

# DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES TRIFÁSICOS COM TECNOLOGIA MCM NA ARCELOR-MITTAL INÓX BRASIL<sup>1</sup>

*Ideraldo Aparecido de Castro Pereira<sup>2</sup>  
José Ferreira da Silva Neto<sup>3</sup>  
Igor Barros Mairinck<sup>4</sup>  
Ari Magno Vieira<sup>4</sup>  
Kilder Neves<sup>5</sup>*

## **Resumo**

O método de Detecção de Falhas em motores elétricos trifásicos, com tecnologia MCM (Motor Condition Monitor), baseia-se no o conceito de modelamento matemático, para diagnosticar com antecedência as degradações progressivas de natureza elétrica ou mecânica do sistema monitorado. As variações ocorridas no sistema, seja proveniente do processo ou por degradação, são perceptíveis quando analisadas no domínio da frequência. A detecção de falha progressiva é realizada comparando os sinais de tensões e correntes medidos no processo com os registros do modelo matemático. A eficiência do equipamento foi avaliada utilizando o motor do exaustor de gás da regeneração de ácido. Este trabalho teve como suporte os testes de avaliação realizada pela Gerência de Área de Engenharia de Manutenção (PICE) e a Gerência de Área de Manutenção de Utilidades (PEUM) da ARCELOR-MITTAL Inóx Brasil.

**Palavras-chave:** Detecção de falhas; Análise preditiva; Tecnologia MCM.

## **DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES TRIFÁSICOS COM TECNOLOGIA MCM NA ARCELOR-MITTAL INÓX BRASIL**

### **Abstract**

The method of detection of faults in three-phase electric motors, powered by MCM (Motor Condition Monitor), based on the concept of mathematical modeling to diagnose in advance the progressive deterioration of electrical or mechanical nature of the system monitored. The changes in the system, either from the process or degradation, are apparent when analyzed in the frequency domain. The detection of progressive failure is performed by comparing the signs of voltages and currents measured in the records of the mathematical model. The efficiency of the equipment was evaluated using the motor of the exhaust gas of the regeneration of acid. This work had the support of evaluation tests conducted by Management Area Engineering Maintenance (PICE) and Management Area of Maintenance of Utilities (PEUM) Arcelor Mittal Inox Brasil.

**Key words:** Detection of failures; Predictive analysis; MCM technology.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Novos Negócios (Kron Instrumento Elétricos Ltda)*

<sup>3</sup> *Engenharia de Aplicação (Kron Instrumento Elétricos Ltda)*

<sup>4</sup> *Gestão de Manutenção de Utilidades –PICE - (Arcelor-Mittal Inóx Brasil)*

<sup>5</sup> *Gestão de Engenharia Manutenção - PEUM - (Arcelor-Mittal Inóx Brasil)*

## **1 INTRODUÇÃO**

Grandes investimentos são canalizados na pesquisa e desenvolvimento de ferramentas destinadas a manterem sistemas e processos operando sem interrupções, isto é: evitar paradas não programadas. Os departamentos de engenharia de manutenção das grandes corporações têm como compromisso a busca incessante de novas tecnologias para o auxílio na detecção antecipada de falhas, possibilitando assim, melhor desempenho na gestão da manutenção. Motores elétricos e conjuntos associados têm demandado grande atenção na gestão de manutenção utilizando ferramentas de análise preditiva, como suportar para manter os sistemas operando. As ferramentas disponíveis, atualmente, são eficientes, porém, obstáculos como: restrições de aplicação, dificuldades de instalação, escassez de profissional especializado, impossibilidade de análise com o processo operando, ambientes agressivos, custo elevado para abranger número maior motores e etc, impedem a expansão destas ferramentas preditivas na indústria. A proposta da tecnologia MCM, contida no Detector de Falhas e Analisador Preditivo PA, desenvolvido e produzido pela Kron Medidores, propõe conciliar: facilidade de instalação, simplicidade de operação, fácil identificação dos alarmes, monitoramento contínuo (on-line), aplicabilidade a motores e máquinas elétricas de baixa e média tensão, não invasivo, atrativa relação custo x benefício, monitoramento remoto, possibilita a flexibilidade da equipe de manutenção e não expõe o profissional ao contato direto com o processo. Diante deste cenário, Engenharia de Manutenção (PICE) e a Área de Manutenção de Utilidades (PEUM) da ARCELOR-MITTAL Inox Brasil, dedicaram 8 meses de trabalho investigativo para avaliarem o desempenho desta nova ferramenta. A tecnologia MCM foi desenvolvida na década de 80, destinado a industrial Aeroespacial.

