. H. **Analysis of transformer failures**. International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference - Stockholm, 2003), (ILKHECHI, H. D.; SAMIMI, M. H. **Applications of the acoustic method in partial discharge measurement: A review**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE, v. 28, p. 42-51, 2021), (STONE, G. **Partial discharge. vii. practical techniques for measuring pd in operating equipment**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 7, p. 9-19, 1991). Devido a isso, diversas metodologias para avaliação da presença dessas falhas foram propostas na literatura, como o método químico, apresentado no documento de patente US 6,391,096 B1, publicado em 21/05/2002, "Apparatus and method for extracting and analyzing gas", o método acústico, apresentado no documento de patente US 7,339.447 B2, publicado em 04/03/2008 "High-voltage transformer coil with acoustic wave guiding function", elétrico (ARDILA-REY, J. A. et al. **A comparison of inductive sensors in the characterization of partial discharges and electrical noise using the chromatic technique**. Sensors, v. 18, p. 1021, 2018), óptico, como abordado no documento de patente US 7,142.291 B2, publicado em 28/11/2006, "Detection of partial discharge or arcing in wiring via fiber optics", e método eletromagnético, apresentado no documento de patente US 8,008,926 B2,

publicado em 30/08/2011, "UHF partial discharge and location measuring device for high-voltage power devices". O objetivo dessas abordagens é diagnosticar a atividade de descargas por meio do sensoriamento de padrões de corrente elétrica, radiação luminosa, de ondas eletromagnéticas, acústicas ou mesmo de elementos químicos que emergem devido a mudanças nos padrões dos dielétricos.

[009] Muitos são os desafios para o aprimoramento deste tipo de teste em transformadores. Descargas podem ser produzidas tanto na parte interna, pela degradação da isolamento entre espiras da parte ativa da máquina, degradação do óleo isolante etc. como nos isoladores externos, que são constituídas pelas buchas de porcelana ou outro material sólido. Por exemplo, os isoladores externos podem estar sujeitos a intempéries, ter sua superfície danificada ou contaminada por depósito de materiais de menor rigidez dielétrica, como a própria poeira ambiental. Desta forma, o desenvolvimento de metodologias que culminem com a diferenciação de tipos de descargas, sendo elas em óleo isolante ou nos isoladores de porcelanas, é de extrema importância para o planejamento das ações antecipativas à falha total da máquina elétrica, uma vez que cada tipo de avaria requer diferentes ações e tempos de manutenção.

[010] Além disso, com as descargas ocorrem e perduram no transformador, a avaliação da severidade da atividade das descargas também se torna fundamental para o planejamento ou a identificação do caráter de urgência da manutenção.

[011] Devido a esse problema, diversos tipos de metodologias de diagnóstico de falhas foram desenvolvidos. No documento de patente WO 96/35128 publicado em 07/11/1996, "Monitoring of internal discharges on a power transformers", é descrito um sistema que detecta descargas parciais em transformadores por meio de sensores indutivos. Esses dispositivos captam sinais de corrente do transformador por meio do contato direto do sensor com a parte energizada do transformador. Entretanto, não existe avaliação do tipo de descarga acometida bem como da avaliação da severidade.

[012] Já no documento de patente WO 2015/195861 A1, publicado em 23 de dezembro de 2015, um aparato que mede corrente, tensão e temperatura foi inventado para o monitoramento de máquinas elétricas, podendo diagnosticar descargas parciais. O invento é baseado em sensores de eletromagnéticos com transmissão de dados em comunicação sem fio. O dispositivo capta os sinais das referidas variáveis e não é dotado de um sistema inteligente que possibilite a classificação e o diagnóstico de severidade das falhas que são enumeradas pelo documento.

[013] Outro tipo de abordagem para diagnóstico de avarias nos transformadores foi observado no documento de patente EP 3 109 958 A1, publicado em 28/12/2016, "Field control element for a high-voltage cable accessory and method of optically measuring partial discharges". O documento parte do princípio de que as descargas elétricas emitem radiação ultravioleta e descreve um sistema que utiliza sinais ópticos para o diagnóstico dessas falhas em

cabos e isoladores. Baseado no mesmo princípio físico, a fibra óptica é utilizada como elemento sensor de descargas no documento de patente US 7,142.291 B2, publicado em 28/11/2006 "Detection of partial discharge or arcing in wiring via fiber optics". Ambos os documentos não atestam a classificação nem a evolução do nível da avaria. Um outro fator primordial nesse aspecto é que os sensores ópticos são insensíveis à luz quando ela atravessa meios opacos. Já a técnica proposta por essa invenção, que se baseia na propagação de emissão acústica, não possui limitações de meios de propagação.

[014] Como discorrido, as descargas deterioram os materiais que compõe a isolação do transformador e, desta forma, liberam substâncias químicas no ambiente ou no próprio óleo isolante. Neste aspecto, o documento de patente US 6,391,096 B1, publicado em 21/05/2002, "Apparatus and method for extracting and analyzing gas", apresenta um dispositivo que faz a análise química do óleo de transformadores e detectam as descargas pela presença dos gases que elas liberam.

