



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GGH/23

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - GGH**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRAULICA - GGH**

**PROGRESSOS NO DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ISOLAMENTO PARA ENROLAMENTOS  
ESTATÓRICOS PARA GERADORES DE ALTA TENSÃO BASEADO NO USO DE NANO-COMPÓSITOS**

**Thomas Hildinger(\*)  
Voith Hydro Ltda.**

**Jürgen R. Weidner  
Siemens AG.**

**RESUMO**

O rápido crescimento do segmento de energia renováveis intermitentes e/ou voláteis alterou e continua alterando solicitações dos operadores do sistema elétrico para as usinas elétricas em operação e em construção ou planejamento. O regime de carga de ponta altamente flexível combinado à queda dos preços da energia em vários mercados de eletricidade exigem novas soluções de projeto de geradores para atender às atuais e futuras demandas do mercado.

Como os enrolamentos estatóricos de alta tensão são os componentes mais importantes dos geradores de grande porte, há alguns anos foi iniciado um programa de pesquisa fundamental para a utilização da nanotecnologia com o objetivo de melhorar as propriedades do sistema de isolamento, mais especificamente a isolamento principal.

Foram realizados testes de triagem química e elétrica com nano-partículas esféricas de SiO<sub>2</sub> para descobrir um nano-compósito compatível com a matriz epóxi-mica que pudesse ser utilizado no sistema de impregnação a vácuo e pressão (VPI). Quando testada e comparada em corpos-de-prova de formato tubular de 0,6 m de comprimento e revestidos com o sistema original de isolamento em epóxi-mica, a nova isolamento com nano-compósitos de SiO<sub>2</sub> apresentou uma curva de vida útil elétrica com menor inclinação em comparação com o sistema de referência (Micalastic®) já estabelecido e comprovado para enrolamentos, resultando em uma significativa melhoria da vida útil nas tensões (elétricas) nominal e operacional.

Como passo seguinte no desenvolvimento, foram fabricadas barras estatóricas originais com parâmetros de projeto típicos para hidrogeradores. Foram realizados testes de envelhecimento em diferentes tensões para a determinação das curvas de vida útil elétrica. Os primeiros resultados comprovam uma vida útil significativamente maior da isolamento contendo os nano-compósito em comparação com os sistemas de isolamento atualmente utilizados.

A utilização de nano-partículas de SiO<sub>2</sub> na isolamento de epóxi-mica permitirá criar um sistema de isolamento para enrolamentos estatóricos mais eficiente, o que não apenas melhorará a sua potência específica, como também se adequará com perfeição às novas demandas de alta flexibilidade das redes elétricas sem qualquer prejuízo da vida útil da isolamento.

**PALAVRAS-CHAVE**

Hidrogerador, sistema de isolamento de enrolamentos estatóricos, nano-partículas de sílica, retardo de arborescência ("treeing"), vida útil elétrica, eficiência.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A demanda por usinas elétricas novas e altamente flexíveis, o crescente volume de energias renováveis intermitentes ou voláteis, assim como a demanda pela repotenciação e a extensão da vida útil de unidades

existentes são fatores que vêm estimulando a comunidade de engenharia de geradores a aprimorar as soluções de projeto de geradores. Por outro lado, o mercado de energia desregulamentado impõe pressões de custo e de elevada confiabilidade operacional para os ativos das usinas elétricas de empresas fornecedoras de serviços públicos. Isso vem motivando os fabricantes a desenvolverem um novo portfólio de geradores com maior eficiência e elevada confiabilidade em todos os tipos de regimes operacionais, bem como intervalos de manutenção adequados e custos operacionais muito menores ao longo da vida útil do equipamento.

Os enrolamentos estatóricos de alta tensão são os componentes mais importantes dos geradores de grande porte. Conforme ilustrado na Figura 1, o sistema de isolamento de alta tensão consiste de uma estrutura de camadas de fitas finas de mica com um suporte de tecido de fibra de vidro impregnado com resina epóxi. É inevitável que o enfitamento de barras e bobinas com de fitas de mica com sobreposição de aproximadamente 50% produza pequenas regiões não-homogêneas localmente (ilustradas na Figura 1) que são possíveis pontos vulneráveis a um posterior processo de envelhecimento.

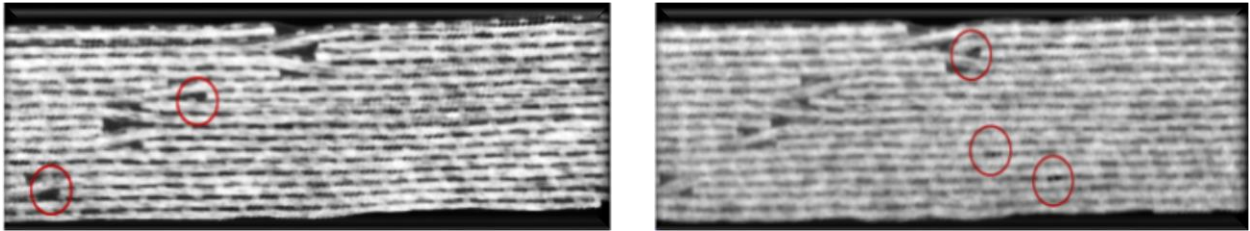


Fig. 1. Tomografia computadorizada em 3D da seção transversal de uma estrutura em camadas típica da isolamento de barras estatóricas de fitas de epóxi-mica

As diferentes solicitações que provocam o envelhecimento elétrico, térmico, mecânico e ambiental ao longo da operação no longo prazo enfraquecem a estrutura da isolamento de epóxi-mica, reduzindo a sua resistência dielétrica como um todo. Em um sistema de isolamento envelhecido e delaminado, o mecanismo de arborescência elétrica ("treeing") é o principal processo de propagação de campo elétrico que, em última instância, leva à falha da isolamento [1].

