DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE ENSAIOS PARA AVALIAR DEGRADAÇÃO DE ÓLEOS ISOLANTES UTILIZADOS EM TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

Gerardo Antonio Idrobo Pizo[(1)](gerardo.idrobo@gmail.com), Pilar Hidalgo Falla[(2)](drapilar@gmail.com), Leonardo Aguayo[(3)](aguayo@unb.br), Arilson Terrão Ximenes Junior[(4)](arijuniorxi@gmail.com)

[(1)(2)(3)(4)] Universidade de Brasília (UnB); Faculdade de Gama

RESUMO: *O trabalho apresenta-se como uma proposta inovadora para testes in loco, que permitem diagnosticar o estado do óleo isolante que está em contato com os principais componentes ativos do transformador durante seu funcionamento. O monitoramento do óleo isolante no transformador tem um papel vital não apenas na avaliação do estado da rede de transmissão e na manutenção de sua integridade, como também na vida remanescente estimada de cada unidade. Durante a operação do equipamento, é necessário realizar regularmente testes estabelecidos de acordo com normas padronizadas, a fim de averiguar a qualidade do óleo isolante e detectar possíveis falhas no estágio inicial da degradação de suas características elétricas (ARANTES, 2016) (CAMPOS, 2016)(ROUSE, 1980). Os testes da rigidez dielétrica e da concentração dos gases dissolvidos requerem equipamentos caros, de dimensões grandes e difíceis de ser acoplados a um sistema de monitoramento in loco. O desenvolvimento desta bancada móvel inclui: (i) 4 nanosensores para detecção de gases dissolvidos, e (ii) um sistema acoplado a um processador para medição indireta da rigidez dielétrica. O resultado foi uma bancada portátil e de baixo custo em relação aos métodos clássicos. O monitoramento de índices obtidos pelos parâmetros acima reduziu o número de interrupções não programadas causadas pelos danos nos transformadores.*

PALAVRAS-CHAVE: *TRANSFORMADORES, RIGIDEZ DIELÉTRICA, ÓLEOS, ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS (AGD), NANOSENSOR.*

DEVELOPMENT OF TESTING BENCH TO MEASURE DEGRADATION OF INSULATING OILS USED IN ELECTRIC TRANSFORMERS

ABSTRACT: *The work presents an innovative proposal for tests in loco, which allows diagnosing the state of the insulating oil that is in contact with the main active components of the transformer during its operation. The monitoring of non-transformer insulating oil plays a vital role not only in assessing the state of the transmission network but also in the maintenance of its energy as well as in the remaining life of each unit. During the operation of the equipment, the performance standards were unchanged and the indicators were established with the standard dates, in order to determine the quality of the insulating oil and the probability of occurrence of the electrical phases (ARANTES, 2016) (CAMPOS, 2016)(ROUSE, 1980). The tests of dielectric strength and dissolve gas concentration are expensive, large-size equipment that is difficult to couple to an on-site monitoring system in loco. The development of this mobile includes: 4 nanosensors for the detection of dissolved gases, and (ii) a system driven by a processor for the analysis of dielectric rigidity. The monitoring of indices obtained by the above parameters reduced the number of unscheduled interruptions caused by transformer damage.*

KEYWORDS: *TRANSFORMERS, DIELECTRIC STRENGTH, OILS, DISSOLVED GAS ANALYSIS (DGA), NANOSENSOR.*

1. INTRODUÇÃO

A bancada móvel tem como objetivo imediato de fornecer um sistema de auxílio às atividades de manutenção, monitoramento e operação de transformadores. Dentro desta linha, o impacto da aplicação do sistema poderá ser mensurado diretamente por indicadores econômicos (por exemplo, na redução de custos associados à análise laboratorial remota da qualidade do isolante; na antecipação da degradação do funcionamento do transformador, evitando sua paralisação e reparo) e por indicadores de qualidade do sistema elétrico (DEC/FEC).

O sistema proposto tem, ainda, aplicabilidade direta em locais onde o acesso a exames laboratoriais de bancada é difícil ou impossível, necessitando do transporte de amostras de óleo desde o transformador até o laboratório, com potencial demora ao acesso dos resultados e risco de contaminação das amostras por transporte inadequado.

