

Aplicações de nanotecnologia na engenharia elétrica de potência

Como a tecnologia de miniaturização dos elementos pode encontrar lugar na engenharia de potência, que envolve megawatts e milhares de volts? Embora pareça contraditório, a nanotecnologia promete melhorar propriedades elétricas, mecânicas e térmicas dos equipamentos de energia elétrica. Este artigo apresenta resultados de testes realizados em isoladores de porcelana com revestimento nanoestruturado.

Christof Sumereder e Michael Muhr,
da Graz University of Technology (Áustria)

A nanotecnologia é uma das áreas que mais tem se desenvolvido ultimamente; novas tecnologias e inúmeras pesquisas têm sido realizadas. Embora o principal interesse não esteja na engenharia elétrica de potência, a nanotecnologia pode ser aplicada na melhoria das propriedades elétricas, mecânicas, térmicas ou químicas dos equipamentos de energia elétrica. Ela pode contribuir, no futuro, para a maior eficiência desses dispositivos ou redução das perdas na condução de energia.

Este artigo analisa o estado da arte da nanotecnologia, abordando suas possibilidades e aplicações na engenharia elétrica de potência. Foram considerados novos materiais para condutores e novos isolantes e revestimentos para isoladores. No caso dos isolantes dos sistemas de alta tensão, o objetivo é aumentar o tempo de vida útil, de forma a

otimizar os custos do ciclo de vida dos equipamentos, reduzir as despesas de manutenção, tamanho e peso e ainda aumentar a eficiência.

Os resultados de uma série de testes em isoladores de porcelana com revestimento nanoestruturado são apresentados como exemplo de aplicação prática desta nova tecnologia. Inicialmente, esse revestimento foi aplicado numa

superfície de cerâmica. Em seguida, foi testada a estabilidade a longo prazo por meio de um procedimento cíclico, variando as condições térmicas e a umidade do ar através de uma câmara climatizada. Avaliou-se também o desempenho sob condições naturais.

Foram estabelecidos como objetivos a serem atingidos os critérios para estabilidade a longo prazo, observando o ângulo de contato por meio de medições ópticas em intervalos de tempo definidos. As avaliações dos primeiros resultados dos testes parecem ser positivas: os ângulos de contato dos isoladores revestidos foram constantemente maiores do que 30 graus ao longo de todo o período de testes.

Nanotecnologia na engenharia elétrica de potência

A nanotecnologia já está presente em diversas áreas de pesquisa e ciência aplicada, e é possível considerar a viabilidade de sua aplicação a

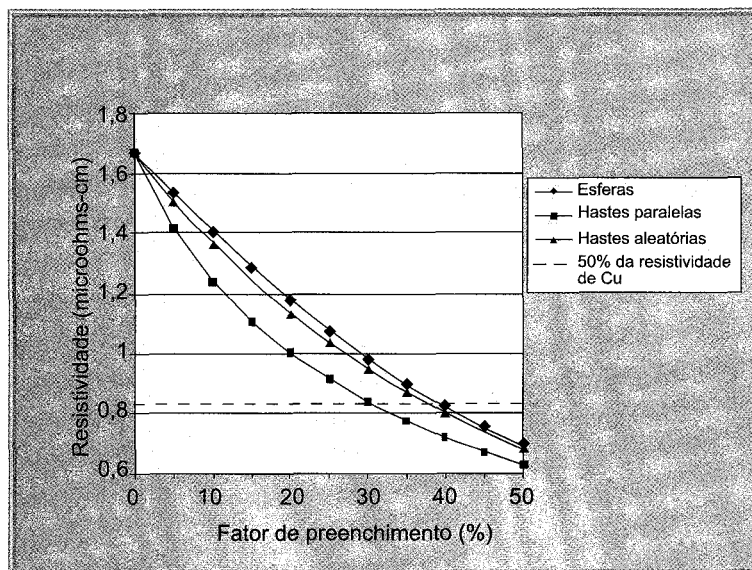
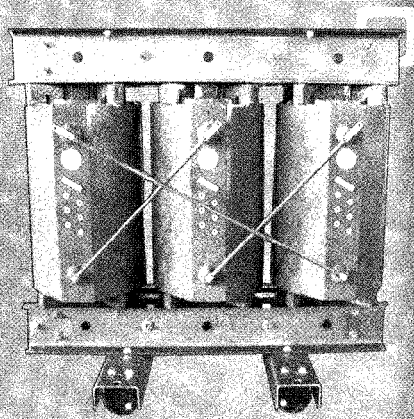


