

TÍTULO

Determinação de gases combustíveis em óleo isolante para transformadores, por meio de aquecimento prévio.

RESUMO

Os transformadores de potência são alguns dos elementos mais importantes dos sistemas elétricos. A confiabilidade e o bom funcionamento destes equipamentos são vitais para que as companhias de energia forneçam eletricidade com qualidade e segurança. Um dos principais parâmetros que envolvem a normalidade da operação dos transformadores é o estado da isolação interna formada pelo óleo mineral e o papel que cobre as bobinas. Danos nessa isolação resultam na degradação destes dielétricos e, por consequência, na diminuição da vida útil dos transformadores. Essa degradação, que advém de processos elétricos, térmicos, ou mesmo mecânicos, geram gases combustíveis cujas quantidades individuais podem indicar o tipo de falha e a gravidade do problema. Desta forma, é importante detectar os principais gases envolvidos. O objetivo deste trabalho é realizar análises e estudos quantitativos da presença de gases inflamáveis dissolvidos no óleo, surgidos através da degradação deste líquido isolante. O cerne deste trabalho está em elaborar ensaios de formação de arco no óleo e, posteriormente, aquecer o fluido para medir a quantidade dos gases combustíveis antes dissolvidos nele. Este estudo visa à melhoria na confiabilidade dos equipamentos projetados para detectar e monitorar o surgimento de gases inflamáveis no interior de transformadores de potência existentes em subestações de companhias de eletricidade.

Palavras-chave: Transformadores. Óleo isolante. Arco elétrico. Formação de gases combustíveis. Detecção de gases inflamáveis. Análise de gases dissolvidos.

INTRODUÇÃO

A bobina de indução de Faraday, que deu origem ao transformador, surgiu no século XIX, mais precisamente, em 1831, quando o cientista Michael Faraday demonstrou de forma prática a indução eletromagnética. Conhecida, atualmente, como transformador estático, tem como principal característica a transformação de tensão, corrente e impedância e, apesar de grandes inovações tecnológicas, pode-se dizer que, até o momento, o mais moderno transformador é ainda - basicamente - o dispositivo utilizado por Faraday (GROSSNER, 1983}.

Segundo a NBR5356 (1993), o transformador é um equipamento elétrico estático que utiliza o princípio de indução eletromagnética e transforma tensão e corrente alternadas entre dois ou mais enrolamentos em uma mesma frequência. A principal finalidade do transformador de potência é adequar a energia elétrica entre diferentes partes do sistema elétrico de potência em níveis de tensão e de corrente convenientes. Na figura 1, encontra-se ilustrado um transformador de força para subestações, isolado internamente por óleo mineral. Um transformador parecido, mas de outro fabricante e em corte, está representado na figura 2.

Os transformadores de potência variam de poucos a centenas de MVAs, chegando a custar milhões de dólares. Baseada em alguns padrões, a classificação em kVA de um transformador de potência pode referir-se a sua capacidade de potência de entrada. A potência de saída estimada é igual à de entrada, menos as perdas do equipamento. Os transformadores de potência têm sido agrupados internacionalmente em três categorias (HARLOW, 2004):



Figura 1: Transformador de potência em óleo isolante (SIEMENS, 2001).

