



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

CB/GMI/17

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XII

GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO - GMI

MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO: O QUE SE CONHECE?

**TAKAO PAUO HARA(*)
HARA ENGENHARIA**

**GUILHERME TAKAO HARA
HARA ENGENHARIA**

RESUMO

O ensaio para medir a resistência de isolamento em máquinas elétricas rotativas, mais conhecido como Megger, é um dos ensaios mais simples e de baixo custo. Porém, talvez devido a sua aparente simplicidade muitos profissionais medem a resistência de isolamento de forma equivocada, tanto na técnica de medição bem como nos recursos do equipamento de medição e o que é pior, na interpretação dos resultados.

Neste trabalho pretende-se discorrer desde os primórdios dos ensaios de medição de resistência de isolamento associado a tecnologia de materiais, que até a década de 1970 eram basicamente de materiais termoplásticos a base de asfalto, resinas de goma-laca (Shellac) e alquídicas e que depois deste período predominaram os materiais termofixos a base de epóxi e poliéster e mais recentemente poliuretano.

A mudança nos materiais trouxeram comportamentos diversos entre eles, onde a medição de resistência de isolamento foi afetado. Com as boas práticas, conhecimento técnico e melhorias na tecnologia de medição desenvolveram-se novos conceitos a respeito do tema.

O primeiro instrumento de medição de resistência de isolamento foi inventado em 1888 e o primeiro teste de campo realizado em 1889. Mas somente nas décadas de 1920 e 1930 que este ensaio começou-se a ser utilizado com mais frequência.

A norma mais conhecida é a IEEE 43 que foi publicada a primeira versão em 1950, revisadas em 1961 e 1974 com conhecimento de materiais termoplásticos. Devido ao grande incremento de máquinas elétricas rotativas fabricadas com sistema de isolamento termofixo, a partir de 1970, a norma IEEE43 foi atualizada somente em 2000. Nesta revisão ela trouxe uma série de novos entendimentos a respeito da interpretação dos resultados. Com o avanço de recursos da eletrônica e conhecimento sobre o tema a norma foi novamente revisada em dezembro de 2013.

PALAVRAS-CHAVE

xxiv snptee – Megger - Megaohmímetro - Resistência de Isolamento - índice de Polarização - Máquinas Elétricas Rotativas

1.0 - INTRODUÇÃO

O ensaio para medir a resistência de isolamento em máquinas elétricas rotativas, mais conhecido como Megger, é um ensaio relativamente simples e de baixo custo. Porém, talvez devido a sua aparente simplicidade muitos profissionais medem a resistência de isolamento de forma equivocada, tanto na técnica de medição bem como nos recursos do equipamento de medição e o que é pior, na interpretação dos resultados.

Os ensaios de medição de resistência de isolamento está associado à tecnologia de materiais que até a década de 1970 eram basicamente de materiais termoplásticos a base de asfalto e resinas Shellac e alquídicas, que depois deste período predominaram os materiais termofixos a base de epóxi e poliéster e mais recentemente poliuretano.

A mudança nos materiais trouxeram comportamentos diversos entre eles, onde a medição de resistência de isolamento foi afetado. Com as boas práticas e de conhecimento técnico e melhorias na tecnologia de medição desenvolveram-se novos conceitos a respeito do tema.

Para padronizar o tema a norma mais conhecida é a IEEE 43 que foi publicada a primeira versão em 1950, revisadas em 1961 e 1974 com conhecimento de materiais termoplásticos. Devido ao grande incremento de máquinas elétricas rotativas fabricadas com sistema de isolamento termofixo, a partir de 1970, estes trouxeram

mudanças significativas na medição e na interpretação dos resultados do ensaio de resistência de isolamento. Mas devido ao conservadorismo do meio técnico, a norma IEEE 43 foi atualizada somente em 2000, ou seja 30 anos depois de implantada a nova tecnologia de materiais. Nesta revisão ela trouxe uma série de novos entendimentos a respeito da interpretação dos resultados. Com o avanço de recursos da eletrônica e conhecimento sobre o tema a norma foi novamente revisada em dezembro de 2013. Nesta última versão, foi introduzida uma série de recomendações e cuidados, como o ponto de orvalho para fazer as medições bem como de alterações na equação da correção de temperatura e da interpretação dos resultados.

O conhecimento corrente no meio profissional é ainda das práticas com material termoplástico que deixaram de ser utilizadas a partir de 1970.

2.0 - CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1 Sistema Isolamento Termoplástico

É o sistema onde o polímero de aglutinação é termoplástico, geralmente são polímeros lineares de ligação simples e que alteram com o calor, exemplos como Asfaltos, Resina de goma-laca (Shellac), Alkidicas, polietileno (PE), polipropileno (PP), cloreto de polivinila (PVC), entre outros.

2.2 Sistema de Isolamento Termofixo

É o sistema onde o polímero de aglutinação é termorrígido, geralmente são polímeros lineares com ligações cruzadas e que não alteram com o calor, exemplos como Poliuretanos, Epoxy, Poliester, etc

2.3 Corrente de Absorção ou Polarização (IA)

Uma corrente resultante da polarização molecular e da migração do elétron, que decai com tempo de aplicação de tensão a uma taxa decrescente de um valor inicial comparativamente alto para quase zero, e que depende do tipo e condição do sistema de isolamento.

2.4 Corrente de Condução (IG)

Uma corrente que é constante no tempo, que passa através da parede de isolamento da superfície aterrada para o condutor de alta tensão, e que isso depende do tipo de material aglutinante utilizado no sistema de isolamento

2.5 Efeito Eletroendosmose

Um fenômeno observado ocasionalmente, mais frequentemente em termoplásticos mais antigos (por exemplo, Asfalto), quando, na presença de umidade e com diferentes valores de Resistência de Isolamento podem ser obtido quando a polaridade dos fios do instrumento de medida- Megger são invertidos. Normalmente para enrolamentos mais antigos com umidade (umidos), a Resistência de Isolamento para polaridade positiva, em que o condutor positivo está ligado ao enrolamento e o condutor negativo conectado a terra, é muito maior do que para a polaridade oposta.