[015] Ainda no contexto da identificação de descargas, o método de diagnóstico por análise de fase, conhecido como PRPD, do inglês "*Phase-Resolved Partial Discharge*", classifica a descarga por meio da análise da fase da ocorrência dela. O método depende de sensores de corrente como descrito nos documentos de patente WO 2013/002897 A2, publicado em 13/01/2013, "Using values of PRPD envelope to classify single and multiple partial discharge (PD) defects in HV equipment" e no documento de patente US 7,076.404 B2,

publicado em 11/06/2006, "Method and apparatus for the analysis and monitoring of the partial discharge behavior of an electrical operating device". Embora eficaz essa metodologia depende da análise de tensão e corrente dos dispositivos de alta tensão. Desta forma a aplicabilidade dessa técnica de forma contínua se torna custosa para sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Além disso, mesmo em técnicas de transmissão de dados sem fio, a instalação desses sensores pode colocar o operador em contato com os terminais de tensão do transformador, o que pode exigir cuidados extras devido ao grau de periculosidade.

[016] Outros exemplos mostram aparatos para diagnóstico de falhas como as descargas parciais. A dissertação de Souza (2006), intitulada "Método de detecção de falhas em transformadores de distribuição de poste com proteção operada" cita um sistema de detecção de falhas em transformadores feito por meio de dois testes: de análise de transformação e de comparação de ondas de tensão impulsivas para diferentes níveis de tensão. Já em na dissertação de Ferreira (2013), intitulada "Análise de falhas em transformadores de distribuição por metodologia forense", é ilustrado uma metodologia que requer a análise da resistência elétrica de isolamento, ou seja, além de colocar o operador em contato com tensões e correntes, deve-se fazer o desligamento do transformador para tal teste. Além disso é nítido que a análise de absorção físico-químico e de absorção dielétrica torna a metodologia custosa a nível laboratorial. No mais, em nenhum ponto dos dois documentos citados acima se realiza a análise ou

propõe algum sistema de diagnóstico de evolução ou classificação de falhas.

[017] A técnica da emissão acústica também é utilizada para a identificação e localização de descargas parciais. Contudo, além de problemas metodológicos com a exatidão e precisão da localização, a avaliação da severidade e do tipo de descarga é uma invenção inédita na literatura.

[018] Souza (2008) salienta o uso de transdutores piezelétricos para a localização de descargas no documento de dissertação intitulado "Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso." Entretanto, esse tipo de metodologia requer o uso de mais de um transdutor, depende da geometria do transformador, que muda de fabricante para fabricante, além de não avaliar a severidade do problema, fator primordial para o sucesso dos sistemas de manutenção preventiva.

[019] Diversos trabalhos provaram a complexidade do método de localização. Antony et al (2018) e Wang et al, (2018) desenvolveram métodos de localização de descargas parciais baseados em sensores de emissão acústica. Todavia, como alicerçado nos dois artigos, o método demanda modelos matemáticos complexos e até mesmo o conhecimento da geometria do transformador, o que torna inviável em aplicações práticas. Além das técnicas necessitarem de muitos sensores acoplados à parede do transformador, a avaliação da severidade não é realizada por esses estudos (WANG, Yan-Bo et al. **Acoustic localization of partial discharge sources in power transformers using a particle-**

swarm-optimization-route-searching algorithm. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 24, p. 3647-3656, 2017), (ANTONY, Deepthi; et al. **Noniterative method for combined acoustic-electrical partial discharge source localization.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 33, p. 1679-1688, 2017). Uma técnica de localização de descargas em transformadores também é apresentada pelo documento de patente WO97/24742, publicado em 10/07/1997, "Method and apparatus for locating partial discharge in electrical transformers". O método se baseia na aplicação de sensores de emissão acústica combinado com a extração dos diferentes tempos de chegada das ondas nos sensores. Neste contexto o método utiliza como referência um sinal elétrico para o cálculo dos respectivos tempos entre a emissão das ondas e a recepção por sensores posicionados em diversos pontos da máquina elétrica. A desvantagem dessa metodologia é a dificuldade de se analisar o tempo de chegada tendo em vista que os sinais são contaminados por ruídos e o som se propaga com velocidade de acordo com os meios que a onda é transmitida. Essa problemática é abordada em Markalous et al. (2008) (MARKALOUS, S. et al. **Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals,** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v.15, p. 1576-1583, 2008). Além disso, as técnicas de localização necessitam do acoplamento de diversos sensores ao transformador, diferentemente desta técnica proposta, que utiliza um único elemento de sensoramento.

[020] Outros inventos também utilizaram o princípio da piezeletricidade para se diagnosticar falhas. Por exemplo, o documento de patente WO2005/077029 A3, publicado em 25/08/2005, "Transducer in-situ testing apparatus and method" utiliza a técnica da impedância eletromecânica para realizar o diagnóstico de uma determinada avaria. O método consiste em averiguar a impedância do transdutor acoplado que é modificado pela falha. O invento é caracterizado por um gerador de sinal que excita o sensor eletricamente. A partir desse sinal é extraído o espectro de frequências pelo processador e a impedância do conjunto pode ser calculada. O invento também embute um autoteste de funcionamento do sensor ou do transdutor. Diferentemente desta proposta o invento não é capaz de diagnosticar o tipo de avaria pela sua classificação e fornecer um aparato que culmine com a avaliação da severidade de uma descarga em transformador. Além disso, a impedância total do conjunto pode mudar de fabricante para fabricante uma vez que as especificações mecânicas de acoplamento à carcaça podem alterar totalmente a impedância do sistema. Uma outra vantagem desse sistema é que ele não depende de medição de impedância.

