



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

GGH-20  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO I  
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**PÓLOS ESMALTADOS – UMA NOVA CONCEPÇÃO PARA A ISOLAÇÃO  
DO ENROLAMENTO DE EXCITAÇÃO EM HIDROGERADORES**

**Thomas Hildinger \***  
Voith Siemens Hydro

**João Carlos Benedetti**  
Voith Siemens Hydro

**Caio W Kramer**  
Voith Siemens Hydro

**RESUMO**

Atualmente, a isolação das bobinas polares de geradores síncronos de pólos salientes está baseada na aplicação de materiais isolantes rígidos e/ou papeis de uso elétrico ( p.e. Nomex ), dispostos ou mesmo colados entre espiras das bobinas e entre estas e o corpo polar.

A Voith Siemens Hydro desenvolveu uma nova concepção para substituir o método tradicional, denominada de **pólos esmaltados**, baseada na aplicação de uma pintura a base de pó isolante revestindo totalmente as barras de cobre que formam as espiras polares.

A aplicação do pó isolante pode ser feita por processo eletrostático ou leito fluidizado e, uma vez que, as espiras que formam as bobinas do enrolamento de campo estão totalmente envolvidas pela isolação torna-se possível ainda simplificar significativamente a ancoragem das bobinas no corpo polar.

Pretende-se mostrar neste trabalho as características desta nova isolação bem como a nova concepção de fixação das bobinas polares no corpo polar e os resultados experimentais já obtidos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gerador síncrono – pólos salientes – bobinas polares – isolação – qualidade

**1.0. INTRODUÇÃO**

De uma forma geral, pode-se afirmar que a base dos sistemas de geração hidrelétrica é constituída de máquinas síncronas de pólos salientes. Nestas

máquinas, peças polares individuais, formadas por um núcleo magnético e enrolamento multi-espiras de uma ou mais camadas, são fixadas através de parafusos ou encaixes tipo rabo de andorinha ou cabeças de martelo na roda polar.

O trabalho descreve rapidamente o processo modernamente empregado nas médias e grandes máquinas, nas quais a isolação entre as espiras polares é constituída de uma ou duas camadas de material isolante, tipicamente de classe F. Normalmente, são empregadas tiras de Nomex superpostas e coladas entre si e, eventualmente, também coladas aos condutores de cobre eletrolítico que forma as espiras rotóricas. Além disso, placas de material isolante rígido ou bandagens de fibra de vidro impregnadas com resina são utilizadas para isolar o conjunto das espiras de cada pólo do correspondente núcleo magnético. Este processo torna a fabricação dos pólos lenta e onerosa.

Diversos fatores também contribuem para tornar problemática a manutenção da isolação entre espiras e entre bobinas e núcleos polares. Assim, máquinas síncronas em usinas hidrelétricas têm que ser desligadas para reparos com o objetivo de eliminar curtos-circuitos entre espiras e entre bobinas e núcleos polares. Tais curtos-circuitos surgem principalmente devido a “contatos” indesejáveis provocados por umidade ou sujeira (partículas condutoras), ou ainda devido a movimentações relativas entre condutores e materiais isolantes.

Com o objetivo explícito de eliminar os pontos fracos do atual sistema de isolação dos enrolamentos de excitação e ao mesmo tempo otimizar os custos de fabricação, a Voith Siemens Hydro desenvolveu uma

\*Rua Friedrich von Voith, 825 - CEP 02995-000 – São Paulo - SP - Brasil  
Tel.: (011) 3944-4060 - Fax: (011) 3944-5182

nova concepção, denominada de **pólos esmaltados**, baseada na aplicação de uma pintura a base de pó isolante revestindo totalmente as barras de cobre que formam as espiras polares. Esta nova concepção, a ser apresentada em detalhes, pode ser aplicada tanto na fabricação de pólos para máquinas novas quanto em trabalhos de modernização ou repotenciação de usinas hidrelétricas, garantindo bom desempenho e economia.

