

# A MANUTENÇÃO PREDITIVA DE MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES COMO FERRAMENTA DE GESTÃO ESTRATÉGICA<sup>1</sup>

Willye Bonfá de Lima<sup>2</sup>  
Eduardo Prini Rampazzo<sup>2</sup>

## Resumo

Esse trabalho visa fornecer informações essenciais sobre técnicas de manutenção preditiva em máquinas elétricas girantes, contextualizar a aplicação dessas técnicas como ferramentas de gestão estratégica e de manutenção industrial e apresentar estudos de casos de aplicação dessa técnica em máquinas da CST Arcelor Brasil. A CST Arcelor Brasil utiliza ferramentas de manutenção preditiva na gestão de suas máquinas elétricas girantes para otimizar o uso de recursos como a manutenção / substituição / sobressalentes, reduzir impactos no processo e aprimorar a gestão de manutenção. A ferramenta de manutenção preditiva destacada neste trabalho é a diagnose elétrica do estator das máquinas. Consistindo de ensaios elétricos periódicos para identificar a condição de parâmetros de controle do estator, a diagnose gerou resultados que confirmaram sua eficácia para definir estratégias de manutenção para as máquinas elétricas de grande porte, permitindo a identificação de riscos potenciais de médio prazo, o que ajudou a definir as ações de manutenção de curto ou médio prazos para o controle dos problemas incipientes, antes que afetassem o processo produtivo inesperadamente. Com isso, nos últimos anos foi possível realizar a troca de motores de grande porte ou fazer manutenções preventivas em motores e geradores que apresentavam indícios de efetiva degradação na sua confiabilidade. Conseqüentemente, impactos de indisponibilidade e custos associados foram minimizados. A elaboração de estratégias de médio prazo é atualmente desenvolvida com base nos diagnósticos.

**Palavras-chave:** Diagnose elétrica; Máquinas elétricas; Manutenção preditiva.

## ROTARY ELECTRICAL MACHINES PREDICTIVE MAINTENANCE AS A STRATEGY MANAGEMENT TOOL

### Abstract

This presentation provides information about the predictive maintenance techniques in rotary electrical machines, shows these techniques as a strategic management tool and presents real case studies related to these techniques used at CST-Arcelor Brasil machineries. CST-Arcelor Brasil uses predictive maintenance tools in the management of the rotary electrical machines to optimize the resource use, such as maintenance / substitutions / spare parts, in order to reduce their impact on the process and to improve the maintenance management. The tool that is explored is the stator diagnosis of electrical machines, which uses electrical tests to identify the stator condition. The diagnoses have been generating results that confirm their reliability to determine maintenance strategies, allowing to identify medium term risks, that help to define maintenance actions to handle problems before they affect the productive process. With this, in the last few years it has been possible to exchange machines or to provide preventive maintenance in equipments that presented evidences of its reliability degradation. Therefore the unavailability of equipments and the corrective maintenance cost were minimized. The medium-term strategies elaboration is nowadays carried-out based on the machines diagnosis.

**Key words:** Electrical diagnosis; Rotary electrical machines; Predictive maintenance.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Especialista de Manutenção Eletro-Eletrônica – CST-Arcelor Brasil*

## 1 INTRODUÇÃO

No mundo atual, as grandes empresas atuam em cenários extremamente competitivos, onde as conquistas de mercado são gradativas e as margens de lucro por unidade produzida são menores que outrora. Nesse cenário, um fator crítico de diferenciação para as empresas é a minimização de seus custos de produção. Como se sabe, esses custos se dividem em custos variáveis, proporcionais ao quanto se fabrica, e custos fixos, que independem da quantidade produzida. Conclui-se que se maximizarmos a produção de modo a diluirmos o custo fixo, o custo por tonelada (no caso de uma empresa produtora de aço) acaba se reduzindo. Internamente à empresa, uma forma de se conseguir esse ganho é reduzindo o tempo ocioso das unidades produtivas, pois mesmo estando paradas, elas consomem imposto territorial, encargos financeiros, mão-de-obra própria para cuidar do patrimônio e outros. Dois meios para se maximizar esse tempo produtivo do ponto de vista de manutenção de controle de processo são:

- Reduzir os tempos de paradas de manutenção por meio de aprimoramentos do planejamento e uso de novas técnicas e/ou tecnologias que acelerem as atividades de manutenção sem perda de qualidade e confiabilidade;
- Reduzir (se possível, eliminar) as paradas de produção devido a acidentes materiais (quebra de peças, queima de motores etc).