Fig. 1 – Resistividade calculada de um composto de cobre e nanotubos de carbono [1]

TRANSFORMADORES ULTRASINUS

TRADIÇÃO E QUALIDADE

Transformadores UltraSINUS
de Média Tensão (até 15KV)
Equipado com Sob Auto-Voltagem



Transformadores de Potência
Médios e Altos Tensões
Compensadores de Tensão
Redutores de Tensão



Cooperativa das Empresas
Fabricadoras de Transformadores

Rua Guarani, 501 - Vila Pôrto
Bladerna - SP - CEP: 04070-000
cootrans@cootrans.com.br
www.cootrans.com.br

Tel: (11) 4052-5933
Fax: (11) 4056-6245

MATERIAIS

curto prazo. Duas aplicações servem de exemplo: a nanotecnologia tem sido usada por médicos e engenheiros biomédicos para desenvolver nanopartículas para identificação de tumores; e por engenheiros eletrônicos e físicos nos semicondutores, com o objetivo de criar o supercomputador.

Sob esse ponto de vista, a nanotecnologia e a engenharia elétrica de potência parecem ser contraditórias. O que uma tem a ver com a outra? Como a tecnologia de miniaturização dos elementos pode encontrar lugar na engenharia de potência, que envolve megawatts de potência e milhares de volts? Entre tanto, existem diversas probabilidades para aplicação da nanotecnologia na engenharia de potência, como:

- melhoria dos condutores metálicos (redução das perdas);
- melhoria dos isoladores (aumento da isolamento elétrica, estabilidade mecânica, comportamento da carga térmica, resistência química);
- miniaturização do *design*, redução do material usado, maior confiabilidade;
- melhoria da compatibilidade eletromagnética (EMC - *Electromagnetic Compatibility*); e
- melhoria a longo prazo da eficiência e aumento do tempo de vida útil.

Todos esses projetos não podem ser colocados em prática em dias ou meses, mas sim em médio a longo prazos, passando por etapas que compreendem desde a idéia até o trabalho de pesquisa com o uso de protótipos e, por fim, a produção industrial e a aplicação pelos clientes.

Grupos de pesquisadores têm investigado intensivamente a viabilidade do uso da nanotecnologia nas aplicações de engenharia de potência; existe um alto nível de expectativa em relação à redução das perdas ôhmicas nos condutores metálicos usando nanotubos de carbono (CNT - *Carbon Nano Tubes*).

A referência [1] apresenta o conceito para criação de um material com resistividade ultrabaixa, baseado num composto de metal com nanotubos de carbono. Usando um modelo simples, de eficácia média, demonstrou-se que é possível obter uma resistividade 50% menor que a do cobre (Cu) na temperatura ambiente. A figura 1 ilustra a resistividade calculada de um composto

de cobre e CNT. Esse grupo de pesquisa denominou o projeto de condutor com resistividade ultrabaixa. O fenômeno é possível devido à característica de condução balística dos nanotubos de carbono, cujas propriedades podem ser descritas da seguinte forma: o CNT tem um caminho para passagem dos elétrons com magnitude diversas vezes maior do que metais como cobre (Cu) e prata (Ag). Isso indica que um sistema com tubos conectados em paralelo pode, na verdade, ter a resistividade na temperatura ambiente bem abaixo da resistividade dos metais condutores normalmente usados, como alumínio (Al), cobre (Cu) e prata (Ag).

Imagine como seria importante a produção industrial de um condutor cuja resistência ôhmica pudesse ser reduzida em alguns pontos percentuais. Não apenas as perdas elétricas seriam reduzidas e a eficiência dos cabos aumentada, mas também o comportamento térmico seria otimizado e a carga do material reduzida. É importante lembrar que, de acordo com a teoria de Arrhenius, o aquecimento térmico é um dos fatores que mais afeta o envelhecimento dos sistemas de isolamento. Desta forma, além de melhor eficiência, também seriam obtidos aumento no tempo de vida útil e melhoria na confiabilidade. O condutor com resistividade ultrabaixa ainda não existe. Contudo, acredita-se que a nanotecnologia vai fornecer meios para realizar o sonho de todos os engenheiros elétricos: a condução elétrica sem perdas.