As camadas inorgânicas de mica funcionam como uma forte barreira de elevada resistência dielétrica. Dessa forma, os pequenos canais de arborescência, com cerca de 10  $\mu\text{m}$  de seção transversal, ramificam-se e propagam-se na interface de resina entre a camada de mica e o material de suporte, conforme ilustrado nas fotos de microscopia em cores da Figura 2.

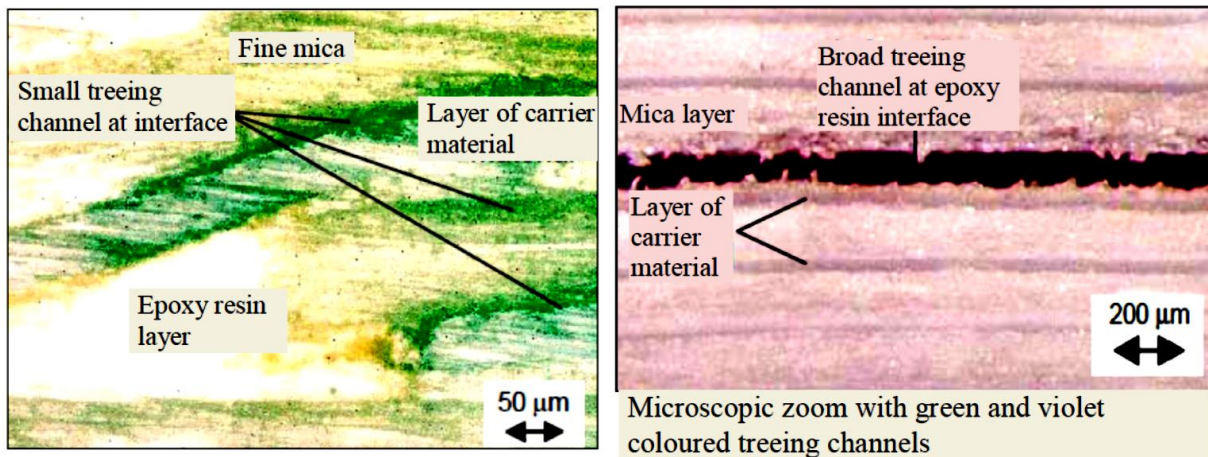
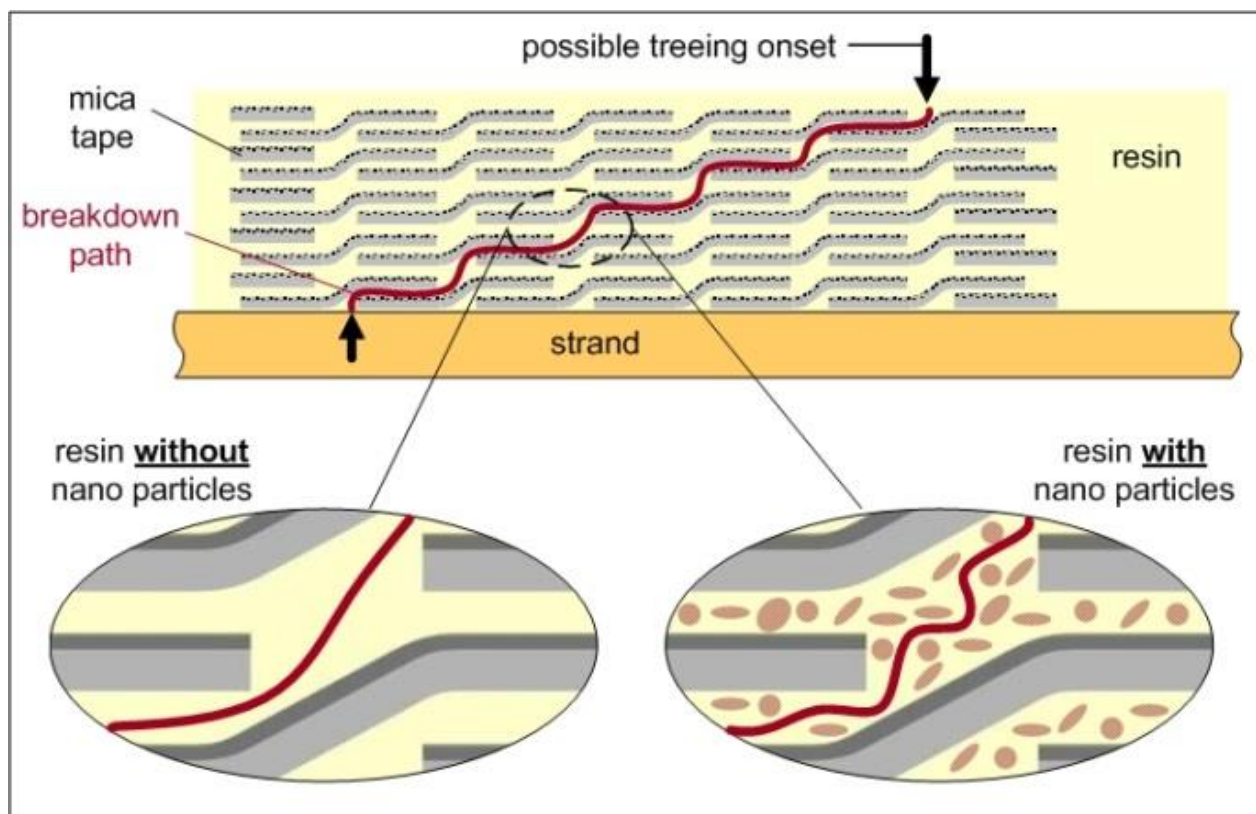


Fig. 2. Propagação de pequenos canais de arborescência ("treeing") em sistemas de isolamento de epóxi-mica [1]

Os testes de envelhecimento nas barras de enrolamentos estatóricos com sistemas de isolamento de epóxi-mica impregnados a vácuo demonstraram que a resistência dielétrica aumenta até um determinado nível ótimo em função do conteúdo de mica [3]. A análise de diversos canais de falha demonstrou claramente que o caminho de arborescência na resina até a interface de mica deveria ser o mais longo e mais estreito possível para se obter uma resistência a falha elétrica elevada na luva de isolamento [1, 4].

