



DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA UTILIZANDO A DUALIDADE ENTRE OS ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICO E CROMATOGRÁFICO

F. R. Barbosa*

O. M. Almeida*

A. P. S. Braga*

M. A. B. Amora*

*** Universidade Federal do Ceará**

RESUMO

O diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência imersos em óleo está diretamente relacionado à avaliação das condições do sistema de isolamento. Este estudo aborda a relação entre os gases dissolvidos no óleo e a qualidade do óleo mineral isolante utilizado em transformadores de potência. As redes neurais artificiais são utilizadas na abordagem da avaliação das condições operacionais do óleo isolante em transformadores de potência, que é caracterizada por um comportamento dinâmico não-linear. As condições de operação e a integridade do sistema de isolamento de um transformador de potência podem ser inferidas através das análises físico-químicas e cromatográficas (Análise de Gás Dissolvido). Estes ensaios permitem estabelecer procedimentos de operação e manutenção do equipamento e normalmente são realizados simultaneamente. Os testes físico-químicos são utilizados para avaliação da qualidade do dielétrico enquanto os ensaios cromatográficos fornecem os percentuais de gases dissolvidos necessários para o diagnóstico de falhas incipientes. Esta contribuição técnica descreve um método que pode ser usado para extrair informações cromatográficas usando as análises físico-químicas através de redes neurais artificiais. As análises atuais das propriedades físico-químicas fornecem apenas diagnóstico do estado do óleo, o que não permite o diagnóstico de falhas incipientes. Entretanto, pelo mesmo método, fazendo-se uso de redes neurais artificiais, é possível extrair informações referentes às propriedades físico-químicas dos ensaios cromatográficos. Os resultados mostraram que esta estratégia é promissora nos percentuais de previsão das informações. O objetivo deste trabalho é demonstrar a relação de dualidade entre os dois testes mais importantes na manutenção de transformadores de potência, além da possibilidade do trânsito entre suas informações. Acredita-se que, as concessionárias de energia podem melhorar a confiabilidade na previsão de falhas incipientes e na análise do estado do óleo a um custo menor com este método, redução de pelo menos 50%, uma vez que apenas um ensaio seria necessário.

PALAVRAS-CHAVE

Diagnóstico, Transformadores de Potência, Análise de Gases Dissolvidos, Cromatografia, Físico-Químico, Redes Neurais Artificiais.

1. INTRODUÇÃO

Tendo-se em vista as demandas exigentes e crescentes de energia elétrica em tempos atuais, as faltas que comprometem a disponibilidade do sistema elétrico que o obriguem a sair de operação tornam-se cada vez mais averiguadas pelos agentes de regulamentação do setor.

Diante deste cenário, os transformadores são importantes por se encontrarem em toda extensão do sistema elétrico: geração, transmissão e distribuição.

Largamente usado em transformadores, o óleo mineral apresenta as funções de conferir o isolamento e a refrigeração. Inerente a sistemas de monitoramento e diagnóstico de transformadores de potência há o objetivo de se avaliar falhas incipientes através da análise dos gases dissolvidos no óleo isolante [2, 4]. De forma semelhante, há a necessidade de verificação da qualidade dielétrica e da integridade do líquido isolante por meio das grandezas físico-químicas [10, 12].

A qualidade dielétrica do óleo isolante de transformadores e as falhas incipientes de natureza térmica e elétrica destes equipamentos podem ser determinadas a partir dos ensaios físico-químicos e cromatográficos [5, 7, 9). Estes ensaios são importantes para orientar o programa de manutenção das concessionárias. Entretanto, o ensaio cromatográfico é mais informativo que os testes físico-químicos e, por isso, mais usual no diagnóstico de falhas em transformadores uma vez que fornece medidas quantitativas das concentrações de gases dissolvidos no óleo que indicam condições operacionais que comprometem a vida útil do transformador [3, 14].