2.6 Resistência de Isolamento (RI)

A capacidade do isolamento elétrico de um enrolamento resistir à corrente contínua. O quociente da tensão em corrente contínua aplicada em polaridade negativa dividida pela corrente que atravessa o isolamento da máquina, corrigido para 40 °C, e tomando a um tempo especificado (t) a partir do início da aplicação da tensão. O tempo de aplicação da tensão é normalmente 1 min (RI₁) ou 10 min (RI₁₀), no entanto, outros valores podem ser utilizados. Convenção de unidade: os valores de 1 a 10 são assumidos em minutos, valores de subíndice de 15 e maior é assumido em segundos.

2.7 Corrente Capacitiva Geométrica (Ic)

Uma corrente reversível de magnitude comparativamente alta e de curta duração, o qual decai exponencialmente com o tempo de aplicação da tensão e a qual depende da resistência interna do instrumento de medição e da capacitância geométrica do enrolamento.

2.8 Perfil da Resistência de Isolamento (IRP)

O perfil da resistência de isolamento (IRP) é um gráfico do RI onde o RI é plotada em incrementos de tempo discretos (tais como 5 segundos) durante um período de tempo especificado (tipicamente 10 min).

2.9 Índice de Polarização (IP_{t2/t1})

Variação no valor da resistência de isolamento com o tempo. O quociente da Resistência de Isolamento no tempo (t₂) dividido pela Resistência de Isolamento no instante (t₁). Se os tempos t₂ e t₁ não forem especificados, são considerados 10 min e 1 min, respectivamente. Convenções de unidades: valores de 1 a 10 são assumidos como sendo em minutos, valores de 15 e maiores são assumidos como sendo em segundos (por exemplo, IP_{60/15} refere-se a RI_{60s}/RI_{15s})

2.10 Corrente de Fuga Superficial (IL)

Uma corrente que é constante com o tempo e a qual normalmente existe sobre a superfície das cabeças de bobinas do enrolamento do estator ou entre condutores expostos e o corpo do rotor em enrolamento do rotor isolado. A magnitude da corrente de fuga superficial depende da temperatura e da quantidade de material condutivo, por exemplo a umidade ou contaminação na superfície do isolamento

3.0 - RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO - TEORIA GERAL

A Resistência de Isolamento de um enrolamento de máquina rotativo é função do tipo e condição do materiais isolantes utilizados, bem como as técnicas utilizadas para aplicá-los. Em geral, a resistência de isolamento varia proporcionalmente à espessura do isolamento e inversamente proporcionalmente à área de superfície do condutor.

3.1 Componentes Medidas na Corrente Contínua

Por definição, a resistência de isolamento é o quociente da tensão corrente contínua aplicada através do isolamento dividido pela corrente resultante total num dado momento. A corrente resultante total (I_T) é a soma de quatro correntes: Fugas superficiais (I_L), Capacitância geométrica (I_C), Condutância ou de condução (I_G) e Absorção (I_A).

Um circuito equivalente para as várias correntes em um teste de resistência de isolamento é mostrado na Figura 1

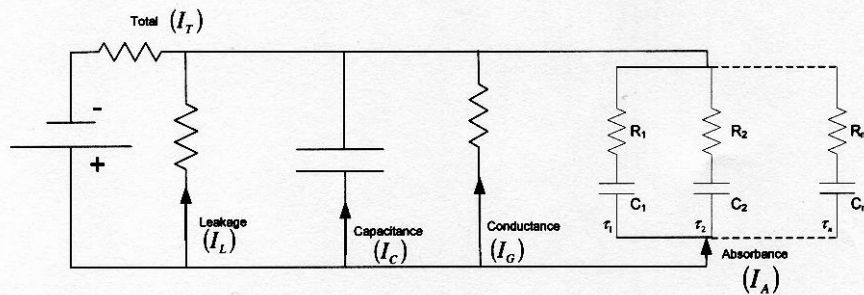


Figura 1 (Figura 1 da IEEE 43:2013) - Circuito equivalente mostrando as quatro correntes monitorada durante a medição de Resistência de Isolamento.

A corrente de capacitância geométrica (I_C) normalmente não afeta as medidas porque desaparece pelo tempo em que a primeira leitura é feita em 1 minuto. A corrente de absorção (I_A) ou a corrente de polarização decai a uma taxa decrescente.

A corrente de absorção tem dois componentes. O primeiro componente é devido ao polarização do materiais impregnantes porque as moléculas orgânicas, tais como epóxi, poliéster e asfalto, tendem a mudar a orientação na presença de um campo elétrico. Uma vez que estas moléculas têm a força contra a atração de outras moléculas, normalmente demora vários minutos após a aplicação do campo elétrico para as moléculas serem reorientadas e, portanto, para que a energia de polarização fornecida pela corrente seja reduzida a quase zero. Um segundo componente da corrente de absorção é devido à orientação gradual de elétrons e íons pela maioria dos materiais orgânicos. Esses elétrons e íons orientam-se até tornarem preso na superfície dos sistemas de isolamento de máquina rotativa. Normalmente, para isolamento da máquina rotativa limpa e seca, a resistência de isolamento está entorno de 30 s e alguns minutos é primariamente determinada pela corrente de absorção.

A corrente de condução (I_G) em sistemas de isolamento de poliéster e epoxi-mica bem consolidados é essencialmente zero, a menos que o isolamento tenha ficado saturado com umidade. Sistemas de isolamento mais antigos, como a mica-asfalto ou shellac mica-folium podem ter uma corrente de condução natural e maior devido à condutividade das fitas que ancora a mica. A corrente de fuga superficial (I_L) é constante ao longo do tempo. Uma corrente de fuga superficial elevada, isto é, resistência de isolamento baixo, normalmente é causada pela umidade ou algum outro tipo de contaminação parcialmente condutora.