Além dessas medidas de projeto, já bastante compreendidas, foi possível promover um retardo e um prolongamento do tempo de propagação da arborescência elétrica através da isolamento principal da parede pela utilização de nano-partículas de  $\text{SiO}_2$  inorgânicas e especialmente tratadas dentro da matriz de resina, conforme ilustrado na **Figura 3**. Este estudo apresenta a influência positiva das nano-partículas no desempenho da isolamento principal de alta tensão de enrolamentos estatóricos de geradores sob tensão operando sob demandas altamente flexíveis da rede elétrica. Trata-se de um relatório de status sobre este projeto de P&D, ainda em andamento.



**Figura 3:** Mecanismo de retardo da propagação da arborescência ("treeing") através da isolamento da parede principal pela utilização de nano-partículas inorgânicas de  $\text{SiO}_2$  dentro da matriz de resina epóxi

A utilização de nano partículas no sistema de isolamento proporcionou um retardo e prolongamento significativos da propagação da arborescência elétrica ("treeing") através da isolamento principal de epóxi-mica. Assim, há alguns anos iniciou-se um programa de pesquisa fundamental para a utilização da nanotecnologia com o objetivo de melhorar as propriedades elétricas e mecânicas da isolamento principal de alta tensão.

## 2.0 - PREPARAÇÃO DO NANO-COMPÓSITO DE EPÓXI

A tecnologia de processamento de nano-compósitos utilizada tem forte influência no desempenho elétrico e mecânico do sistema de isolamento de referência (Micalastic®) para permitir a sua utilização em um produto industrial aprimorado [2]. Dessa forma, especial atenção foi dedicada à escolha de um método de processamento adequado para o nano-compósito de sílica. Tal método considerer em uma resina epóxi de baixa viscosidade que será utilizada para o processo de impregnação a vácuo e pressão (VPI) da isolamento de fita de mica dos enrolamentos estatóricos do gerador.

As nano-partículas de  $\text{SiO}_2$  foram preparadas como uma solução alcalina aquosa de sílica coloidal por um processo baseado em "água de vidro", isto é, a partir de reações químicas do silicato de sódio. Os sais de sílica foram otimizados para o tratamento orgânico da superfície e para a máxima estabilidade em sistemas orgânicos do tipo epóxi. A utilização da partícula correta e do produto químico de tratamento superficial adequado é fundamental para a estabilidade do processo de impregnação (VPI) no longo prazo, especificamente no que tange a mudanças em seu comportamento viscoso, sua reatividade e o tamanho otimizado das partículas.

A manutenção de um sistema coloidal sílica/resina com boa dispersão contribui para a maximização do desempenho do sistema polimerizado ("cura") em termos de suas propriedades físicas, incluindo: menor coeficiente de expansão térmica, maior módulo de elasticidade e resistência à tração, assim como maior resistência à erosão do material causada por campos elétricos elevados e pela ocorrência de descargas parciais.

Os nano-compósitos utilizados para a isolamento dos enrolamentos estatóricos de alta tensão com fitas de mica fina foram preparados pela mistura de nano-partículas de sílica com um diâmetro de 10 nm a 20 nm dissolvidas em um solvente orgânico com uma resina de bisfenol-diglicidílico (epóxi). A resina epóxi foi misturada com anidrido metil-hexa-hidroftálico como endurecedor para o processo de produção por VPI das barras originais do enrolamento estatórico com o novo sistema de isolamento com nano-compósitos.



### 3.0 - PESQUISA FUNDAMENTAL DE VIDA ÚTIL EM CORPOS-DE-PROVA TUBULARES COM O SISTEMA DE ISOLAÇÃO POR FITA

#### 3.1 Corpos-de-prova

Para a realização dos testes fundamentais de vida útil elétrica, foram fabricados corpos-de-prova com perfil cilíndrico (tubular), que foram então submetidos a testes de envelhecimento elétrico. Todos os corpos-de-prova foram envoltos com a mesma fita padrão de mica fina que é utilizada para os enrolamentos estatóricos originais na linha de produção. Os corpos-de-prova tubulares foram impregnados a vácuo e pressão (VPI) com resina epóxi e curados conforme o processo de fabricação original.

A Tabela 1 resume as características de projeto dos corpos-de-prova tubulares de tensão nominal  $U_n = 11$  kV que foram produzidos em lotes tanto com isolação com resina epóxi pura como com nano-partículas de  $\text{SiO}_2$  adicionadas à resina epóxi. Após o processo de cura, foi aplicada uma camada externa de proteção contra o efeito corona (OCP; coloração preta) que foi parcialmente coberta com uma folha de cobre para funcionar como eletrodo de aterramento (Figura 3). O sistema de proteção contra o efeito corona nas extremidades (ECP; coloração cinza) preveniu as descargas superficiais durante os testes de envelhecimento em alta tensão e sob três diferentes níveis de aceleração.

