HELENA MARIA WILHELM	Diagno Materiais e Meio Ambiente, Pesquisa e Desenvolvimento e Análises Quí-micas LTDA	helenaw@diagno.srv.br
Julio C. P. Mello	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	julio.pereira@AES.com
Carlos A. Silva	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	carlos.alves@aes.com
Mauricio Mattoso	Diagno Materiais e Meio Ambiente, Pesquisa e Desenvolvimento e Análises Quí-micas LTDA	mattoso@diagno.svr.br
Natalia Piovezan	Diagno Materiais e Meio Ambiente, Pesquisa e Desenvolvimento e Análises Quí-micas LTDA	natalia@diagno.srv.br
Paulo Fernandes	Diagno Materiais e Meio Ambiente, Pesquisa e Desenvolvimento e Análises Quí-micas LTDA	ferandes@diagno.srv.br
Jose Henrique C. Hossri	Diagno Materiais e Meio Ambiente, Pesquisa e Desenvolvimento e Análises Quí-micas LTDA	henrique@mgtrafos.com.br
Claudio Aparecido Galdeano	MGM Consultoria	claudio@mgmdiag.com.br
Milton M. Silva Junior	Diagno Materiais e Meio Ambiente, Pesquisa e Desenvolvimento e Análises Quí-micas LTDA	junior@mgmdiag.com.br

Aplicação de peneira molecular na secagem da isolação sólida em transformadores de potência energizados

Palavras-chave

Material adsorvente
Monitoramento
Secagem
Transformadores
Umidade
Óleo mineral isolante

Resumo

A pesquisa teve por objetivo principal avaliar a aplicação de um novo material adsorvente para remover a água do óleo mineral isolante (OMI) em transformadores energizados, em operação. Foi testado também um processo para recuperar o material adsorvente, visando seu reuso. Os resultados obtidos indicaram que é possível remover água do OMI em transformadores energizados de forma segura e com monitoramento *online*, remoto, usando uma peneira molecular, reciclável pela lavagem com vapor d'água quente.

1. Introdução

Durante a vida útil dos transformadores, ocorre tanto a formação de água em decorrência da degradação do papel isolante quanto a formação de produtos da oxidação do óleo, mas água atmosférica também pode entrar no equipamento em operação, apesar dos sistemas de preservação existentes. Normalmente mais de 90% da água presente no transformador encontra-se distribuída na celulose (ROIZMAN & DAVYDOV & DUKARM, 2006, p. 1-20).

A água e os compostos de oxidação do óleo ficam principalmente retidos no papel isolante e passam a ter contribuição significativa na aceleração do envelhecimento do próprio papel e na conseqüente redução da vida útil do equipamento. À medida que o papel deteriora sua resistência elétrica e mecânica diminuem. Em geral, a durabilidade mecânica do isolamento é reduzida pela metade para cada duplicação do teor de água, enquanto que a taxa de deterioração térmica do papel é proporcional ao seu teor de água (FOFANA & WASSERBERG & BORSI & GOCKENBACH, 2004, p. 20-30).

A secagem do transformador em operação é recomendada quando o limite de saturação da água no óleo tiver sido atingido (FOFANA & WASSERBERG & BORSI & GOCKENBACH, 2004, p. 20-30). O tratamento com termovácuo (utilização de vácuo com aquecimento) é eficiente na secagem do óleo mineral isolante (OMI), porém, como o tempo para estabelecer o equilíbrio entre a migração da umidade do papel para o óleo é elevado e o tempo de aplicação do processo no local de instalação do transformador é curto, a secagem da isolação sólida não é eficiente. Além disso, o processo é oneroso uma vez que a remoção da água é feita com aquecimento do óleo.