Destacando esse segundo item, temos hoje em dia a filosofia da Manutenção Centrada em Confiabilidade. Podemos resumi-la na idéia de que, se um determinado equipamento ou planta apresenta todas as condições para ser considerado confiável até a próxima inspeção, não há motivo para que tenhamos que trocá-lo antes disso. A diagnose de motores e geradores elétricos está em sintonia com essa visão, pois ela consiste de testes específicos que permitem predizer se um equipamento se aproxima ou não de sofrer uma falha ou mesmo de seu fim de vida útil. No gráfico estatístico de número de falhas x tempo operacional (“curva-de-banheira”), esse fim de vida útil é caracterizado pela parte ascendente em que as chances de falha do equipamento se elevam até alcançarem níveis inaceitáveis.

As principais causas de falha em motores e geradores são, segundo estudos da IEEE, falhas em rolamentos e/ou mancais (37% do total - há diversas metodologias de mecânica preditiva que não são foco desse trabalho) e falhas no bobinado do estator (33% do total - cuja metodologia de diagnóstico é abordada nesse trabalho).<sup>[1]</sup>

A CST-Arcelor Brasil, ciente da importância que o diagnóstico representa para sua competitividade, desde 2002 utiliza essa diagnose de isolamento dos seus motores mais importantes, o que vem lhe permitindo monitorar sua confiabilidade, uma vez que várias máquinas estão com mais de 20 anos de operação. No longo prazo, esse diagnóstico fornece uma grande previsibilidade em seus planos estratégicos de prolongamento de vida útil e reforma de plantas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

É sabido que os motores, especialmente os de média e alta tensão, sofrem desgastes em seu isolamento em decorrência de alguns fatores bem específicos. Os principais são:

- Despolimerização do isolamento em função de temperaturas elevadas, levando ao surgimento de espaços vazios internos ao dielétrico, entre o

isolamento e o núcleo de ferro ou entre o isolamento e o condutor de cobre, que desencadeiam o processo de descargas parciais ao longo dos anos de operação;

- Stress mecânico devido à dilatação e compressão do isolamento ao longo do tempo com as diversas partidas e paradas, podendo levar a trincas no isolamento que potencializam o efeito das descargas parciais, além de serem possíveis pontos de fuga a terra no isolamento;
- Degradação externa da pintura semicondutiva e do isolamento por efeitos corona causados pela deposição de contaminantes (umidade, pó, óleos) nas cabeças de bobina e dentro das ranhuras. Isso leva ao aquecimento por efeito joule nos pontos de maior intensidade do fenômeno e à desagregação mais acentuada do isolamento nessas áreas;
- Abrasão do isolamento por partículas contaminantes, o que pode acelerar o efeito corona externo ao isolamento.

Esses fenômenos, quando não identificados ou monitorados, levam ao rompimento dielétrico inadvertido do isolamento do estator, gerando um caminho de corrente do estator para terra, caracterizando a “queima” do motor. Em uma planta estratégica onde um motor de grande porte sem sobressalente venha a queimar seu estator, isso pode significar uma perda equivalente a várias vezes o valor do motor, o que justificaria a princípio ter um motor reserva. Por outro lado, sabe-se bem que nenhum negócio é competitivo no cenário macroeconômico atual mantendo-se uma “segunda fábrica” estocada, à espera que algum elemento da primeira falhe. Ou seja, não se justifica manter em ativo imobilizado por longo prazo um motor de grande porte que custe centenas de milhares de dólares sem gerar resultados. O ponto de equilíbrio, então, consiste em monitorar as variáveis que, cientificamente, informarão precisamente quando o motor se aproximará do seu fim de vida útil. Uma vez diagnosticado o processo de ruína do isolamento, a empresa planeja a aquisição de um novo ou o reparo total do original sem comprometer seu plano estratégico.

Os principais testes elétricos existentes são divididos em dois grupos: os testes do tipo “aprova/reprova”, e os testes preditivos. Em uma análise sistêmica da saúde do motor, ambos são válidos e relevantes, se analisados em conjunto e à luz dos fatos do histórico operacional do motor analisado.

## **2.1 Testes Elétricos**

A diagnose das máquinas rotativas se baseia no resultado de diversos testes elétricos realizados com a máquina parada, bem como no comparativo de diagnoses anteriores e de máquinas similares espalhadas ao redor de todo o mundo. O comparativo é feito por um sistema computacional especialmente desenvolvido para isso pela empresa que presta o serviço de diagnóstico. Um ciclo completo de testes para diagnose dura cerca de 10 horas, e são descritos a seguir.