A aplicabilidade do sistema proposto ao sistema de distribuição de energia é abrangente, tendo como premissa para sua implantação requisitos mínimos de energia elétrica e de manutenção para que possa ser instalado junto aos transformadores de potência da rede.

Dentro da busca pela minimização da interrupção do fornecimento de energia e manutenção da vida útil dos transformadores, um monitoramento que permita antecipar falhas críticas tem como resultado impacto econômico são direto. Há poucos estudos sobre o assunto e, em Nota Técnica da Annel (0173/2016 de 23/12/2016) é possível observar que os custos de interrupção de uma hora é de aproximadamente R$64 /kWh para usuários não-residenciais e de R$46/kWh para usuários residenciais (ANNEL, 2016). Deve-se, ainda, contabilizar, de maneira geral, os custos aos consumidores decorrentes de impactos sociais diretos e indiretos, tais como interrupção em meios de transporte e pilhagem durante *blackouts* de longa duração.

Quanto à classificação dos possíveis ganhos econômico-financeiros, podem-se elencar os seguintes itens associados ao desenvolvimento do sistema e sua futura implementação:

•Ganho de Produtividade, devido a mudanças nos processos operacionais de manutenção preditiva e preventiva e na redução no tempo de execução das atividades diretamente relacionadas ao procedimento de análise em laboratório;

•Qualidade do Fornecimento, pela melhoria da qualidade dos serviços resultante da redução do índice de reclamações e dos índices de continuidade (DEC, FEC e TMA);

•Gestão de Ativos, pela redução ou da postergação de investimentos na expansão ou manutenção do sistema elétrico, decorrentes do aumento da vida útil dos transformadores;

•**Eficiência Energética**, no lado da oferta, por decorrência de aumento na confiabilidade do sistema, levando a um aumento da eficiência do sistema de transmissão e distribuição de energia.

2. METODOLOGIA

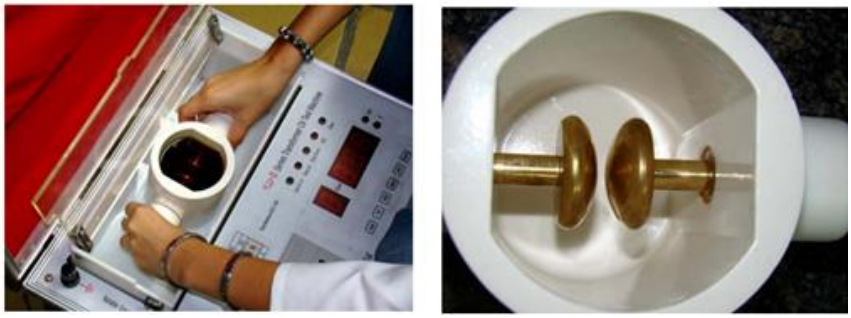


FIGURA 1: Teste de Rigidez dielétrica para óleos isolantes, segundo norma padrão ASTM e BNR (PEREIRA, 2011).

Define-se a rigidez dielétrica como uma medida de campo elétrico (kV/mm), importante para caracterizar esforços dielétricos que o óleo isolante poderá suportar antes de sua ruptura. Essencialmente, sua medição é realizada mediante a aplicação de uma determinada tensão entre dois eletrodos, sob condições prescritas por regulamentações nacionais ABNT (NBR 6869:1989) e internacionais (ASTM D-1816 e D-877), tal como mostrado na Figura 1.

Por outro lado, a Analises de Gases Dissolvidos (AGD) é considerada como uns dos melhores métodos para o diagnóstico da condição interna de um transformador. A metodologia AGD foi desenvolvida a mais de 40 anos (LEOPOLDINO AND REINALDO, 2011) e até hoje é considerada a principal técnica utilizada para monitorar falhas em equipamentos isolados a óleo.

TABELA 1. Gases dissolvidos presentes na degradação do óleo isolante.