A relação entre grandezas físico-químicas e concentração de gases é implementada neste trabalho através de Redes Neurais Artificiais (RNA) que, a partir de exemplos, aprendem a realizar mapeamentos lineares ou não-lineares, sendo considerados aproximadores universais [8].

2. ANÁLISE DO ÓLEO ISOLANTE

O sistema de isolamento de um transformador, mesmo operando em condições de normalidade, sofre redução de sua capacidade na medida em que envelhece. No caso de operação em condições críticas, esta redução pode ser acelerada e a vida útil do isolamento se torna mais breve. Quando o isolamento não tem mais integridade para realizar sua função tem-se a falha do isolamento.

As falhas incipientes podem ser classificadas em termos dos esforços térmicos (sobreaquecimentos) e elétricos (descargas internas). Estes esforços ocorrem tanto de forma isolada quanto simultânea.

Quando submetidos a temperaturas na faixa de 150°C a 500°C os óleos minerais utilizados para isolamento sofrem decomposição em gases de baixo peso molecular, tais como hidrogênio (H_2) e metano (CH_4), e apenas traços de gases mais pesados, tais como etileno (C_2H_4) e etano (C_2H_6). À medida que a temperatura se eleva, na vizinhança da falha ocorre o aumento da produção de gases mais pesados. Entretanto, quando uma falha promove o aumento substancial da temperatura, há produção de acetileno (C_2H_2). As moléculas do papel isolante podem se degenerar como resultado de falhas térmicas aliada à presença de umidade e óxidos. Em temperaturas baixas, a decomposição térmica da celulose e outros isolamentos sólidos produz água e óxidos de carbono (CO e CO_2) em quantidades relevantes [4, 9].

2.1 Análise dos Gases Dissolvidos (DGA)

Vários métodos de análise dos gases dissolvidos (DGA) têm sido desenvolvidos e empregados nos parques elétricos de todo o mundo gerando um ambiente de confiança na metodologia à medida que esta logra êxito com o passar dos anos. A análise cromatográfica é amplamente documentada e até padronizada por normas, tais como: NBR 7070, IEC 599 e IEEE C57.104.

A base das técnicas de DGA consiste em submeter a amostra do óleo isolante à um processo de cromatografia em fase gasosa que estratifica as concentrações dos gases dissolvidos no óleo. As várias técnicas para interpretação da análise cromatográfica, visam diagnosticar a condição atual do sistema de isolamento do transformador. Dentre os métodos mais conhecidos são: método do gás chave, triângulo de Duval, os métodos das razões de Dörnenburg e Rogers.

2.2 Análise das Propriedades Físico-Químicas

As análises das características físico-químicas geram dados que permitem avaliar o estado do óleo. As propriedades físico-químicas fornecem uma descrição do estado do óleo isolante. Com esta descrição é possível inferir as condições de uso continuado do isolante garantindo que o transformador tenha um sistema de isolamento capaz de responder às requisições de serviço de modo satisfatório.

Através de cartas de avaliação extraídas dos procedimentos de referência, como catálogos de fabricantes, pode-se classificar o óleo analisado. A classificação pode exigir a troca do óleo caso exista algum indicativo de anormalidade.

Por depender da aplicação de muitas normas em vários resultados de ensaios para se obter uma avaliação da qualidade do óleo, a tarefa de diagnosticar o estado do líquido isolante do transformador pode se tornar uma tarefa complexa que requer experiência do operador. Ultimamente, tem sido feito uso de ferramentas inteligentes para efetuar tal trabalho [4].

A caracterização de um óleo mineral para a utilização como isolante não é feita pela composição da mistura do mesmo, mas por uma série de parâmetros físico-químicos. Assim, o estabelecimento de limites para esses parâmetros tem como objetivo alcançar uma uniformidade de comportamento como isolante e referências de qualidade para sua utilização [15].

3. RELAÇÃO ENTRE AS GRANDEZAS DOS ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICO E CROMATOGRÁFICO

A qualidade dielétrica do óleo isolante e as falhas incipientes de natureza térmica e elétrica podem ser determinadas a partir de ensaios físico-químico e cromatográfico. Estes ensaios são, portanto, de grande importância para manter a integridade dos transformadores de potência.