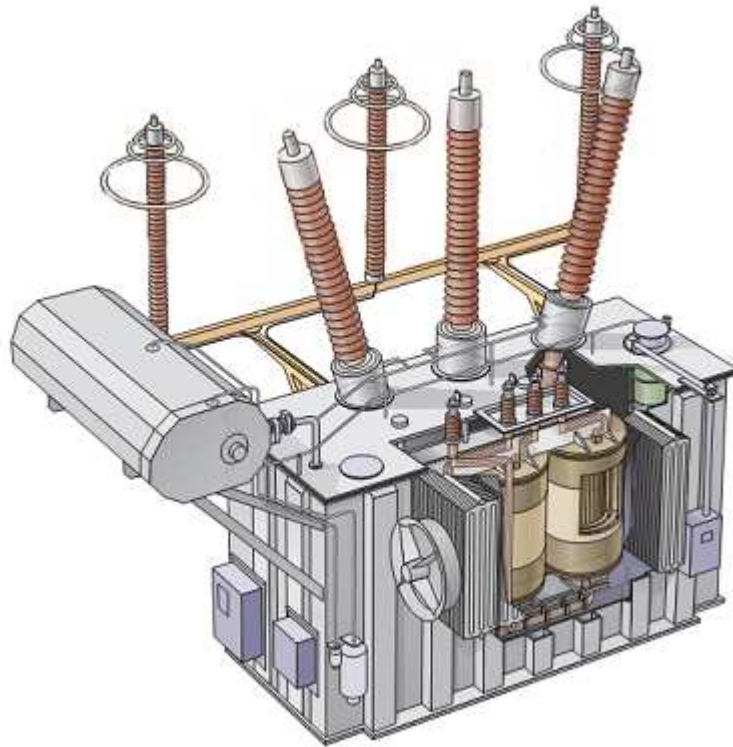


Figura 2: Transformador de potência em corte (ABB, 2006).

1. Transformadores de potência pequenos: de 0,5 a 7,5 MVA;
2. Transformadores de potência médios: de 7,5 MVA a 100 MVA;
3. Transformadores de potência grandes: de 100 MVA e superiores.

Há, também, outras formas conhecidas de classificação de transformadores de potência, como a exibida na tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos transformadores de força quanto ao nível de potência (NBR5356, 1993).

Categoria	Potência Nominal em kVA
I	$P \leq 500$
II	$500 < P \leq 10.000$
III	$P > 10.000$

Como são equipamentos bem robustos, uma falha em serviço é muito perigosa, o que pode levar, inclusive, a sua explosão (WANG et al., 2002). Além dos aspectos de segurança, existem os impactos financeiros para as empresas. A parada repentina do fornecimento de energia, dependendo da duração, pode implicar em multas perante a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Deve-se considerar, também, que as perdas monetárias estão relacionadas aos custos dos reparos corretivos e à interrupção da venda de energia.

Neste contexto, o correto funcionamento dos transformadores de potência é vital para a operação do sistema elétrico. Conseqüentemente, devem ser constantemente monitorados por dispositivos de proteção. Alguns desses dispositivos são os relés Buchholz e os relés diferenciais que apenas respondem a falhas severas, levando à remoção imediata os transformadores de seu serviço. Em tais casos, é inevitável uma interrupção do fornecimento de energia. Dessa forma, são de grande valia, técnicas preventivas que detectem falhas, precocemente, e evitem paradas (LIN et al., 1993).

Defeitos internos nem sempre se apresentam de imediato. Eles podem durar meses antes de causarem sérios danos.

Um dos sérios problemas que podem surgir no interior dos transformadores é a deterioração na isolação. A degradação do óleo e de outros materiais da isolação, como a celulose ou o papel impregnado com óleo, gera a formação de gases. Se uma falha incipiente estiver presente, a concentração dos gases e sua taxa de formação aumentam significativamente. Os principais gases envolvidos nestas degradações são: hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono, metano, etano, etileno e acetileno.

Ao longo dos anos, pesquisadores puderam correlacionar as falhas de características elétricas e térmicas com os gases dissolvidos no óleo. Assim, por exemplo, a decomposição térmica da isolação de celulose impregnada com óleo produz monóxido e dióxido de carbono, além de um pouco de metano e hidrogênio. Descargas parciais no óleo produzem hidrogênio, metano e acetileno (IEEE, 1992).

Existem vários métodos capazes de diagnosticar possíveis falhas no interior do transformador, por meio de análises envolvendo a formação destes gases. Algumas técnicas, que serão mais detalhadamente apresentadas no capítulo 2, utilizam relações das concentrações dos gases - como o método de Rogers e de Doernenburg -, outras utilizam as concentrações individuais de determinados gases - como o método do gás-chave.

Contudo, antes de realizar os diagnósticos das falhas por meio das análises das quantidades dos gases presentes no óleo ou no relé de gás, é necessário, obviamente, detectá-los.

O guia da IEEE (1992) sugere as seguintes prioridades com relação à detecção e análise dos gases combustíveis produzidos nos transformadores:

1. Detectar a formação de qualquer gás que exceder quantidades consideradas normais e utilizar diretrizes convenientes para que

anormalidades sejam identificadas o mais precocemente possível, minimizando os danos e evitando as falhas;

2. Avaliar os riscos de uma anormalidade sobre a confiabilidade do equipamento, a partir de diretrizes e recomendações pertinentes;
3. Agir de forma preventiva, monitorando o transformador e determinando se há necessidade de diminuição de seu carregamento ou, em caso extremo, remoção de serviço.