[021] Todos esses esforços culminaram com técnicas de monitoramento de transformadores e dispositivos de alta tensão, sendo, por conseguinte, notória a importância do desenvolvimento desses sistemas. O objetivo dos trabalhos mencionados foi diagnosticar descargas elétricas, que são falhas que podem culminar com um ônus financeiro de porte significativo devido à perda total desse dispositivo

presente no ambiente industrial, em subestações e nos setores de geração e distribuição de energia.

[022] Entretanto, como desenvolvido nessa patente, o conhecimento do grau de severidade e do tipo da falha na isolamento propicia um maior controle e planejamento por meio de manutenções preditivas mais eficientes, evitando-se paradas não programadas. Como observado, embora exista uma grande parcela de contribuição científica na área em questão, não há nenhum registro no Brasil e nem no exterior de uma técnica que avalie a severidade e classifique o tipo das descargas elétricas que acometem transformadores.

[023] Neste contexto, a presente invenção propõe um sistema não invasivo para a avaliação da severidade e classificação do tipo de falha que acomete o transformador. A avaliação da severidade ou da evolução do problema com o tempo é primordial para o aprimoramento dos sistemas de manutenção, pois fornece a opção de escolha do momento da intervenção na máquina elétrica, dando robustez ao processo de análise e predição de uma falha total. Já a classificação do tipo de descarga é de fundamental importância pois cada tipo de falha demanda ações totalmente diferentes de manutenção. Por exemplo, uma descarga na bucha isolante requer sua simples substituição. Já a descarga interna requer o esvaziamento do transformador e manutenções em seus enrolamentos, o que pode custar tempo.

[024] A técnica proposta se baseia no sensoriamento de ondas acústicas emitidas pelas falhas e se apresenta como uma solução para o diagnóstico de evolução e classificação

de descargas que podem acometer outros tipos de máquinas elétricas, cabos ou dispositivos de proteção de sistemas elétricos. O invento se baseia na aquisição de sinais acústicos por sensores piezelétricos cujos sinais são processados por técnicas matemáticas desenvolvidas para identificar a severidade e classificar o tipo de descarga que ocorre no transformador. Demanda baixo custo computacional e possui vantagens como segurança operacional pois não depende da análise de tensões e correntes do transformador, como o método elétrico ou óptico, que pode colocar operadores ou dispositivos em contato com partes energizadas, além de ter eficiência nas conclusões pois não depende de coleta de material e análise laboratorial como no método químico.

Breve descrição da invenção:

[025] Refere-se o presente pedido de patente a uma técnica para diagnóstico de evolução de descargas, bem como a classificação de seus tipos. Esse invento é baseado em transdutores piezelétricos a base de titanato de zirconato de chumbo (PZT) e técnicas avançadas de processamento de sinais. O sistema é constituído de:

[026] Transdutores piezelétricos a base de titanato zirconato de chumbo e suas variações.

[027] Um hardware de aquisição de dados para capturar os sinais dos transdutores durante a aplicação da técnica.

[028] Um computador/interface com o usuário que será responsável pelo processamento dos sinais e cálculo dos parâmetros propostos por esse documento.

[029] Em relação aos procedimentos: a descrição da invenção será feita com base em um estudo de caso, com a especificação do transformador empregado, dos tipos de descargas elétricas estudados bem como a avaliação da evolução dessas falhas. O posicionamento do transdutor também será apresentado. A invenção estende-se as mais diversas opções e tipos transdutores e de transformadores, sendo esses últimos empregados em óleo, a seco ou qualquer tipo de topologia ou local de emprego. O invento também atende a identificação de falhas em isoladores e materiais dielétricos que possam constituir qualquer sistema de isolamento de máquinas elétricas sendo rotativas ou não, além de ter factibilidade para aplicações em cabos e dispositivos de proteção de sistemas elétricos.

[030] Dessa forma, no estudo de caso, utilizou-se um transformador de distribuição isolado a óleo. Um sensor piezelétrico foi acoplado na carcaça do transformador. Uma fonte de média tensão produziu descargas na parte ativa, que é imersa em óleo isolante, bem como nos isoladores externos da máquina elétrica. Diversos níveis de descargas foram considerados. De posse dos dados, os sinais foram processados digitalmente com a implementação de parâmetros como energia, banda média, análise de componentes principais, média da amplitude espectral e sistemas inteligentes, como serão mostrados a seguir. Cabe destacar que o invento se estende também a qualquer outro tipo de falha presente nos mais variados tipos de transformadores, dispositivos de proteção, cabos ou máquinas elétricas.

Breve descrição das figuras:

[031] Para melhor compreender o invento, seguem as descrições das figuras apresentadas:

[032] **Figura 1:** ilustração da bancada de ensaio para descargas em isolador.

[033] **Figura 2:** ilustração da bancada de ensaio para descargas em óleo.

[034] **Figura 3:** gráfico do mapa de caracterização formado pelos parâmetros energia e banda média dos sinais acústicos.

[035] **Figura 4:** gráfico do mapa de caracterização formado pelos parâmetros de componentes principais 1 e 2.

[036] **Figura 5:** gráfico do mapa de caracterização formado pelos parâmetros de componentes principais de 1 a 3.

[037] **Figura 6:** matriz de estatísticas apresentando a eficácia das redes neurais artificiais do tipo Perceptron Multicamadas para a identificação de descargas em óleo (parâmetro "0") e em isolador (parâmetro "1").