Hidrocarbonetos e Hidrogêno	Óxidos de Carbono
Metano (CH_4) Etano (C_2H_6) Etileno (C_2H_4) Acetileno (C_2H_2) Hidrogênio (H_2)	Monóxido de Carbono (CO) Dióxido de Carbono (CO_2)

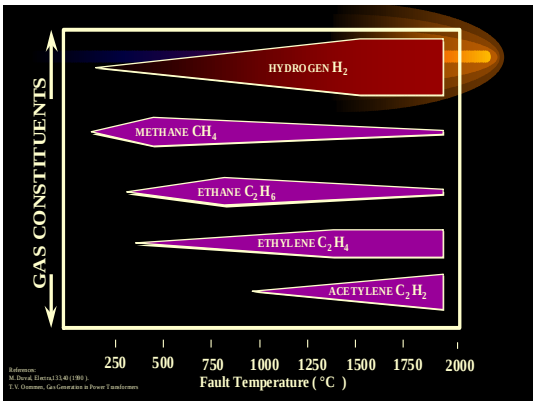


Figura 2. Pirolises do óleo por aquecimento a altas temperaturas.

A AGD é realizada utilizando-se a técnica de cromatografia de gases (CG). Em muitos casos, não há nas proximidades do transformador um equipamento disponível para realização da cromatografia, o que pode resultar em demora para obtenção dos dados dos gases dissolvidos, inclusive aumentando a taxa de contaminação do óleo (Ver Figura 3).

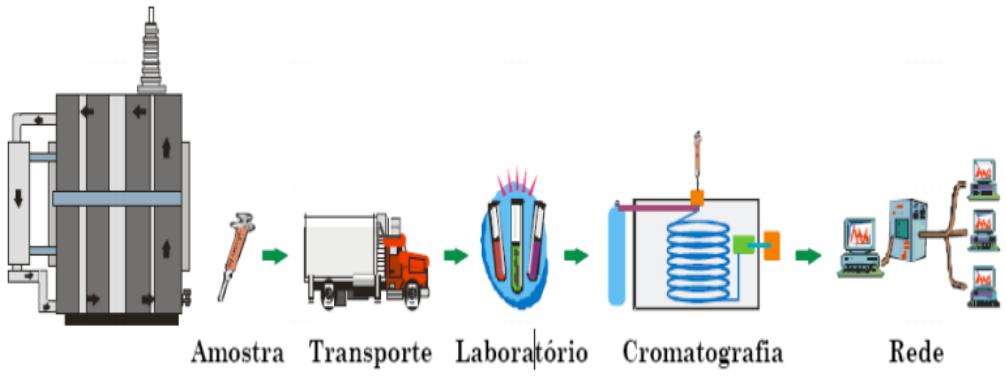


FIGURA 3. Processo convencional para análise de concentração de gases dissolvido no óleo (LEOPOLDINO, 2011).

Ainda de acordo com [5], uma alternativa é o uso de um sistema de monitoramento acoplado a uma infraestrutura de transmissão de dados, que permita a análise remota do estado do transformador (Figura 4).



FIGURA 4. Sistema de medição on-line para análise da concentração de gases dissolvidos no óleo (LEOPOLDINO, 2011).

Este método pressupõe a possibilidade de uso de uma rede de dados (por exemplo, utilizando a arquitetura SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), nem sempre disponível para todas as localidades.

4.1. Descrição do Sistema

O sistema proposto tem dois subsistemas: um destinado ao cálculo da constante dielétrica do óleo (Subsistema I), e outro destinado a análise dos gases obtidos por decomposição química do óleo (Subsistema II).

O Subsistema I utiliza os princípios descritos pela Figura 5, porém utiliza um sistema microprocessado para realização automática da caracterização do dielétrico por varredura em frequência.

