*Por Ricardo Botelho, Hirofumi Takayanagi e João Henrique Zancanella**

Capítulo XII

Aplicação da metodologia para motores elétricos

Tabela 1 – Análise de modos de falha para motores elétricos

Item	Equipamento	Função	Função Significante	Falhas funcionais	Local da Falha/Defeito	Mecanismo de Degradação	Defeito	
1	Motor Elétrico	Realizar acionamento de cargas de produção e facilidades	Sim	1) Motor não parte sob demanda; 2) Motor não para sob demanda; 3) Baixo torque na partida; 4) Corrente alta em vazio; 5) Corrente alta em carga; 6) Sobreaquecimento do motor; 7) Aquecimento dos mancais; 8) Motor com baixa isolação; 9) Motor em curto-circuito; 10) Vibração excessiva; 11) Alto nível de ruído.	Rolamento	Desgaste por vida útil Desgaste por desalinhamento/ falha de montagem Desgaste por deficiência de lubrificação	Vibração Aquecimento	
2					Caixa de ligação	Baixo isolamento (Excesso de umidade ou poeira) Mau contato	Curto-circuito Aquecimento Curto-circuito	
3					Estator	Baixo isolamento (Excesso de umidade ou poeira)	Curto-circuito para massa Curto-circuito entre fases	
						Sobrecarga	Degradação prematura do isolamento devido ao sobreaquecimento Curto-circuito entre espiras	
4					Rotor	Rompimento de barras	Ruído Elevação da corrente Redução da capacidade de carga	
5					Carcaça	Corrosão	Perda do grau IP Diminuição da capacidade de troca térmica	
6					Aterramento	Corrosão Afrouxamento	Choque elétrico	
7					Acoplamento	Desgaste por desalinhamento/ falha de montagem	Vibração Aquecimento	
8					Ventilador	Ventilador quebrado Ventilador empenado	Aquecimento	
9					Influências externas	Não aplicável	Não aplicável	
10					Resistência de aquecimento	Queima	Baixa temperatura ambiente (quando desligado) Condensação (Umidade)	

Definição da periodicidade da manutenção preventiva

Esse capítulo apresenta a aplicação da metodologia descrita ao longo dos capítulos deste fascículo para a classe de equipamento "motor elétrico".

Etapa 1

A Tabela 1 corresponde à análise dos modos de falha para um motor elétrico de indução, realizada através da FMEA proposta no capítulo anterior, considerando a taxa de falha por local da falha/defeito obtida por meio do banco de dados Oreda.

Com base nos modos de falha identificados, é proposta a árvore de falhas apresentada na Figura 1. O local de falha "resistência de aquecimento" não foi considerado nesta análise por não possuir dados de falhas disponíveis no banco de dados do Oreda.

Tabela 1 – Análise de modos de falha para motores elétricos

Taxa de Falha (x 10^{-6} h)	*Método de Detecção*	*Tarefa*	*Frequência*	*Tipo*
8,25	Inspeção auditiva Medição de vibração Medição temperatura	Observar a existência de ruídos estranhos	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Rota Operacional
		Medição e análise de vibração e temperatura no mancal	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preditiva
		Realizar lubrificação do rolamento	Conforme recomendação do fabricante	Preventiva
3,60	Inspeção visual	Verificar/corrigir estado das conexões	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preventiva
		Realizar limpeza da caixa de ligação		
		Verificar/corrigir estado de pintura, corrosão e anel de vedação		
		Reapertar conexões da caixa de ligação		
0,36	Medição de isolamento	Medir isolação para massa. Calcular IP.	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preventiva
	Medição de isolamento	Medir isolação entre fases. Calcular IP.	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preventiva
	Método de MCA	Realizar análise de MCA	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preditiva
	Descargas parciais	Realizar análise dos dados de descargas parciais	Continuamente, sob demanda	Preditiva
	Medição da resistência ôhmica	Medir resistência ôhmica das bobinas	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preventiva
	Método de MCA	Realizar análise de MCA	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preditiva
1,08	Inspeção auditiva Medição de vibração Medição temperatura	Observar a existência de ruídos estranhos	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Rota Operacional
		Medição e análise de vibração e temperatura	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preditiva
	Método de MCA	Realizar análise de MCA	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preditiva
2,52	Inspeção visual	Verificar pontos de corrosão e acúmulo de poeira na carcaça. Limpar se necessário.	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Rota Operacional
2,51	Inspeção visual	Inspecionar continuidade e fixação do cabo de aterramento	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Rota Operacional
		Verificar/corrigir estado das conexões	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preventiva
1,08	Inspeção auditiva Medição de vibração Medição temperatura	Observar a existência de ruídos estranhos	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Rota Operacional
		Medição e análise de vibração e temperatura no mancal	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preditiva
3,23	Inspeção visual	Verificar funcionamento do ventilador e obstrução nas entradas e saídas de ar	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Rota Operacional
6,10	Inspeção visual	Observar a existência de pontos sujeitos a intempéries (prensa-cabos, bujões, etc.)	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Rota Operacional
N/D	Medição da resistência ôhmica	Medir valor da resistência ôhmica da resistência de aquecimento	Definido conforme criticidade e taxa de falha	Preventiva