Para que seja possível diagnosticar uma falha na isolação interna de um transformador e tomar medidas preventivas, é fundamental detectar a presença de determinados gases, sejam eles dissolvidos no óleo, nas partes superiores dos transformadores ou no relé de gás.

A análise de gases dissolvidos no óleo é uma das ferramentas mais empregadas para a identificação de falhas em equipamentos elétricos de alta tensão. Estima-se que cerca de um milhão de análises destes tipos sejam realizadas, por ano, em todo o mundo (DUVAL, 2003).

As companhias de energia, geralmente, utilizam as técnicas cromatográficas para a separação e identificação dos gases que se dissolvem no óleo. Uma amostra do óleo retirada do transformador é levada ao laboratório, onde se extraem os gases e realiza-se a cromatografia em fase gasosa. Embora esta técnica seja consagrada, possui inconvenientes: o tempo entre a obtenção da amostra e a realização das análises pode provocar a alteração de dados importantes sobre a taxa de aumento da contaminação do óleo (NOGUEIRA, 2004). A figura 3 demonstra o processo convencional utilizado para a verificação dos componentes presentes no óleo.

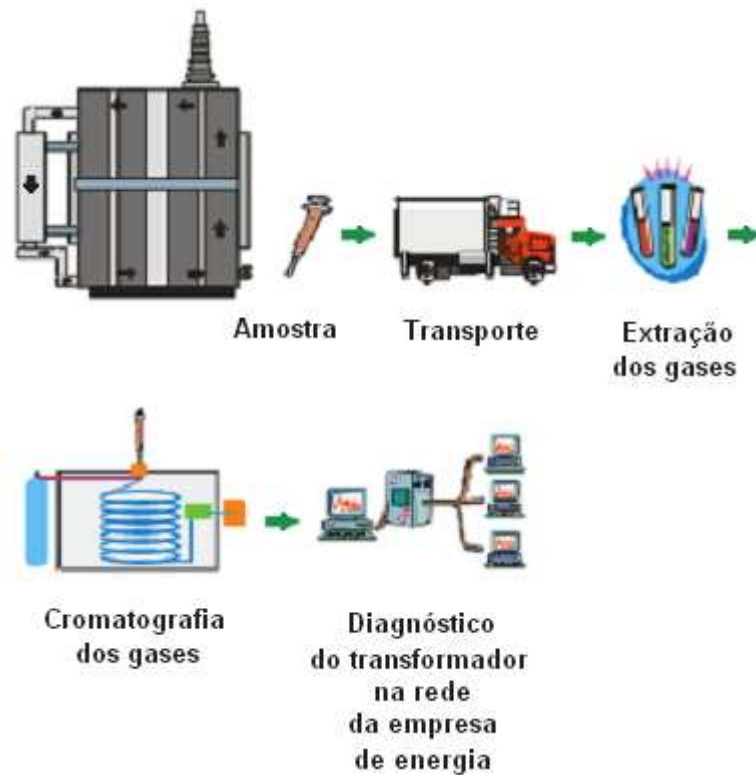


Figura 3: Processo usual para identificar os gases dissolvidos no óleo e diagnosticar as falhas (NOGUEIRA, 2004).

Há, no mercado, alguns aparelhos capazes de detectar gases inflamáveis como o hidrogênio e outros citados acima, porém não conseguem distinguir, por exemplo, a concentração de acetileno e etileno. A concentração de cada um destes gases, em ppm, é somada, e pode-se diagnosticar, erroneamente, uma falha. Além disso, seriam necessárias modificações e adaptações para que se fizessem as medições diretamente nos transformadores, visto que tais aparelhos portáteis foram projetados para detectar gases em ambiente aberto. Somando-se a este fato, cada equipamento poderia ser utilizado para monitorar apenas um transformador.

Há, também, equipamentos que detectam a formação de gases projetados especificamente para transformadores de potência. Trata-se de aparelhos que monitoram as condições do óleo em tempo real. A figura 4 ilustra e resume o processo de monitoramento do óleo.