## **2 IMPORTÂNCIA DO PROCESSO NA INDUSTRIALIZAÇÃO DO PRODUTO FINAL ONDE O EQUIPAMENTO FOI AVALIADO**

O trabalho foi realizado na torre de regeneração de ácidos do Recozimento e Decapagem do Aço Elétrico (RB2). Em Fevereiro de 2008, juntamente com a Gerência de Manutenção de Utilidades (PEUM), decidiu-se aplicar o monitoramento em caráter experimental no motor do ventilador da regeneração de ácidos da linha do silício. Este processo de decapagem química tem como objetivo preparar o aço elétrico (aço silício) para a linha de laminação à frio tendo a função de receber, estocar e regenerar ácido clorídrico saturado (HCl), utilizado no processo de decapagem química contínua dos aços siliciosos. Trata-se de um equipamento de fundamental importância para a empresa, tendo em vista o controle ambiental e redução de custo no processo de acabamento dos aços, por tornar o banho químico reaproveitável diversas vezes. O exaustor de Gases do Forno tem a capacidade de 13.000 Nm<sup>3</sup>/h.

### **2.1 Importância do Motor Monitorado para o Processo**

O motor escolhido para ser monitorado é o motor do exaustor de gás da regeneração de ácido. Trata-se de um motor de corrente alternada, de 125 (cv) de potência, tensão de 440 (V), corrente elétrica 140 (A), rotação de 3.500 (RPM) e 2 pólos. Este é um equipamento crítico do processo e responsável por realizar a exaustão do vapor gerado no processo de regeneração do ácido HCl.



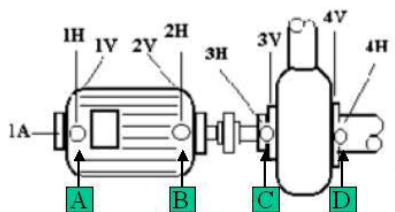
**Figura 1.** Motor do exaustor de Gases do Forno monitorado.

## 2.2 Consequências de uma Parada Não Programada

A conjuntura atual do mercado mundial favorece a produção dos aços elétricos devido às particularidades das demandas. Sendo assim, qualquer parada neste sistema produtivo é mais impactante que em outras áreas da companhia. Verifica-se que qualquer problema neste motor causa parada geral na planta do RB2, podendo gerar degradação ao meio ambiente, resultante de maior emissão de particulados para a atmosfera, e propicia condição insegura de operação dos queimadores; devido ao desgaste dos equipamentos provocado pelo produto gerado pela planta e também pelo tempo de existência da instalação.

## 2.3 Precauções para Evitar uma Parada Não Programada (Cuidados com o Motor e Conjunto Associados)

Existem planos de manutenção programados (inspeções) que monitoram as condições gerais de vibração do conjunto e periodicamente é realizada a troca ou raspagem das paletas do ventilador pois as mesmas ficam impregnadas pelo óxido resultante do processo químico envolvido. Nestas inspeções, quando é detectado algum indício de anormalidade, é acionada a equipe da engenharia de manutenção para uma investigação mais aprofundada. Para este equipamento, não existem sensores específicos para diagnóstico de início de falha nem sistema supervisorio. A área apresenta risco de contato com o ácido HCl e exposição ao agente "ruído" excessivo. Os planos de manutenção existentes cobrem uma monitoração com periodicidade de 30 dias. As atividades de manutenção preditiva abrangem a medição do sinal de vibração (aceleração e velocidade) nos pontos (A, B, C e D) nos sentidos (Horizontal, Vertical e Axial), conforme evidenciado na Figura 2.