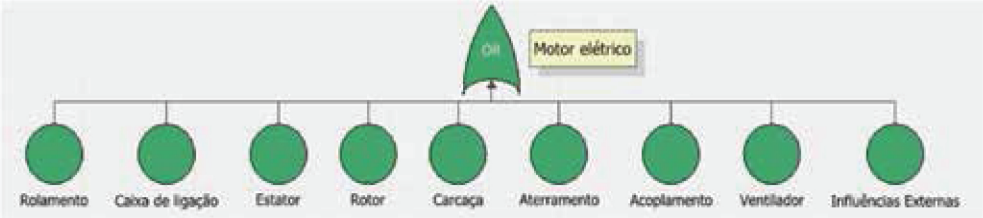

Figura 1 – Árvore de falhas para motor elétrico.

Etapa 2

A tabela a seguir apresenta os principais dados de confiabilidade de cada local da falha apresentado na Tabela 1.

TABELA 2 – RESUMO POR LOCAL DA FALHA/DEFEITO – MOTOR ELÉTRICO

Posição	*Local da Falha/Defeito*	*Taxa de Falha ($x\ 10^{-6}h$)*	*MTTF (meses)*	*Intervalo para manutenção (meses)*		
				Altíssima	*Alta*	*Média*
1	Rolamento	8,25	166,04	8,52	17,03	25,55
2	Caixa de ligação	3,60	380,52	19,52	39,04	58,55
3	Estator	0,36	3805,18	30*	60*	90*
4	Rotor	1,08	1268,39	30*	60*	90*
5	Resistência de aquecimento	-	-	30*	60*	90*
6	Carcaça	2,52	543,60	27,88	55,77	83,65
7	Aterramento	2,51	545,76	27,99	55,99	83,98
8	Acoplamento	1,08	1268,39	30*	60*	90*
9	Ventilador	3,23	424,11	21,75	43,51	65,26
10	Influências externas	6,10	224,57	11,52	23,04	34,56

***De acordo a periodicidade máxima definida.**

Etapa 3

Com base nos estudos de confiabilidade realizados na etapa 2, é possível definir a estratégia de manutenção adequada a ser aplicada para a classe de equipamentos "motores elétricos", priorizando a filosofia de operações integradas preconizada por este trabalho.

Os rolamentos do motor são os elementos que apresentam o maior índice de falhas, sendo estas provenientes de diversas causas, como desalinhamento mecânico de seu eixo, montagem incorreta do próprio rolamento, lubrificação insuficiente ou excessiva, sobrecarga mecânica, entre outras.

Um fator crítico para vida útil de um rolamento refere-se à lubrificação, tipicamente realizada com óleo ou graxa. Estudos indicam que 30% das falhas em rolamentos são relacionadas à lubrificação deficiente. Os rolamentos do tipo blindado já são projetados com a quantidade necessária de lubrificante para todo o período de vida útil do rolamento, não sendo necessárias relubrificações. Contudo, a maioria dos rolamentos não é blindada, devendo ser realizada a relubrificação conforme intervalos definidos pelo fabricante. A quantidade de lubrificante também deve ser adequada à recomendação do fabricante, pois tanto a falta quanto o excesso de lubrificação podem ser causas de falhas nos rolamentos.