O trabalho apresenta, também, os testes iniciais destinados a selecionar o material mais adequado para esta nova técnica de isolamento dos enrolamentos de excitação de hidrogeradores. Adicionalmente aos testes iniciais, optou-se pela realização de um teste de longa duração sob condições reais de operação.

## 2.0. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Com o objetivo de reduzir a diversidade dos materiais aplicados na isolação entre as espiras polares bem como a isolação destas para o corpo polar, aumentando assim a confiabilidade operacional do produto, a Voith Siemens Hydro desenvolveu um novo sistema para a isolação completa das bobinas polares, denominada de **pólos esmaltados**, baseada na aplicação de uma pintura a base de pó isolante revestindo totalmente as barras de cobre que formam as espiras polares.

A aplicação do pó isolante pode ser feita por processo eletrostático ou leito fluidizado e, uma vez que, as espiras que formam as bobinas do enrolamento de campo estão totalmente envolvidas pela isolação torna-se possível ainda simplificar significativamente ancoragem das bobinas no corpo polar.

Dentre os materiais inicialmente selecionados para os testes iniciais, o material finalmente escolhido, que apresentou melhor performance, foi um pó a base de epóxi para aplicação por processo eletrostático ou leito fluidizado, que apresenta excelentes propriedades mecânicas e de rigidez dielétrica após a cura.

Principais características:

- Elevada rigidez dielétrica ( > 28 kV/mm )
- Elevado grau de dureza ( > 100 conf DIN 53153 )
- Baixa corrente de fuga superficial
- Elevada resistência elétrica e mecânica em ciclos térmicos
- Classe de isolação: F
- Cor: verde oliva

## 3.0. FIXAÇÃO DAS BOBINAS POLARES

O processo atualmente praticado pela Voith Siemens Hydro e, com pequenas variações também praticado por outras empresas, consiste na aplicação de uma isolação de material isolante rígido e Nomex entre a bobina polar e o núcleo polar e aplica-se uma ou duas camadas de Nomex coladas diretamente sobre as espiras para isolá-las entre si.

Prepara-se o núcleo polar e insere-se o quadro isolante externo. A bobina isolada é então inserida e completa-

se o processo com a colocação de um quadro isolante interno e um quadro de pressão metálico soldado diretamente no núcleo polar para se garantir a completa fixação do conjunto.

Encontra-se a seguir uma representação ilustrativa do processo de fixação atualmente praticado, onde se destacam os quadros isolantes externo (a) e interno (b) e o quadro de pressão (c).

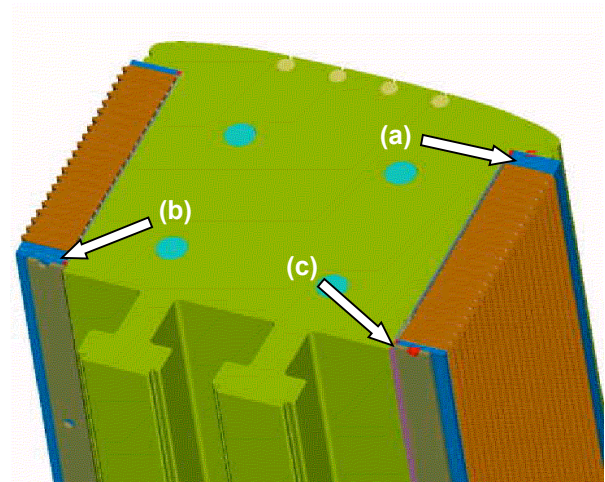


Figura 1 – Fixação bobina polar sistema atual

Com a nova tecnologia de **pólos esmaltados**, em princípio a bobina polar já se encontra suficientemente isolada para garantir-se com a aplicação do esmalte a isolação desta com o núcleo polar.