Recentemente foi introduzido no mercado um processo alternativo de secagem ao sistema termovácuo, baseado no uso de elementos filtrantes (WILINSON & DYER, 2001, p. 1-39). Neste processo, o óleo é continuamente tratado, passando por um conjunto de filtros especiais, preenchidos com material adsorvente, que retêm a umidade. Como o tratamento é feito a longo prazo, o equilíbrio entre a migração da umidade do papel para o óleo é estabelecido e a água continuamente removida do OMI e, consequentemente, da isolação sólida (WILINSON & DYER, 2001, p. 1-39). O tipo de material adsorvente utilizado nesse processo não é divulgado pelo prestador de serviço desse tipo de tecnologia. Visando avaliar a potencialidade de diferentes materiais como agentes adsorventes da umidade do sistema isolante óleo/papel Kraft, com o objetivo final de promover a secagem de transformadores de potência e, utilizar um desses materiais em um teste em campo, foi executado o projeto de pesquisa intitulado “Avaliação do desempenho de novos materiais para secagem de transformadores de potência em campo” (código ANEEL: 0390-002/2009), cujos principais resultados obtidos são apresentados nesse artigo. Em uma etapa preliminar desse projeto foram testados em escala de laboratório diferentes materiais adsorventes (resultados não apresentados nesse artigo), tendo a peneira molecular REF 512 (Zeolita NaA, 4 Å e 2,5 a 5 mm) apresentado o melhor desempenho como agente secante do OMI (SILVA & GALDEANO & MELLO & WILHELM & HOSSRI & MATTOSO & SILVA & PIOVEZAN & FERNANDES, 2011, p. 1-9).

A principal inconveniência do sistema de secagem pelo uso de elementos filtrantes é a geração de passivo ambiental com o descarte dos elementos filtrantes. A recuperação de materiais adsorventes utilizados na regeneração de óleos minerais isolantes em uso é referenciada na literatura (ASSIS & FLEMING & SERRA, 2001, p. 1-6; TRINDADE & GRANATO & STOCCO & TULIO, 2005, 20 p.), porém nada consta sobre a recuperação de peneiras moleculares usadas na secagem do OMI. A recuperação de materiais adsorventes é uma alternativa necessária e importante, desde o ponto de vista econômico como ambientalmente correta, diminuindo a disposição de rejeitos de adsorventes exauridos, além de proporcionar ganhos econômicos diretos pela reutilização do material. Avaliar a recuperação do material adsorvente testado em campo foi um dos objetivos do presente trabalho.

As peneiras moleculares são materiais conhecidos pela designação genérica de zeólitas. São formadas por

compostos alumino-silicatos hidratados altamente cristalinos. São compostas de uma rede tridimensional de tetraedros de AlO_4 e SiO_4 ligados entre si pelos átomos de oxigênio, originando assim uma estrutura microporosa compensada eletronicamente por outros cátions, como por exemplo Na^+, K^+, Ca^{++}, Mg^{++}. A existência de cavidades e de canais regulares de tamanho molecular na estrutura das zeólitas permite a movimentação de moléculas de água em seu interior. A água dos canais é facilmente desprendida e de maneira contínua com o aquecimento. Este processo é seletivo e depende da estrutura particular da zeólita (tamanho do poro) e do tamanho das moléculas, podendo assim ser usada como peneira molecular (FILHO & SILVEIRA & SANT'ANA & SOARES, 2006, p. 1-8). Sua estrutura cristalina complexa ($(Na_2, Ca, Mg)_{29}$ $[Al_{58}Si_{134}O_{384}]$ 240 H_2O) origina diversas variações de estruturas porosas, como a zeólitas X, Y, A, ZSM e SAPO, tendo, cada uma, diferentes capacidades de armazenamento de água em seus poros (FILHO & SILVEIRA & SANT'ANA & SOARES, 2006, p. 1-8).

Neste trabalho foi avaliada a aplicação de uma Zeólita A (NaA), com granulometria de 2,5 a 5 mm e com diâmetro de poro de 4 Å, comercialmente designada, pelo fornecedor, com o código REF 512. A possibilidade de recuperação dessa peneira molecular também foi investigada.

2. Desenvolvimento

Primeiramente foi locada uma máquina comercial de secagem, onde foi aplicada a peneira molecular sob investigação neste estudo. A máquina de secagem era composta por uma unidade móvel contendo colunas para acondicionar o material adsorvente, uma bomba mecânica para promover a circulação do óleo pelo material adsorvente, eletroválvulas, filtros coalescentes e sensores de temperatura, de pressão e de vácuo. Foram adquiridos 300 kg da peneira molecular REF 512 (fornecedor: Grace Davison), material que foi inserido nas colunas da máquina de secagem, conforme ilustrado na Figura 1. A máquina de secagem foi instalada no Transformador TR3 – Número de série 501166, instalado na subestação ETD (Estação Transformadores de Distribuição) Taboão da Serra, da AES ELETROPAULO, com tensão igual a 138/13,8 kV, potência de 15/20 MVA e com capacidade para 15.400 L de OMI (Figura 2).