Pela forma construtiva do rolamento, as falhas nesta peça podem ser consideradas distribuídas ou localizadas. A primeira determina uma falha que afeta toda uma região do rolamento, sendo esta característica típica das falhas de desgaste do anel externo ou do anel interno, ambas em suas respectivas pistas de rolagem.

O segundo tipo de classificação, conhecido como falha localizada, afeta um único ponto do rolamento. Este tipo de falha pode estar presente na pista externa ou interna, além de ocorrer nas gaiolas ou esferas. Estas falhas são pontos incipientes, como rachaduras, ranhuras ou deterioração pontual.

Algumas características de defeito no rolamento podem ser identificadas em uma inspeção visual ou observação do elemento em funcionamento. É o caso dos ruídos que se tornam audíveis e constantes; das temperaturas que podem se elevar acima do normal e também das vibrações excessivas e oscilatórias.

As técnicas mais tradicionais para identificação da condição dos rolamentos são a análise de vibração e temperatura. A análise de vibração baseia-se na inserção de vários sensores de vibração em pontos específicos no entorno do motor e de seus acoplamentos, podendo ser um conjunto de sensores fixos instalados no equipamento ou sensores utilizados para coletas pontuais de vibração em intervalos de tempo pré-determinados. Estes sensores medem a vibração mecânica de todo o conjunto. Uma vez adquiridos os sinais, estes são avaliados pela análise e identificação em janelas de frequências das falhas e amplitude de cada uma.

Já para a análise de temperatura, são necessários equipamentos específicos como sensores de temperatura ou ainda termovisores

que permitam monitorar e verificar as variações de temperaturas de trabalho e a transposição de limites em pontos específicos do motor ou peças, como tampa traseira, dianteira e acoplamentos.

A estratégia de manutenção proposta para bloquear os modos de falha no componente rolamento é:

- Realizar a lubrificação do rolamento conforme recomendações e intervalos definido pelo fabricante;
- Adotar a manutenção preditiva, realizando o monitoramento e substituição do rolamento com base na condição, acompanhada através das técnicas de análise de vibração e temperatura.

Com base na filosofia de Operações Integradas, a análise dos dados de vibração e temperatura deve ser realizada por uma equipe especializada, que deve configurar valores de alerta e de limite para vibração e temperatura de cada equipamento. Os dados que são coletados online não necessitam de nenhuma interferência da equipe de operação, visto que estão disponíveis para análise a qualquer momento por parte da equipe especializada.

A coleta de vibração e temperatura também pode ser realizada de forma offline, ou seja, é necessário que um profissional realize a coleta dos dados manualmente através de sensores portáteis. Este trabalho propõe que a coleta dos dados seja realizada pela equipe de operadores da instalação através de aparelhos portáteis, conjuntamente com outras tarefas pertinentes à manutenção de primeira linha.

O mercado oferece coletores portáteis de vibração e temperatura que podem ser empregados nessa atividade. A Figura 2 apresenta um modelo de coletor portátil que pode ser acoplado ao motor elétrico para coleta de dados. Este coletor transmite os dados coletados via Bluetooth para um PDA, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 2 – Coletor portátil de vibração e temperatura.

Figura 3 – Transmissão via bluetooth dos dados coletados de vibração e temperatura.

Posteriormente, todos os dados coletados no PDA são transferidos para o banco de dados da aplicação e podem ser acessados e tratados por uma equipe especialista localizada em qualquer ambiente, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Transmissão dos dados entre o PDA e o banco de dados.

No caso de detecção de qualquer anormalidade nos dados coletados e analisados, deve ser emitida uma ordem de manutenção para intervenção no rolamento, a fim de reestabelecer sua condição adequada em uma faixa satisfatória da curva P-F, antes da ocorrência de uma falha funcional. A mesma abordagem pode ser aplicada para o componente "acoplamento", que possui uma taxa de falhas muito menor que o rolamento.