Tabela 1. Detalhes dos corpos de prova tubulares:

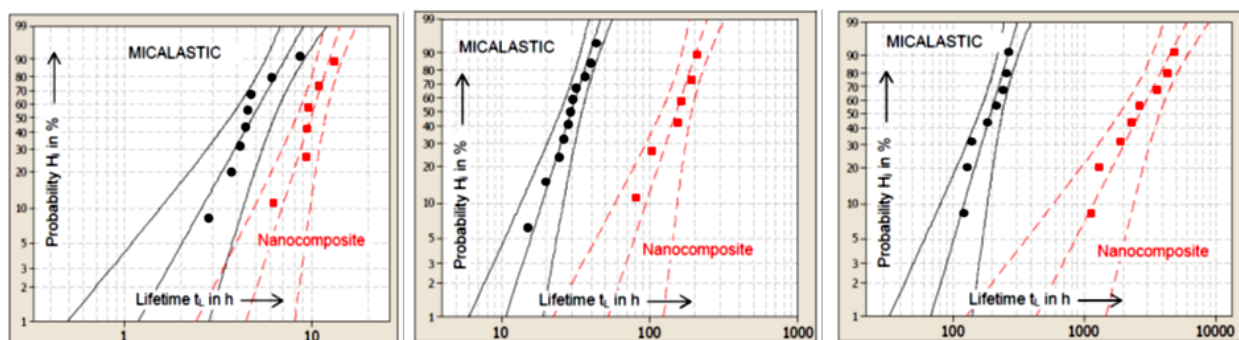
Comprimento do tubo	600 mm
Numero de camadas de mica	6 (semi-sobrepostas)
Tipo da fita de mica	Fita de mica fina curado em fibra de vidro
Espessura da Isolação	1.5 mm
Perfil do corpo de prova	Tubos metálicos com 30 mm de diâmetro
Tensão Nominal	$U_n = 11$ kV
Resina (Referência)	Sistema Epóxi puro sem solvente
Resina (Novo desenvolvimento)	Sistema Epóxi com adição de nano-partículas $\text{SiO}_2$
Número de corpos de prova	6-11 (de cada tipo de resina e tensão)



Fig. 3. Seis corpos de prova tubulares com OCP aterrado (preto) e com o sistema de atenuação (ECP cinza) foram submetidos a tensões elevadas em CA em um teste de envelhecimento acelerado em Temperatura Ambiente (RT)

Para comparar o desempenho da resistência dielétrica e as características de vida útil da nova isolação com nano-compósitos em relação ao sistema de referência estabelecido, foi realizada uma série de testes de envelhecimento acelerado à temperatura ambiente sob três diferentes níveis de tensão equivalentes a 2, 2.5 e 3 vezes a tensão nominal ( $U_n$ ).

A distribuição da vida útil elétrica ( $t_L$ ) dos diferentes lotes está representada graficamente na Figura 4 como uma distribuição de probabilidades de Weibull. Sob todos os três níveis de tensão testados, a nova isolação com nano-compósitos de  $\text{SiO}_2$  aumentou significativamente a vida útil elétrica em comparação com a isolação MICALASTIC já estabelecida. O *Fator de Melhoria do Envelhecimento (VEI)* é definido como sendo a diferença entre o valor médio de 63% da distribuição Weibull do sistema MICALASTIC já estabelecido e os lotes de teste dos novos nano-compósitos. As figuras 4 (a) - (c) mostram que o *Fator VEI* depende do nível da tensão de teste aplicado, e aumenta de 2.0 (em  $3.0U_n$ ) para 14.6 (em  $2.0U_n$ ). Quanto menor a tensão aplicada, maior o *Fator VEI*.



(a) Fator VEI: 2.0 @ 3 vezes  $U_n$  (b) Fator VEI: 5.1 @ 2.5 vezes  $U_n$  (c) Fator VEI: 14.6 @ 2 vezes  $U_n$   
 Fig. 4. Distribuição de Weibull referente aos resultados dos testes de envelhecimento do sistema MICALASTIC e do novo sistema com nano-compósitos aos níveis de tensão constantes de (a)  $3.0 U_n$ , (b)  $2.5 U_n$  e (c)  $2.0 U_n$

### 3.2 Curvas de vida útil elétrica

A Figura 5 apresenta os valores médios (Weibull @ 63%) para todos os testes de envelhecimento elétrico acelerado em um gráfico de escala semilogarítmica relacionando a intensidade do campo elétrico  $E_D$  com a vida útil  $t_L$ . As duas curvas de vida útil demonstram claramente a melhor estabilidade à erosão do novo sistema de isolamento com nano partículas de  $SiO_2$ , o que por sua vez proporciona uma vida útil elétrica significativamente maior.