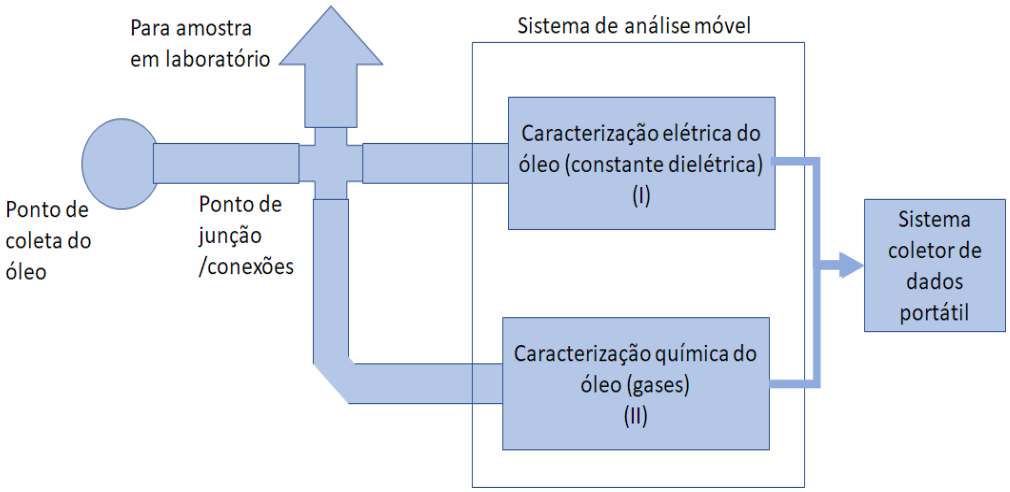


FIGURA 5. Arquitetura básica da bancada móvel. Foram previstas duas entradas de amostras de óleo independentes e uma interface com um sistema externo para processamento dos dados.

5. RESULTADOS

5.1. Subsistema de Caracterização Elétrica

Óleo isolante é um material dielétrico responsável pelo arrefecimento e isolação elétrica em transformadores de potência (YOUNG & FREEDMAN, 2009). Apesar de existirem óleos isolantes de origem vegetal (soja, girassol, etc.), os fluidos minerais petroquímicos ainda são os dielétricos líquidos mais utilizados em redes de distribuição domésticas ou industriais. Todavia, devido a mecanismos de stress químico e/ou elétricos, tais substâncias sofrem redução de suas propriedades dielétricas, podendo assim possibilitar a geração de descargas elétricas parciais e até mesmo de arcos voltaicos . Assim, este trabalho teve como objetivo projetar um sistema portátil para avaliar o grau de degradação de óleos isolantes para transformadores mediante determinação da constante dielétrica em um dispositivo capacitivo modificado como se descreve na Figura 6(a).

O medidor LCR demonstra-se apto para determinar o nível da degradação de óleo mineral isolante através do monitoramento dos seus parâmetros dielétricos, uma vez que mudanças significativas nos valores da constante dielétrica em função da variação de frequência puderam ser observadas (Figuras 6(b)) e Figura 6(c) apresenta a bancada. Analisando o comportamento da constante dielétrica em função da variação de frequência (100, 200, 300, ..., 2000Hz), é possível

observar uma maior instabilidade nos valores das capacitâncias obtidas nas frequências menores ou iguais a 700 Hz e que a partir de 800 Hz até 2000 Hz esta variação diminui consideravelmente.

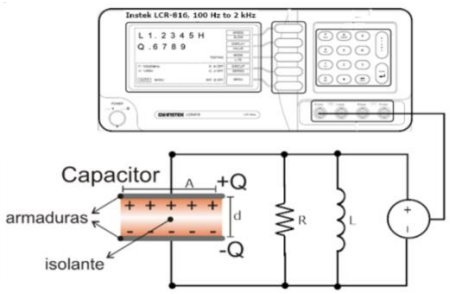


FIGURA 6. (a) Avaliação da constante dielétrica nos óleos isolantes

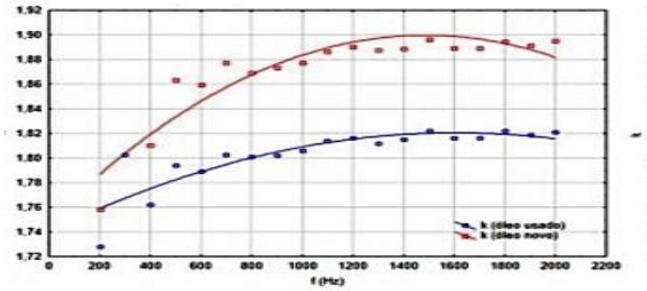


FIGURA 6. (b) Constante dielétrica em função de frequência para os óleos isolantes novos e usados.