A segunda maior causa de falhas, influência externa, é afetada por condições climáticas, objetos estranhos, influência de sistemas vizinhos, produtos químicos no ambiente, entre outros. O bloqueio desse modo de falha se dá, principalmente, através da especificação correta do equipamento de acordo com o ambiente onde o mesmo será instalado, tais como o material da carcaça e o grau IP adequado. Verificações de rotina auxiliam na manutenção das características técnicas originais do equipamento, visto que a degradação de determinados componentes, tais como prensa-cabos, pode acarretar no ingresso de água no interior do equipamento, levando a falha devido à baixa isolação por conta da umidade.

A terceira maior causa de falhas ocorre no componente "caixa de ligação", sendo que os modos de falha são bloqueados basicamente por atividades de manutenção preventiva. Em relação às atividades, as mesmas estão relacionadas basicamente ao reaperto das conexões na caixa de ligação e às atividades de preservação da caixa de ligação, a fim de evitar degradação por processo de corrosão.

Em relação ao componente "ventilador", as atividades se constituem basicamente por tarefas pertencentes à rotina de verificação. Assim como a causa de falha "Influências externas", as atividades relacionadas são de baixa complexidade e rápida execução, podendo ser agrupadas juntamente com a rota para coleta dos dados de vibração e temperatura.

Por fim, dois componentes muito importantes para o funcionamento do motor elétrico possuem uma baixa taxa de falhas: o estator e o rotor. Contudo, falhas nesses componentes possuem

alto custo de reparo, especialmente em motores de maior potência.

As falhas elétricas nesses componentes estão relacionadas aos enrolamentos abertos ou em curto, barras quebradas ou anéis de curto circuito danificados. Já para as falhas de origem mecânica, tem-se a excentricidade do rotor deslocado do seu centro magnético, rolamento defeituoso, bem como eixo do rotor torto ou desalinhamento dos acoplamentos mecânicos.

As bobinas do estator estão sujeitas a diversas anomalias e estas, por sua vez, ocasionam variadas respostas do equipamento. As alterações no estator podem se manifestar de diversas maneiras, entre as quais, podem ser citados o aquecimento excessivo do motor, a sobrecarga elétrica e a falha no isolamento da bobina. Geralmente, as alterações são avaliadas com a realização de testes de isolamento do estator com a carcaça da máquina, bem como testes de isolamento entre fases.

Os principais testes elétricos a serem aplicados são:

- Medição de resistência: a medição da resistência utiliza uma baixa tensão DC (tensão contínua) e uma ponte de Wheatstone ou Kelvin. O principal propósito é detectar conexões com alta resistência (malfeitas), conexões abertas e curtos-circuitos que apresentem grande variação de resistência elétrica;
- Resistência de isolamento: consiste na aplicação de uma tensão DC entre os condutores do motor e a terra, resultando em uma corrente de fuga que atravessa o isolamento. Este valor é convertido em resistência usando equipamentos chamados Megôhmetros. Como neste teste os dipolos do isolamento são excitados apenas em DC, é necessário algum tempo para que eles se polarizem. As normas normalmente indicam um tempo de carga de um minuto. A resistência de isolamento é diretamente afetada pela temperatura e umidade;
- Índice de Polarização (IP): é executado para medir quantitativamente a habilidade do isolamento em se polarizar. Quando um isolante se polariza, os dipolos elétricos distribuídos no isolante se alinham com o campo elétrico aplicado. Como as moléculas se polarizam, uma corrente de polarização (também chamada de corrente de absorção), é desenvolvida e adicionada à corrente de fuga. O índice de polarização geralmente é efetuado na mesma tensão do teste de resistência de isolamento e leva 10 minutos para ser completado. O valor IP é calculado dividindo-se o valor da resistência de isolamento obtido em dez minutos pelo valor da resistência de isolamento obtido em 1 minuto. Em geral, isolamentos em boas condições apresentarão altos valores IP, enquanto baixos valores IP representarão isolamentos danificados ou comprometidos. Em alguns casos, deve-se tomar algum cuidado com testes de motores com novos e modernos materiais de isolamento que não polarizam e que apresentarão, portanto, baixa corrente de polarização e consequente baixo valor IP. Nota-se que

nesse caso, apesar do IP ser baixo, o isolamento pode perfeitamente estar adequado, conforme é discutido na norma IEEE 43.