Figura 1: Colunas preenchidas com a peneira molecular REF 512, utilizadas na máquina de secagem.

Figura 2: Ilustração mostrando o transformador número de série 501166 ao qual foi acoplada a máquina de secagem.

Todo processo de instalação da máquina de secagem na subestação ETD de Taboão da Serra foi realizado pela equipe da empresa MGTRAFOS com assessoria e supervisão de responsáveis da concessionária e de representantes da equipe executora do projeto de pesquisa. A máquina foi conectada por meio das válvulas superior e inferior do transformador (Figura 3), e devidamente aterrada na malha da subestação (Figura 4). O óleo foi bombeado por meio do registro inferior do transformador, passando pelas colunas de adsorção e retornando ao transformador pelo registro do conservador (parte superior). Eletroválvulas foram instaladas nas conexões inferior e superior, programadas para atuarem no caso de avarias no sistema, como vazamentos (Figura 5).

Figura 3: Ilustrações mostrando as válvulas superior e inferior do transformador número de série 501166 ao qual foi conectada a máquina de secagem.

Figura 4: Ilustração mostrando o aterramento da máquina de secagem na malha da subestação.

Figura 5: Ilustração mostrando a eletroválvula instalada na conexão inferior do transformador número de série 501166.

O desempenho da peneira molecular REF 512 como agente de secagem do óleo do transformador foi acompanhado no período de 12/12/2010, data da instalação da máquina de secagem, até o dia 30/05/2011.

O acompanhamento do processo de secagem se deu continuamente, via GPRS (General Packet Radio Service), sistema que envia informações por meio de uma rede telefônica móvel, por meio de sensores de umidade (monitor de umidade MO) e de temperatura, ambos fabricados pela empresa brasileira TREETECH, instalados nas conexões de entrada e de saída do óleo do transformador para a máquina de secagem. Os dados obtidos pelos sensores instalados na máquina de secagem registravam os valores de umidade e temperatura que, por sua vez, eram enviados via GPRS para um sistema Data Center onde eram armazenados (Figura 6) e ficavam disponíveis para consulta em tempo real na internet pelo acesso a um software específico (www.sigma4web.com.br).

Figura 6: Ilustração mostrando a antena de comunicação GPRS instalada no transformador, utilizada na transmissão de dados.

Para acesso aos dados em tempo real foram seguidas as seguintes instruções gerais:

1. Acessado o site www.sigma4web.com.br.
2. Preenchidos os campos de Login e senha.
3. Selecionada a opção – Subestação (Subestação Taboão da Serra).
4. Selecionados os sensores e o intervalo de tempo desejados (por exemplo: Monitor de Umidade - MO de Entrada e Saída).
5. Gerados os Gráficos e Tabelas, a partir da seleção dos dados, descrita no item anterior.

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram acompanhados os seguintes parâmetros para avaliar a eficiência da peneira molecular REF 512 no processo de secagem do transformador:

- Teor de água no óleo,
- temperatura do óleo e
- saturação de água no óleo.

Também foi avaliada nesta pesquisa uma técnica para promover a recuperação da peneira molecular REF 512. Os métodos utilizados com esse protósito foram:

- Secagem em forno tipo mufla, 350 °C (rampa de aquecimento à 1 °C/min).
- Lavagem com vapor d'água, 100 °C, 1000 L/h, utilizando uma caldeira a vapor, e uma coluna de aço inox de 2 x 0,5 m. Após, o material foi seco em forno tipo mufla a 350 ^{0}C, por 24 h.

Foi determinado o teor de óleos e graxas na peneira molecular REF 512 recuperada pelos métodos citados anteriormente, utilizando-se a metodologia descrita na norma ASTM D5765 (ASTM D5765, 2010). A peneira molecular REF 512 nova e recuperada foi testada em laboratório a partir de testes de percolação quanto a sua capacidade de adsorção de umidade presente no OMI. Foi projetado e construído um sistema protótipo de simulação de uma máquina de secagem (Figura 7), que foi utilizado nos testes de percolação em laboratório.

Figura 7. Foto do sistema protótipo da máquina de secagem com destaque para o reservatório de OMI e as duas colunas de adsorção, utilizado nos testes de percolação dos materiais adsorventes.