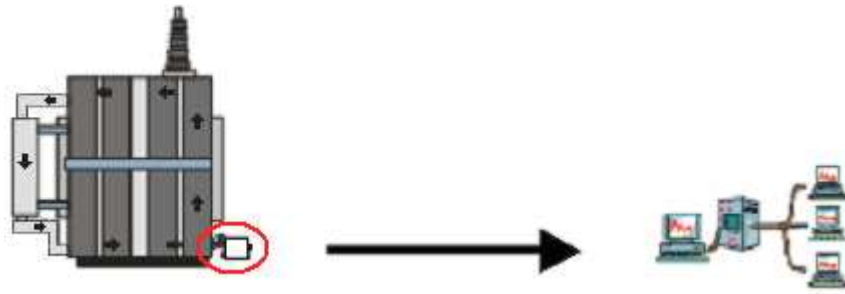


Figura 4: Sistema *on-line* utilizado na verificação da formação de gases no óleo (NOGUEIRA, 2004).

O elemento motivador do trabalho tem como base o fato de que existe, atualmente, uma tendência mundial do desenvolvimento da manutenção preditiva e preventiva, envolvendo o monitoramento *on-line* dos principais equipamentos de uma subestação de energia, de forma eficaz e não onerosa para as companhias de eletricidade.

Conseqüentemente, torna-se interessante realizar estudos e análises experimentais que almejem monitorar economicamente os transformadores de potência. Para isso, é necessário conhecer os problemas internos deste equipamento, principalmente, aqueles relacionados à degradação da isolação interna. Os estudos deste trabalho também visam a montar uma boa base de dados teórica e experimental, para o desenvolvimento de futuros projetos de sensores voltados a este contexto.

CONCLUSÃO

Neste trabalho estabeleceu-se uma nova metodologia para facilitar a análise dos gases dissolvidos em óleos de transformadores, baseada no aquecimento de amostras à temperatura de 70°C. Dentre os pontos que merecem destaque, ressaltam-se: a montagem dos ensaios em laboratório para simular os arcos internos em transformadores, em amostras contendo apenas dois litros óleo; a metodologia para

aquisição de dados e os resultados significativos que apontam para o desenvolvimento de novos sensores de gases dissolvidos em óleo isolante de transformador.

Como descrito no trabalho, as solubilidades dos gases H_2 e CO elevam-se, e a do CH_4 decresce discretamente com o aumento de temperatura, enquanto que as solubilidades do C_2H_6 , C_2H_4 e C_2H_2 diminuem com a elevação de temperatura. Em outras palavras, comprova-se que apenas estes três últimos gases tendem a ser expelidos expressivamente do óleo degenerado com o aquecimento.

Por conseguinte, nos estudos e análises deste trabalho de determinação de gases combustíveis em óleo isolante de transformadores por meio de aquecimento prévio, apenas as moléculas dos gases C_2H_6 , C_2H_4 e C_2H_2 foram alvos. Isto acentua sobremaneira o valor do trabalho, dado que o principal gás crítico relacionado à falha por descarga elétrica é o acetileno.

Outro dado importante com relação ao acetileno envolve itens de segurança. Dentre os hidrocarbonetos aqui citados, o acetileno é o mais combustível, devido as suas ligações químicas interatômicas C-C. O C_2H_2 possui, três ligações carbono-carbono: uma ligação σ - forte e de alta energia - e duas ligações π - fracas e de baixa energia. Isto se deve ao fato de que os elétrons π contribuem menos que os elétrons σ para manter unidos os átomos de carbono e, conseqüentemente, são menos fortemente atraídos por esses núcleos. O C_2H_4 possui apenas uma ligação de cada tipo entre os átomos de carbono, o que diminui o poder de combustão em relação ao acetileno. Por fim, os alcanos – a exemplo do metano e do etano -, possuem apenas ligações σ , o que acarreta aumento de energia na quebra de suas moléculas (MORRISON & BYOB, 1990).

Na parte experimental II, é pertinente salientar também que, quando a tensão de saída do TP foi de 12.000 V - e a conseqüente produção de, somente, pequenas

centelhas -, reproduziu, provavelmente, a situação de descargas parciais. Para este caso, os gases majoritários são H_2 e CH_4 . Servindo-se destas instruções e das informações sobre solubilidade, é notadamente razoável o fato de que, praticamente, não houve detecção de gases inflamáveis nos óleos submetidos a este nível de tensão.