Dessa maneira, o quadro isolante externo é mantido, porém pode-se eliminar, em máquinas verticais, o quadro isolante interno e o quadro de pressão. As bobinas polares são fixadas ao corpo polar por meio de uma massa composta por resina epóxi e fibras curtas de vibro, com cura a temperatura ambiente.

Dessa forma, com os pólos esmaltados obtêm-se uma construção simples, robusta e econômica dos enrolamentos de excitação dos hidrogeradores, possibilitando aumento da confiabilidade operacional e redução das paradas intempestivas provocadas por curtos-circuitos entre espiras polares ou curtos à terra no rotor devido a uma movimentação relativa dos materiais isolantes rígidos ou Nomex aplicados entre as espiras ou entre estas e o corpo polar.

Encontra-se a seguir uma representação ilustrativa do processo de fixação atualmente praticado, onde se destacam o quadro isolante externo (a) e a massa de fixação (d).

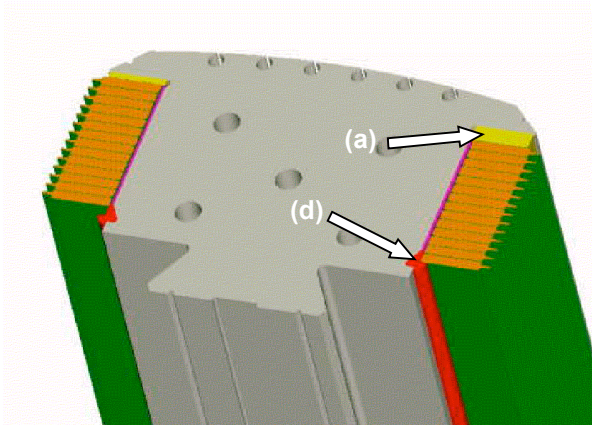


Figura 2 – Fixação bobina polar sistema com pólos esmaltados

Para uma melhor compreensão das diferenças entre os métodos de fixação das bobinas polares nos núcleos, segue-se esquema ilustrativo destas fixações, onde se destacam os quadros isolantes externo (a) e interno (b) e o quadro de pressão (c) e a massa de fixação (d).

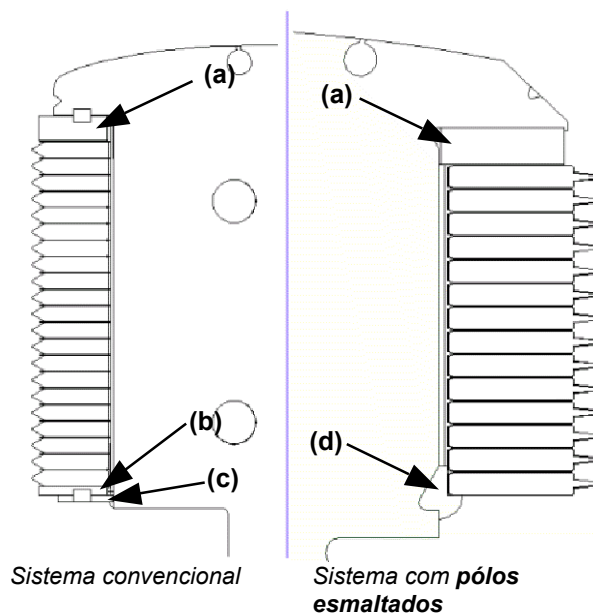


Figura 3 – Esquema ilustrativo das diferenças de fixação da bobina polar

#### 4.0. TRABALHOS INICIAIS

Os trabalhos iniciais para se desenvolver o conceito de bobinas polares com tecnologia de **pólos esmaltados** foi um desenvolvimento com parceria da Voith Siemens Hydro ( então Siemens Ltda. ) e Siemens AG ( Alemanha ).