### **2.1.1 Resistência de isolamento (IA) e Índice de polarização (IP) <sup>[2]</sup>**

O ensaio de resistência de isolamento é feito através da aplicação de um degrau de tensão CC (corrente contínua) e posterior medição da resistência obtida, utilizando um medidor de resistência de isolamento (Megger). O valor da resistência de isolamento é pedido após 30 segundos e novamente após 60 segundos da aplicação da tensão, pois após este tempo é considerado que a corrente que permanece circulando é devido aos mecanismos de condução inerentes ao isolamento (não há isolante perfeito da mesma forma que não há condutor perfeito).

O índice de absorção consiste da razão entre a resistência de isolamento medida aos 30 segundos e a medida aos 60 segundos. O índice de polarização é obtido pela razão entre a resistência de isolamento medida em 60 segundos e a medida aos 600 segundos. Este índice mostra a variação da corrente de carregamento no tempo.

A análise destes índices pode indicar a existência de problemas como: presença de contaminação, dano na isolação do enrolamento, defeito na cura da resina e o estado da umidade presente na isolação, especialmente em motores mais antigos de isolamento classe B.

### 2.1.2 Absorção DC [2]

Neste teste é aplicada uma tensão CC por 17 minutos para carregar o isolamento da máquina, sendo que durante este período a corrente de carregamento é medida. Após este período, o isolamento é descarregado através de uma resistência, sendo observada a corrente de descarga durante esse processo.

A curva de descarga obtida é resultado de três processos de descargas simultâneos (Figura 1): polarização de cargas espaciais (espaço entre o enrolamento e o núcleo do estator) dentro das ranhuras, polarização interfacial (entre dois diferentes materiais como isolação e óleo contaminante) dentro das ranhuras e polarização interfacial nas cabeças de bobina.

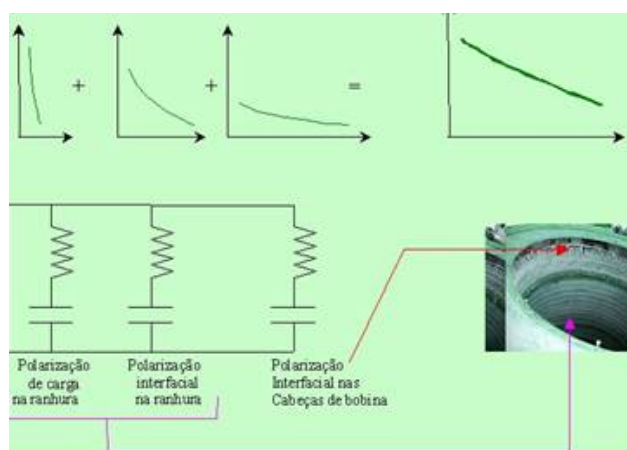


Figura 1 – Efeito de descarga da absorção DC [2]

A análise deste teste fornece informações sobre a superfície da isolação:

- Fator de envelhecimento (AF): indicação do estado da resina próximo aos condutores.
- Índice de concentração de íons (CI): indica a concentração de íons nos enrolamentos, sendo que quanto maior esta concentração, maior a chance de ocorrer acúmulo de cargas no isolamento (contaminação e/ou envelhecimento).
- Razão de dispersão: pode indicar a presença de contaminantes dispersivos no isolamento, falta de contato da bobina com o núcleo dentro das ranhuras e/ou envelhecimento avançado do isolamento.
- Razão  $I_c/I_r$ : pode indicar a presença de contaminantes condutivos.

### 2.1.3 Análise não linear de corrente<sup>[2]</sup>

Este teste é realizado aplicando-se uma tensão AC (corrente alternada) no isolamento e medindo-se a corrente neste sistema. Esta corrente é submetida a uma análise de harmônicas, cujas componentes e comportamento espectral (Figura 2) permite diagnosticar se há presença de atividade iônica nas ranhuras, presença de contaminantes, ocorrência de descargas parciais e/ou envelhecimento do isolamento.