FIGURA 6. (c) Bancada (ARILSON, 2019)

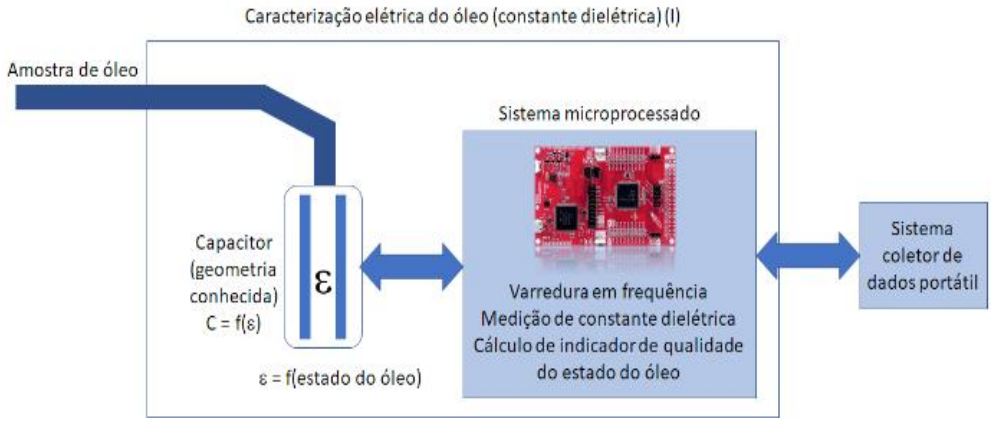


FIGURA 7. Diagrama do subsistema de caracterização elétrica do óleo (ARILSON, 2019)

O detalhamento preliminar do Subsistema I está na Figura 7. A amostra de óleo a ser medida será armazenada em recipiente adequado, passível de limpeza e com geometria conhecida. O sistema microprocessado é responsável pelo ensaio elétrico padronizado e automatizado, com software embarcado destinado à realização das análises das grandezas medidas mais detalhes se

pode consultar em (Arilson, 2019). O resultado da análise é um indicador de qualidade do isolante, que pode ser combinado a outros indicadores oriundos do Subsistema (II) para compor um indicador global do estado do óleo.

5.2. Subsistema de Caracterização de Gases- Nanosensores

A técnica clássica para detecção destes gases dissolvidos no nível do laboratório é a Cromatografia de Gases. O inconveniente de usar esta técnica no monitoramento on-line induz a alguns erros de amostragem, exposição à luz solar, calor e agitação que afetam a integridade da amostra.

Por outro lado, o uso da Espectroscopia Fotoacústica fica limitada por ser uma técnica muita cara. Os espectros dos gases dissolvidos obtidos com este equipamento apresentam bandas semelhantes que conduzem a calibração do equipamento em períodos frequentes de análises, e software pouco interativos com o usuário.

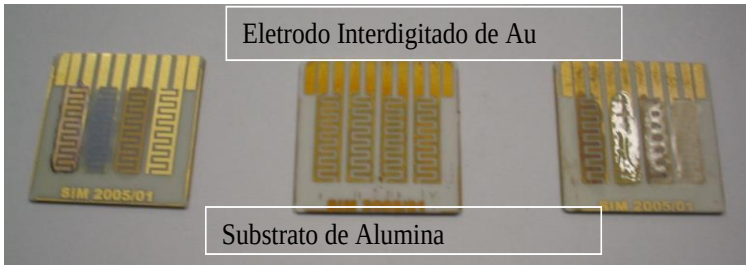


FIGURA 8. Filmes finos na base nanoparticulas de SnO_2.