*Figura - pontos de medição*

**Figura 2.** Ilustração dos pontos monitorados por acelerômetros.

## 2.4 Benefícios da Tecnologia MCM (*Motor Condition Monitor*)

Evitar paradas não programadas.

Aumentar a eficiência da planta.

Reduzir os custos de manutenção

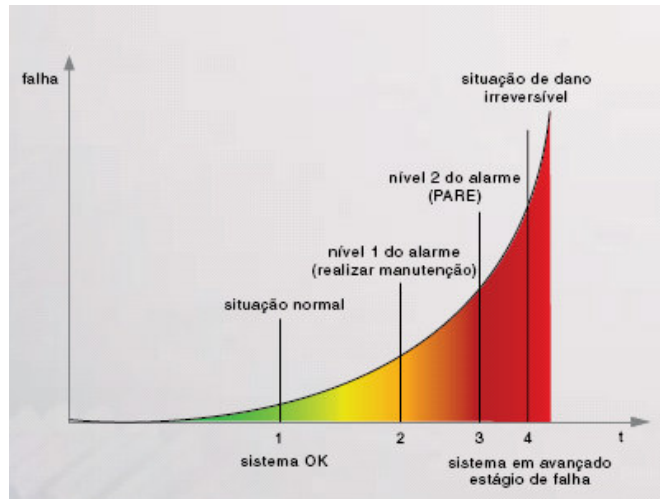
Melhorar o controle sobre o processo, monitorando e intervindo no momento certo, através da utilização de técnicas modernas.



Figura 3. Painel de comando do motor onde o PA foi instalado.

## 2.5 Princípio de Funcionamento

O método MCM (*Motor Condition Monitor*) é uma tecnologia que usa o modelamento matemático para o diagnóstico de deterioração progressiva em sistemas que utilizam motores de indução, permitindo a detecção precoce de falhas mecânicas e elétricas, evitando paradas inesperadas do processo. O método é eficiente, pois se baseia na correlação entre tensão e corrente e, com isso, permite monitorar tanto o funcionamento mecânico quanto o elétrico do sistema analisado. O modelo matemático consiste de um conjunto de equações diferenciais representantes das propriedades eletromecânicas do sistema, é construído durante a fase de aprendizado do instrumento. Durante essa fase, as coletas de sinais de tensão e corrente são continuamente medidas e processadas utilizando algoritmos de identificação que determinam os parâmetros do modelo, sob uma larga gama de estados de operação. Assim, o modelo matemático construído representará o comportamento da aplicação, abrangendo as diversas situações do dia-a-dia de operação. Toda mudança de condição, tanto no motor quanto em componentes associados, causa alteração no sinal de corrente. Portanto, alterações de comportamento de natureza mecânica ou elétrica são refletidas nos sinais elétricos e, conseqüentemente, levadas em consideração na análise feita pelos instrumentos. Ao identificar mudanças significativas que se mantenham durante um determinado período, o instrumento determina em que situação a aplicação se encontra (normal ou com presença de falha). Essa abordagem permite uma maior confiabilidade à análise – com controle preciso e sem alarmes falsos. Se houver alguma condição de trabalho não identificada durante a fase de aprendizado é possível agregá-la ao modelo, tornando-a parte da análise.

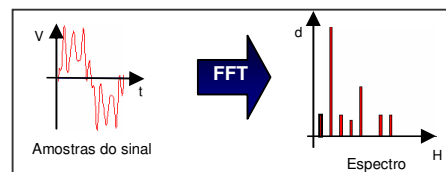


**Figura 4.** Gráfico de evolução de falhas progressivas no tempo.<sup>(1)</sup>

A medição é feita por sensores comuns (TCs – transformadores de corrente), muitas vezes já presentes na aplicação a ser monitorada. A partir desta tecnologia foi desenvolvido um instrumento denominado “Analisador Preditivo para Motores Elétricos Trifásicos [PA-01], que opera baseado na criação de um modelo matemático do sistema. A detecção de falhas mecânicas é possível pelo fato de que variações (mudança de condição ou falha) em um sistema com motores (seja ela mecânica ou elétrica) se reproduzem no espectro dos sinais elétricos (tensão e corrente). As variações ocorridas em componentes (engrenagens e redutores, por exemplo) também se reproduzem na corrente do motor.