Em outras áreas de aplicação da nanotecnologia, as pesquisas estão mais avançadas. O Grupo de Trabalho Cigre D1.16, por exemplo, aborda diferentes aspectos: *High Field Phenomena in Solid Insulation and Interfaces* reporta o estado da arte nas interfaces de cabos extrudados CCAT (transmissão de corrente contínua em alta tensão), fenômenos de baixa tensão e campo elétrico elevado, nanocompostos poliméricos e interfaces de compostos isolantes.

Usando partículas nanoestruturadas para preenchimento (*nanofillers*) nos isoladores elétricos, os limites físicos das propriedades do comportamento térmico, mecânico ou elétrico podem ser afetados. Diversos testes demonstraram que o uso dos *nanofillers*

fornece grandes chances de sucesso. Efeitos físicos diferentes foram usados para alcançar o objetivo. Com o uso dos *nanofillers*, a superfície da estrutura do material dilata-se bastante, de forma que o efeito na superfície não é mais acentuado do que no volume. Como consequência, pode ocorrer uma variação no comportamento térmico ou um deslocamento do ponto de fusão. Além disso, o comportamento associado ao fenômeno das árvores elétricas é reduzido pelos *nanofillers* em função da redução da força do campo elétrico com o aumento das distâncias dessas árvores elétricas.

A referência [2] trata da influência dos *nanofillers* no desempenho dos materiais, mostrando que propriedades físicas (como condutividade térmica, resistência aos arcos de AT, fator de dissipação ou permissividade relativa) podem variar dentro de certos limites em função da mudança da concentração dos *nanofillers* nos materiais isolantes (figura 2).

Um dos primeiros produtos usados na nanotecnologia foi um material desenvolvido para melhorar o comportamento hidrofóbico das superfícies. A melhoria das superfícies impermeáveis foi motivo de inúmeras pesquisas. A

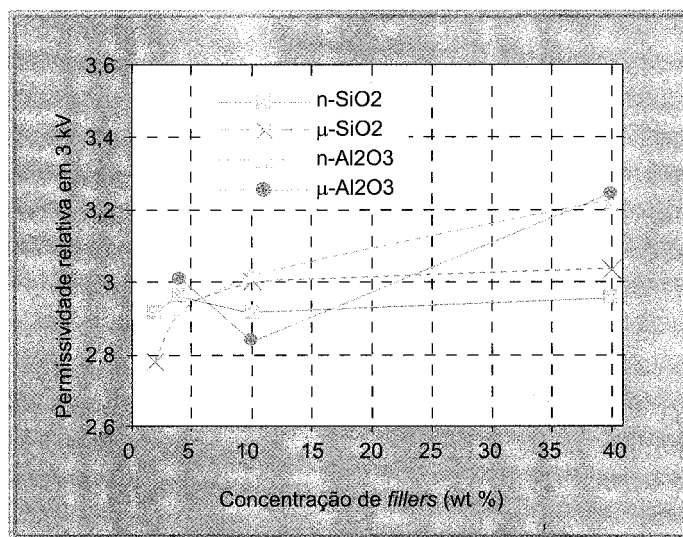


Fig. 2 – Influência da concentração dos fillers no comportamento dielétrico dos materiais isolantes [2]

referência [3] descreve uma das diversas séries de testes para aplicações práticas na engenharia de potência.