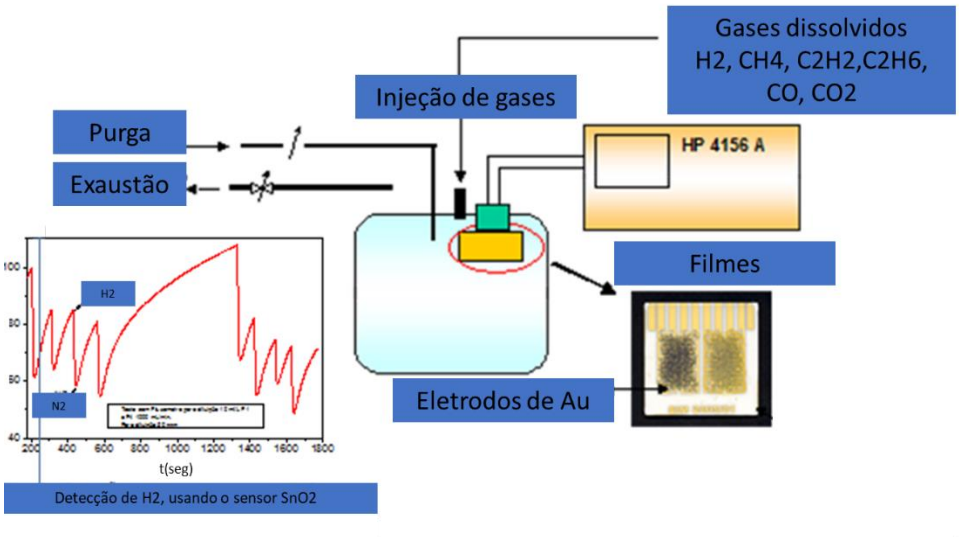


FIGURA 9. Sistema acoplado à bancada para detecção de gases dissolvidos na base de filmes finos de SnO_2.

A nanotecnologia aponta ao desenvolvimento de filmes finos baseados em nanoparticulas semicondutoras bastante sensíveis a detecção de gases dissolvidos presentes em óleos isolantes. Neste trabalho, ainda em desenvolvimento, foram obtidos filmes finos na base de nanoparticulas de SnO_2 dopadas com metais de transição (M) obtidas pelo Metodo de Pechini (HIDALGO & PILAR, 2005) e (PEREIRA, 2011), acima de substratos de alumina com circuitos interdigitados de Au, tal como apresentados na Figura 8.

Ainda em processo de adaptação dos sensores na máquina espera-se avaliar os gases mais críticos obtidos da degradação de óleos isolantes, os quais serão injetados na câmara acoplada na bancada portátil (Figura 9).

6. CONCLUSÕES

No Brasil as aplicações típicas de nanotecnologia para o setor elétrico encontrado na base de dados são aplicadas a desenvolvimento de novos materiais. Dentro do que foi possível observar pela base de dados consultados, em nenhum dos projetos desenvolvidos por outros autores foi encontrada a referência explícita ao uso de nanosensores para a realização monitoramento e analises de Gases Dissolvidos (AGD) em um sistema portátil. Além disto, o diferencial deste trabalho é a combinação simultânea de indicadores provenientes da análise de gases e da caracterização elétrica, constituindo um indicador único com melhor confiabilidade.

O sistema proposto tem, ainda, aplicabilidade direta, como sistema de monitoramento da qualidade de óleos isolantes e de prevenção e correção de falhas durante o trabalho destes no transformador.

A aplicabilidade do sistema proposto ao sistema de distribuição de energia é abrangente por ser de baixo custo, tendo como premissa para sua implantação requisitos mínimos de energia elétrica e de manutenção para que possa ser instalado junto aos transformadores de potência da rede.

7. REFERENCIAS

ANNEL (2016). Nota Técnica n° 0173/2016-SRD/ANEEL. < http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0173_SRD.pdf>.

ARANTES, JOSE GERALDO. Diagnostico de falhas em transformadores de potência pela análise de gases dissolvidos em óleo isolante através de redes neuronais. Monografia apresentada a UNIFEI para obtenção do grau de mestre em ciências em engenharia. (2016).

ARILSON TERRÃO XIMENES JUNIOR,. Desenvolvimento de protótipo de bancada para monitorar tensão corrente e temperatura de transformadores de baixa tensão e sistema para ensaio de rigidez dielétrica de óleos isolantes. 2019. 93 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica)—Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

CAMPOS, FELIPE DE SOUZA. Avaliação da eficiência dos óleos isolantes em transformadores em rede de transmissão elétrica. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Energia—Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

ROUSE T. O. Evaluation of Alternate Mineral Oils for Use in Transformers and Other Electrical". *In: EEE Electrical Insulation Magazine*. (1980).

HIDALGO, F. MARIA DEL PILAR. Estudo Nanoestrutural de pós à base de SnO_2 para a Construção de Sensores de gases Seletivos ao SO_2. Tese (Doutorado); Escola Politécnica Universidade de São Paulo. São Paulo, Fev. (2005).

LEOPOLDINO, REINALDO. Estudos sobre gases dissolvidos em óleos vegetais isolantes – influência de arco elétrico e superaquecimento. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos.USP.(2011)

PEREIRA, MÁRIO ANDRÉ. Elementos para a Gestão do Ciclo de Vida de Transformadores Elétricos de Potência**.** Dissertação Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto-Portugal. (2011)

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física III: Eletromagnetismo. 12ª ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009.