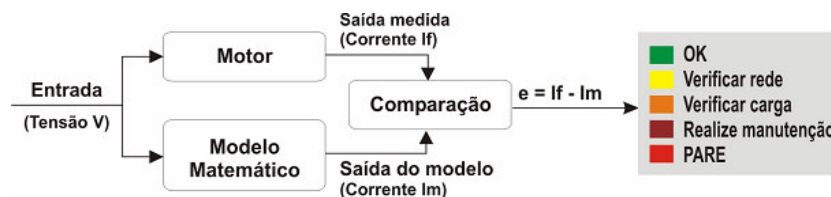


**Figura 5.** Sistema baseado em motor elétrico.<sup>(1)</sup>



**Figura 6.** Modelamento Matemático.<sup>(1)</sup>

O monitoramento consiste em comparar o sinal coletado do processo com modelamento matemático criado.



**Figura 7.** Esquema operacional do equipamento PA.<sup>(1)</sup>

O PA sinalizará se o sistema está operando corretamente ou se está ocorrendo o início de um processo de degradação.

## **2.6 Estágios do Modelamento Matemático**

A criação do modelo matemático é feita por meio de aquisições e processamento dos sinais de tensão e corrente elétrica no domínio da frequência.

### *Etapa 1: CHECK*

Nesta etapa o equipamento checa os sinais de tensão e corrente (se estão no nível adequado e se não existe variação rápida dos sinais). Duração aproximada: de 30s até três minutos.

### *Etapa 2: LEARN (aprendizado)*

O equipamento inicia a aquisição dos sinais de tensão e corrente, de modo a criar o modelo matemático. Esta etapa envolve 4000 aquisições sendo que o tempo médio entre aquisições é de 1 minuto (este tempo pode variar de acordo com a amplitude do sinal e a variação do mesmo). O processo não precisa rodar continuamente para o aprendizado, porém, quando o motor estiver parado o equipamento não irá processar sinais. Desta forma, o tempo de aprendizado é variável, porém para um processo contínuo, seria por volta de dois a três dias.

### *Etapa 3: IMPROVE*

Após a formulação do modelo matemático, o analisador inicia a etapa de otimização, com mais 8000 aquisições de sinal. Da mesma forma que no aprendizado, o tempo pode variar, porém para um processo contínuo esta etapa é estimada de quatro a seis dias. Nesta etapa já é feito o monitoramento.

### *Etapa 4: MONITOR*

Após aprender (LEARN) e otimizar (IMPROVE), o PA inicia o monitoramento contínuo do processo. O monitoramento é baseado na comparação entre os sinais aprendidos e os sinais medidos, gerando-se um status (estado do sistema).

### *Etapa 5: UPDATE*

Caso após o modelo matemático ser construído (LEARN) e otimizado (IMPROVE) e havendo uma mudança de processo detectada pelo PA (alarme) e que seja considerada uma situação normal de trabalho (exemplo: o motor trabalhava a 70% de carga no período LEARN + IMPROVE e passou a trabalhar com 90%), deve-se realizar um UPDATE (atualização). Enquanto o analisador estiver realizando o UPDATE, o monitoramento não será realizado. A indicação de alarme é realizada por meio de um LED vermelho no frontal do instrumento. Havendo retorno a condição normal de operação, o LED permanecerá aceso até ser reconhecido.