Para os ensaios no sistema protótipo da maquina de secagem, ilustrado na Figura 7, foram colocados em cada uma das colunas de adsorção em torno 100 a 150 g do adsorvente em teste. O OMI utilizado (5 L) foi o mesmo dos ensaios de imersão, incluindo o nível de umidade. O OMI foi permeado pelo leito das colunas com auxílio da bomba de circulação. A secagem do óleo pelos adsorventes foi monitorada por meio de dois sensores de teor de água, instalados no protótipo (ver Figura 8: um na entrada da primeira coluna e outro na saída da segunda coluna). O fluxo do óleo pelo leito da coluna foi mantido constante em 50 L/h. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente.

A uma temperatura constante, a quantidade adsorvida aumenta com a concentração do adsorbato (água no OMI), e a relação entre a quantidade adsorvida e a concentração é conhecida como isoterma de adsorção. Utilizando o modelo mais simples de adsorção, o de Langmuir (MOORE, 2004, 886 p.), como em (1), foram construídos gráficos relacionando a quantidade de água adsorvida no equilíbrio (q*) com a concentração final (ou residual) de água no OMI, no equilíbrio (Ceq) para a peneira molecular REF 512 nova e recuperada visando comparar seu desempenho.

$$q^* = qm \cdot b \cdot Ceq / (1 + b \cdot Ceq) \qquad (1)$$

onde q* é a quantidade de água adsorvida no equilíbrio (massa de água adsorvida dividida pela quantidade de material adsorvente utilizado), (mg/g); Ceq corresponde à concentração final (residual) de água no OMI, no equilíbrio, (mg/g); qm é a constante de capacidade máxima de adsorção (mg/g); e b corresponde à constante de energia de adsorção (L/mg), ou seja, à afinidade entre o adsorvente e o adsorvato.

A partir da relação de 1/q* versus 1/Ceq foi possível obter, para os testes realizados, os valores dos parâmetros de capacidade de adsorção (qm) e de afinidade de adsorção (b) da água pelo material adsorvente.

Na Figura 8 estão apresentados os resultados iniciais, obtidos nos primeiros dias de instalação da máquina de secagem no transformador. Os resultados mostram que o óleo entrava na máquina de secagem com teor de umidade igual a ~20 ppm, a uma temperatura aproximada de 47 ^{0}C e retornava para o transformador, após passar pelo filtro contendo a peneira molecular REF 512, com teor de umidade em torno de 3 ppm, a uma temperatura aproximada de 49 ^{0}C. A diminuição do teor de umidade do óleo de ~20 para ~3 ppm equivale a uma diminuição de 85%. Esses resultados indicam a eficiência da peneira molecular como agente de secagem do OMI.

Nos gráficos da Figura 9 está ilustrado o histórico completo dos resultados de monitoramento obtidos até o dia 30/05/2011. É possível observar que o teor de umidade no óleo está diretamente relacionado com a temperatura do óleo, quanto maior a temperatura do óleo, maior o teor de umidade no óleo, indicando que mais umidade migra do papel para o óleo com o aumento da temperatura, concordando com a tendência expressa pelas curvas de Oomenn (DU & ZAHN & LESIEUTRE & MAMISHEV & LINDGREN, 1999, p. 11-20), que relaciona as isotermas de equilíbrio de umidade entre o óleo e o papel Kraft isolantes.

Os resultados da Figura 9 mostram também, que o teor de umidade do óleo na entrada diminuiu gradativamente até abril de 2011, quando se mostrou praticamente constante (~4 ppm) e próximo do valor obtido para o óleo na saída (1,3 ppm). O nível de saturação de água no óleo foi reduzido de 49,8% para 17,4% (dados não mostrados), considerando a temperatura de referência. Esses resultados mostram que o óleo retornava seco para o transformador e que o adsorvente ainda não atingiu seu limite de saturação, uma vez que o teor de umidade do óleo na saída da máquina continuava baixo.