3.2 Característica da Medição em Corrente Contínua

Comparando a alteração na resistência de isolamento ou a corrente total com a duração da aplicação da tensão de teste pode ser usual na avaliação da limpeza e se está seco o enrolamento. Se os enrolamentos estiverem contaminados ou úmidos, a corrente total (I_T) será aproximadamente constante com o tempo, I_L e/ou I_G (ver figura 2 da IEEE 43:2000) ser muito maior que a corrente de absorção (I_A). Se os enrolamentos estiverem limpos e secos, a corrente total (I_T) normalmente diminuirá com o tempo (ver Figura 3 da IEEE 43:2000), uma vez que a corrente total é dominada pela corrente de absorção (i.e., polarização) I_A .

3.3 Leituras de Resistência de Isolamento

A medição da resistência de isolamento é obtido pelo ensaio de tensão corrente contínua e deve ser limitada a um valor adequado à tensão nominal do enrolamento e à condição básica de isolamento. Isto é particularmente importante no caso de máquinas pequenas, de baixa tensão ou enrolamentos úmidos. Se a tensão de teste for muito alta o tensão de teste pode sobrestressar o isolamento, levando a falha.

Os ensaios de resistência de isolamento são geralmente conduzidos a tensões contínuas constantes de 500-10.000 V com polaridade negativa. A polaridade negativa é preferida para acomodar o fenômeno da electroendosse. Diretrizes para tensões de teste são apresentados na Tabela 1. As leituras de resistência de isolamento são tomadas após a tensão corrente contínua de teste ser aplicada durante 1 minuto.

Tensão nominal do enrolamento (Vca ou cc)*	Tensão Vcc - Medição RI
< 1.000	500
1.000 - 2.500	500 - 1.000
2.501 - 5.000	1.000 - 2.500
5.001 - 12.000	2.500 - 5.000
> 12.000	5.000 - 10.000

* Tensão Nominal ou de fase - fase para máquinas trifásicas, fase-terra para máquinas monofásicas, tensão nominal de corrente contínua para máquinas de corrente contínua ou enrolamento de campo.

Tabela 1 - Diretrizes para V_{cc} a ser aplicada em ensaio de medição de RI.

3.4 Leituras de Índice de Polarização

A resistência de isolamento medida geralmente aumentará rapidamente quando a tensão for aplicada pela primeira vez e, então, quando aproximar-se gradualmente do valor relativamente constante à medida que o tempo passa (ver figura 4 da IEEE 43:2000). As leituras de um enrolamento seco em boas condições podem continuar a aumentar durante horas com uma tensão de teste constante aplicada continuamente. Para tipos mais antigos de isolamento, um valor razoavelmente estável é normalmente atingido em 10-15 minutos. Tipos modernos de fios revestidos com filmes bem como enrolamentos de estator isolados com epóxi-mica ou poliéster-mica, podem aproximar-se de um valor da resistência de isolamento em 4 minutos ou menos. Se o enrolamento estiver úmido ou sujo, um baixo valor ser atingido 1 minuto ou 2 minutos após a aplicação da tensão de teste.

O índice de polarização é normalmente definido pela relação entre o valor da resistência de 10 min (RI_{10}) para o valor da resistência 1 min (RI_1). (A norma sugere no anexo A para a utilização de outros valores.) O índice de polarização é indicativo da inclinação da curva característica (ver figura 4 da IEEE 43:2000) e pode ser utilizado para avaliar a condição de isolamento. Para proporcionar uma maior precisão em torno do ponto de 1 minuto e permitir que os dados sejam plotada no papel de registro, também é comum tomar leituras em outros intervalos, tais como 15 s, 30 s, 45 s, 1 min, 1,5 min, 2 min, 3 min, 4 min, ..., e 10 min.

3.5 Corrente de Descarga

Após a retirada da tensão contínua aplicada, deve ser fornecido um circuito de descarga adequado, veja figura 3 da IEEE 43:2000.

A corrente de descarga se manifesta em dois componentes:

a) Um componente de corrente de descarga capacitiva que decai quase instantaneamente dependendo da resistência à descarga.

b) A corrente de descarga de absorção, que decai de um valor inicialmente elevado para quase zero com as mesmas características que a corrente de carga inicial mas com a polaridade oposta. Este decaimento pode levar mais de 30 min dependendo do tipo de isolamento e o tamanho da máquina sob teste.

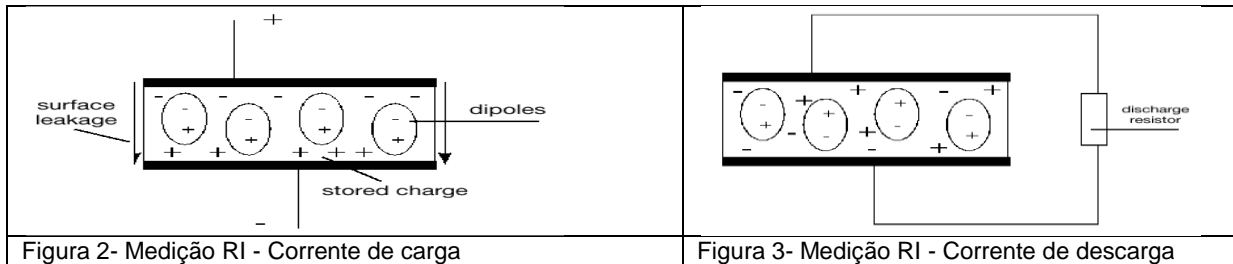


Figura 2- Medição RI - Corrente de carga

Figura 3- Medição RI - Corrente de descarga

4.0 - FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

4.1 Efeito da Condição da Superfície

A corrente de fuga superficial (I_L) é dependente do material estranho, como óleo e/ou pó de carvão sobre a superfície de enrolamento fora da ranhura. A corrente de fuga superficial pode ser significativamente maior nos rotores de geradores de máquinas de grande porte, a qual têm expostas grandes superfícies de correntes de fuga. Também pode haver um aumento na corrente de fuga superficial em máquinas onde tem pintura de controle de tensão aplicado nas cabeças de bobinas.

A poeira (ou sais) em superfícies de isolamento normalmente não são condutoras quando secas, pode tornar-se parcialmente condutora quando exposto à umidade ou ao óleo e, assim, pode diminuir a resistência de isolamento. Se a resistência de isolamento ou o índice de polarização for reduzido devido a contaminação normalmente pode ser restaurado para um valor aceitável através da limpeza e secagem.