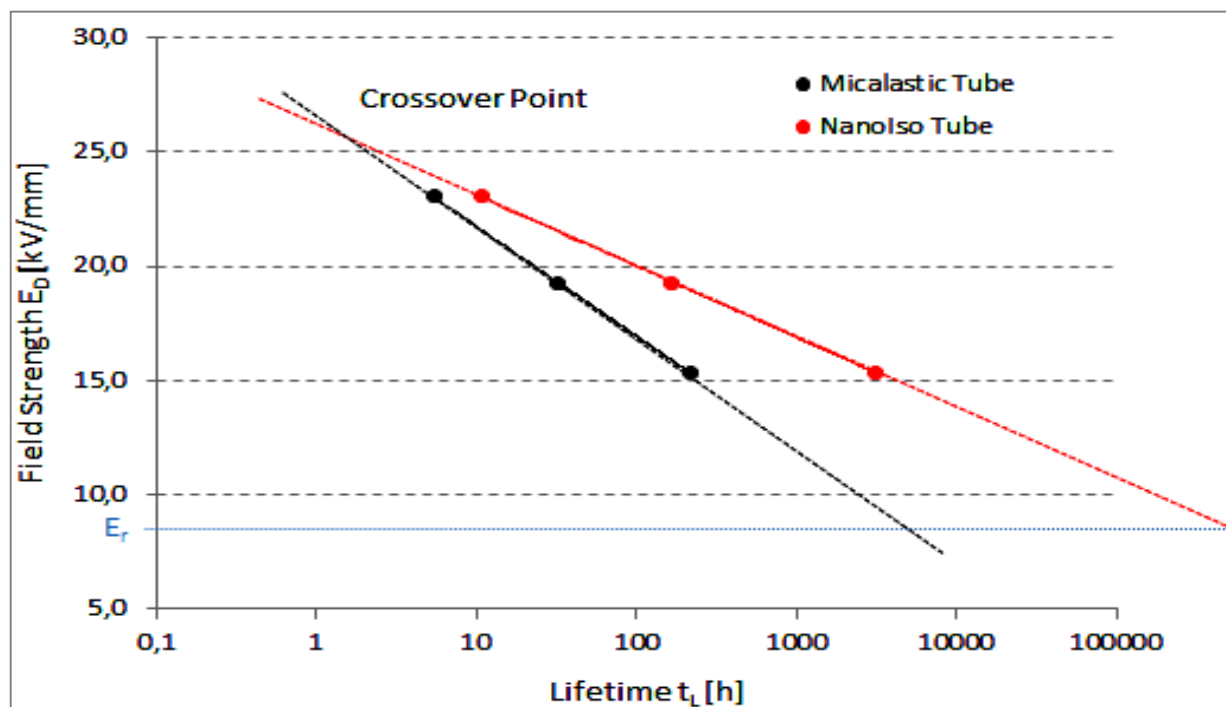


Fig. 5. Comparação das curvas de vida útil elétrica  $E_D = f(t_L)$  entre tubos com o sistema MICALASTIC e o novo sistema de isolamento com nano-compósitos em termos da intensidade nominal do campo do enrolamento  $E_r$

Ao se fazer uma extrapolação dos valores medidos aumentando-se a intensidade do campo elétrico, as diferentes inclinações das duas curvas de vida útil resultariam em uma intersecção estimada onde ambos os sistemas teriam desempenho idêntico. Já a extrapolação no sentido de uma menor intensidade de campo até a zona usual da intensidade do campo operacional ( $E_r$ ) dos enrolamentos estatóricos resultam em vidas úteis significativamente maiores até um fator  $VEI$  calculado acima de 100.

A inclinação diferente da curva de vida útil para o novo sistema de isolamento com nano-compósitos comparada ao sistema de isolamento MICALASTIC já estabelecido – com intersecção em campos elétricos elevados e vida útil significativamente mais longa a baixas intensidades de campo – coincide bem com outras pesquisas realizadas com resinas e vernizes contendo nano-compósitos para a isolamento de enrolamentos de motores [3].

Em [4], a vida útil e o mecanismo de envelhecimento elétrico para o sistema com nano-compósitos de epóxi haviam sido investigados com corpos-de-prova em formato agulha-plano. A característica de envelhecimento desses testes é ilustrada na Figura 6, que demonstra as diferentes inclinações da vida útil com a intersecção ocorrendo em campos elétricos elevados, na faixa de falhas intrínsecas.

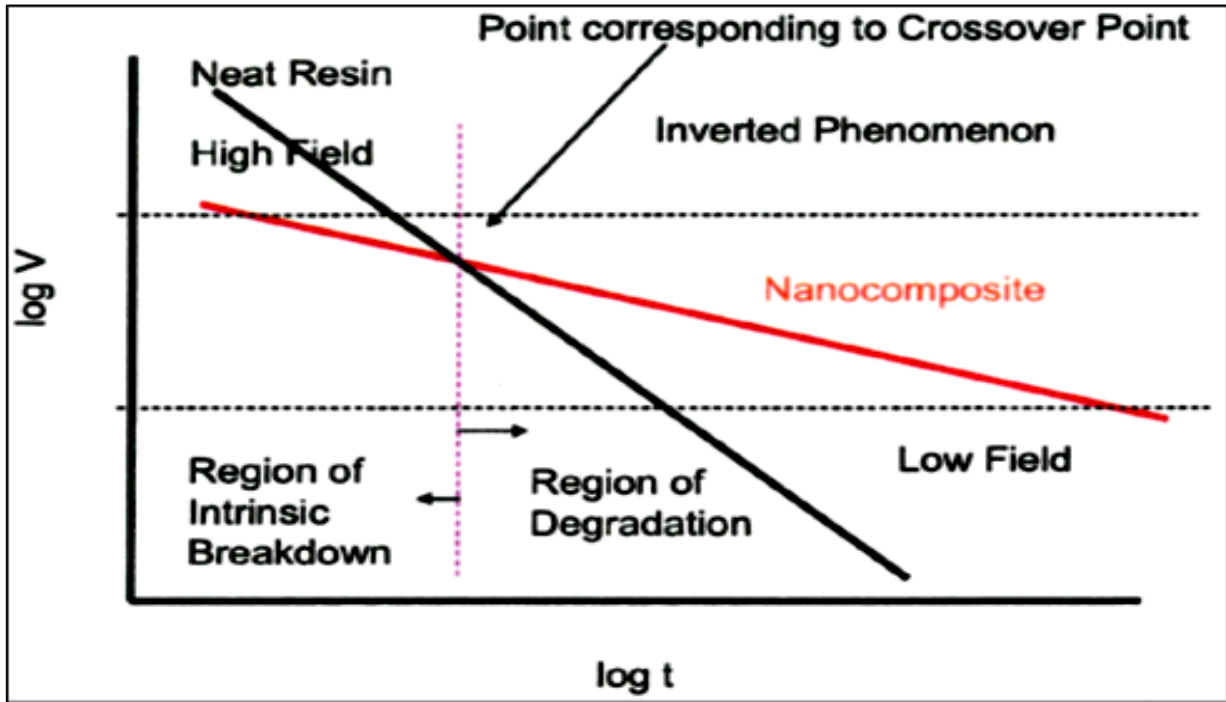


Fig. 6. Característica de envelhecimento da resina epóxi pura e com nanocompósitos de  $\text{SiO}_2$ , com intersecção em elevadas tensões do campo elétrico (retiradas de [4])