Propriedades hidrofóbicas das superfícies

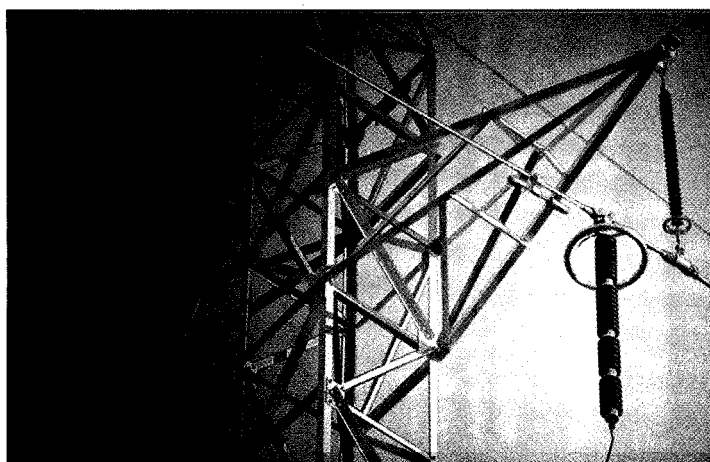
Entre os problemas frequentes dos isoladores de cerâmica externos estão as descargas de corona, as disrupções (*flashovers*) e as correntes de fuga devidas à umidade do ar e chuvas, em combinação com a sujeira acumulada pela poluição ambiental. Além disso, a poluição industrial, a salinidade ou as tempestades de areia aceleram o envelhecimento da superfície de porcelana [4]. Quanto melhor for o desempenho

diante de disrupções e menor a corrente de fuga, melhores serão as propriedades hidrofóbicas do isolador.

Os isoladores poliméricos possuem características hidrofóbicas adequadas, ao contrário dos isoladores de cerâmica. Por essa razão, as tentativas de revestir de silicone a superfície de cerâmica obtiveram sucesso relativo. Os principais problemas foram a dificuldade na aplicação do revestimento de silicone e sua estabilidade a longo prazo.

Desde o desenvolvimento de produtos nanotecnológicos, os nanolíquidos têm sido usados em várias aplicações. Este artigo também analisa a aplicabilidade e a estabilidade a longo prazo dos isoladores de cerâmica com revestimento nanoestruturado.

Para caracterizar as propriedades hidrofóbicas das superfícies dos isoladores, o ângulo de contato representa um parâmetro objetivo. Desta forma, as definições encontradas na norma IEC 62073 [5] foram consideradas. Numa superfície com um determinado ângulo de inclinação, o ângulo de contato dinâmico consiste em ângulos *Advancing* (o maior ângulo de contato) e *Receding* (o menor ângulo de conta-



Transmissão, A Balestro também está nesta linha.

Referência premiada em pára-raios de distribuição, a Balestro também emprega tecnologia e *know-how* em linhas de transmissão.

Produtos de alta resistência e excelente acabamento garantem proteção em linhas de transmissão, instalações industriais e subestações.

Pára-raios poliméricos classe 2 para linhas e estação (06 kV a 120 kV)
Isoladores poliméricos (69 kV a 345 kV | 70 kN a 160 kN)



B
BALESTRO

SAC 0800 704 3445 | www.balestro.com

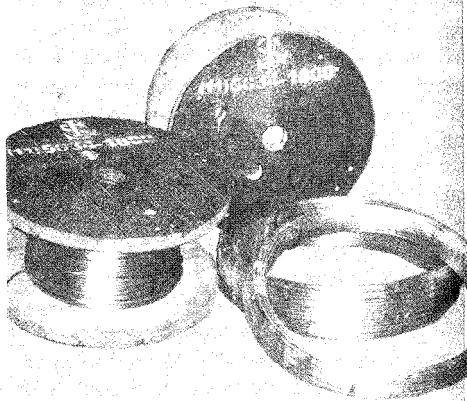
Fios e Cabos de Cobre Nu Eletrolítico e Estanhado

Fabricação própria

✓ Proteção contra descargas atmosféricas (SPDA)

✓ Conexões aluminotérmicas e mecânicas

✓ Materiais elétricos em geral



Santa Luiza
CONDUTORES ELÉTRICOS

Fone/Fax:
55 (11) 5034-1800

MATERIAIS

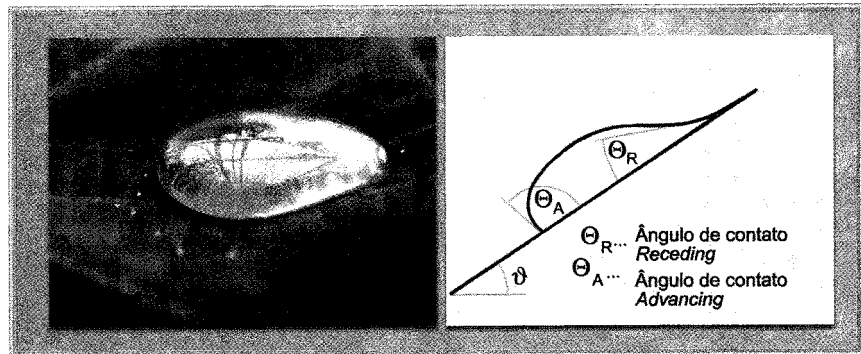


Fig. 3 - Ângulo de contato dinâmico

to), conforme figura 3. O ângulo de contato estático não foi levado em conta nesta análise, pois o topo do isolador tem inclinação de 15 graus.