Amostras de óleos ensaiadas com métodos de espectroscopia dielétrica apresentam correlação entre o envelhecimento do óleo e o fator de perdas ($\tan \delta$). Amostras com características físico-químicas alteradas apresentam fator de perdas dependente da temperatura [7].

Os estudos de [13] demonstram que a condutividade do óleo, parâmetro complementar à rigidez dielétrica, mantém uma relação ascendente com a temperatura.

Pesquisas de [1] relacionam envelhecimento do óleo isolante às modificações nas características físico-químicas como: tensão de ruptura, acidez, teor de água, cor e viscosidade cinemática. Foi verificada a influência do envelhecimento por efeito térmico nas propriedades físico-químicas do óleo.

Sabe-se também que o óleo isolante tende a ter má qualidade com o decréscimo da rigidez dielétrica e da tensão interfacial e com o aumento do teor de água e da acidez [11].

Em suma, os estudos apontam uma possível correlação entre a degradação do óleo e os valores das análises físico-químicas, porém, ainda não explorada na literatura.

Diante do exposto, há possibilidade aparente de se obter relações entre as características físico-químicas e cromatográficas, porém não há uma forma clara de se obtê-la.

A proposta de se obter a associação das características físico-químicas com a geração de gases dissolvidos no óleo isolante envolve o uso de RNA devido a sua característica de serem consideradas aproximadores universais e aprenderem através de apresentação de exemplos [8].

Considerando os resultados obtidos por [12], foram definidas as características físico-químicas que influenciam na qualidade do óleo isolante. O vetor de entrada a ser aplicado às RNA é constituído dos seguintes elementos: Acidez, Rigidez Dielétrica, Teor de Água, Tensão Interfacial, Densidade e Fator de Potência do Óleo.

A estimação dos gases dissolvidos é obtida na saída da rede neural. Foram estimadas as concentrações dos seguintes gases: Hidrogênio (H_2), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Etano (C_2H_6), Etileno (C_2H_4) e Acetileno (C_2H_2).

Foi concebida uma RNA MLP (Multi-Layer Perceptron) para estimar cada gás dissolvido no óleo. Portanto, sete RNA dão a ligação associativa entre as entradas físico-químicas e as concentrações dos gases dissolvidos no óleo.

Foram utilizados 357 dados no projeto de sete RNA MLP. Para a fase de treinamento foram usados 60% dos dados. Para teste, 20%. Os dados foram normalizados de forma a compreender os valores mínimos e máximos no intervalo [-1, 1]. O treinamento foi elaborado com o método de Levenberg-Marquardt. A camada de neurônios escondidos apresentou como melhor configuração um total de 10 neurônios para a RNA que estima acetileno. As demais, a quantidade de 5 neurônios apresentou resultado satisfatório. Todas as RNA foram treinadas e testadas em séries de 30 repetições.

Os resultados são apresentados nas Tabela 1, medindo o percentual do acerto da previsão dada pela RNA em relação ao valor real da concentração do gás dissolvido.

Tabela 1 – Taxa de Acerto RNA estimando gás.