4.2 Efeito da Umidade

Independentemente da limpeza da superfície do enrolamento, se a temperatura do enrolamento estiver no ponto de orvalho do ar ambiente ou abaixo dele pode formar-se uma película de umidade sobre a superfície de isolamento o que pode diminuir a resistência de isolamento ou o índice de polarização. O efeito é mais pronunciado se a superfície estiver também contaminada, ou se houver fissuras no isolamento. Note que os efeitos da contaminação da umidade em um enrolamento saudável não devem impedir a obtenção de leituras aceitáveis.

Alguns tipos de sistemas de isolamento de enrolamento mais antigos são higroscópicos (absorvem facilmente água) e a umidade do ar ambiente úmido pode ser puxada para dentro do isolamento. Isto é particularmente verdadeiro para os materiais isolantes a base de mica-asfáltica e de goma-laca (Shellac) mica-folium mais antigas, bem como para algumas fitas ou papel isolantes utilizadas entre condutores de cobre não isolados em grandes rotores de geradores. A umidade absorvida aumenta a corrente de condução (I_c) e reduz significativamente a resistência de isolamento.

As máquinas em serviço estão geralmente a uma temperatura acima do ponto de orvalho. Os ensaios devem ser efetuados numa máquina que estava em serviço, antes da temperatura do enrolamento da máquina descer abaixo do ponto de orvalho.

As máquinas fora de serviço (sem aquecedores) são frequentemente testadas quando a temperatura do enrolamento está abaixo do ponto de orvalho e podem ter leituras de resistência de isolamento e de polarização significativamente menores do que o esperado devido à contaminação por umidade. Pode ser necessário secar essas máquinas para obter leituras aceitáveis antes de retornar essas máquinas para operação ou realizar testes

de alta tensão. Para procedimentos apropriados de secagem consulte o fabricante do equipamento. O anexo A2 da norma IEEE 43:1974 recomenda procedimento de secagem. O histórico da máquina, as inspeções visuais e outros resultados de teste podem ajudar na avaliação do risco potencial de retorno ao serviço de uma máquina com baixa resistência de isolamento e/ou leituras do índice de polarização devido à contaminação por umidade. Recomenda-se que uma máquina com leituras baixas de IP e R_{11} não seja submetida a testes de alta tensão adicionais.

4.3 Efeito da Temperatura

4.3.1 - Teoria Geral

O valor da resistência de isolamento para um determinado sistema, a qualquer dado momento, varia inversamente, numa base exponencial, com a temperatura do enrolamento. Há um contraste entre a dependência da temperatura da resistividade em metais e materiais não metálicos, especialmente em bons materiais isolantes. Nos metais, onde há numerosos elétrons livres a temperatura mais elevada introduz maior agitação térmica, o que reduz a trajetória livre média do movimento dos elétrons com a consequente redução na mobilidade dos elétrons e um aumento na resistividade. No entanto, nos materiais isolantes, um aumento da temperatura fornece energia térmica, o que libera portadores de carga adicionais e reduz a resistividade. Esta variação de temperatura afeta todos os componentes atuais identificados em 3.1, exceto a corrente capacitiva geométrica. O valor da resistência de isolamento de um enrolamento depende da temperatura do enrolamento e do tempo decorrido desde a aplicação da tensão.

Por exemplo, quando a máquina acaba de ser parada e a temperatura de operação é da ordem de 90 °C - 100 °C a temperatura pode cair significativamente durante 10 minutos e isso pode afetar o IP. Para evitar os efeitos da temperatura na análise de tendência, testes subsequentes devem ser realizados quando o enrolamento está próximo da mesma temperatura do teste anterior. No entanto, se a temperatura do enrolamento não puder ser controlada durante o teste e de um para outro, é recomendado que todos os valores de teste de isolamento sejam corrigidos para uma temperatura de base comum de 40 °C usando a equação (1). Embora o valor corrigido seja uma aproximação, isto permite uma comparação mais significativa dos valores de resistência de isolamento obtidos a diferentes temperaturas.

A correção poderá ser feita utilizando a equação 1

$$R_c = K_T \cdot R_T$$

(1)

Onde:

R_c É a resistência de isolamento (em MegaOhms) corrigido para 40 °C;

K_T É o coeficiente de temperatura da resistência de isolamento para temperatura T °C;

R_T É a resistência de isolamento medido (em MegaOhms) para temperatura T °C.

Para as temperaturas de enrolamento abaixo do ponto de orvalho é difícil prever o efeito da condensação de umidade na superfície, portanto uma tentativa de corrigir a 40 °C para a análise de tendências introduziria um erro inaceitável. Em tais casos, recomenda-se que o histórico da máquina testada em condições semelhantes seja o fator predominante na determinação se a mesma está apta para o retorno ao serviço. No entanto, uma vez que a contaminação da umidade normalmente diminui a resistência de isolamento e/ou as leituras do índice de polarização é possível corrigir a 40 °C para comparação com os critérios de aceitação.

Não existem meios eficazes para converter a resistência de isolamento medida sob uma umidade específica para a resistência de isolamento que ocorreria a uma umidade diferente.

4.3.2 - Medição em Campo para Determinação do K_T

O método recomendado de obter dados para uma curva de resistência de isolamento versus curva de temperatura de enrolamento é fazendo medições a várias temperaturas de enrolamento, todas acima do ponto de orvalho, e plotando os resultados numa planilha com escala semi-logarítmica.

4.3.3 - K_T Aproximado

Os fatores de correção (K_T) são apresentados aqui para duas famílias diferentes de sistemas de isolamento rotulados, respectivamente, como "THERMOPLASTIC" e "THERMOSETTING". O "THERMOPLASTIC" aplica-se, por exemplo, para sistemas a base de asfalto e outros sistemas que estavam em uso antes do início da década de 1970. O "THERMOSETTING" aplica-se aos isolamentos mais novos que apareceram em torno de meados de 1970. Nestes incluem sistemas baseados em epóxi e poliéster. Ambos são apresentados na Figura 5 da IEEE 43:2013.