Para motores, cuja criticidade for classificada como "alta" ou "altíssima", recomenda-se ainda a aplicação da técnica conhecida comercialmente como "Análise de Circuito de Motores (MCA)". Os aparelhos modernos que executam o método de análise do circuito do motor utilizam uma baixa tensão de saída senoidal para excitar os dipolos do sistema de isolamento. A partir da coleta de resistência, impedância, indutância, ângulo de fase, resposta I/F e resistência de isolamento, com o motor elétrico desenergizado e bloqueado, esta técnica de manutenção preditiva permite o diagnóstico de falhas no estator (contaminação ou sobreaquecimento, curto-circuito entre espiras, entre bobinas de mesma fase e entre bobinas de fases diferentes e curto-circuito de fase para terra) e no rotor (barras quebradas ou trincadas, excentricidade estática e porosidade).

Também é recomendável a aplicação da técnica preditiva de descargas parciais para motores de grande porte e classificados com uma criticidade "Alta" ou "Altíssima". Trata-se de um ensaio não destrutivo cuja finalidade é medir o nível de descargas parciais em um determinado equipamento em uma dada tensão, onde existem diversos tipos de isolamentos envolvidos (sólido, líquido e gasoso) e que permite a detecção de eventuais danos ao motor com ele energizado, podendo suas variáveis serem acompanhadas e analisadas por uma equipe especializada (inclusive por empresas através de contratos, conforme preconiza a geração G2 da filosofia das Operações Integradas). De maneira geral, o nível de descarga parcial medido deve estar abaixo de um valor prefixado por norma ou especificação do equipamento ensaiado.

O fenômeno das descargas parciais ocorre em cavidades ou inclusões de constante dielétrica diferente do material que a rodeia. Quando este material é submetido a um campo elétrico, este se distribui pelo material, submetendo a cavidade ou inclusão a um gradiente de tensão superior ao gradiente máximo suportável pela mesma. Este fenômeno dará origem a pequenas descargas disruptivas no interior da cavidade, acarretando um processo temporal de deterioração progressivo do material e eventualmente a falha do equipamento. Logo, é importante a detecção das descargas parciais em equipamentos como controle de qualidade não destrutivo.

A aquisição dos dados pode ocorrer continuamente ou periodicamente, a depender da estratégia e dos equipamentos aplicados. A Figura 5 apresenta um equipamento comercial que permite o monitoramento contínuo das descargas parciais de uma máquina.

A Figura 6 ilustra um esquema de ligação utilizado no monitoramento de descargas parciais.

Em relação ao rotor, a quebra de barras pode ser provocada por vibração, desalinhamento e excentricidade. A carga excessiva

Figura 5 – Equipamento para medição contínua de descargas parciais.

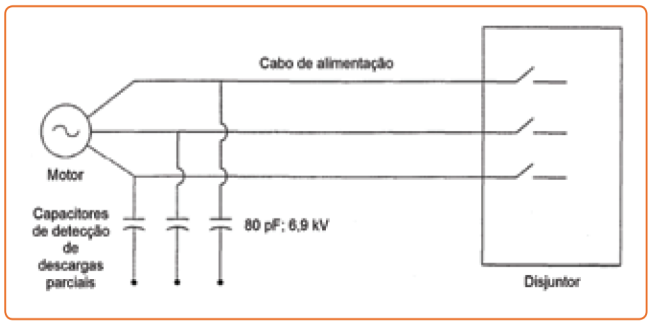

Figura 6 – Esquema de ligação.

no eixo também é capaz de provocar a ruptura ou trinca, além de fatores como temperaturas que podem ser consequências dos outros problemas ou mesmo desgaste dos mancais do motor.

No momento em que o circuito apresenta uma barra quebrada, há uma disfunção característica do sistema, uma vez que o rotor não está mais respondendo à excitação de maneira uniforme. Esta variação eletromagnética, que é criada devido a alguns pontos sem indução no rotor, pode causar níveis significativos de vibrações da máquina.