Em intensidades do campo elétrico moderadas, i.e., aquelas tecnicamente importantes, predomina o processo de degradação da atividade de descarga parcial juntamente com o crescimento gradual da arborescência ("treeing"). Pode-se concluir que o envelhecimento do sistema com nano-compósitos segue um mecanismo de degradação diferente e bem mais lento em comparação com a resina epóxi pura [4].

Os testes de envelhecimento realizados em corpos-de-prova nano-dielétricos sobre placas, colocados sob tensão a  $60^\circ\text{C}$  e campos elétricos homogêneos de 6 kV/mm, 7 kV/mm e 8 kV/mm também confirmaram as diferentes inclinações de curvas de vida útil da resina epóxi pura e do material contendo os nano-compósito com 5% de composição em massa [5]. As amostras com nano-compósitos têm uma inclinação mais suave em comparação com a resina epóxi pura, com uma vida útil cerca de nove vezes maior sob tensões elétricas típicas de projeto da isolação do enrolamento de motores.

Com informações de outros pesquisadores e baseado em resultados de testes próprios, pode afirmar de maneira inequívoca que o *Fator de Melhoria do Envelhecimento (VEI)* da isolação do enrolamento estatórico em relação intensidade do campo de projeto seria maior que dez. No entanto, isto precisa ser comprovado em barras estatóricas originais de hidrogeradores ao longo dos próximos passos deste projeto de P&D.

#### 4.0 - TESTES DE ENVELHECIMENTO EM BARRAS DE ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS ORIGINAIS DE HIDROGERADORES

##### 4.1 Tipos de corpos-de-prova

Foram fabricadas quarenta barras de enrolamentos estatóricos com a seção transversal original de hidrogeradores com refrigeração indireta a ar (execução comum a mais de 95% dos hidrogeradores) de tensão nominal de  $U_n = 13,8\text{ kV}$ , sendo que a parte reta dessas barras tem comprimento de 1,6 m e enfiadas com fitas padrão de tecido de vidro e mica fina e o processo original de cura em temperatura após o ciclo de VPI. Para os testes de envelhecimento elétrico (VET) foram produzidas barras originais impregnadas com resina epóxi pura e outras com 20% de composição em peso de nano-partículas de  $\text{SiO}_2$  na resina epóxi.

A medição do fator de dissipação dielétrica ( $\tan \delta$ ), que foi utilizada como uma medida de qualidade para o processos de produção por VPI, resultou nos mesmos valores reduzidos de *tip-up* das barras tanto para a isolação MICALASTIC padrão como para o novo sistema de isolação com nano-partículas. Isso demonstra claramente a boa impregnação e cura da isolação de barras estatóricas originais de  $U_n = 13,8\text{ kV}$ . Todas as barras tiveram um fator de dissipação máximo *tip-up* significativamente inferior ao limite interno de controle de qualidade estabelecido em  $1 \cdot 10^{-3}/0,2U_n$ .

A Figura 7 ilustra a célula de teste de alta tensão com um conjunto de barras conectadas e submetidas a tensão de 2.5 vezes a tensão nominal para um teste de vida útil dielétrica (envelhecimento acelerado).

Devido à tensão elevada de teste em CA de  $2.5U_n = 34.5 \text{ kV}$  torna-se necessário realizar um resfriamento forçado do sistema de atenuação de potencial ECP (coloração verniz cinza) com ventiladores para evitar o sobreaquecimento e a formação de arcos elétricos (*flash over*).



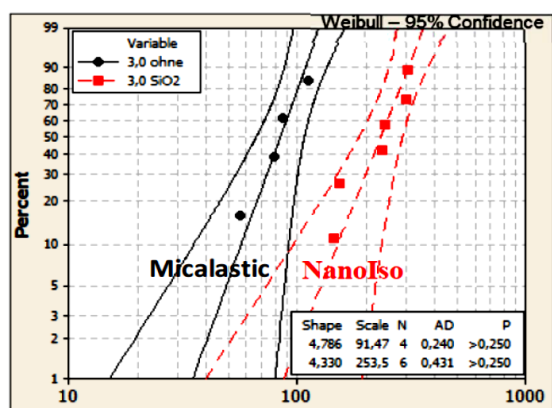
Fig. 7. Teste de envelhecimento elétrico acelerado em barras de enrolamentos estáticos com 1,6 m de comprimento e seção transversal original de um hidrogerador indiretamente resfriado a ar com  $U_n = 13,8 \text{ kV}$

#### 4.2 Teste de envelhecimento elétrico (VET)

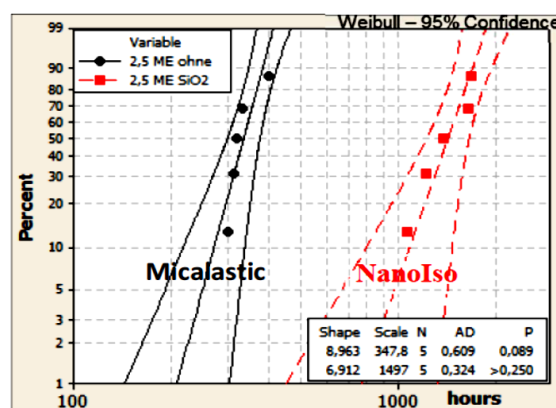
Os resultados dos testes de envelhecimento sob diferentes tensões estão indicados graficamente como uma distribuição de probabilidade de Weibull nos gráficos da Figura 8.