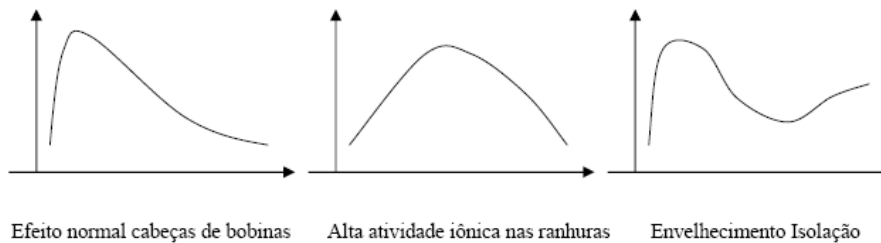


Figura 2 – Curvas características da análise não linear <sup>[2]</sup>

### 2.1.4 Teste de capacitância e tangente delta<sup>[2]</sup>

Os testes de tangente delta e capacitância são realizados através da aplicação de uma tensão AC e o gradual aumento até o valor da tensão entre fase e terra da máquina para identificar a elevação no valor da Tg Delta ao longo do teste. Diferentemente dos testes CC, este teste mostra a condição interna do isolamento, indicando a intensidade das descargas parciais no isolamento.

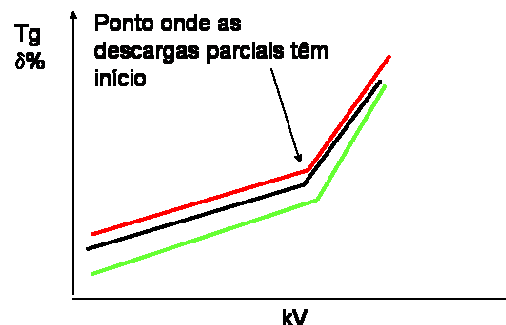


Figura 3 – Perfil característico do teste de tangente delta

### 2.1.5 Descargas parciais<sup>[3]</sup>

O teste consiste da aplicação de uma tensão AC em valores acima do patamar onde ocorre o aparecimento de descargas parciais como indicado pelos testes de tangente delta e capacitância (caracteristicamente, acima de 2 kV). A partir deste ponto a intensidade e o padrão de comportamento das descargas parciais é registrado. A análise destes resultados permite identificar a natureza das descargas, a localização onde ocorre tal fenômeno bem como estimar o nível de dano causado ao isolamento.

As descargas parciais podem ocorrer nas seguintes condições:

- Dentro do isolamento, como resultado de bolhas gasosas deixadas pela cura incompleta da resina.
- Dentro da ranhura quando o contato é perdido entre a superfície de condução entre a bobina e o núcleo.
- Na cabeça de bobina devido à contaminação superficial.
- Na região onde o enrolamento sai da ranhura

## 2.2 Filosofia de Manutenção na CST

Os motores e geradores da Utilidades estão, ainda em sua maioria, operando há 23 anos – desde o start-up da usina – e encontram-se caminhando para seu fim de vida útil, considerando-se a expectativa estatística para motores de 3,3 kV e superiores. Para monitorar com mais precisão sua vida útil e possibilitar otimizar investimentos, além de evitar paradas emergenciais de plantas produtivas, a diagnose de motores e geradores representa uma ferramenta de manutenção preditiva estratégica no contexto da manutenção de controle de processos da área de Utilidades.

Atualmente as diagnoses ocorrem num ciclo que procura acompanhar as paradas programadas para manutenção, respeitando-se um intervalo de 2 a 3 anos entre cada diagnose, a menos que alguma condição especial exija um intervalo de tempo menor. Assim, a gestão desse plano é flexível, mas estritamente condicionada aos resultados obtidos nos testes.

As máquinas inseridas no ciclo de diagnoses na área de Utilidades variam entre 1,3MW e 68MW, com tensões em nível de 3,3kV e 13,8kV. Seguem os principais dados relativo as diagnoses na área de Utilidades da CST-Arcelor Brasil:

- Máquinas inseridas no plano de diagnose: 20
- Máquinas inseridas no plano de diagnose em nível de 3,3kV - 10
- Máquinas inseridas no plano de diagnose em nível de 13,8kV - 10
- Total de diagnoses realizadas entre 2002 e 2006: 32

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Estudo de Caso do MC-1200 e MC-2200 (Ambos em 10MW, 13,2kV e Início de Operação em 1982)

Em 2002 foi realizado ensaio de diagnose no motor de 10MW (MC-2200), onde os resultados indicaram que a isolação do estator estava em estado crítico com vida útil prevista de 2 anos, indicando alta probabilidade de falha da máquina conforme mostrado na Tabela 1. Os resultados da diagnose apontavam presença contaminantes e alto índice de folga das bobinas/cunhas.