Uma análise qualitativa da coloração das amostras de óleos submetidos aos ensaios de degeneração do óleo mineral, e a conseguinte formação de gases inflamáveis nele dissolvidos, indicam que os procedimentos adotados na parte experimental I são superiores aos da parte experimental II. Isto ocorreu, provavelmente, devido às diferenças significativas entre as potências das descargas aplicadas pelos dois sistemas geradores de alta tensão. Mesmo sem ter sido possível realizar a medição das tensões produzidas pela bobina Tesla, notou-se, sonora e visualmente, que as descargas geradas por ela foram bem mais agressivas do que os arcos elétricos supridos pelo TP. Logo, pode-se concluir que apesar da duração da descarga elétrica ter aumentado a degradação do óleo, o fator crítico desses ensaios na simulação de falhas em transformadores é a potência da descarga aplicada. Esta idéia também pode ser corroborada com o que relata SUWARNO (2006): a concentração dos gases aumenta quadraticamente com a tensão aplicada e quase linearmente com a duração do arco elétrico, fato também verificado nos resultados dos experimentos.

Para finalizar, verificou-se que, para os propósitos do trabalho, as amostras da parte experimental II apresentaram uma validade menor do que as amostras da parte experimental I. Em trabalhos futuros, dever-se-á procurar controlar as potências dos arcos, com possibilidade de simular diferentes defeitos.

BIBLIOGRAFIA

ABB. ABB Transformers. Zurich, Switzerland, 2006.

ALLAN, D. J. Fires and Explosions in Substations, In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, volume 1, pages 504-507, Asia Pacific IEEE/PES, 2002.

ARAKELIAN, V. G. On-line Physico-chemical Diagnostics of SF₆-equipment. In *IEEE Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, volume 1, pages 362-366, Xian Jiatong University, IEEE, 2000.

ARAKELIAN, V. G. Effective Diagnostics for Oil-Filled Equipment. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 18(6):26-38, 2002.

ARAKELIAN, V. G. e FOFANA, I. Water in Oil-filled High-voltage Equipment Part II: water content as physicochemical tools for insulation condition diagnostic. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 23(5):15-24, 2007.

ARAKELIAN, V. G. e KOVALENKO, A. J. Diagnostics for the Condition of SF₆ Equipment Based on Physico-chemical Parameters. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 17(2):42-51, 2001.

ARAKELYAN, V. G., DARYAN, L., e LOKHANIN, A. K. Gas Formation in Insulating Liquids Under the Stress of Partial Discharges, Heat and Ultrasonic; Diagnostics of Their Behavior. In *IEEE Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pages 890-893, Tokyo, Japan. IEEE, 1991.

ARAKELYAN, V. G. e VERTIKOV, V. P. The Checker System to Provide Control Over Gas Concentration in a Power Transformer Oil. In *Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurement and Applications*, pages 267-269, Manchester, UK. IEEE, 1992.

ASTM. D117 Standard Guide for Sampling, Test Methods, and Specifications for Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin. In *Annual Book of ASTM – Electrical Insulating Liquids and Gases*, volume 10.03, ASTM International, Philadelphia, PA 19428-2959, United States, 2002.

ASTM. D3612 Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography. In *Annual Book of ASTM – Electrical Insulating Liquids and Gases*, volume 10.03, ASTM International, Philadelphia, PA 19428-2959, United States, 2002.

ASTM. D4652 Standard Specification for Silicone Fluid Used for Electrical Insulation. In *Annual Book of ASTM – Electrical Insulating Liquids and Gases*, volume 10.03, ASTM International, Philadelphia, PA 19428-2959, United States, 2005.

ASTM. D2472 Standard Specification for Sulfur Hexafluoride. In *Annual Book of ASTM – Electrical Insulating Liquids and Gases*, volume 10.03, ASTM International, Philadelphia, PA 19428-2959, United States, 2006.

ASTM. D3487 Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus. In *Annual Book of ASTM – Electrical Insulating Liquids and Gases*, volume 10.03, ASTM International, Philadelphia, PA 19428-2959, United States, 2006.

ASTM. D2779 Standard Test Method for Estimation of Solubility of Gases in Petroleum Liquids. In *Annual Book of ASTM – Electrical Insulating Liquids and Gases*, volume 05.01, ASTM International, Philadelphia, PA 19428-2959, United States, 2007.