Taxa de Acerto Acetileno	Treinamento (%)	Teste (%)
Mínimo	93,95	91,55
Médio	96,61	96,48
Máximo	99,07	100,00
Desvio Padrão	1,52	2,42
Taxa de Acerto Hidrogênio	Treinamento (%)	Teste (%)
Mínimo	97,21	94,37
Médio	97,86	87,65
Máximo	98,14	100,00
Desvio Padrão	0,54	2,93
Taxa de Acerto Etano	Treinamento (%)	Teste (%)
Mínimo	92,09	80,28
Médio	95,19	89,01
Máximo	98,14	98,59
Desvio Padrão	1,65	4,44
Taxa de Acerto Etileno	Treinamento (%)	Teste (%)
Mínimo	86,51	78,87
Médio	89,74	84,41
Máximo	93,95	92,96
Desvio Padrão	1,81	3,77
Taxa de Acerto Metano	Treinamento (%)	Teste (%)
Mínimo	88,37	76,06
Médio	91,00	85,02
Máximo	93,95	92,96
Desvio Padrão	1,56	4,23
Taxa de Acerto Dióxido de Carbono	Treinamento (%)	Teste (%)
Mínimo	82,58	63,79
Médio	85,28	73,97
Máximo	88,76	84,48
Desvio Padrão	1,90	5,98
Taxa de Acerto Monóxido de Carbono	Treinamento (%)	Teste (%)
Mínimo	91,11	55,93
Médio	95,22	67,34
Máximo	99,44	79,66
Desvio Padrão	1,93	5,75

4. DIAGNÓSTICO DE FALHAS INCIPIENTES DIRETAMENTE A PARTIR DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

A possibilidade confirmada de se estimar os gases dissolvidos abre caminhos para investigação do diagnóstico de falhas incipientes diretamente a partir das propriedades físico-químicas.

O diagnóstico de falhas incipientes se baseia na cromatografia de óleo isolante. As propriedades físico-químicas são usadas em paralelo apenas para certificar a qualidade do óleo em sua função como um isolante e refrigerante. O objetivo deste trabalho é a implementação direta do diagnóstico de falhas

incipientes através do uso de propriedades físico-químicas, sem a necessidade de uma cromatografia de óleo. Dessa forma, uma análise apenas seria necessária para fornecer os dois diagnósticos, sobre as falhas incipientes e a qualidade do óleo. Este fato traz benefícios claros para a logística de manutenção de transformadores de grande potência. O diagrama mostrado na Figura 1 ilustra o objetivo desta contribuição técnica.



Figura 1 - Objetivo do estudo proposto.

As análises cromatográficas e físico-químicas, contemporâneas, foram tomadas para a realização de estágios de treinamento e testes das RNA desenvolvidas. A fim de fornecer diagnóstico de falhas, dois modelos de RNA foram concebidos. Os modelos são do tipo Multi-layer Perceptrons (MLP). Um com treinamento Levenberg-Marquardt e outro modelo treinando com Adaptive Back-Propagation. O total de 135 amostras foi usado na proposta do diagnóstico de falhas incipientes a partir de características físico-químicas, apresentando 33 classificações normais, 30 falhas térmicas, 72 falhas elétricas.

No projeto da RNA, os conjuntos de dados de treinamento e teste foram, respectivamente, 94 e 41 amostras. A saída desejada é o diagnóstico previsto no relatório técnico da análise de óleo isolante.

A partir da média e desvio padrão dos dados, os dados são normalizados com média igual a 0 e variância 1. A normalização logarítmica foi também efetuada, porém, os melhores resultados dessa aplicação foram evidenciados somente no algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt. As RNA foram treinadas e testadas em séries de 20 repetições.

A Tabela 2 apresenta os valores da taxa de acerto para MLP treinada pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt (identificado por LM) e o Adaptive Back-Propagation (identificado por ABP) em conjuntos de treinamento e dados de teste (no mínimo - Min, média - Med, máxima - Max e desvio padrão DP). O melhor desempenho para MLP-LM foi com uma camada escondida com 10 neurônios nesta camada. A MLP-ABP apresenta duas camadas escondidas com 7 e 10 neurônios, respectivamente. Ambas as redes tem 3 neurônios na camada de saída, cada um representando uma classe do diagnóstico de falhas.

Tabela 2 - Resultados do Diagnóstico de Falhas Incipientes a partir de propriedades físico-químicas.