[038] **Figura 7:** gráfico de diagnóstico de evolução de descargas pelo parâmetro de energia do sinal acústico.

[039] **Figura 8:** gráfico de diagnóstico de evolução de descargas pelo parâmetro de média da amplitude espectral do sinal acústico.

Descrição detalhada da invenção:

[040] Tomando como base as Figuras 1 e 2, um transdutor piezelétrico foi acoplado em um transformador de

distribuição de 30 KVA, 13,8 kV/220 V. Um eletrodo de latão em formato ponto-plano, com distanciamento de 3 mm foi construído com intuito de produzir descargas no óleo isolante, que constitui a parte interna da isolação do transformador. Duas fitas também foram acopladas aos isolares do transformador para a produção de descargas nesses dispositivos. Para isso, estes eletrodos foram alimentados por uma fonte de média tensão da General Electric que pode aplicar tensões na ordem de 0 a 40 kVac.

[041] Para emular a contaminação dos isoladores no transformador, uma das buchas foi contaminada com grafite em pó. A finalidade foi emular possíveis deteriorações do material e contaminações ambientais produzidas por sujeira, poeira ou outros elementos como ocorre na prática.

[042] As descargas foram produzidas com intuito de averiguação da sensibilidade da técnica proposta para a diferenciação de descargas internas e em isoladores, pois cada tipo de descarga elétrica requer diferentes ações de manutenção.

[043] Em muitos casos a falha evolui e a identificação da severidade é primordial para a avaliação do momento adequado da manutenção. Portanto, diversos níveis de descargas parciais foram induzidos na bucha do transformador. O isolador foi contaminado com pó de grafite e, para emular diferentes níveis de descargas elétricas, foram aplicadas tensões de 8 kV, 12 kV, 16 kV, 18 kV, 20 kV, 22 kV, 24 kV, 26 kV, 28 kV e 30 kV.

[044] Um oscilógrafo da marca Yokogawa®, foi utilizado para captar os sinais desses sensores em uma taxa de aquisição de dados de 2 MHz.

[045] Após a aquisição de 600 sinais acústicos oriundos de descargas internas e de descargas ocorridas nos isoladores do transformador, foram elaboradas as técnicas de avaliação da severidade e classificação do tipo de descarga.

[046] Primeiramente, para o sistema de classificação desse invento, a transformada de Fourier foi aplicada. Neste contexto se extraiu a energia (E), banda média (BM) e as componentes principais 1, 2 e 3 (CP1, CP2 e CP3). Após o cálculo desses parâmetros, três inéditas técnicas de avaliação de tipo de falha foram elaboradas. A primeira, considerou mapas formados pela energia e banda média como coordenadas (E x BM) (Figura (3)). Já a segunda, aplicou a teoria das componentes principais para a formação de mapas bi ou tridimensionais (Figuras (4) e (5)). Neste caso, as componentes principais 1 e 2 formaram agrupamento de dados bidimensionais (CP1 x CP2) como observado na Figura (4) e as componentes 1, 2 e 3, mapas tridimensionais (CP1, CP2, CP3), como apresentado na Figura (5).

[047] A terceira técnica constituiu o emprego de parâmetros acústicos como energia e banda média como parâmetros de treinamento de um sistema inteligente baseado em redes neurais artificiais do tipo perceptron multicamadas.

[048] Considerando um sinal acústico amostrado $x[n]$, de tamanho N , bem como sua transformada de Fourier $X[k]$, tem-se, por definição a Energia (E) (Equação I) e Banda Média (BM) (Equação II) dos sinais como:

$$[049] \quad E = \sum_{n=1}^N |x[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |X[k]|^2$$

(1)

$$[050] \quad BM = \frac{\sum_{n=1}^N f^2 \cdot X[k]^2}{\sum_{n=1}^N X[k]^2}$$

(2)

[051] Para o cálculo das componentes principais 1, 2 e 3 é necessário tomar uma matriz de dados e, após o cálculo de sua matriz covariância, é necessário se obter os autovalores dessa matriz covariância pela técnica da decomposição por valores singulares (DVS). As três primeiras colunas da matriz ortonormal produzida pela DVS são, respectivamente, as componentes principais 1, 2 e 3.

[052] Para cada uma das 600 descargas elétricas os parâmetros E e BM foram calculados, formando pontos em coordenadas de um gráfico 2D, conforme Figura (3).

[053] Observa-se que duas regiões bem definidas são formadas para todas as descargas produzidas na parte ativa e para as falhas inseridas nos isoladores do transformador. Assim, graficamente tem-se a relação do tipo de falha com um parâmetro gráfico.

[054] O mesmo ocorre quando se aplica as componentes principais 1, 2 e 3 para a formação de mapas bi ou tridimensionais. Observa-se que tanto a Figura (4) quanto a Figura (5) produziram duas regiões bem definidas que se relacionam com o tipo de falha aplicado ao transformador.

[055] No que condiz à aplicabilidade das redes neurais artificiais por meio da aplicação dos parâmetros de energia e banda média como entradas de treinamento e teste, verifica-se pela matriz confusão (Figura (6)) que o sistema inteligente classificou corretamente 100 % dos casos.