BERTRAND, Y. e HOANG, L. C. Vegetal Oils as Substitute for Mineral Oils. In *IEEE Proceedings of 7th Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, Japan. IEEE, 2003.

BORSI, H. e GOCKENBACH, E. Properties of Ester Liquid Midel 7131 as an Alternative Liquid to Mineral Oil for Transformers. In *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, pages 377-380. IEEE, 2005.

CELECTRA. Componentes e Acessórios para Transformadores Elétricos de Potência e Distribuição. São Paulo, SP, Brasil, 2006.

CHIQUITO, A. J. e JR., F. L. Bobina Tesla: dos circuitos ressonantes LC aos princípios das telecomunicações. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22(1): 69-77, 2000.

CHOU, J. *Hazardous Gas Monitors: a practical guide to election, operation and applications*. McGraw-Hill Book Company, New York, United States of America, 2000.

CIOLA, R. *Introdução à Cromatografia em Fase Gasosa*. Editora Edgar Blücher, São Paulo, SP, 1973.

CLAIBORNE, C. C. e PEARCE, H. A. Transformer Fluids. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 5(4):16-19, 1989. Westinghouse ABB Power Transformer T&D Company.

CLARK, F. M. *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc., New York, United States of America, 1962.

COHN, P. E. *Analisadores Industriais: no processo, na área de utilidades, na supervisão da emissão de poluentes e na segurança*. Interciência – IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás), Rio de Janeiro, RJ, 2006.

DAI, J., KHAN, I., WANG, Z. D., e COTTON, I. Comparison of Hydran and Laboratory DGA Results for Electric Faults in Ester Transformer Fluids. In *2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pages

731-734, Vancouver, British Columbia, Canada. IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, 2007.

DARVENIZA, M., SAHA, T. K. HILL, D. J. T., E LE, T. T. Investigations Into Effective Methods for Assessing the Condition of Insulation in Aged Power Transformers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 13(4):1214-1223, 1998.

DAYRAN, L. A e ARAKELYAN, V. G. The Ageing Cavitation Mechanism of High-Voltage Oil-Filled Insulation. In *IEEE Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pages 244-247, Seoul, Korea. IEEE, 1997.

DEAN, J. A. *Handbook of Organic Chemistry*. McGraw-Hill Books Company, United States of America, 1987.

DHIBA, D. *Étude du vieillissement de l'isolation Papier/buile dans les Transformateurs de Puissance: Influence des Inhibiteurs d'Oxydation*. Tese de Doutorado, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 1995.

DIGIORGIO, J. D. Dissolved Gas Analysis of Mineral Oil Insulating Fluids. Northern Technology & Testing, Sacramento, CA, USA, 2005.

DORF, R. C. editor. *The Electrical Engineering Handbook*. Dielectrics and Insulators. CRC Press, LLC, Florida, USA, 2000.

DUVAL, M. Fault Gases Formed in Oil-Filled Breathing EHV Power Transformers – The Interpretation of Gas Analysis Data. *IEEE-PES*, C 74:476-8, 1974.

DUVAL, M. Dissolved Gas Analysis: it can save your transformer. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 5(6):22-27, 1989.

DUVAL, M. A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 18(3):8-17, 2002.

DUVAL, M. New Techniques for Dissolved Gas-in-Oil Analysis. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 19(2): 6-15, 2003.

FARBER, M. Gas Chromatograph Techniques for On-line Testing of Transformer Faults. United States Patent 5659126, 1997. Disponível em : <<http://www.patentstorm.us/patents/569126-fulltext.html>>. Acesso em: 12 nov. 2007.

FILHO, A. B. *Estudo Químico de Óleos Isolantes Elétricos por Cromatografia, Extração com Fluido Supercrítico e Degradação Radiolítica*. Tese de Doutorado, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

FILHO, J. M. *Manual de Equipamentos Elétricos*. Rio de Janeiro, RJ, 3 edição, 2005.

GIBBS, J. B. *Transformers: principles and practice*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, NY, United States of America, 2nd edition, 1950.

GILL, A. S. The Design of Transformer Oil. In *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pages 247-250, Anaheim, CA, USA. IEEE, 2000.