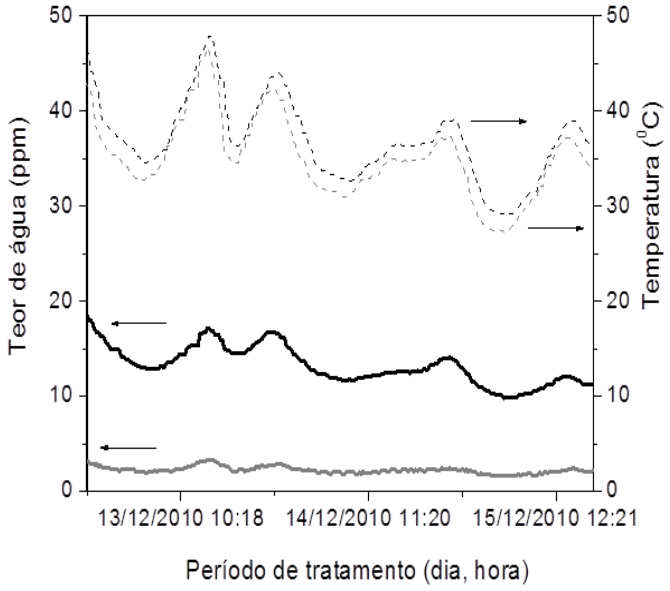

Figura 8: Resultados iniciais obtidos para o óleo durante seu tratamento com a peneira molecular REF 512: temperatura do óleo medida pelos sensores instalados na (----) saída e na (----) entrada do óleo para a máquina de secagem; e teor de água no óleo medido pelos sensores instalados na **(——)** entrada e na **(——)** saída do óleo para a máquina de secagem.

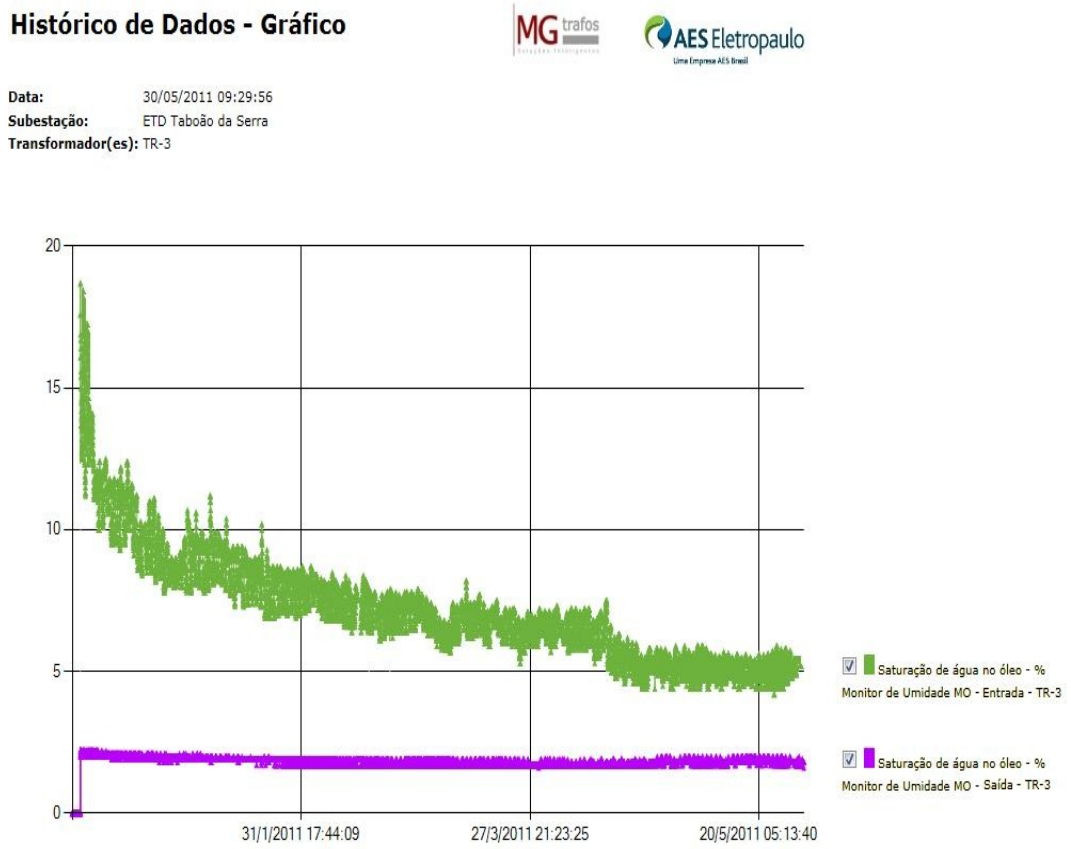

Figura 9: Histórico da evolução do teor de água do óleo em função do tempo de secagem com a peneira molecular REF 512, medido nos sensores de umidade da (——) entrada e da (——) saída do óleo da máquina de secagem.