[056] Com relação ao método de diagnóstico de severidade das falhas inseridas no transformador, conforme Figura (7) e Figura (8) o método também é capaz de estimar a evolução da intensidade das descargas e, conseqüentemente, avaliar sua severidade. Observa-se que a energia (Equação (1)) e o Valor Médio da amplitude espectral (VME) (Equação (3)) tem relação matemática direta com o nível de falha imposta ao isolador do transformador máquina. Observa-se, pela Figura (7) que a intensidade da descarga tem relação quadrática com a energia do sinal acústico. Além disso, o valor médio espectral tem relação linear, ou seja, o novo índice cresce com a intensidade da descarga elétrica.

[057] Deste modo, a técnica proposta, além de identificar o tipo de falha, consegue também estimar sua evolução ou sua intensidade.

[058] O valor médio da amplitude espectral é definido como:

$$[059] \quad VME = \frac{\sum_{n=1}^N X[k]}{N}$$

(3)

[060] Por conseguinte, o invento apresentado é uma técnica de identificação de evolução e, consequentemente, da severidade da descarga, bem como sua classificação. É um método não invasivo para transformadores, mas que pode se estender a cabos de linhas de transmissões, máquinas elétricas girantes, maquinário industrial, dispositivos de controle e proteção de sistemas elétricos etc. O invento torna-se uma alternativa para o monitoramento de outros tipos de falhas uma vez que detém a capacidade de sensoriamento de severidade e classificação de dados.

REIVINDICAÇÕES

1. **TÉCNICA PARA CLASSIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES**, caracterizado pelo fato de se utilizar transdutores piezelétricos e os métodos de avaliação da evolução da severidade e classificação de descargas elétricas baseados em energia, banda média, componentes principais, valor médio da amplitude espectral e redes neurais artificiais.

2. TÉCNICA, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pela possibilidade de aplicação da técnica em qualquer outro tipo de máquina elétrica, maquinário, dispositivos, cabos, linhas de transmissão, dispositivos de proteção.

3. TÉCNICA, de acordo com as reivindicações 1 e 2, caracterizado pela possibilidade de aplicação dos sensores em qualquer ponto externo ou interno ao aparato a ser monitorado, sendo o sensor acoplado ou não, aplicados em transmissão com ou sem fio.

4. TÉCNICA, de acordo com as reivindicações de 1 a 3, caracterizado pelo fato de ser utilizado mediante a aplicação dos sinais originais ou pela aplicação de filtros digitais ou a partir da seleção de bandas de frequência pertinentes às condições do teste, sob qualquer taxa de amostragem, com processamento instantâneo ou remotamente por meio de transmissão de dados pré-processados ou não, com uso de qualquer tipo de sistema inteligente ou aprendizado de máquinas na permuta com as Redes Neurais

Artificiais.