GRIFFIN, P. J. Criteria for the Interpretation of Data for Dissolved Gases in Oil from Transformers (A Review). In *Electrical Insulating Oils, STP 998*, volume 76, pages 89-106, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988.

GRIGSBY, L. L., editor. *The Electric Power Engineering Handbook*. Transformers. CRC Press LLC and IEEE Press, Auburn University, Alabama, USA, 2001.

GROB, R. L. e BARRY. E. F., editors. *Modern Practice of Gas Chromatography*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, United States of America, 4th edition, 2004.

GROSSNER, N. R. *Transformers for Electronic Circuits*. McGraw-Hill, Inc., New York, United States of Americana, 2nd edition, 1983.

HAN, Y. e SONG, Y. H. Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment – A Literature Survey. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 18(1):4-13, 2003.

HARLOW, J. H., editor. *Electric Power Transformer Engineering*. CRC Press LLC, Florida, USA, 2004.

HEATHCOTE, M. J. *The J & P Transformer Book*. Newnes, Great Britain, 12th edition, 1998.

HEINRICHS, F. W. Bubble Formation in Power Transformer Windings at Overload Temperature. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 5(5):1576-1582, 1979.

IEEE. IEEE Std 101-1987 – IEEE Guide for Statistical Analysis of Thermal Life Test Data. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, United States of America, 1988.

IEEE. IEEE Std C57.104-1991 – IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generates in Oil-Immersed Transformers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, United States of America, 1992.

IEEE. Background Information on High Temperature Insulation for Liquid-Immersed Power Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(4):1892-1906, 1994.

IEEE. IEEE Std C57.12.60-1998 – IEEE Guide for Test Procedures for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Solid-Cast and Resin-Encapsulated Power and Distribution Transformers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, United States of America, 1998.

JOHNSON, G. L. Building the World's Largest Tesla Coil – History and Theory. In *IEEE Proceedings of the Twenty-Second Annual North American Power Symposium*,

pages 128-135, Manhattan, Kansas 66506. Electrical and Computer Engineering Department, Kansas States University, IEEE, 1990.

KAUFMANN, G. H. Gas Bubbles in Distribution Transformers. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-96(5):1596-1601, 1977.

KELLY, J. J. Transformer Fault Diagnosis by Dissolved-Gas Analysis. *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. IA-16(6):777-782, 1980.

KELLY, J. J. Transformer Life Extension Through Proper Reinhibiting and Preservation of the Oil Insulation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1(1):55-60, 1995.

LANÇAS, F. M. *Cromatografia em Fase Gasosa*. Editora Acta, São Carlos, SP, 1993.

LIDE, D. R., editor. *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, United States of America, 81st edition, 2000.

LIN, C., LING, J. M., e HUANG, C. L. An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 8(1): 231-238, 1993.

MAIRI. BlockGás Portátil – Inspeção e Medição de Gases. Mairi Eletro Eletrônica Ltda., São Paulo, SP, 2006.

MCNUTT, W. J., ROUSE, T., e KAUFMANN, G. H. Mathematical Modeling of Bubble Evolution in Transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(2):477-487, 1985.

MESSIAS, J. R. *Guia Prático de Ensaio Físico-Químicos na Manutenção de Transformadores de Potência*. São Paulo, SP, 1993.

MILASH, M. *Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante*. Editora Edgar Blücher, São Paulo, SP, 1984.

MINHAS, M. S. A., HOCH, D. A., e REYNDERS, J. P. Enhancing the Flame, Thermal and Partial Discharges Performance of Mineral Oil. In *IEEE Proceedings of 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, volume1, pages11-114, Brisbane, Australia. IEEE, 1994.

MORAIS, D. R. Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado) -, Universidade Federal de Santa Catarina, Engenharia Elétrica.

MORRISON, T. R. e BYOB, R. N. *Química Orgânica*. Fundação Calouste Gulbekian, Lisboa, Portugal, 9th edition, 1990.

MULLEN, C. T., CLAIBORNE, C., e OOMMEN, T. V. Biodegradable Electrical Insulation Fluids. In *IEEE Electrical Insulation Conference Proceedings*, pages 465-468, Illinois, USA. ABB Power T&D Company Inc., 1997.