Após pesquisa com fornecedores localizados majoritariamente na Europa, decidiu-se por realizar ensaios preliminares com um leque de 7 produtos, que foram submetidos aos seguintes ensaios em corpos de provas de laboratório:

- Ensaio de determinação da temperatura de transição vítrea
- Medição da espessura da camada aplicada ( mesmo processo e seqüência de aplicação em todos os corpos de prova com diferentes os produtos )
- Ensaio de ruptura dielétrica
- Ensaio de pressão estático
- Ensaio de determinação do coeficiente de atrito em função da temperatura
- Ensaio de envelhecimento sob temperatura ( perda de massa )
- Ensaio de ciclos térmicos
- Ensaio de corrente de fuga superficial
- Ensaio para avaliação da resistência a impactos cinéticos

Ao final do processo de seleção, optou-se por se fazer um corpo de provas que correspondesse a uma bobina original para sua instalação em uma máquina em funcionamento.

Uma das metas originais era de se encontrar um material que atendesse aos requisitos da classe de isolamento H, porém devido ao fato da composição polimérica básica de todos os produtos testados ser de epóxi ou poliéster, não se conseguiu atender esta exigência, porém alguns produtos chegaram a ter uma temperatura de index de 160 °C.

A pesquisa foi suspensa na Siemens AG ( Alemanha ) devido a problemas operacionais para sua implantação em turbogeradores de grande porte, pois a aplicação da pintura a base de pó isolante por processo eletrostático ou leito fluidizado requer que a bobina polar já esteja com todas as espiras soldadas, o que impedia a montagem das bobinas rotoricas fabricadas na Siemens AG.

No Brasil, devido ao fato de se utilizar tecnologia de pólos salientes com secção constante do corpo polar, não ocorreram maiores dificuldades de adaptação ao processo de aplicação da pintura a base de pó isolante.

#### 5.0. TESTE DE LONGA DURAÇÃO / CEMIG

Para a realização dos ensaios de longa duração em corpos de provas originais, ocorreram negociações desenvolvidas entre a CEMIG e a Voith Siemens Hydro, para que se permitisse a realização do teste de longa duração sob condições reais de operação em uma máquina de grande porte. Este teste, desenvolvido em conjunto pela CEMIG e pela Voith Siemens Hydro, consistiu na fabricação, de acordo com a nova técnica para isolamento da bobina polar, de dois pólos esmaltados protótipo para o gerador da UHE Nova Ponte, unidade #3.

Após os teste estáticos normais em fábrica, estes dois pólos esmaltados foram montados na Unidade #3 em Março de 1998 para operação em condições reais pelo período de um ano e dois meses, tendo sido submetidos, inclusive, a todos os testes normais de comissionamento antes da liberação para operação.

Adicionalmente, durante este teste de longa duração, foram realizadas duas paradas programadas para se verificar, através de ensaios elétricos ( medição da resistência de isolamento ), as condições do isolamento das espiras.

Os pólos permaneceram em operação por cerca de 10.000 horas e findo este teste de longa duração, os pólos protótipo foram removidos do gerador em Maio de 1999, apresentando um aspecto geral do conjunto bobinas e núcleos polares satisfatório, não havendo externamente sinais de deterioração ou danos.

Ao retornarem à Voith Siemens Hydro, os pólos foram desmontados e submetidos a uma bateria de testes elétricos e mecânicos para a validação final da nova concepção.

Os ensaios elétricos realizados nas fases de final de fabricação e após o ensaio de longa duração foram:

- Medição da resistência de isolamento
- Medição da resistência ôhmica
- Verificação de curto entre espiras por média frequência e surge-tester <sup>\*)</sup>
- Tensão aplicada ( 5 kV<sub>AC</sub> / 1 minuto )

Nota <sup>\*)</sup>: Devido a completa cobertura das espiras dos pólos por material isolante, não foi possível realizar o teste de curto entre espiras da maneira convencional, ou seja, medindo-se corrente de fuga entre espiras em média frequência ( cerca 10 kHz ). Para tanto, foi adotado o processo de verificação de curto entre espiras praticado em bobinas estatóricas já impregnadas e curadas.