FIGURAS

Figura 1

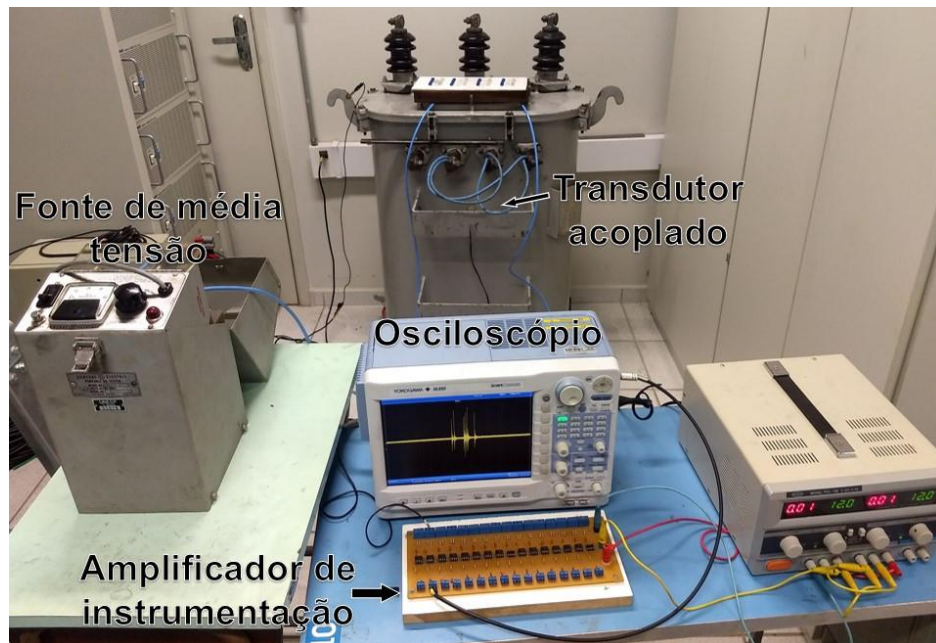


Figura 2

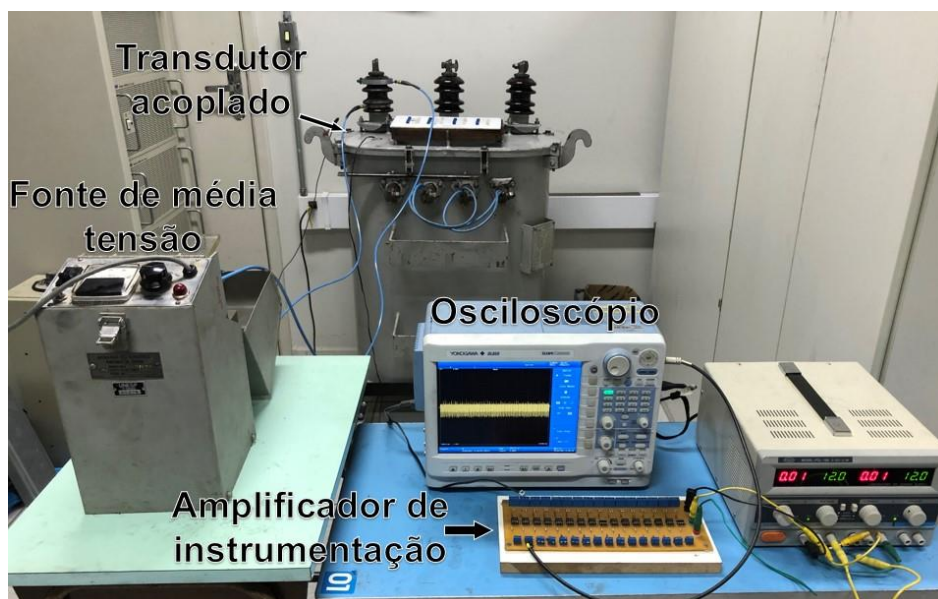


Figura 3

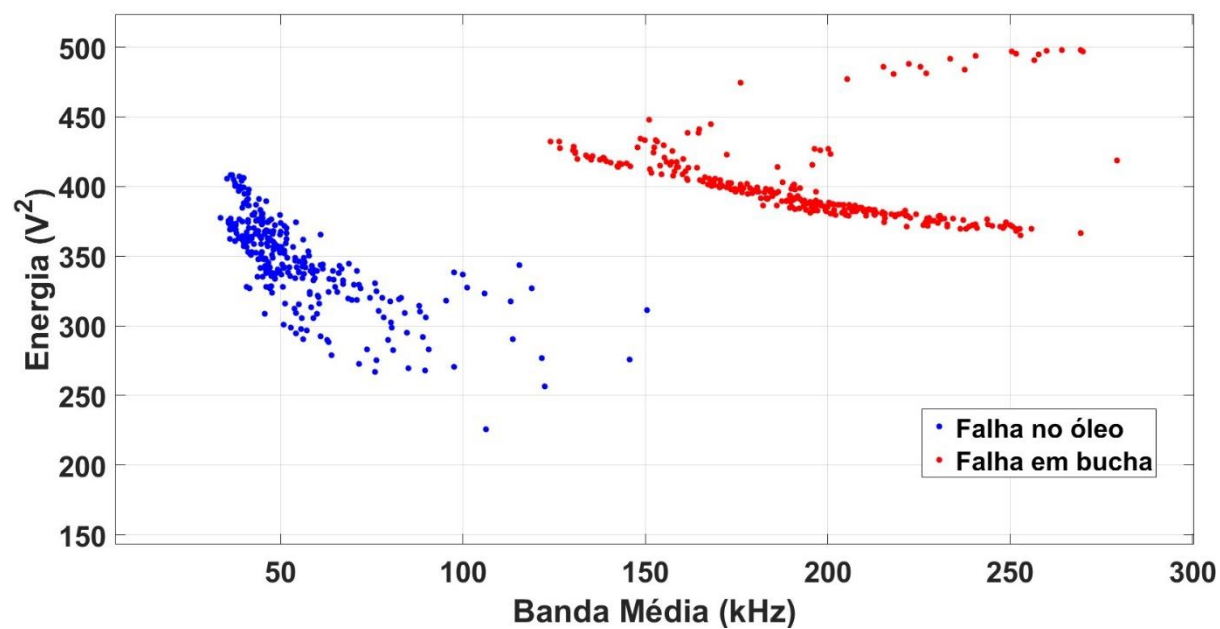


Figura 4

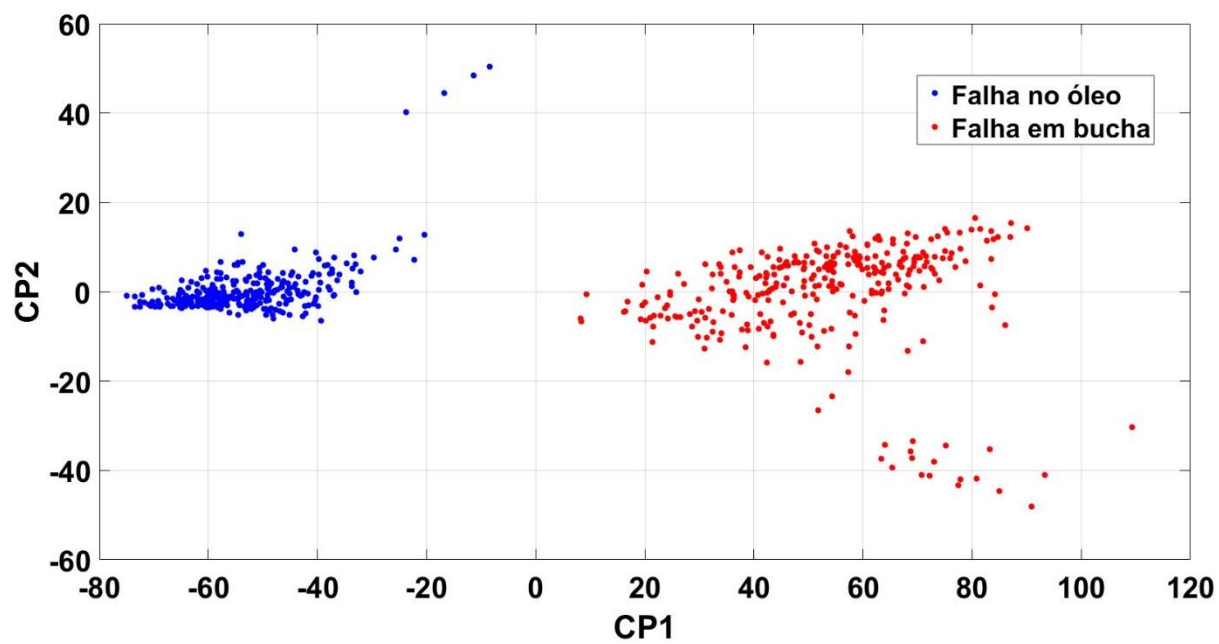


Figura 5

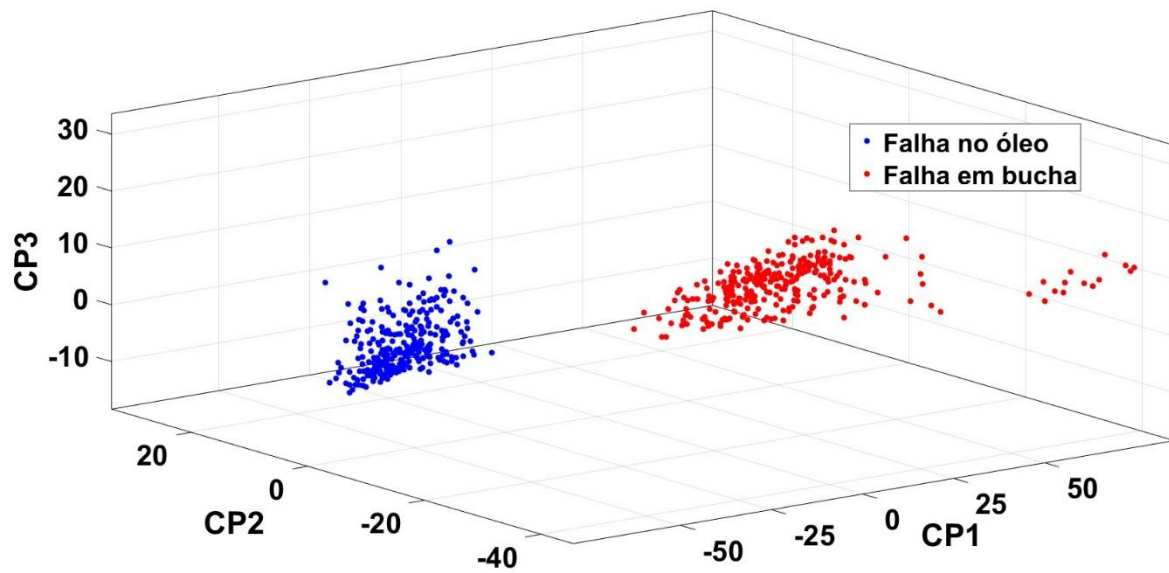


Figura 6

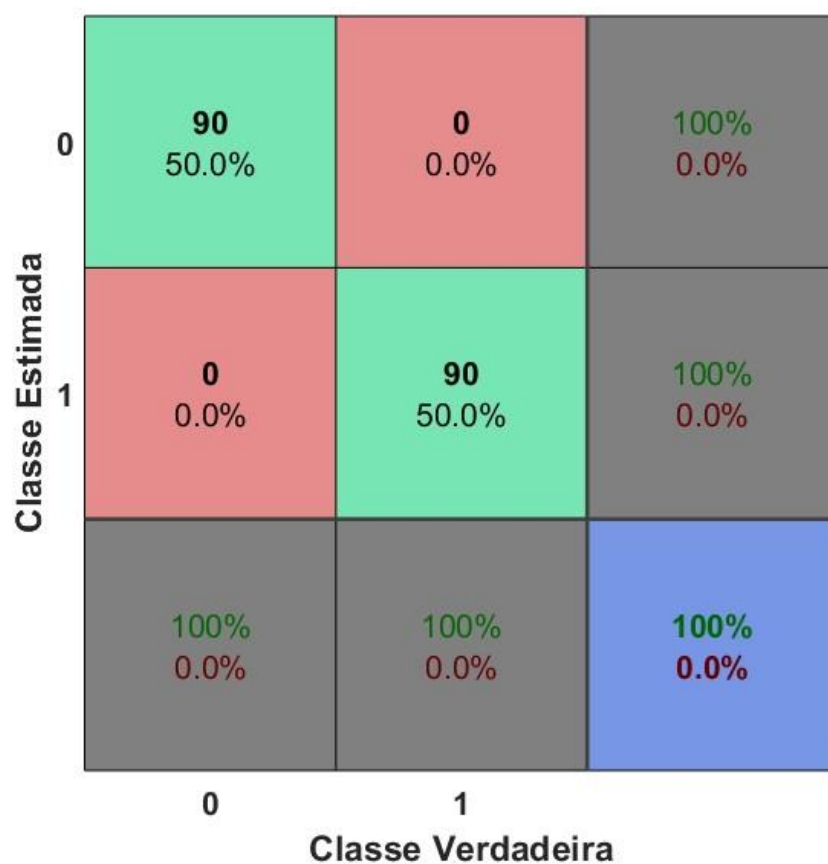


Figura 7

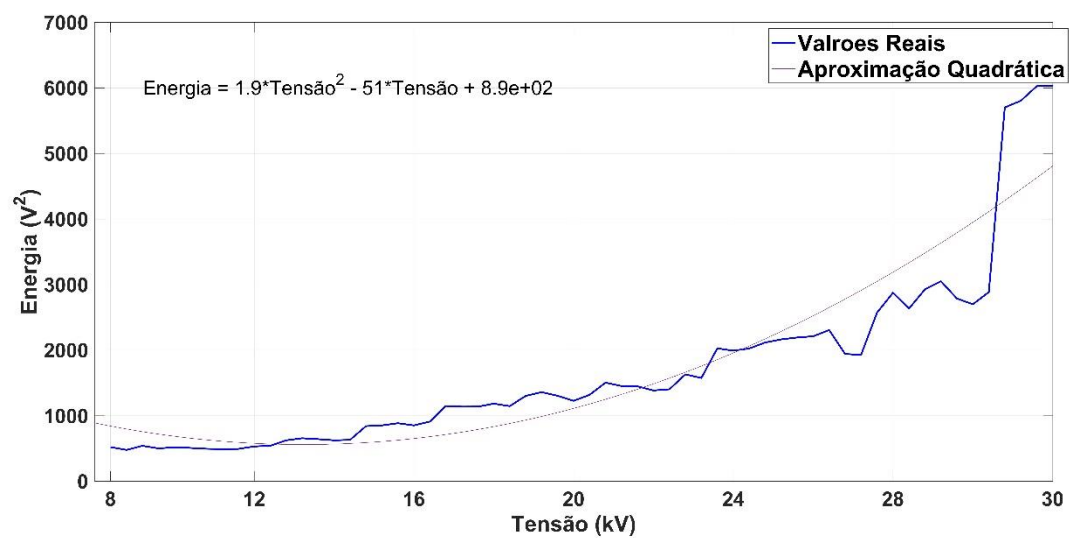