A literatura apresenta vários métodos para estimar a umidade do papel isolante a partir do teor de água e da temperatura do óleo isolante, como os de Oomen (DU & ZAHN & LESIEUTRE & MAMISHEV & LINDGREN, 1999, p. 11-20), Nielsen (SOKOLOV & VANIN, 1995, sec. 8-6) e Myers (HORNING & KELLY & MEYERS, 2004, 437 p.). O método de Myers utiliza um fator, determinado para diferentes temperaturas do óleo, que multiplicado pelo teor de água no óleo fornece a porcentagem de umidade por peso seco de papel (HORNING & KELLY & MEYERS, 2004, 437 p.). Aplicando o método de Myers a partir dos dados monitorados pelos sensores de umidade do óleo e de temperatura, obteve-se uma porcentagem de umidade para a isolação, no início do processo de secagem, de aproximadamente 0,9% por peso seco de papel. Ao final do processo de secagem, a umidade da isolação sólida foi diminuída para aproximadamente 0,5% por peso seco de papel, que corresponde à umidade de um transformador novo. Esses dados comprovam, novamente, a potencialidade da peneira molecular REF 512 como agente de secagem da isolação sólida.

Uma vez comprovada a eficiência da peneira molecular no processo de secagem da isolação sólida de um transformador energizado, foram realizados os testes de recuperação desse material. Devido à contaminação do adsorvente pelo óleo isolante (Tabela 1) o resultado obtido para o método de secagem em forno tipo mufla não foi satisfatório. Este resultado também foi confirmado nos gráficos das isotermas de adsorção do adsorvente REF 512 novo (Figura 10), sem uso, e após uso e recuperação (dados não mostrados).

O material adsorvente REF 512 apresentou-se seco após a lavagem com vapor d'água quente e secagem a 350 ^{0}C, em mufla, e aparentemente sem resíduo de óleo. Para avaliar a eficiência do processo foi determinado o teor de óleos e graxas no material antes e após lavagem com vapor d'água quente. Os resultados obtidos indicaram que a lavagem foi satisfatória, conforme pode ser verificado pelos valores obtidos nas análises realizadas, onde foi observada a redução significativa nos teores de óleos e graxas após

esse tipo de tratamento (Tabela 1).

Tabela 1: Teor de óleos e graxos na peneira molecular REF 512 nova e após recuperação.

Peneira molecular REF 512	**Óleos e graxas** **% (massa/massa)**
Nova, sem uso.	< 0,001
Usada, após recuperação pelo método de secagem em mufla.	12,0
Usada, após recuperação pelo método de lavagem com vapor d'água quente e secagem em mufla.	0,10

Para garantir o reuso da peneira molecular REF 512 após lavagem com vapor d'água quente e secagem a 350 ^{0}C, em mufla, foram realizados testes de percolação em laboratório e obtidas as isotermas de Langmuir para avaliar sua capacidade de reaproveitamento (Figura 10).

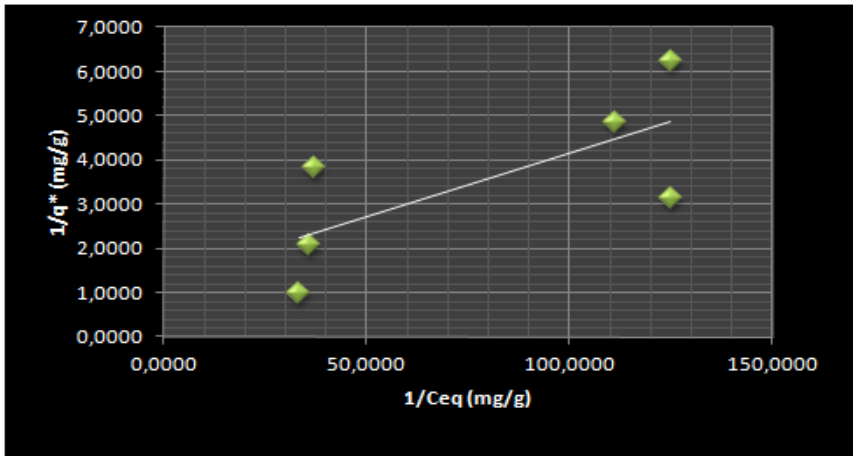

Figura 10: Isoterma de Langmuir aplicada a peneira molecular REF 512 nova.