Um ponto positivo verificado durante a desmontagem das bobinas polares foi a total aderência da massa de fixação das bobinas polares ( detalhe (d) nas figuras 2 e 3 ). A fixação destas ao núcleo superou as expectativas iniciais, pois houve penetração da massa entre as primeiras espiras da bobina polar e para sua remoção foi necessário o uso de uma alavanca. Durante este processo foi possível avaliar a boa resistência mecânica da superfície esmaltada das espiras, pois estas foram apenas levemente afetadas.

Para se avaliar a temperatura de funcionamento dos pólos bem como avaliar o aspecto de troca de calor entre as espiras e o corpo polar e estas e o meio, foram instalados "thermopapers" em pontos definidos das bobinas. Após a desmontagem das bobinas se verificou que estes "thermopapers" se encontravam degradados, tanto devido ao longo tempo exposto a temperatura de trabalho dos pólos ( para o qual estavam dimensionados ) quanto devido aos esforços mecânicos que atuaram sobre estes ( esmagamento ). Como aprendizado adicional, pode-se concluir que "thermopapers" não constituem meios adequados para este tipo de medição. Face ao exposto, a medição de temperatura realizada foi baseada unicamente no sistema de monitoramento "on-line" instalado pela CEMIG.

## 6.0. CONCLUSÃO

O desenvolvimento da nova tecnologia de isolamento denominada de **pólos esmaltados** fez com que se mudasse o enfoque dado à isolamento entre espiras polares e entre estas e o núcleo polar.

Os trabalhos de introdução desta nova tecnologia não se limitaram apenas em substituir o tradicional Nomex colado entre as espiras, mas levaram também em consideração as propriedades de elevadas rigidez dielétrica e mecânica da bobina polar esmaltada para se rever o conceito de montagem das bobinas polares no núcleo polar, visando uma redução do número total de materiais aplicados e com isso aumentando a confiabilidade operacional do sistema.

Um outro ponto positivo do novo processo de isolamento das espiras polares, tecnologia denominada de **pólos esmaltados**, refere-se a repotencialização de usinas hidrelétricas, pois não havendo mais a necessidade de soldagem do quadro metálico, pode-se proceder a desmontagem dos pólos propriamente dito e envio apenas das bobinas polares para aplicação da nova isolamento, pois a remontagem destas se dará por aplicação de massa a base de resina epóxi com cura a temperatura ambiente.

Houveram também ganhos de produtividade na etapa de fabricação das bobinas com a tecnologia de **pólos esmaltados**, pois basicamente a pintura a base de pó isolante por processo eletrostático ou leito fluidizado e a posterior cura ocorrem com as bobinas desmontadas do corpo colar e sem a necessidade de dispositivos auxiliares complexos.

Por fim, trata-se de um avanço tecnológico impar na área de sistemas de isolamento do enrolamento rotórico ( indutor ) cujos os impactos estimados na parte fabril e de aumento na confiabilidade operacional por parte do cliente tornarão esta nova tecnologia um diferencial de qualidade dos hidrogeradores projetados e fabricados pela Voith Siemens Hydro.

## 7.0. AGRADECIMENTO

Os autores deste Informe Técnico e a Voith Siemens Hydro gostariam de agradecer, publicamente, a CEMIG pelo inestimável apoio prestado pela empresa no desenvolvimento desta nova tecnologia e também agradecer a colaboração e apoio do corpo técnico da CEMIG na condução dos trabalhos de campo.

## 8.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Müller - Relatório EG4 / 1997 / 6003 "Entwicklung Pulverbeschichtung für Läuferisolierung" - Siemens AG.
- (2) Mazolla - Relatório Técnico KWU HF4 "Pólos protótipos CEMIG / Nova Ponte Unidade #3"- Siemens Ltda..