RNA	Treinamento (%)				Teste (%)			
	Min	Med	Max	DP	Min	Med	Max	DP
MLP-LM	100,00	100,00	100,00	0,00	80,49	97,44	100,00	4,94
MLP-ABP	95,74	96,81	98,94	1,09	65,85	71,71	78,05	3,39

Como uma forma comparativa, a Tabela 3 apresenta a aplicação dos métodos clássicos de DGA sobre os dados utilizados na concepção das RNA-MLP. Essas normas incluem o uso dos métodos: Gás Chave, Dörnenburg e Rogers Ratio. A taxa de acerto é calculada em comparação com o relatório técnico de especialista. Na série de dados, alguns casos estão em uma área de não-decisão das normas, onde não é possível fazer qualquer diagnóstico com base nas regras do padrão, como mostra a Tabela 4. O método do Triângulo de Duval foi acrescentado a estes por ser um método sem zonas de não-decisão.

Tabela 3 - Resultados do Diagnóstico de Falhas Incipientes - Métodos IEEE e Triângulo de Duval

Métodos	Acerto (%)	Não-decisão
Gás Chave	45,19	0
Razões de Rogers	40,00	26
Dörnenburg	43,70	79
Triângulo de Duval	61,48	0

Tabela 4 - Exemplos das amostras utilizadas.

Amostras	1	2	3	4	5	6	7
H ₂	15	32	479	75	29	6	7
CH ₄	0,6	26	109	89	76	2	6
CO	24	166	84	756	594	332	80
CO ₂	359	2569	1433	4367	3184	6580	170
C ₂ H ₄	0	80	133	10	63	39	0,3
C ₂ H ₆	0	12	11	68	28	0,2	1
C ₂ H ₂	0	0,6	1121	0	0	0	0
Relatório do Especialista	Normal	Térmica	Elétrica	Térmica	Térmica	Normal	Normal
Gás Chave	Normal	Térmica	Elétrica	Térmica	Térmica	Térmica	Normal
Rogers	Normal	Não-decisão	Elétrica	Não-decisão	Térmica	Normal	Normal
Dörnenburg	Normal	Normal	Elétrica	Não-decisão	Térmica	Normal	Normal
Triângulo de Duval	Elétrica	Térmica	Elétrica	Térmica	Térmica	Térmica	Térmica
MLP-LM	Normal	Térmica	Elétrica	Térmica	Térmica	Normal	Térmica

Os resultados mostrados na Tabela 3 apontam que as normas não cobrem todos os casos considerados, seja por casos onde a norma erra o diagnóstico por casos que coincidem com as zonas de não-decisão. Mesmo o método do triângulo de Duval, sem zonas de não-decisão, não apresenta percentual de acerto maior que os da RNA projetada.

Na Tabela 4 é possível observar como os diversos métodos explorados se comportam no diagnóstico das amostras. Para os exemplos, o relatório do especialista é mostrado como padrão de comparação. A RNA de melhor resultado, MLP-LM, foi considerada para representar o método proposto.

A primeira amostra, considerada normal pelo especialista, foi designada falha elétrica pelo Triângulo de Duval, devido a vértice superior do triângulo conter região de transição para este tipo de falha. Esta região fronteira pode ter causado o diagnóstico equivocado. Entretanto, é importante salientar que esta amostra foi retirada de um transformador cujo óleo isolante havia sido substituído por óleo novo, decisão tomada devido a indicação da análise das propriedades físico-químicas. Nos três testes físico-químicos anteriores, o valor do teor de água apresentou os seguintes valores: 30,0 p.p.m., 34,8 p.p.m., 41,6 p.p.m, respectivamente. Os valores de acidez foram: 0,166 mg KOH/g, 0,175 mg KOH/g e 0,200 mg KOH/g, respectivamente. Tais valores são crescentes e com diferença de menos de um ano entre a primeira e a última amostra. Todos os valores apontam para faixas fora da normalidade. Por conta disso a decisão de substituição do óleo e reamostragem para testes. Porém, a substituição não isenta que impurezas advindas do contato do óleo com as partes ativas do transformador o tenham contaminado a ponto de distorcer os cálculos do método de Duval.