O motor em questão alimenta o ar de entrada de uma das plantas de fracionamento de ar da CST-Arcelor Brasil, portanto qualquer defeito nesta máquina faria a planta nº2 parar de produzir oxigênio e nitrogênio. A planta de fracionamento de ar nº1 possui um motor de alimentação, MC-1200, idêntico ao MC-2200, com mesmas características, idade e condições de funcionamento.

Tabela 1 - Resultados da diagnose do MC-2200.<sup>[4]</sup>

Item	Ano	2002
Contaminação		Amarelo
Falta contato c/ núcleo		Vermelho
Despolimerização resina		Verde
Descargas ranhura		Vermelho
Desc superf (final ranhura)		Vermelho
Descargas superfície		Vermelho
Espaços de ar / vazios		Vermelho

Com base nisso e na situação estratégica de então na empresa, decidiu-se adquirir um novo motor a ser colocado no lugar do MC-1200 e após a substituição, o motor antigo foi rebobinado e instalado substituindo o motor MC-2200 original. Isto eliminou o impacto de uma eventual parada emergencial de qualquer das duas plantas para reforma emergencial dos motores, fazendo com que as plantas apenas permanecessem paradas durante o período de troca dos motores.

### 3.2 Estudo de Caso do MC-1400 (1,9MW, 3,3kV, Início de Operação: 1982)

Este motor aciona um compressor de que distribui o nitrogênio produzido nas plantas de fracionamento de ar para diversos consumidores dentro da CST.

As diagnoses realizadas neste equipamento em 2002 e 2004 não apontavam para problemas significativos no motor, entretanto a diagnose julho/2006 (Figura 4) revelou que o motor estava em uma condição crítica de contaminação por particulado carbonizado (condutivo) e óleo, ameaçando sua confiabilidade operacional. Como condições críticas apontadas pelo resultado da diagnose encontravam-se:

- Contaminação por particulado carbonizado;
- Contaminação penetrando no isolamento;
- Envelhecimento do isolamento (acelerado pela contaminação);
- Atividade iônica dentro da ranhura (por causa da contaminação).

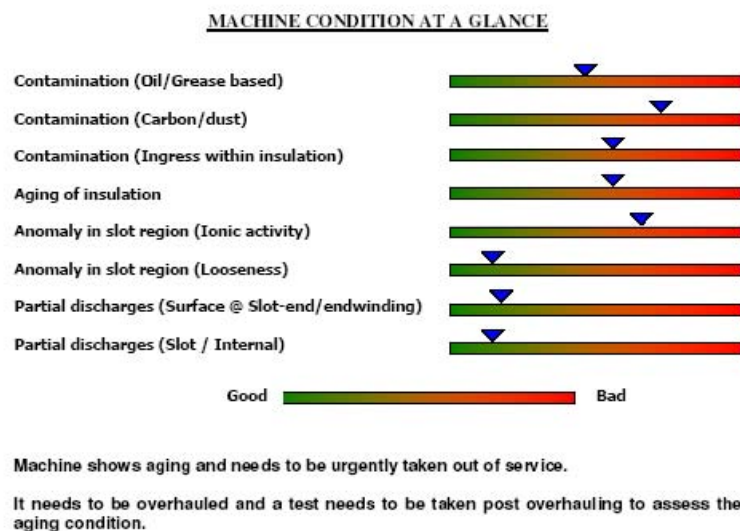


Figura 4 – Resultados da diagnose do MC-1400.<sup>[5]</sup>

A contaminação verificada na última diagnose foi atribuída predominantemente à contaminação por óleo causado por provável vazamento em labirinto de mancal, portanto foi programada uma parada da máquina em 18/Set/2006 para revisar o motor com limpeza do estator e rotor, reimpregnar com resina e eliminar a fonte do vazamento de óleo. A manutenção realizada indicou que havia realmente presença de óleo nas cabeças de bobina, confirmando o diagnóstico realizado.

### 3.3 Estudo de Caso do MC-1200 (10MW, 13,2kV, Início de Operação: 2004)

O novo motor MC-1200 foi novamente diagnosticado em novembro 2006, após sua partida em 2004. Os resultados da diagnose (Figura 5) indicaram algumas condições críticas:

- Contaminação por óleo, particulado carbonizado;
- Contaminação penetrando no isolamento;
- Atividade iônica dentro da ranhura (por causa da contaminação);
- Descargas parciais de cabeça de bobina e dentro de ranhuras.