## **2.7 Monitoramentos do Motor (*status*)**

O monitoramento do motor indica se o sistema está operando em sua condição normal (isto é, com uma variação aceitável em relação ao modelo aprendido) ou se existe uma falha. O quadro 1 mostra os estados possíveis de serem indicados pelo instrumento e seu significado:

**Quadro 1.** Interpretação dos alarmes<sup>(1)</sup>

Cor	Estado do sistema	Possíveis causas
	<b>NO DATA</b> Sem dados do sistema	O equipamento ainda não criou o modelamento matemático (está na etapa CHECK ou LEARN)
	<b>MOTOR OK</b> O sistema está OK.	Os parâmetros medidos estão dentro de uma variação tolerável.
	<b>WATCH LINE</b> Verificar rede	Detectada mudança relacionada à alimentação do motor. <b>Possíveis causas:</b> distorção harmônica, tensão desbalanceada, problema de isolamento dos cabos, mau contato nos terminais, defeito no contator.
	<b>WATCH LOAD</b> Verificar carga	Detectada mudança relacionada à carga. <b>Possíveis causas:</b> vazamentos causando perda de pressão, desajuste da válvula e aleta, falha no manômetro, filtros ficando sujos (ventilador, compressor), mudança de condição do processo (nesta situação, caso a mudança de condição seja esperada, deve ser feito um UPDATE).
	<b>PERFORM MAINTENANCE</b> Nível de alarme I	Detectado início de uma falha. É recomendado agendar uma manutenção. <b>Possíveis causas:</b> desbalanceamento, desalinhamento, falha do rolamento, problema no alojamento do rolamento, problema no eixo do motor, barra do rotor quebrada, problema de isolamento no enrolamento do estator, lubrificação excessiva e vazamento da lubrificação através da correia. Problemas mecânicos nos equipamentos associado (caixa de engrenagem, compressor, turbina, bomba, prensa, esteira, etc), fricção e avaria das pás da turbina, etc.
	<b>STOP</b> Nível de alarme II	Falha em progressão. Manutenção deve ser realizada.

## 2.8 Interface Homem-Máquina (IHM)

### 2.8.1 PA-01

O instrumento possui uma IHM composta de:

- display de 7 segmentos [1] para visualização dos parâmetros medidos;
- seis LEDs [2] de indicação do parâmetro medido / estado e etapa do módulo preditivo;
- LED azul [3]: Indicador de kilo / visualizando estado do sistema;
- LED vermelho [4]: Indica falha detectada pelo módulo preditivo;
- LED verde [5]: Indicador de Mega / visualizando etapa de operação; e
- três teclas para navegação

Sempre que o módulo preditivo detectar uma falha, o LED vermelho irá acender. Para se verificar qual o alarme existente, deve se navegar até a opção nCn do modo instantâneo.

O LED permanecerá aceso até o alarme ser reconhecido, acessando a função nCn (MCM) do modo funções.