As atividades e ensaios apresentados anteriormente são suficientes para prevenção e, em casos mais extremos, identificação de problemas relativos a barras quebradas no rotor. Adicionalmente, alguns modelos comerciais de relés de proteção disponibilizam informações sobre o espectro de frequência das correntes e tensões do estator para suporte na detecção de barras rompidas no rotor.

Conclusão

Este fascículo apresentou o desenvolvimento de uma metodologia para definição da estratégia de manutenção de equipamentos elétricos baseada na filosofia de Operações Integradas e da manutenção centrada na confiabilidade.

A metodologia proposta pode ser aplicada a diversas classes de equipamentos elétricos, semelhante à classe "motor elétrico", demonstrada neste capítulo.

Referências bibliográficas

• *Baccarini, L. M. R. "Detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução". Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.*

• *Bellini, A.; Filippetti, F.; Tassoni, C.; Capolino, G. A. Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, 2008.*

• *Blodt, M.; Granjon, P.; Raison, B.; Rostaing, G. Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. In: "IEEE International Symposium on Industrial Electronics", 2004.*

• *Brito, J. N. "Desenvolvimento de um sistema inteligente híbrido para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos". Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, 2002.*

• *Gongora, W. S. "Uma abordagem neural no diagnóstico de falhas em rolamentos de indução trifásicos". Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2013.*

• *Herraty, T. "Preventive maintenance bearing fruits". IEEE Manufacturing Engineer, v. 68, 1989.*

• *Herbert, W. "Rolling element bearing basics in large electric motors". In: "IEEE Conference Record of 2011 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC)", 2011.*

• *IEEE 43. "Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery", 2013.*

• *Kowalski, C. T.; Orlowska-Kowalska, T. "Neural networks application for induction motor faults diagnosis". Mathematics and Computers in Simulation, v. 63, 2003.*

• *OREDA – Offshore Reliability Data Handbook. Sintef, 5ª Edição. Oslo, Noruega, 2009.*

• *Penrose, H.W.; Jette, J. "Static motor circuit analysis: an introduction to theory and application". IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 16, 2000.*

• *Pereira, M. A. M. "Estudo de métodos de detecção de curto-circuito entre espiras em estatores de motores de indução trifásicos de baixa tensão". Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.*

• *Queiroz, A. R. S. Estratégia de manutenção de equipamentos elétricos em unidades offshore de produção de petróleo e gás baseada na filosofia de operações integradas. Tese (Doutorado em Ciências – Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, 2016.*

• *Samanta, B.; Al-Balushi, K. R. "Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features". Mechanical Systems and Signal Processing, v. 17, 2003.*

• *Tao, B.; Zhu, L.; Ding, H.; Xiong, Y. "An alternative time-domain index for condition monitoring of rolling element bearings - a comparison study". Reliability Engineering & System Safety, v. 92, 2007.*

• *Tetrault, S.; Stone, G.C.; Sedding, H.G. Monitoring partial discharges on 4 kV motor windings. In: "IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference", 1997.*

**RINALDO JUNIOR BOTELHO é matemático, engenheiro eletricista e sócio fundador da Fastweld. Atua há 30 anos no segmento de materiais para aterramento. É membro da CE 03:102 – Comissão de Estudos de "Segurança em Aterramento Elétrico de Subestações C.A.", que faz parte do Comitê Brasileiro de Eletricidade CB-03 do Cobei.*

HIROFUMI TAKAYANAGI é engenheiro eletricista, trabalhou vários anos na distribuidora EDP Bandeirante do grupo EDP Brasil, é consultor na empresa Transformadores União e diretor da empresa JMV Consult. É também membro da CE-03:102 – Comissão de estudos "Segurança em Aterramento elétrico de Subestações C.A." do CB-03/Cobei.

JOÃO HENRIQUE ZANCANELLA atua há mais de 30 anos no ramo elétrico na parte de geração, transmissão e distribuição de energia. É superintendente de marketing e vendas da Intelli Industria de Terminais Elétricos Ltda. e membro e coordenador da CE-03:102 – Comissão de estudos "Segurança em Aterramento elétrico de Subestações C.A.". do CB-03/Cobei.

FIM

Acesse este e outros artigos do fascículo sobre "Manutenção de equipamentos elétricos" em www.osetoreletrico.com.br