Os resultados obtidos para o adsorvente novo e após uma etapa de recuperação com vapor d'água quente foram satisfatórios, tendo o material recuperado apresentado desempenho semelhante ao material novo (Tabela 2), indicando que o agente adsorvente REF 512, após tratamento com vapor d'água quente, pode ser reutilizado, comprovando a eficácia do método de recuperação empregado (lavagem com vapor d'água quente).

Tabela 2: Valores dos parâmetros de capacidade de adsorção (qm) e de afinidade de adsorção (b) da água pela peneira molecular REF 512 nova e após recuperação com vapor d'água quente.

Peneira molecular REF 512	**Parâmetros da Isoterma de Langmuir**	
	qm	**b**
Nova, sem uso.	0,769	45,5
Usada, após recuperação pelo método com vapor d'água quente e secagem em mufla.	0,760	45,6

3. Conclusões

De uma forma geral foram obtidas com o desenvolvimento desta pesquisa três principais conclusões. A primeira conclusão é a comprovação da viabilidade técnica da utilização da peneira molecular REF 512 na remoção de água de óleo mineral isolante e, consequentemente, da isolação sólida (celulose) em transformadores de potência energizados. A recuperação e a reutilização desse adsorvente pelo método de lavagem com vapor d'água quente, em atendimento as boas práticas ambientais, a segunda. E, a terceira conclusão é a validação do acompanhamento da eficiência do material adsorvente em campo pela utilização de monitoramento remoto, on line, por meio de sensores de umidade adequadamente instalados no sistema/máquina de secagem.

4. Referências bibliográficas

ROIZMAN, O., DAVYDOV, V., DUKARM, J. Water-in-Paper Activity: A New Concept for Moisture Assessment in Transformers. **IEEE/PES Transformers Committee Meeting**, Montreal, Quebec, Canada, v. 23, October, 2006, p. 1-65

FOFANA, I., WASSERBERG, V., BORSI, H., GOCKENBACH, E. Drying of Transformer Insulation Using Zeolite. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 20, n.1, 2004, p. 20-30.

WILKINSON, M. D., DYER, P. Continuous Moisture Management: Extending Transformer Service Life. Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ. No. 482), v. 1, 2001, p.1-39.

SILVA, C. A., GALDEANO, C. A.,MELLO, J. C. P., WILHELM, H. M., HOSSRI,J. H., MATTOSO, M., SILVA, M. M. J., PIOVEZAN, N., FERNANDES, P. O. Avaliação do Desempenho de Novos Materiais para Secagem de Transformadores de Potência em Campo. **Artigo submetido para o CITINEL**, Maio, 2011, p. 1-9.

ASSIS, F., FLEMING, J. R., SERRA, E. T. Recuperação da Argila para Reutilização na Regeneração de Óleo Mineral Isolante. **XVI SNPTEE**, 2001, p. 1-6.

TRINDADE, E. M., GRANATO, R. C., STOCCO, G. B., TÚLIO, L. Processo para Recuperação de Bauxita Utilizada na Regeneração de Óleos Minerais Isolantes. **Patente submetida ao INPI,** 2005 , 20 p.

FILHO, A. C. S., SILVEIRA, L. E. M., SANT'ANA, H. B., SOARES, J. B. Produção e Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Obtidas a Temperaturas Intermediárias pela Adição de Zeólitas. **18° Encontro de Asfalto. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**, 2006, p. 1-8.

ASTM D5765. Standard Practice for Solvent Extraction of Total Petroleum Hydrocarbons from Soils and Sediments Using Closed Vessel Microwave Heating. **ASTM**, 2010.

MOORE, W. J. Físico-Química. São Paulo: **Edgard Blucher**, 2004, 886 p.

DU, Y., ZAHN, M., LESIEUTRE, B. C., MAMISHEV, A. V., LINDGREN, S.R. Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems. **IEE Electrical Insulation Magazine**, v. 15, 1999, p. 11-20.

SOKOLOV, V., VANIN, V. In-Service Assessment of Water Content in Power Transformers. **Conference of Doble Clients**, 1995, Sec.8-6.

HORNING, M., KELLY, J., MEYERS, S. Transformer Maintenance Guide. **ISBN 0-939320-02-9**, Estados Unidos da América, 3 ed., 2004, 437 p.