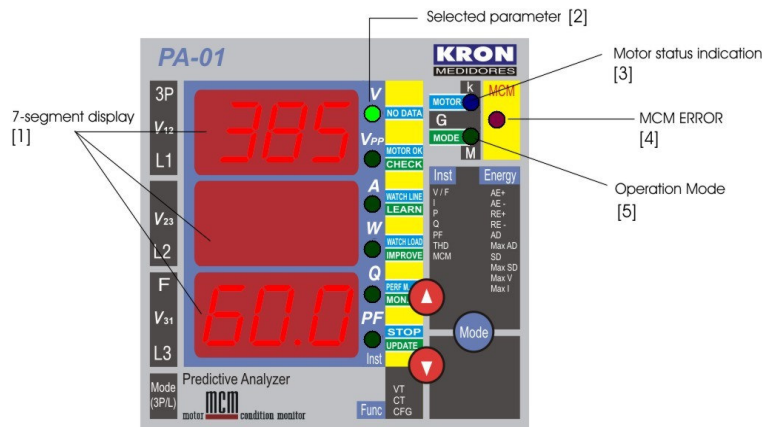


Figura 7. Imagem do IHM do equipamento PA-01.<sup>(1)</sup>

Quadro 2. Indicação de operação do equipamento PA-01<sup>(1)</sup>

LED	Estado do motor LED Azul [3] aceso	Etapa de operação LED Verde [5] aceso
1	<b>NO DATA</b> Sem dados para fornecer o estado do sistema	
2	<b>MOTOR OK</b> O sistema está OK.	<b>CHECK</b> O módulo preditivo está checando o sistema (verificando níveis dos sinais, conexões, etc...).
3	<b>WATCH LINE</b> Verificar rede: possível mudança na alimentação do motor.	<b>LEARN</b> O módulo preditivo está na fase de aprendizado para criação do modelo matemático.
4	<b>WATCH LOAD</b> Verificar carga: possível mudança na carga ou início de uma falha.	<b>IMPROVE</b> O módulo preditivo está otimizando as informações aprendidas.
5	<b>PERFORMANCE MAINTAINANCE.</b> Nível de alarme I: é recomendável agendar uma manutenção do sistema	<b>MON.</b> O módulo preditivo está monitorando o sistema.
6	<b>STOP</b> Nível de alarme II: é recomendável parar o sistema	<b>UPDATE</b> O módulo preditivo está atualizando o modelo matemático.

## 2.9 Aplicabilidades da Tecnologia MCM (PA)

O instrumento tem como função informar se o sistema está em condições normais ou em processo de degradação progressiva. É uma ferramenta complementar as demais técnicas preditivas.

- Aplicado em processos críticos com comportamento cíclico, tais como: Bombas, compressores, transportadores, sistemas de ventilação ou qualquer processo cíclico.
- Permite instalação em motores com partida direta, partida compensada e softstarter.
- A utilização com Inversor de frequência está condicionada a trabalhar com frequência fixa próximo a 50/60Hz, mantendo a velocidade estável. Caso contrário é inadequado



- A tecnologia não é aplicável para sistemas com variação rápida de velocidade (ex: corte de madeira, elevadores, robótica etc...)
- Permite a instalado no CCM do motor
- Pode ser utilizado em motores de baixa e média tensão
- Monitoração contínua: sem falhas entre visitas do técnico
- Pode ser utilizado em motores de qualquer porte.
- Baixa tensão: Sinal de tensão direto até 500VCA  
Sinal de corrente através TC (transformador de corrente)
- Média tensão: Sinal de tensão através TP (transformador de potencial)  
Sinal de corrente através TC (transformador de corrente)
- Potencia do motor: Sem restrições



Figura 8. Possibilidades de aplicação.<sup>(1)</sup>

### 2.9.1 Degradações/falhas progressivas detectáveis

- Barras quebradas,
- Vazamentos, entupimentos,
- Desalinhamento rotórico,
- Perda de isolamento,
- Falta de lubrificação,
- Falta de limpeza em filtros,
- Perda de pressão,
- Desbalanceamento mecânico
- Desbalanceamento elétrico,
- Cavitação Etc.

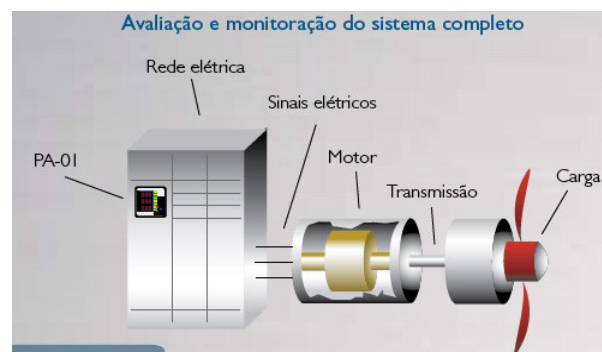


Figura 9. Ilustração de instalação padrão.<sup>(1)</sup>

## **2.9.2 Aplicações**

É recomendado para processos cíclicos, onde o modelamento matemático seja possível.