4.3.3.1 - Equação de K_T para Isolamento Termoplástico

Para a família dos Termoplásticos podemos ter K_T aproximado pela equação 3 da IEEE 43:2013

4.3.3.2 - Equação de K_T para Isolamento Termofixo

Para sistemas de isolamento Termofixo, a equação do fator de correção para temperaturas acima de 40 °C é diferente da abaixo de 40 °C, podendo ser obtidos pelas equações 4 e 5 da IEEE 43:2013

O gráfico apresentado na Figura 5 da IEEE 43:2013 foram gerados a partir das equações 3 e 4.

4.3.4 - Correção do Índice de Polarização

Quando o índice de polarização é usado com a resistência de isolamento para determinar a condição de isolamento, não é necessário fazer uma correção de temperatura para o IP. Quando a temperatura da máquina não se altera sensivelmente entre as leituras de 1 min e 10 min, o efeito da temperatura no índice de polarização é geralmente pequeno. Contudo, quando a temperatura inicial do enrolamento é elevada uma redução da temperatura do sistema de isolamento durante o tempo de ensaio pode resultar num aumento substancial da resistência de isolamento entre as leituras de 1 min e 10 min devido ao efeito da temperatura.

O índice de polarização resultante pode ser inusitadamente elevado, caso em que é recomendada a repetição da medição ou abaixo de 40 °C para verificação do IP. Como indicado em 3.2, se as medições de 1 min ou 10 min forem tomadas quando a temperatura do enrolamento estiver abaixo do ponto de orvalho, os efeitos da contaminação por umidade devem ser considerados durante a interpretação. Para determinados sistemas de isolamento, a umidade absorvida pode fazer com que o IP caia abaixo de 2 e aproximar-se do valor de 1.

4.4 Efeito da Magnitude da Tensão de Teste

As diretrizes para tensões de teste são apresentadas na tabela 1. O valor da resistência de isolamento pode diminuir um pouco com um aumento na tensão aplicada. No entanto, para o isolamento em boas condições e em estado completamente seco, substancialmente a mesma resistência de isolamento será obtida para qualquer tensão de teste até o valor de pico da tensão nominal.

Uma diminuição significativa na resistência de isolamento com um aumento na tensão aplicada pode ser uma indicação de problemas de isolamento. Estes problemas podem ser devidos as imperfeições ou fraturas do isolamento, agravadas pela presença de sujidade ou umidade, ou os problemas podem ser devidos aos efeitos de sujeira ou umidade sozinhos ou resultar de outros fenômenos de deterioração. A alteração na resistência é mais pronunciada em tensões consideravelmente acima da tensão nominal.

4.5 Efeito da Existência de Carga no Enrolamento na Medição da Resistência

As medidas de resistência de isolamento serão erradas se houver cargas residuais ou polarização não isolada no isolamento. Portanto, antes de medir a resistência de isolamento, os enrolamentos devem ser completamente descarregados. Medir a corrente de descarga no início do teste para ajudar a garantir que o enrolamento é completamente descarregado. Uma carga residual afetará a leitura da resistência de isolamento.

Após a conclusão ou término da aplicação de alta tensão contínua aterramento do enrolamentos é importante para a segurança, bem como para a precisão dos testes subsequentes. O tempo de aterramento deve ser no mínimo de quatro vezes o tempo de carga.

5.0 - CONDIÇÕES PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

Deve-se registar a temperatura ambiente, a umidade relativa, o ponto de orvalho, a temperatura do enrolamento, o tempo que a máquina está desligada ou fora de serviço, a tensão de teste e a conexão no momento em que o teste é executado. Também é importante converter a medição para uma base de 40 °C para futuras comparações.

Não é necessário que a máquina fique parada quando estiverem sendo feitos testes de resistência do isolamento do enrolamento do rotor do gerador. Muitas vezes é desejável fazer medições de resistência de isolamento quando o enrolamento está sujeito às forças centrífugas semelhantes às que ocorrem em serviço. Em certos casos, é prático efetuar medições periódicas de resistência de isolamento enquanto as máquinas estão em rotação em curto-circuito para secagem. Sempre que as máquinas não estejam paradas durante a medição da resistência de isolamento devem ser tomadas precauções para evitar danos ao equipamento e ferimentos ao pessoal.

Para obter medições de resistência de isolamento para um enrolamento diretamente resfriado a água, a água deve ser removida e o circuito interno completamente seco. Em alguns casos onde são utilizados enrolamentos resfriados a água, o fabricante do enrolamento pode ter proporcionado um meio de medir a resistência de isolamento sem necessidade de drenagem da água de resfriamento. Em geral, se a água não é removida então a condutividade da água deve ser menor que 0,25 µS/cm. Mais informações devem estar disponíveis no manual do fabricante do enrolamento.

6.0 - PRECAUÇÕES

Uma quantidade finita de tempo é necessária para trazer a tensão impressa no isolamento para o valor de teste desejado. A tensão de ensaio total deve ser aplicada o mais rapidamente possível e mantida constante durante todo o ensaio.

Os instrumentos de ensaio em que a tensão de ensaio é fornecida por geradores, baterias ou retificadores são normalmente utilizados para efetuar ensaios com duração superior a 1 min. É essencial que a tensão de qualquer fonte de teste seja constante para evitar flutuações na corrente de carga. Estabilização da tensão pode ser necessária.

Quando forem utilizados resistores de proteção em instrumentos de ensaio, deve ter-se em conta o seu efeito na magnitude da tensão aplicada ao isolamento em ensaio. A queda de tensão nas resistências pode ser uma percentagem apreciável da tensão do instrumento quando se mede uma resistência de isolamento baixa.

7.0 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO E ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO.

Os testes de resistência de isolamento e índice de polarização podem ser utilizados para pelo menos dois propósitos:

a) O histórico de ensaios de isolamento de uma determinada máquina, medido em condições uniformes no que diz respeito às variáveis controláveis, é reconhecido como uma forma útil de se verificar alguns aspectos da condição de isolamento ao longo dos anos.

b) A estimativa da adequação de uma máquina para a aplicação de ensaios de sobretensão apropriados ou para a operação pode ser baseada numa comparação de valores de IP e/ou RI_1 atuais e anteriores que irão suportar avaliações da condição de isolamento.