As amostras 2 e 4, classificadas pelo especialista como falha térmica, apresentam um exemplo de diagnóstico não previsto pelos métodos de Rogers e de Dörnenburg. Não há regiões que localizem a coordenada de falha da amostra.

Na amostra 3, não há divergência entre os métodos e o especialista. Isso se deve ao valor acentuado de acetileno. Por ser um gás formado a partir de grandes temperaturas de falhas é evidente que há um causador de altas temperaturas no interior do equipamento. A amostra 5 possui diagnóstico comum entre todos os métodos e concordante com o especialista que classificou essa amostra como falha térmica. Provavelmente, devido a relação entre os óxidos de carbono indicando sobreaquecimento na celulose, considerada aqui como falha térmica.

Na amostra 6, os métodos do Gás Chave e de Duval relatam falha térmica, diferenciando do especialista que diagnosticou caso de normalidade. O método do Gás Chave usa os valores dos óxidos de carbono para inferir sobreaquecimento na celulose. Em termos do triângulo de Duval, as coordenadas apontam o vértice inferior direito, região identificada como falha térmica, logo, erro inerente ao método.

A amostra 7, classificada pelo especialista como normal, tem diagnóstico apontado como térmico somente pelo triângulo de Duval, além da RNA. O método de Duval aponta região próxima ao vértice superior, designada como falha térmica de baixa temperatura, em uma faixa de transição que pode confundir operação normal com situação de sobrecarga e sobreaquecimento momentâneo. Com

relação à RNA, o neurônio vencedor, neste caso o representante da falha térmica, apresentou valor de saída aproximadamente 80% maior que os demais neurônios de saída. Por isso esse foi o diagnóstico fornecido pela RNA. Entretanto, em outros ciclos de treinamento e teste, com escolha aleatória das amostras para treinamento e teste, não foi verificado erros envolvendo esta amostra.

É importante salientar que as amostras 6 e 7 sofreram processos de desgaseificação antes de serem amostradas, indicados por valores de teor de água e/ou rigidez dielétrica fora das faixas de normalidade. Este processo também envolve a secagem, ou desumidificação, do óleo antes de ser retomada sua operação. Porém, ao entrar em contato novamente com as partes ativas do transformador, é possível a alteração nos valores das propriedades físico-químicas, bem como nas concentrações dos gases dissolvidos. Devido a isso, a avaliação das análises físico-químicas e cromatográficas alinhadas ao histórico do transformador é de suma importância para a precisão dos resultados das análises.

A amostra 6 apresenta valor de teor de água fora do padronizado como normal, 40,4 p.p.m., valor referente a óleo em condições insuficiente para uso. Também apresenta valor de rigidez dielétrica 24,5 kV, compatível com óleo em condições de condicionamento para eliminar características de envelhecimento. A amostra 7 apresenta valores em condições anormais para acidez, teor de água e tensão interfacial, 0,181 mg KOH/g, 16,8 p.p.m., 21,1 mN/m. Estes valores fora das faixas de normalidade não influenciaram a decisão do especialista quanto ao diagnóstico normal de falhas devido o acesso ao histórico de desgaseificação imediatamente anterior à amostragem.

5. CONCLUSÃO

Através dos resultados apresentados conclui-se que é possível elaborar um diagnóstico de falhas diretamente a partir dos dados físico-químicos do óleo isolante do transformador. Em situações de âmbito real, como o universo de dados utilizados nesta tese, demonstra-se resultados satisfatórios na classificação de falhas com taxa de acerto da ordem de 100% nos melhores casos. O método proposto aqui apresenta êxito em situações onde as normas apresentam erros de diagnóstico e em situações onde ocorrem as zonas de não-decisão. Aliado a isso, a diagnóstico diretamente a partir das propriedades físico-químicas acompanharam com mais eficiência as avaliações do especialista onde este faz uso de informações históricas das amostras e cruzamento de informações dos ensaios físico-químicos. Este tipo de ação não é refletida por nenhum método de diagnóstico clássico, configurando-se em mais uma vantagem do método de diagnóstico proposto neste trabalho.