MYERS, S. D., KELLY, J. J., e PARRISH, R. H. *A Guide to Transformer Maintenance*. Akron, OH: Transformer Maintenance Inst., United States of America, 1981.

NBR5356. Transformadores de Potência – Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 1993.

NBR7070. Guia para Amostragem de Gases e óleo em Transformadores e Análise dos Gases Livres e Dissolvidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 1981.

NBR7274. Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em Serviço – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 1982.

NEPOMUCENO, L. X. *Técnicas de Manutenção Preditiva*. Editora Edgar Blücher, São Paulo, SP, 1989.

NOGUEIRA, C. A. A. Avaliação de Sistemas de Medição da Concentração de Hidrogênio Dissolvido em Óleo Isolante. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado) -, Universidade Federal de Santa Catarina, Metrologia Científica Industrial.

OLIVEIRA, J. C., COGO, J. R., e ABREU, J. P. G. *Transformadores: teoria e ensaios*. Editora Edgar Blücher, São Paulo, SP, 1984.

OOMMEN, T. V. Adjustments to Gas-in-Oil Analysis Data Due to Gas Distribution Possibilities in Power Transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(6): 1716-1722, 1982. Westinghouse Electric Corporation, Large Power Transformer Division, 23rd Street ad Cowan Road, Muncie, Indiana 47302.

OOMMEN, T. V., CLAIBORNE, C., WALSH, E., e BAKER, J. P. A. A New Vegetable Oil Based Transformer Fluid: development and verification. In *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pages 308-312. ABB Power T&D Company Inc., 2000.

REED, E. G. *Transformer Construction and Operation*. McGraw-Hill Book Company Inc., New York, USA, 1st edition, 1928.

REPSOL. Repsol YPF – Óleo para Transformador. Buenos Aires, Argentina, 2006.

ROUSE, T. O. Mineral Insulating Oil for Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 14(3):6-16, 1998.

SAHA, T. K., DARVENIZA, M., HILL, D. J. T., e LE, T. T. Electrical and Chemical Diagnostics of Transformers Insulation- A. Aged transformer samples. *IEEE*

Transactions on Power Delivery, 12(4):1547-1554, 1997. Dept. of Electr. & Comput. Eng., Queensland Univ., Australia.

SAHA, T. K., DARVENIZA, M., HILL, D. J. T., e LE, T. T. Electrical and Chemical Diagnostics of Transformers Insulation- B. Accelerated aged insulation samples. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(4):1555-1561, 1997. Dept. of Electr. & Comput. Eng., Queensland Univ., Australia.

SCOTT, R. P. W. *Introduction to Analytic Gas Chromatography*. Marcel Dekker Inc., New York, United States of America, 2nd edition, 1998.

SIEMENS. Transformadores de Força. Jundiaí, SP, 2001.

SIEMENS. My Transfo do Brasil 2007 – Gerenciamento da vida dos transformadores de força. Power Transmission and Distribution TLM, Siemens Brasil PTD T (TUSA), Jundiaí, SP, 2007.

SIHVO, V. e PYRHÖNEN, J. Steam-Resistivity of Wire Insulating Materials. In *Power Tech 2007*, volume A2, 283, pages1-5, Lausanne, Switzerland. IEEE, 2007. Department of Electrical Engineering, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland.

STIGANT, S.A. e FRANKLIN, A. C. *Transformer Book*. John Wiley & Sons Inc., New York, United States of America, 10th edition, 1973.

SUWARNO. The Influence of Arc on Dissolved Gases in Transformer Oils. In *8th International Conference of Properties and Applications of Dielectric Materials, 2006*, pages 498-501, Indonesia. IEEE, 2006.

WANG, M., VANDERMAAR, A. J., e SRISVASTAVA, K. D. Review of Condition Assessment of Power Transformer in Service. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 18(6):12-25, 2002.

YANMING, L., GANG, L., YING, L., e YAN, X. The Application Analysis of the On-Line Monitoring System of Dissolved Gas in Transformer Oil. In *2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pages 747-750, Vancouver, British Columbia, Canada. IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, IEEE, 2007.

YUEN, D. C. M., CHOI, V., GAO, L. Z., e HAN, J. The First 110 kV / 35 kV – 31,5 MVA Cast Resin Transformer. In *Industry Applications Conference. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*, volume 2, pages 763-767. IEEE, 2004.