7.1 Monitoramento da Condição do Isolamento

Se o histórico de resistência de isolamento da máquina estiver disponível, a comparação do resultado do ensaio atual com testes anteriores pode subsidiar para esclarecer a condição de isolamento. No entanto, é importante comparar os ensaios em condições semelhantes, isto é, as temperaturas de enrolamento e a ambiente, a magnitude da tensão, a duração da tensão e a umidade relativa. Para comparação de ensaios realizados a diferentes temperaturas de enrolamento, os resultados devem ser corrigidos para a mesma temperatura.

Um declínio acentuado do RI_1 ou IP da leitura anterior pode indicar contaminação superficial, umidade, ou danos severos de isolamento, como fissuras ou rachaduras. Quando se obtém baixo IP e que ocorreu a uma temperatura elevada (acima de 60 °C), recomenda-se uma segunda medição abaixo de 40 °C, mas acima do ponto de orvalho, como uma verificação da condição real de isolamento.

Para os ensaios realizados em condições semelhantes, um aumento constante do IR_1 , isto é, uma diminuição da corrente de absorção com a idade pode indicar a decomposição dos materiais de ligação, especialmente quando os materiais de isolamento são do tipo termoplástico (mica-asfalto ou de goma-laca com mica-folium).

7.2 Adequação para Operação ou Teste Continuado

Quando o histórico de resistências de isolamento não estiver disponível, os valores mínimos recomendados para o IP ou RI_1 pode ser usado para estimar a adequação do enrolamento para aplicação de um teste de sobretensão ou para operação. Se o RI_1 ou IP estiver baixo devido à sujidade ou umidade excessiva, pode ser melhorado para um valor aceitável por limpeza e secagem (ver IEEE Std 56, IEEE Std 62.2 e IEEE Std 67). Quando se seca o isolamento o IP pode ser utilizado para indicar quando o processo de secagem pode ser terminado, isto é, os resultados do IP excederam o mínimo recomendado. Se o IR_1 estiver baixo devido a deterioração severa do isolamento ou danos, a operação e os testes de sobretensão da máquina não são recomendados.

As máquinas devem ter tanto o índice de polarização como a resistência de isolamento (a 40 °C) acima dos valores mínimos recomendados para operação ou teste de sobretensão adicional.

Se o valor RI_1 (a 40 °C) for superior a 5.000 M Ω , o IP pode ser impreciso e pode ser desconsiderado

Para enrolamento de estator isolado com pano envernizado, Shellac mica-folium ou asfalto, um PI muito alto (por exemplo, maior que 7) pode indicar que o isolamento está termicamente envelhecido e pode apresentar um alto risco de falha. Se a inspeção física (batendo no isolamento, por exemplo) confirmar que o isolamento é seco e frágil, é melhor não tentar a limpeza ou o teste de sobretensão do enrolamento. A falha pode ocorrer a qualquer momento se a máquina for colocada em operação.

7.3 Limitações do Teste de Resistência de Isolamento

Os dados do teste de resistência de isolamento são úteis para avaliar a presença de alguns problemas de isolamento, tais como contaminação, umidade absorvida ou fissuração severa, no entanto, existem algumas limitações e são as seguintes:

a) A resistência de isolamento de um enrolamento não está diretamente relacionada com a sua resistência dielétrica. A menos que o defeito esteja concentrado, é impossível especificar o valor de resistência de isolamento no qual o sistema de isolamento de um enrolamento falhará.

b) Enrolamentos tem uma área de superfície extremamente grande na cabeça de bobina, máquinas grandes ou baixa rotação, enrolamentos de campo do rotor bobinado ou máquinas com comutadores podem ter valores de resistência de isolamento menor do que o valor recomendado. Nestes casos, a tendência histórica do RI_1 é inestimável na avaliação da condição de isolamento.

c) Uma única medida de resistência de isolamento a uma tensão específica não indica se o material estranho (sujeira) está concentrada ou distribuída ao longo do enrolamento.

d) As medições de tensão em corrente contínua, como os testes RI e IP, podem não detectar vazios internos ao isolamento causados por impregnação inadequada, deterioração térmica ou ciclos térmicos em bobinas de estator de barra moldada.

e) Quando os testes de resistência de isolamento são conduzidos enquanto a máquina está parada, estes testes não detectarão problemas devido à rotação, tais como bobinas soltas ou vibração levando pelo movimento da cabeça e bobina.

8.0 - VALORES MINIMOS RECOMENDADOS DE RI E IP

8.1 Valores Mínimos

O IP mínimo recomendado e o valor mínimo recomendado de RI_1 de um enrolamento de máquina rotativa Vac ou Vdc são os valores mais baixos em que um enrolamento é recomendado para um teste de sobretensão ou para operação.

Em alguns casos o material isolante especial ou projetos podem fornecer valores mais baixos. Os valores mínimos destes projeto devem basear-se na comparação com os valores históricos dos ensaios.

8.2 Índice de Polarização - IP

Os valores mínimos recomendados de IP para máquinas rotativas de corrente alternada e contínua estão listados na tabela 2. A tabela 2 baseia-se na classe térmica dos materiais isolantes e, com exceção dos enrolamentos de campo não isolados (e sem pintura de acabamento), aplica-se a todos os materiais isolantes independentemente da aplicação

Classe Térmica	Valor Mínimo de IP
Classe 105 (A)	1,5
Classe 130 (B) e acima	2,0

Tabela 2 - Valores mínimos recomendados de IP para isolamento por classe térmica de componentes de máquinas