Durante os períodos entre amostras recomendados por normas, que em caso de ensaio normal pode chegar a 12 meses, a disponibilidade de dados que assegurem o bom desempenho do equipamento sempre é vantajoso. Soma-se a isso que, ao invés de se realizar dois ensaios, apenas um teste, no caso o físico-químico, seria necessário para um diagnóstico prévio sobre os gases dissolvidos. Vale ressaltar que, no mercado, os dois testes apresentam ônus financeiros próximos. Isso equivale a dizer que a proposta pode reduzir pela metade os volumes financeiros consumidos para se obter este diagnóstico que protege o equipamento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ABDI, S.; BOUBAKEUR, A.; HADDAD, A.; "Influence of thermal ageing on transformer oil properties," Dielectric Liquids, 2008. ICDL 2008. IEEE International Conference on , vol., no., pp.1-4, 2008.
- [2] ALMEIDA, O. M.; BARBOSA, F. R.; AMORA, M. A. B.; BRAGA, P. R. O. Diagnóstico de Transformadores Utilizando Monitoramento On-line. Anais do XII ERIAC - Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, PR, 2007.
- [3] AMORA, M. A. B. ; ALMEIDA, O. M.; BRAGA, A. P. S.; BARBOSA, F. R.; LIMA, S. S; LISBOA, L. A. C.; "Extraction of Knowledge from Artificial Neural Networks to

- Application in Analysis of Transformers”, The 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems ISAP 2009, Curitiba, 2009.
- [4] BARBOSA, F. R., “Monitoramento on-line e diagnóstico inteligente da qualidade dielétrica do isolamento líquido de transformadores de potência”, Dissertação de Mestrado, UFC/CT/PPGDEE – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza, CE, 2008.
 - [5] BIRLASEKARAN, S.; LEDWICH, G.; "Possible indicators of aging in oil-filled transformers part 1: measurements," Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.26, no.1, pp.26-32, 2010.
 - [6] DUVAL, M.;"A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers" - Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2002.
 - [7] FERGUSON, R.; LOBEIRAS, A.; SABOU, J. Suspended Particles in the Liquid Insulation of Aging Power Transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine. vol. 18, v. 4, pp. 17-23, 2002.
 - [8] HAYKIN, S. Redes Neurais: Princípios e Práticas. Trad. Paulo Martins Engel, 2ª ed., Porto Alegre, RS, Bookman, 2001.
 - [9] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.104-1991, 2008.
 - [10] MOKHNACHE, L.; BOUBAKEUR, A. Comparison of Different Back-propagation Algorithms Used in the Diagnosis of Transformer Oil. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena IEEE, Waterloo, Canada, 2002.
 - [11] PALMER, J.A.; WANG, X.; SHOURESHI, R.A.; MANDER, A.; TORGERSON, D. RICH, C. Effect of Aging on the Spectral Response of Transformer Oil. Colorado Sch. of Mines, Golden – CO, Electrical Insulation, Conference Record of the 2000, IEEE International Symposium, pp. 460-464, Anaheim, CA, USA, 2000.
 - [12] PARASKEVAS, C. D.; VASSILIOU, P.; DERVOS, C. T. Temperature Dependent Dielectric Spectroscopy in Frequency Domain of High-voltage Transformer Oils Compared to Physicochemical Results, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 3, pp. 539-546, 2006.
 - [13] PEYRAQUE, L.; BEROUAL, A.; BURET, F. Static Electrification of Pressboard/Oil Interface and Transient Phenomena. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 5, no. 3, pp. 443-449, 1998.
 - [14] PRZYBYLEK, P.; NADOLNY, Z.; MOSCICKA-GRZESIAK, H.; “Bubble Effect as a Consequence of Dielectric Losses in Cellulose Insulation”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 3, pp. 913-919, 2010.
 - [15] ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamentos de Papel Impregnado com Óleo Mineral. SBA Controle & Automação, vol. 16, no. 3, pp. 318-331, 2005.