Programa e objetivos de testes

Todos os testes foram aplicados no mesmo tipo de isolador de cerâmica. Oito equipamentos foram utilizados; dois deles não foram impregnados com revestimento nanoestruturado. A impregnação da superfície do isolador com revestimento foi feita de acordo com instruções de aplicação do fabricante do nanolíquido. Os outros seis isoladores de cerâmica foram envelhecidos artificialmente numa câmara climatizada. O programa de testes incluiu temperaturas entre -20 e 60°C e umidade relativa do ar entre 50 e 93%. No total, foram feitos mais de 70 ciclos de testes durante seis meses.

Em dois isoladores, o processo de envelhecimento natural foi aplicado durante vários meses. Eles foram

expostos ao ar livre, sob condições climáticas variadas: verão (até 25°C, ar seco, úmido) e inverno (neve, -10°C), com poluição natural. Durante um período equivalente à metade do tempo previsto para os testes, as condições foram agravadas, pois ainda não era possível identificar variações significativas nas características hidrofóbicas e de superfície. O ar extremamente gelado, a umidade abaixo de zero na superfície do isolador e o processo de evaporação do calor deveriam provocar um processo de envelhecimento acelerado.

Medições do ângulo de contato

Os ângulos de contato *Receding* e *Advancing* foram observados desde o início das investigações até o final dos testes preliminares. Para determinar o ângulo de contato, foi usada uma câmera digital, e as fotos foram analisadas por meio de um software gráfico. Um exemplo da determinação do ângulo de contato é apresentado na figura 4.

Durante o teste, o procedimento de medição foi feito em diversos pontos, usando diferentes tamanhos de gotas de água, desde 1 ml até 100 ml, com degraus de 5 ml. Os resultados dos ângulos de contato *Receding* e *Advancing* foram registrados. Os pingos de água foram produzidos por uma pipeta usada na bio-

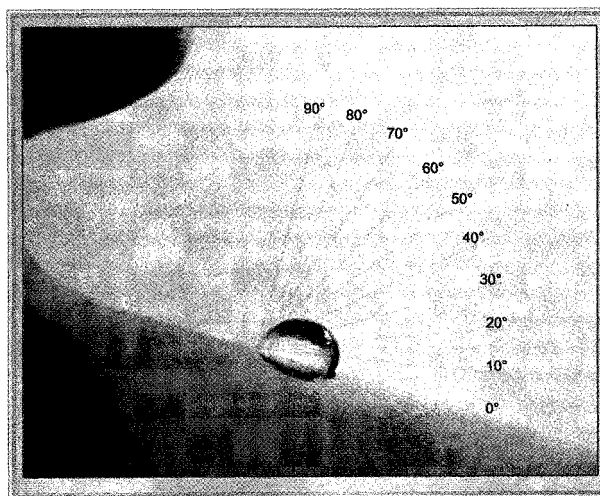
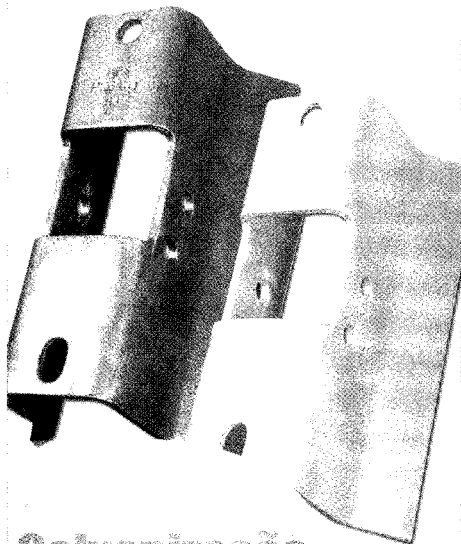
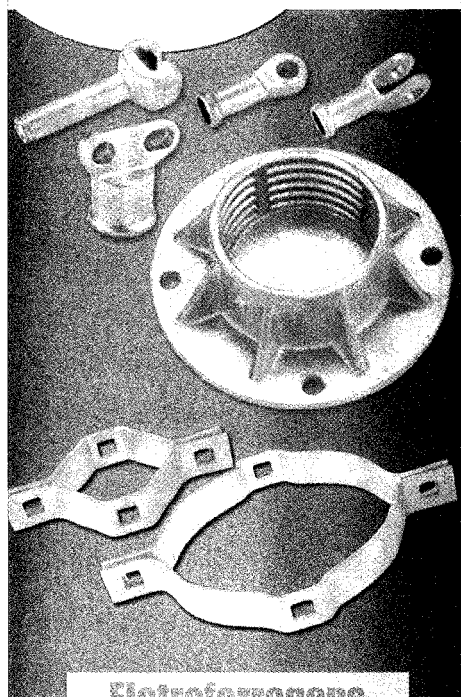