8.2.1 - Aplicabilidade do IP no Enrolamento de Campo

A finalidade típica dos testes de resistência de isolamento e de índice de polarização é determinar se um sistema de isolamento é adequado para o funcionamento ou quando de for realizar teste de sobretensão. Os enrolamentos da maioria dos rotores de máquinas de indução de gaiola de esquilo não são isolados do corpo do rotor; por conseguinte, um índice de polarização não pode ser realizada nestes enrolamentos do rotor. Do mesmo modo, um teste de índice de polarização não é aplicável a armaduras de corrente contínua que têm um comutador de cobre exposto que é por necessidade não envolto em isolamento. Se, no entanto, o enrolamento do rotor estiver envolvido em isolamento, como nos motores de indução de rotor bobinado e máquinas de pólos salientes com enrolamentos isolados com fitas ou material em forma de papel, é aplicável um teste de índice de polarização. Os enrolamentos de campo de muitos geradores muito grandes e motores de pólos salientes e geradores com enrolamentos com borda de ventilação são feitos com cobre exposto que não é bobina com isolamento total. Embora isolada da terra e outros componentes através de fitas isoladoras, a imensa área superficial do cobre não isolado (sem pintura de acabamento) não apresenta uma corrente de absorção (I_A), em comparação com a corrente de fuga (I_L), quando submetida a uma tensão dc. A ausência da corrente de absorção altera a curva característica RI de tal modo que haverá muito pouca alteração no valor RI da leitura de 1 min para 10 min. Portanto, o IP, que descreve a inclinação da curva RI, não é aplicável a enrolamentos de campo não isolados (sem pintura de acabamento) e armaduras de máquina de dc.

Por outro lado, muitos outros tipos de enrolamentos de campo não têm quantidades apreciáveis de condutores expostos. Esses projetos usam condutores que são totalmente envolvidos em isolamento (ou pintura e acabamento) e tem uma corrente de absorção característica (I_A). Para estas máquinas o IP pode ser um teste valioso para avaliar o estado do sistema de isolamento. O valor mínimo recomendado com base na classificação da classe térmica do isolamento do enrolamento de campo, deve ser usado como referência.

8.2.2 - Aplicabilidade do IP Quando RI_1 é Maior que 5.000 M Ω

Quando a leitura de resistência de isolamento obtida após a aplicação da tensão durante 1 min (RI_1) é superior a 5.000 M Ω , com base na magnitude da tensão aplicada, a corrente total medida (I_T) pode estar na ordem de submicroampere. Neste nível de sensibilidade do instrumento de teste necessário, pequenas variações na tensão de alimentação, na umidade ambiente, nas ligações de teste e noutros componentes não relacionados podem afetar grandemente a corrente total medida durante o intervalo de 1 min - 10 min requerido para obter o IP. Devido a estes fenômenos, quando o RI_1 é superior a 5.000 M Ω , o IP pode ou não ser uma indicação da condição de isolamento e, portanto, não é recomendado como um instrumento de avaliação.

8.2.3 - Efeito do Sistema de Alívio de Corona Contínua

Em alguns casos especificamente para enrolamentos de barra Roebel quando a cabeça de bobina do enrolamento é muito curta, a cabeça de bobina de enrolamento completa pode ser tratada com material de controle de alívio de tensão (corona). Se o material de controle de alívio de tensão tiver contato elétrico com o cobre nu nas extremidades das barras, a corrente de fuga superficial (I_L) pode ser muito maior do que a corrente de absorção (I_A). Neste caso, a corrente total (I_T) será aproximadamente constante com o tempo e o IP poderá estar próximo de 1. Assim, a presença do material de controle de alívio de tensão sobre todo a cabeça de bobina reduz a utilidade do teste de IP.

8.3 Resistência de Isolamento

A resistência mínima de isolamento após 1 min, $RI_{1 \text{ min}}$, para o teste de sobretensão ou o funcionamento de enrolamentos do estator da máquina ac e dc e enrolamentos do rotor podem ser determinados a partir da tabela 3. A resistência de isolamento do enrolamento real a ser utilizada para comparação com $RI_{1 \text{ min}}$ é a resistência de isolamento observada, corrigida a 40 °C, obtida aplicando uma tensão contínua constante a todo o enrolamento durante 1 minuto.

A resistência de isolamento de uma fase de um enrolamento de armadura trifásico testado com as outras duas fases aterradas poderia ser inferior a três vezes a de todo o enrolamento devido às contribuições fase a fase para a corrente total.

Valor mínimo de RI (M Ω)	Material sob teste
$RI_1 = kV + 1$	Para maioria dos enrolamentos fabricados antes de 1970, todos os enrolamentos e campo e outros não descritos abaixo
$RI_1 = 100$	Para a maioria dos enrolamentos fabricados depois de 1970, bobinas moldadas
$RI_1 = 5$	Para a maioria das máquinas com bobinas do estator fio redondo e bobinas moldadas com tensão nominal abaixo de 1 kV e armaduras dc.

Tabela 3 - Valores mínimos recomendados de RI a 40 °C, em M Ω

Nota 1 - $RI_{1 \text{ min}}$ é a resistência mínima de isolamento recomendada em megohms, a 40 °C de todo o enrolamento da máquina (todas as fases).

Nota 2 - kV é a tensão nominal rms de fase-fase para máquinas de corrente alternada trifásicas, tensão de fase a terra para máquinas monofásicas e tensão nominal contínua para máquinas de corrente contínua ou enrolamentos de campo.

Nota 3 - Pode não ser possível obter os valores mínimo $RI_{1\ min}$ acima para enrolamentos de estator com cabeça de bobina extremamente grandes áreas de superfície, ou para enrolamentos de armaduras com comutadores. Para tais enrolamentos, a tendência dos valores históricos de $RI_{1\ min}$ pode ser usada para ajudar a avaliar a condição de seu isolamento.

Nota 4 - Os valores da tabela 3 podem não ser aplicáveis em alguns casos, especificamente quando a cabeça de bobina de enrolamento completa é tratada com material de controle de alívio de tensão.

Nota 5 - Os valores na tabela acima não se aplicam as barras ou bobinas "verdes" antes do tratamento da impregnação global com vácuo e pressão.

9.0 - CONSIDERAÇÕES

9.1 Processo de retirada de umidade

Como a água ferve a cerca de 100 °C, não devemos secar o sistema de isolamento a temperaturas superior a 90 °C. Pois se tiver umidade no sistema de isolamento, podemos criar vazios com a pressão do vapor de água. Recomenda-se seguir o procedimento que está no anexo A2 da IEEE 043:1974.