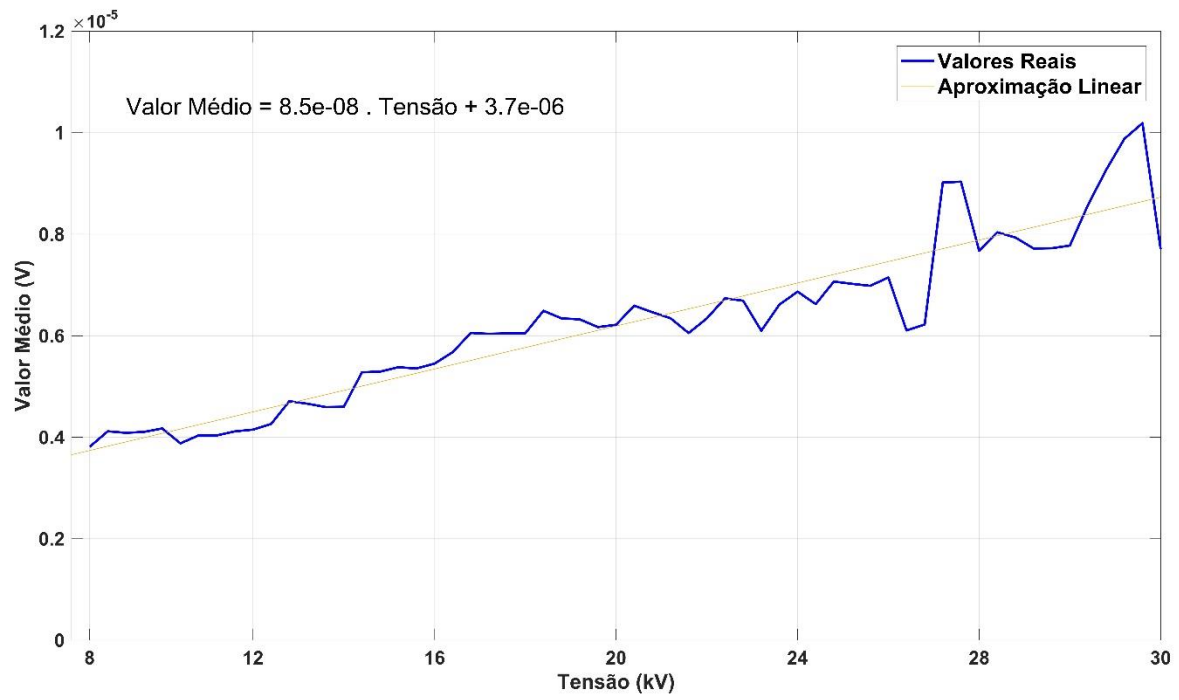


Figura 8



RESUMO**TÉCNICA PARA CLASSIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE
FALHAS EM TRANSFORMADORES**

A presente invenção se refere a uma nova técnica de monitoramento e diagnóstico de descargas elétricas em transformadores, utilizando sensores de emissão acústica, técnicas de análise de dados e sistemas inteligentes. A técnica apresentada é capaz de avaliar a severidade e a evolução de falhas em transformadores, bem como classificá-las. A técnica também pode ser utilizada para o diagnóstico e monitoramento de outros tipos de falhas e outros tipos de dispositivos como máquinas rotativas, cabos e dispositivos de proteção de sistemas elétricos.