Fig. 4 - Determinação do ângulo de contato

Garantia de 20 anos só oferece quem tem qualidade



Galvanização a fogo



Eletroferragens

Hidro Jet

MARCA DE ENERGIA E FORÇA

Fone: 51 3637.4000 • hidrojet@hidrojet.ind.br
www.hidrojet.ind.br

MATERIAIS

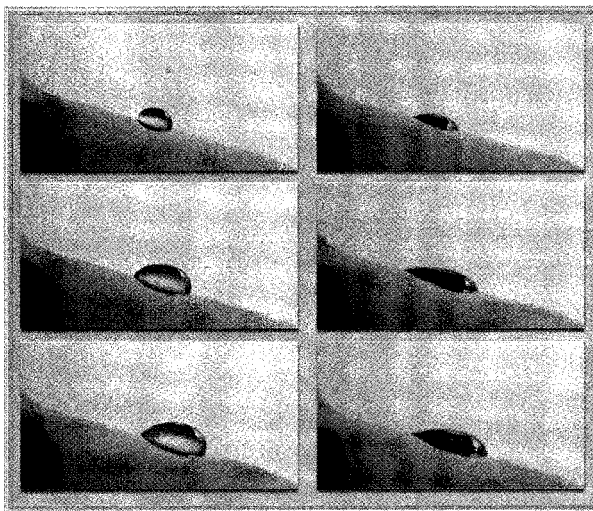


Fig. 5 – Tensão interfacial de uma gota de água de 1, 50 e 90 μ l, com revestimento nanoestruturado (esquerda) e sem revestimento (direita)

medicina, onde o tamanho da gota pode ser ajustado continuamente entre 1 ml e 200 μ l. Os resultados da medição foram verificados, aplicando duas vezes uma gota de água do mesmo tamanho.

Resultados

Os resultados dos testes e das medições dos ângulos de contato mostram que a condição da superfície não sofreu qualquer tipo de degradação e o revestimento nanoestruturado foi aprovado nos testes, não tendo sido observada nenhuma variação. O ângulo de contato permaneceu quase constante durante todo o período de testes.

Entre a superfície de cerâmica re-

vestida e não-revestida, foi observada uma enorme diferença nas características hidrofóbicas. A figura 5 ilustra a diferença da tensão interfacial dos isoladores revestidos e não-revestidos, considerando gotas de água de diversos tamanhos. No lado esquerdo, é mostrado o formato dos pingos no isolador com superfície tratada. Nota-se que os ângulos de contato foram bem maiores do que os da superfície não tra-

tada, apresentados no lado direito da figura.

A figura 6 ilustra os ângulos de contato em função do tamanho das gotas de água. O ângulo de contato *Advancing* do isolador com revestimento nanoestruturado permaneceu quase sempre em 90 graus para todos os tamanhos de pingos de água. Já o ângulo de contato *Receding* mostrou pequena degradação nas características para volumes maiores das gotas de água. O desempenho da superfície não-revestida indicou leve melhoria nas características de acordo com o ângulo *Advancing* e sutil tendência de queda para o ângulo *Receding*.