9.2 Fonte do medidor de Resistência de Isolamento

Como maioria dos instrumentos modernos são operadas com fonte chaveada e que grande máquinas ou que tem muita sujeira ou umidade necessitam de grande correntes. Deste modo temos que tomar muito cuidado, pois normalmente as fontes chaveadas tem proteção de corrente, limitando o fornecimento da mesma. Assim, indicando valores falso de resistência, ou mesmo até bloqueando as medições.

9.3 Medidor de Resistência de Isolamento.

Quando for adquirir medidor, muita atenção se o mesmo já atende as recomendações da norma IEEE 043:2013. Principalmente se mede a corrente de descarga e também o perfil da resistência de isolamento - IRP.

9.4 Correção de RI para 40 °C.

Atentar para a correção adequada do RI, pois a cada versão da norma a equação mudou, Devemos adotar a recomendação da IEEE 043:2013.

9.5 Perfil da Resistência de Isolamento - IRP.

O anexo D da norma IEEE 043:2013 recomenda levantar o perfil do RI no tempos com intervalos de 5 segundos. Muito útil, pois podemos ter uma avaliação do comportamento do RI ao longo do tempo, podendo indicar problemas de sujeira ou umidade com mais precisão.

9.6 Medição do Ponto de Orvalho.

Como a umidade é muito crítica e poderá influenciar negativamente no resultado da medição do RI, sempre devemos medir a temperatura ambiente, da peça, umidade relativa do ambiente antes de cada ensaio e com isto calcular a umidade absoluta e o ponto de orvalho. O mesmo deve estar ligeiramente acima da temperatura da peça. Muita atenção ao fazer ensaio com a máquina esfriando ou no período da manhã (geralmente a peça esta mais fria que o ambiente).

9.7 Pintura de Acabamento.

Porque se pinta o enrolamento? Existe várias razões, mas atualmente recomenda-se não pintar os enrolamentos, principalmente polos de rotores. Geralmente pode trazer mais prejuízo do que benefícios.

10.0 - CONCLUSÕES

Como podemos verificar nas versões das normas IEEE 043 de 1974, 2000 e 2013, existe um delay muito grande entre a tecnologia de material e o entendimento e atualização das normas. O que é mais triste, é que mesmo depois da norma publicada, a comunidade técnica o desconhece ou não aplicam as recomendações. Para dificultar ainda, muitos instrumentos de ensaios também não atendem as normas. Logo, devemos tomar muito cuidado na aquisição de instrumento de ensaio.

A maioria dos profissionais ainda trabalham com base na norma IEEE 043:1974, que é baseada em sistema de isolamento termoplástico. Portanto temos um longo caminho a seguir para atender a norma na versão de 2013.

O Ensaio de medição de RI e IP é o mais simples de todos, mas verificamos que mesmo este ensaio a comunidade técnica tem enorme dificuldade de entender e fazer a correta aplicação.

Entendemos que o treinamento e aquisição de conhecimento é o caminho mais curto para que este tema seja superado com brevidade nas empresas.

11.0 - REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Std 43:1974 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [2] IEEE Std 43:2000 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [3] IEEE Std 43:2013 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [4] IEC 60085 - Electrical Insulation - Thermal Evaluations and Designations

- [5] IEEE Std 56 - Guide for Insulations Maintenance of Large AC Rotating Machinery (10 MVA and Larger)
- [6] IEEE Std 62.2 - Guide for Diagnostics Field Testing of Electric Power Apparatus - Electrical Machinery
- [7] NEMA MG-1 - Motors and Generators
- [8] Greg C. Stone and others "Electrical Insulations for Rotating Machines" - Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair
- [9] EASA "Root Cause Failure Analysis" Version 502CI-2002,
- [10] Instrução de Manutenção - RI em enrolamento resfriado a água - IM.LA.215 - R07, Itaipu Binacional.

12.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Nome: Takao Paulo Hara

Local e ano de nascimento: Nova Esperança - Pr, em 28.05.1955

Local e ano de graduação: Porto Alegre - RS, em 1979

Pos graduação:

Engenharia de Manutenção Elétrica de Usinas Hidrelétricas – CEMAN – H1 da Eletrobrás;

Pós-graduação em Materiais para Equipamento Elétrico do Sistema Elétrico de Potência na UFPR;

Pós-graduação em Finanças Empresariais na ISAE/FGV;

Extensão em Direito da Energia Elétrica na Universidade Candido Mendes

Trabalhou na Copel - Companhia Paranaense de Energia desde setembro de 1.980 na área de geração de energia até março de 2.010. Com cerca de 30 anos de experiência relacionadas a sistemas de gestão e engenharia de operação e manutenção de usinas hidro e termoelétricas tanto no Brasil como no exterior, abrangendo o ciclo completo dos sistemas de operação e manutenção, incluindo comissionamento, planejamento, gerenciamento da operação e manutenção, indicadores de desempenho, fundiário e meio ambiente, estudos de viabilidade técnica-econômica, custos, cronogramas, projetos detalhados, licitações, avaliação. Participou ativamente na reformulação do sistema elétrico na elaboração dos Procedimentos de Rede, bem como nas Resoluções da Aneel. Desenvolveu várias pesquisas na área de materiais e técnicas de reparos de máquinas elétricas rotativas. Tem algumas dezenas de trabalhos publicados em congresso e seminário nacional e no exterior.

Foi coordenador do GTMU do GCOI na gestão 96/97e 98/99. Representou a Copel em Comitês Técnicos de entidades, tais como Cigré, Abrage, Abraman, Bracier e Cier, MTE (NR 10). Atualmente é diretor técnico da Hara Engenharia, representante da Abraman – Regional Sul e instrutor do curso de manutenção de máquinas elétricas rotativas.



Nome: Guilherme Takao Hara

Local e ano de nascimento: Curitiba - Pr, em 26.08.1991

Local e ano de graduação: Curitiba - RS, acadêmico de engenharia elétrica na UTFPR