## **2.9.3 Conectividade**

Tipo: Interface RS-485, Protocolo: MODBUS-RTU,  
Compatibilidade total com sistemas existentes, amplas opções:  
RS-485 / Ethernet (TCP-IP)  
RS-485 / GPRS (via GSM)  
RS-485 / Satélite

## **2.10 Metodologia de Acompanhamento pela Arcelor-Mittal/Acesita:**

O acompanhamento dos testes foi realizado de forma manual com visita ao local de instalação do equipamento, com frequência semanal. As inspeções buscavam coletar informações sobre alarmes e parâmetros elétricos. Quando ocorreram indicações de alarme do PA, foi utilizado o analisador de vibração, como ferramenta de diagnóstico do tipo de falha, presente. O dispositivo PA atuou corretamente diagnosticando o início da falha em quatro oportunidades durante o período de testes. O diagnóstico embasou análises mais aprofundadas e pôde ser comprovado que realmente existiam inícios de falhas que potencializavam defeitos. Em todas as oportunidades, verificou-se que as origens das anormalidades derivavam de distúrbios na carga (rotor) do motor. Falhas identificadas: Impregnação de resíduos do processo nas pás do ventilador foi detectado desbalanceamento de carga e a ação foi raspagem das pás do ventilador do rotor.

Início de avaria no rotor do motor monitorado. O problema foi corrigido e o monitoramento reiniciado. Outro evento foi diagnosticado, tempos depois, também, de natureza mecânica, mais precisamente, a avaria no rolamento do rotor do ventilador, carga do motor monitorado, resultando na manutenção corretiva. Em todos os eventos foram evitados maiores conseqüências para o processo.

## **2.11 Benefícios do PA Identificados pela Arcelor-Mittal/Acesita:**

Melhorar a eficiência na detecção da falha com utilização de sensores não invasivos e baixo custo. O equipamento a ser testado não visa a substituição das técnicas de predição já existentes, tais como a termografia e análise de vibração, pelo contrário, ele objetiva complementar estas técnicas agregando uma supervisão de condição elétrica e mecânica do motor e indicando, quando oportuno, uma investigação mais aprofundada por estas mesmas técnicas. Algumas vantagens do equipamento favorecem a sua aquisição, tais como:

- facilidade de instalação;
- não invasivo;
- simples;
- agrega função de multimedidor e detector de falhas/analizador preditivo;
- detecta início de falhas elétricas e mecânicas;
- monitoração contínua e remota;
- complementa as técnicas tradicionais existentes;
- não depende de um especialista para acompanhamento em tempo integral; e

- por utilizar protocolo de comunicação MODBUS-RTU, pode ser integrado a sistemas de automação ou supervisórios.

Outra característica importante do PA é a possibilidade de analisar a qualidade da rede de alimentação, sobretensão e desequilíbrios entre fases e a condição de sobrecarga do motor.

### **3 CONCLUSÃO**

O referido equipamento funcionou corretamente diagnosticando o início da falha em quatro oportunidades. O diagnóstico embasou análises mais aprofundadas e pôde ser comprovado que realmente existiam inícios de falhas que potencializavam defeitos. Em todas as oportunidades, verificou-se que as origens das anormalidades derivavam de distúrbios na carga do ventilador. Equipamentos em situação análoga podem receber esta monitoração. Identificaram-se motores em situação semelhante e gerou-se uma lista destes equipamentos. Com base neste estudo, verificou-se que o equipamento PA-01 atende a aplicação e sugere-se a aquisição, somente para as seguintes condições:

- locais de difícil acesso ou áreas perigosas com a presença de agentes (químicos, temperatura) ou área controlada;
- detecção de início de falhas imperceptíveis aos equipamentos comuns; e
- aplicação em sistemas trifásicos de partidas diretas, compensadas ou com softstarters.

### **Agradecimentos**

Aos profissionais da Arcelor-Mittal Inox Brasil S.A, unidade de Timóteo/MG, pelo comprometimento e profissionalismo na realização desta avaliação técnica e especialmente aos profissionais: Igor Barros Mairinck, Ari Magno Vieira e Kilder Neves

### **REFERÊNCIAS**

- 1 Literatura Kron “Ficha técnica” e “Manual técnico de instalação”, link, [http://www.kron.com.br/br/downloads\\_manuais.php](http://www.kron.com.br/br/downloads_manuais.php)