O Fator VEI confirma o exposto anteriormente para os corpos-de-prova tubulares com nano-partículas, incluindo o efeito do significativo aumento da vida útil sob tensões de teste reduzidas.

O Fator VEI aumenta, saindo de apenas 2.8 (em  $3U_n = 41,4 \text{ kV}$ ), para 4.3 (em  $2,5U_n = 34,5 \text{ kV}$ ). Os testes em  $2U_n$  com um número suficiente de corpos-de-prova ainda estão em andamento devido à longas vida útil sob tensões mais baixas.



Test voltage  $U_p = 3U_n = 41.4 \text{ kV}$   
Mean electrical lifetime (63% scale)  
Micalastic: 91.5 h  
NanoIso: 254 h  
→ Improvement Factor VEI = 2.8



Test voltage  $U_p = 2.5U_n = 34.5 \text{ kV}$   
Mean electrical lifetime (63% scale)  
Micalastic: 348 h  
NanoIso: 1497 h  
→ Improvement Factor VEI = 4.3

Fig. 8. Distribuição de probabilidade de Weibull dos testes de envelhecimento em RT com o sistema de isolamento padrão MICALASTIC e o novo sistema de isolamento com nanocompósitos a 3 vezes e 2.5 vezes a tensão nominal



### 4.3 Curvas de vida útil dielétrica

No entanto, é possível estabelecer uma primeira curva de vida útil elétrica  $E_D = f(t_L)$  das barras de enrolamentos estatóricos originais de hidrogeradores com o sistema MICALASTIC já estabelecido e a nova resina com nanocompósitos (Figura 9).

Para determinar as diferentes inclinações das curvas de vida útil em barras estatóricas originais, será necessária a realização de testes de envelhecimento adicionais sob quatro diferentes níveis de tensão (isto é, intensidade do campo  $E_D$ ) de  $2 U_n$ ,  $2.5 U_n$ ,  $3 U_n$  e  $4 U_n$ , com lotes de amostras de ao menos sete barras em tamanho real. Para isso, será necessário produzir um lote de 70 barras estatóricas originais de hidrogeradores e testar a sua vida útil. Estes testes estão atualmente em execução e os resultados serão apresentados em um próximo trabalho.

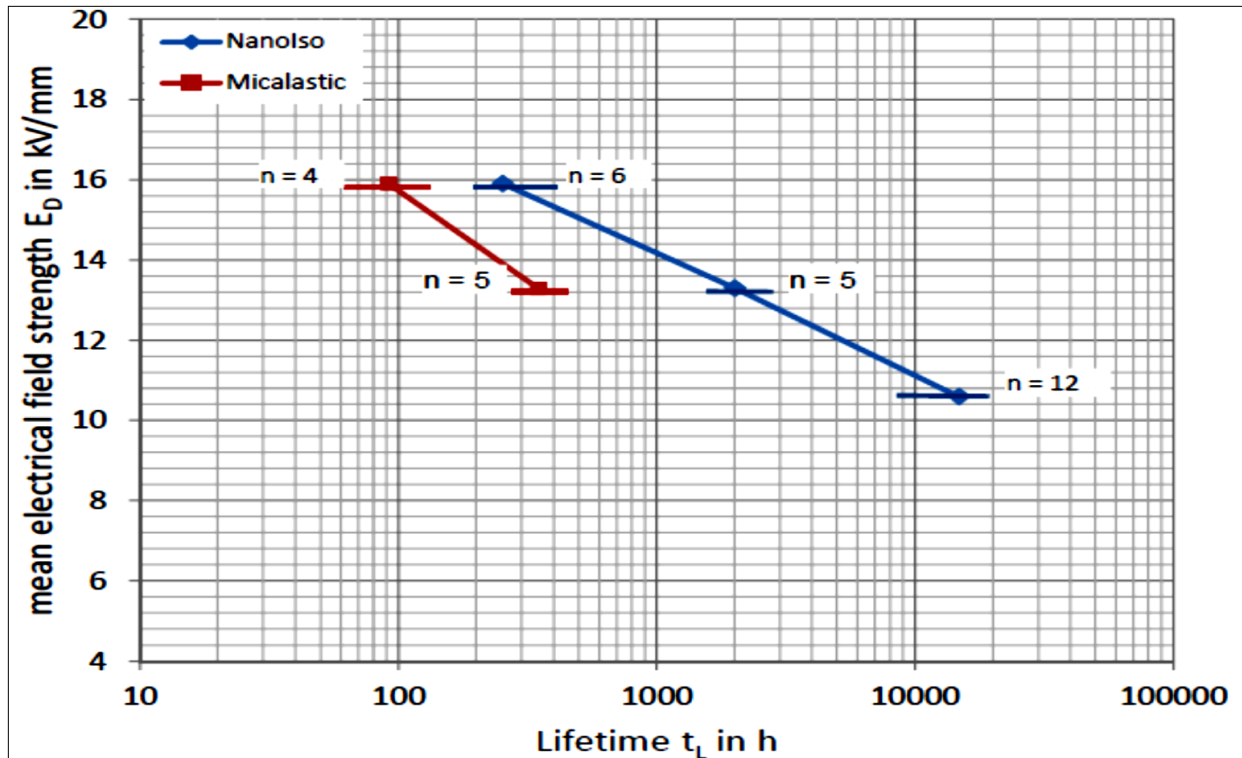


Fig. 9. Comparação da curva de vida útil elétrica  $E_D = f(t_L)$  do sistema MICALASTIC já estabelecido e o novo sistema de isolamento com nanocompósitos em barras originais de enroladores de hidrogeradores à tensão nominal de  $U_n = 13,8$  kV

### 5.0 - PRÓXIMOS PASSOS

Após uma verificação bem-sucedida da maior vida útil dielétrica da isolamento de enrolamentos utilizando nanocompósitos de  $\text{SiO}_2$ , será obrigatório qualificar o novo sistema de isolamento com testes funcionais realizados em conformidade com a norma internacional da série IEC 60034-18 [6].