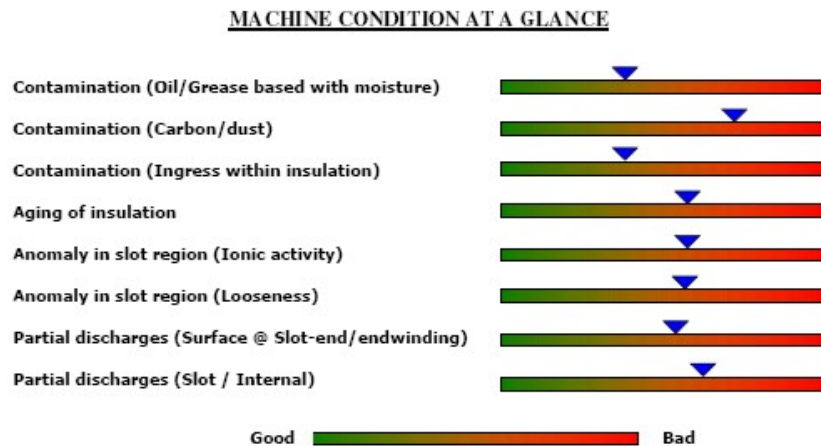


Figura 5 – Resultados da diagnose da MC-1200<sup>[6]</sup>

A análise da diagnose diagnosticou a presença de descargas parciais nas cabeças de bobina e contaminação condutiva com óleo, indicando a necessidade de efetuar limpeza do estator com jato de CO<sub>2</sub> e verificar a condição de folga dos mancais, para evitar a entrada de vapor de óleo para dentro do motor.

Ao ser emitido o laudo da diagnose, a planta se encontrava em parada prolongada em função de outros problemas. Desta forma foi rapidamente mobilizada equipe para realizar limpeza. Após a inspeção visual, identificou-se existência de vazamento de óleo, por labirinto interno danificado do mancal lado acoplado e pontos de efeito corona superficial, havendo a necessidade de recuperar o alívio de tensão em várias cabeças de bobina.

O labirinto foi substituído e os pontos de corona nas cabeças de bobina foram recuperadas na região de saída de ranhura com aplicação de tinta semicondutiva.

## 4 CONCLUSÃO

As técnicas utilizadas nos ensaios, embora não consistindo de nenhum grande segredo, fornecem informações que, após processamento e análise, geram um diagnóstico confiável da condição do isolamento da máquina. O uso da gestão das máquinas de grande porte por meio da diagnose possibilitou, desde 2002, a gestão mais eficaz dessas grandes máquinas, permitindo identificar problemas que poderiam reduzir a vida útil das mesmas e trazer prejuízos vultosos à empresa. Dessa forma, a diagnose torna mais eficaz o gerenciamento desse parque industrial em grande parte com mais de 20 anos operacionais. Isso ocorre exatamente no momento em que a empresa aumenta sua capacidade de produção e precisa da máxima confiabilidade dos seus geradores elétricos e compressores de gases criogênicos, que são grande parte das máquinas atualmente monitoradas.



## **Agradecimentos**

A equipe de elaboração agradece ao corpo gerencial da CST-Arcelor Brasil que incentivou e apoiou o desenvolvimento desse trabalho técnico, à equipe de manutenção de controle de processos da Utilidades da CST-Arcelor Brasil que presta valioso apoio técnico durante a consecução das atividades de campo, e à Comissão Organizadora do 62º Congresso Anual da ABM, que acolheu a apresentação desse Trabalho Técnico em seu importante evento.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 Lima, Willye B., Aplicabilidade da diagnose do isolamento de motores e geradores elétricos na garantia da confiabilidade e estabilidade de plantas produtivas, Vitória, 2002.
- 2 ABB, Pacote de testes de diagnóstico para máquinas elétricas rotativas. São Paulo, 2002
- 3 PAOLETTI, Gabe P.E., et al. Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Equipment. In: 1999 TAPPI Conference. Claremont, NH, USA, 1999.
- 4 ABB, Relatório de Diagnóstico MC-2200, Companhia Siderúrgica de Tubarão, 2002.
- 5 ABB, Relatório de Diagnóstico MC-1400, Companhia Siderúrgica de Tubarão, 2006.
- 6 ABB, Relatório de Diagnóstico MC-1200, Companhia Siderúrgica de Tubarão, 2006.