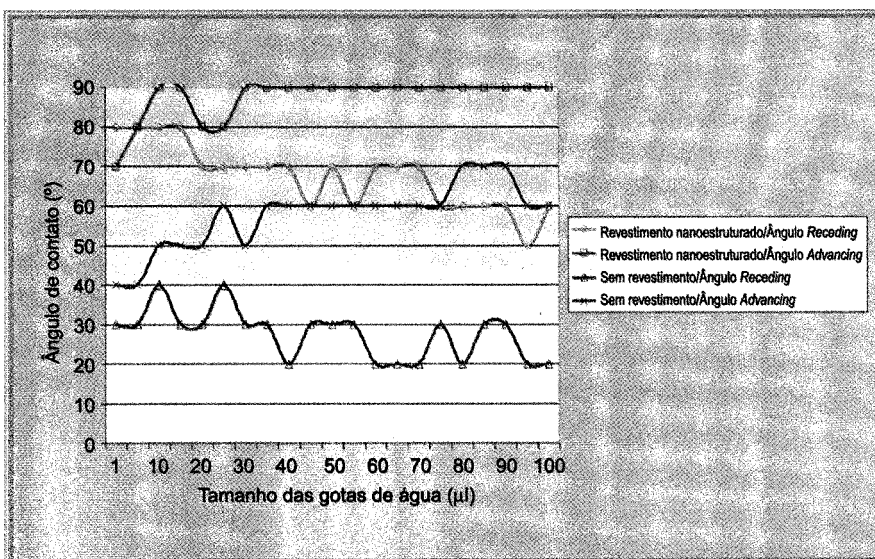


Fig. 6 – Característica do ângulo de contato das superfícies de cerâmica com e sem revestimento nanoestruturado

Sumário

As inovações nanotecnológicas estão presentes em diversas áreas; na engenharia elétrica de potência, estão sendo discutidos inúmeros projetos de pesquisa e desenvolvimento, especialmente os associados ao condutor de resistividade ultrabaixa, à influência dos *nanofillers* nos materiais isolantes e ao revestimento das superfícies hidrofóbicas.

As propriedades hidrofóbicas de seis isoladores de cerâmica com revestimento nanoestruturado e dois não-revestidos foram testadas sob condições apropriadas para o envelhecimento acelerado. A diferença dos ângulos de contato medidos entre as superfícies revestidas e não-revestidas foi de 30 graus, em média. Este valor está de acordo com o que foi recentemente publicado sobre medições dos ângulos de contato de superfícies poliméricas [6,7].

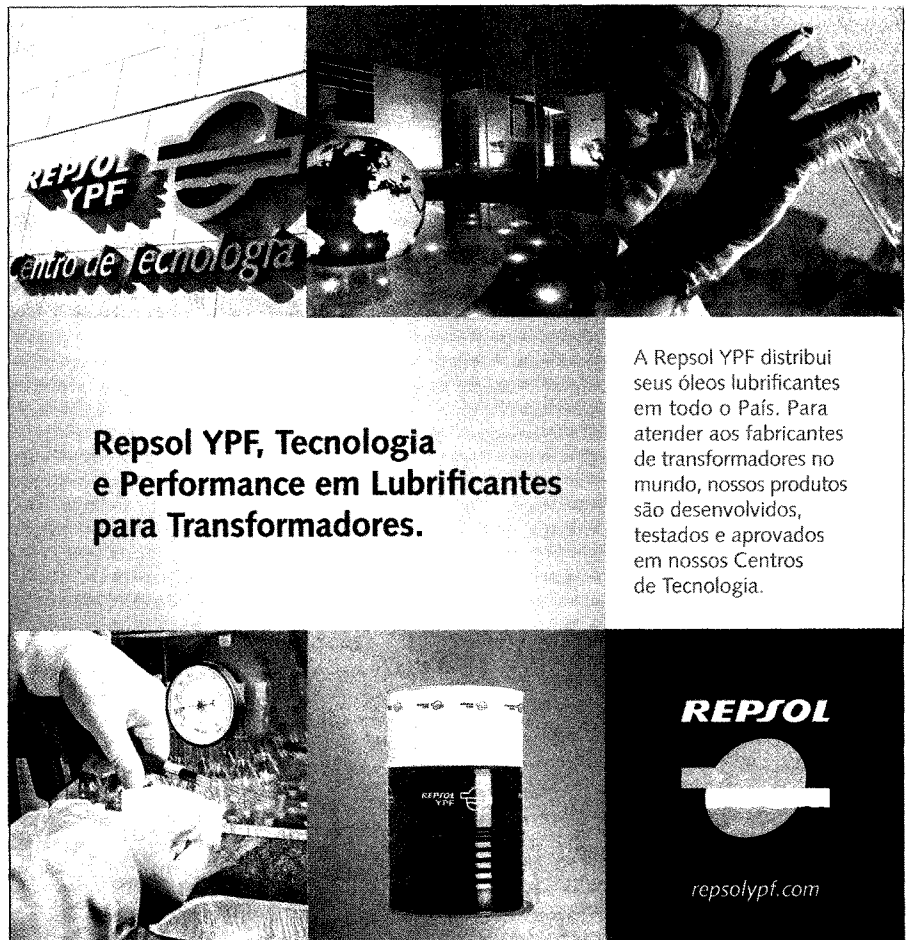
O revestimento nanoestruturado não apresentou qualquer degradação após mais de 70 ciclos de testes sob condições de envelhecimento, realizados por seis meses. A aplicação do revestimento nanoestruturado nas superfícies é muito simples e pode ser feita tanto nos isoladores novos quanto nos já instalados.