As próximas e extensas etapas a serem realizadas neste projeto de desenvolvimento incluem:

1. O procedimento de qualificação sistema-candidato a novo sistema de isolamento em comparação com o sistema de isolamento amplamente comprovado e estabelecido (MICALASTIC®) deve ser realizado em conformidade com as normas da série IEC 60034-18 [6], que especificam uma série de testes funcionais de avaliação para as barras originais do enrolamento estatórico. Este programa de qualificação inclui os testes abaixo, que são significativamente dispendiosos e demorados:
  - Envelhecimento térmico e testes de classificação sob três diferentes temperaturas,
  - Testes de envelhecimento elétrico em no mínimo de 3 níveis diferentes, resultando em curvas de vida útil elétrica;
  - Envelhecimento multifatorial por meio da aplicação simultânea de ciclos térmicos e de tensões elétricas à isolamento principal;
  - Resistência à flexão termomecânica de maneira simultânea à tensão elétrica como teste de envelhecimento multifatorial.



2. Caso o sistema-candidato com nano-compósitos confirme o desempenho esperado, um hidrogerador será então equipado com um enrolamento estatórico com um projeto novo e que utilize esse sistema de isolamento com nano-partículas de  $\text{SiO}_2$  – com isolamento principal de espessura reduzida, de melhor condutividade térmica e mais flexível. Espera-se que a nova isolamento com nano-compósitos aumente o desempenho geral do gerador (MVA) por um valor entre 10% e 15%.
3. Adicionalmente, para uma melhor adequação do enrolamento estatórico para as novas demandas voláteis das redes elétricas provocadas por fontes de energia renováveis intermitentes, foi iniciado um projeto de pesquisa básica para a utilização de uma resina epóxi com nano-partículas especialmente elásticas para tornar o sistema de isolamento principal e a estrutura do enrolamento mais flexível, bem como para melhorar as suas características de atenuação dinâmica.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Com base nos promissores resultados das pesquisas de materiais, bem como nos testes de isolamento em barras estatóricas de hidrogeradores, é possível extrair as seguintes conclusões:

1. As nano-partículas de  $\text{SiO}_2$  funcionam como uma barreira à degradação do material devido ao processo de arborescência ("treeing") ao limitarem a propagação de canais de falhas. A obstrução do crescimento da arborescência resulta em uma vida útil significativamente mais longa do novo sistema de isolamento com nano-compósitos para enrolamentos estatóricos.
2. Os testes de envelhecimento elétrico acelerado realizados nos protótipos tubulares e nas barras estatóricas originais de hidrogeradores demonstram um grande aumento da vida útil elétrica da isolamento à base de nano-partículas com relação ao sistema de referência estabelecido (MICALASTIC). Esse novo sistema abriria as portas para o projeto de um enrolamento estatórico de geradores mais eficiente, com melhor desempenho e com operação de carga de ponta sustentável frente às demandas voláteis da rede elétrica.
3. O sistema de isolamento com nano-compósitos recentemente desenvolvido oferece a possibilidade um projeto mais eficaz para enrolamentos estatóricos. Ele resultará em uma menor espessura da camada de isolamento, oferecendo mais espaço para os materiais ativos (cobre e ferro), além de uma melhor transferência de calor. Isso aumenta a potência específica em um valor entre 10% e 15%, sem comprometer a vida útil da isolamento de hidrogeradores tanto no caso de máquinas novas como no caso de modernizações em que o enrolamento do estator é substituído ("rebobinamento").

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Vogelsang, "Time to breakdown of high voltage winding insulation with respect to microscopic properties and manufacturing qualities", PhD Thesis, ETH Zurich, Hartung-Gorre Verlag, 2004.
- [2] T. Tanaka, G. C. Montanari and R. Mülhaupt, "Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation- perspectives for processing technologies, Material characterization and future applications", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.11, No.5, Oct. 2004, pp. 763 – 784.
- [3] F. Pohlmann, „Isoliersysteme für Drehstromniederspannungsmotoren, die von Pulsfrequenzumrichtern angesteuert werden“ PhD, VDI Reihe 21, Elektrotechnik 317, XIII, VDI-Verl. Düsseldorf (2001).
- [4] T. Tanaka, "Similarity between treeing lifetime and PD resistance in aging mechanisms for epoxy nanocomposites"; Proc. 9th Intern. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, July 19-23, 2009, Harbin, China, Paper H-3.
- [5] P. Preetha, M. J. Thomas, "Life estimation of electro-thermally stressed epoxy nanocomposites", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.21, No.3, June 2014, pp. 1154 – 1160.
- [6] IEC 60034-18 series: Rotating electrical machines – Rotating electrical machines - Functional evaluation of insulation system.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Thomas Hildinger – São Paulo, Brasil, 1960. Graduado em Engenharia Elétrica em 1983 pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e em Administração de Empresas em 1989 pela Faculdade de Administração e Economia da Universidade de São Paulo.

Jürgen R. Weidner – Stuttgart, Alemanha, 1950. Graduado em Engenharia Elétrica em 1975 pelo Institute of High Voltage and High Energy Research da Universidade Técnica de Brunswick, Alemanha.