Reconhecimentos: Os autores agradecem a colaboração da Tyco Electronics, Áustria [8], fabricante de isoladores cerâmicos, e da Nanogate Coating Systems, Alemanha [9], fabricante de nanolíquidos.

Referências

- [1] Hjortstam, O.; Isberg, P.; Söderholm, S.; Dai, H.: *Can we achieve ultra-low resistivity in carbon nanotube-based metal composites?* Applied Physics A, Vol. 78, nº 8, 2004
- [2] Rätzke, S.; Kindersberger, J.: *Erosion behaviour of nano filled silicone elastomers.* ISH 2005, paper C09.
- [3] Andritsch, T.: *Nanotechnology in electrical engineering,* Diploma Thesis 2006, TU Graz.
- [4] Awad, M.; Said, H.; Arafa, B. A.; Nosseir, A.: *Long term aging of silicone rubber insulators due to sandstorms,* Cigre 2000, paper 15-2005.
- [5] IEC/TC 62073, 2003-06: *Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces.*
- [6] Ekl, F.; Kindersberger, J.: *Contact angle measurement on insulator surfaces with artificial pollution layers and various surface roughnesses.* ISH 2005, Paper D 47
- [7] Wu, J.; Cornelissen, C.; Schnettler, A.: *Investigation on the flashover performance of nanostructured insulating surface with Lotus-Effect® under wet conditions.* ISH 2005, paper D-15.
- [8] <http://www.tycoelectronics.com>
- [9] <http://www.nanogate.de>

Trabalho apresentado no 19º Cired - Congresso Internacional de Redes Elétricas de Distribuição, realizado de 21 a 24 de maio de 2007, em Viena, Áustria.



Repsol YPF, Tecnologia e Performance em Lubrificantes para Transformadores.

A Repsol YPF distribui seus óleos lubrificantes em todo o País. Para atender aos fabricantes de transformadores no mundo, nossos produtos são desenvolvidos, testados e aprovados em nossos Centros de Tecnologia.

REPSOL
repsolypf.com



11 anos
1976 - 2007

Brastrafo
SERVIÇOS EM TRANSFORMADORES

SERVIÇOS DE ROTINA

- Termo-Vácuo
- Substituição de Óleo
- Vazamento
- Enchimento

SERVIÇOS ESPECIALIZADOS

- Secagem Parte Ativa
- Reneração Móvel
- Eliminação DBDS
- Serviços Gerais

LABORATÓRIO DE ANÁLISE

- Físico-Químico
- Cromatografia
- Especiais I
- Especiais II

TRANSPORTE / ARMAZENAMENTO

- Frota Própria
- Tancagem Dedicada
- Licença Cetesb
- Plataforma de Carregamento

Parceiras

- Electron do Brasil Tecnologia Digital
- IMOM biapak

SISTEMA DE MONITORAMENTO DIGITAL

- Imagem Térmica Digital
- Indicação de Posição de TAP
- Monitoração de Nível Óleo

SISTEMA DE SELAGEM

(19) 3689-9222 www.brastrafo.com.br - brastrafo@brastrafo.com.br