

# Desenvolvimento do Lote Pioneiro do Sistema de Monitoramento da Condição de Motores de Sistemas Auxiliares pela Análise da Assinatura Elétrica

Erik Leandro Bonaldi, Levy Ely de Lacerda de Oliveira, Germano Lambert-Torres, Jonas Guedes Borges da Silva, Felipe dos Santos Moreira, Luiz Eduardo Borges da Silva

**Resumo** – Este artigo apresenta o trabalho de P&D voltado ao desenvolvimento, construção e instalação do lote pioneiro do sistema de monitoramento remoto de motores de indução de sistemas auxiliares de geração através da análise da assinatura elétrica. Este sistema de monitoramento apresenta duas vantagens principais: a) apenas as fases do motor precisam ser acessíveis, permitindo assim o monitoramento de motores em locais de difícil acesso; b) os dados são transmitidos remotamente via rede ethernet para o computador do usuário, não sendo necessária a sua exposição a riscos inerentes ao processo de coleta manual.

**Palavras-chave** – Análise da Assinatura Elétrica, Manutenção Preditiva, Motores de Indução, Sistemas Auxiliares de Geração.

## I. INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos constituem a força motriz básica de sistemas de bombeio para arrefecimento e lubrificação em sistemas auxiliares de geração. Falhas nestes motores podem prejudicar a disponibilidade do equipamento principal, o gerador [1].

No início deste projeto, na etapa de Desenvolvimento Experimental, foram desenvolvidas as ferramentas para emprego da metodologia de análise da assinatura elétrica, objetivando-se incrementar o programa de manutenção preditiva dos motores de sistemas auxiliares de geração.

Na sequência da cadeia de desenvolvimento, foram desenvolvidos equipamentos cabeças-de-série cujo objetivo principal era o de aperfeiçoar o protótipo desenvolvido no projeto anterior. Foram realizadas melhorias no protótipo desenvolvido no primeiro projeto visando principalmente a: (a) expansão dos canais de entrada permitindo a aquisição simultânea dos três sinais de tensão e dos três sinais de cor-

rente, resultando numa análise mais abrangente e robusta; (b) interligação do sistema em rede, permitindo o acesso remoto; e (c) aprimoramento do software no sentido de se permitir a inclusão de novas ferramentas de diagnóstico e melhoria das ferramentas desenvolvidas na etapa de Desenvolvimento Experimental.

Dando sequência ao desenvolvimento do projeto, a presente etapa trata da produção do Lote Pioneiro dos equipamentos para monitoramento remoto de motores de indução de sistemas auxiliares de geração através da análise da assinatura elétrica. A fase de desenvolvimento de Lote Pioneiro considera aspectos relativos à produção em “escala piloto” do cabeça-de-série desenvolvido em projeto de P&D anterior. Nessa fase, realiza-se uma primeira fabricação, em “escala piloto”, para ensaios de validação, análise de custos e refino do projeto, com vistas à produção industrial e/ou à comercialização.

Na persecução deste objetivo, a equipe do projeto desenvolveu, construiu e instalou os equipamentos do lote pioneiro para monitoramento da condição de motores elétricos dos sistemas auxiliares de geração para análise e diagnóstico de avarias com fins de manutenção preditiva.

O projeto em questão é intitulado “Lote Pioneiro do Sistema de Monitoramento da Condição de Sistemas Auxiliares de Motores pela Análise da Assinatura Elétrica” e está inscrito na ANEEL sob o código TPE 48. Este projeto se encontra concluído e envolveu as seguintes entidades participantes: CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação e Instituto Gnarus, como Instituições Executoras, e Termopernambuco S/A, como Instituição Proponente.

O artigo está organizado da seguinte forma: primeiramente, por uma questão de completude, faz-se uma revisão do desenvolvimento realizado. Em seguida, apresenta-se o procedimento de produção do equipamento para escala industrial, os motores sob monitoramento, as instalações realizadas e a análise de desempenho do sistema.

## II. ANÁLISE DA ASSINATURA ELÉTRICA

Os desenvolvimentos deste projeto têm como motivo a aplicação da técnica de Análise da Assinatura Elétrica (ESA – Electrical Signature Analysis) em motores de indução trifásicos para incrementar o programa de manutenção preditiva de motores dos sistemas auxiliares de geração.

Existem inúmeras técnicas disponíveis para monitoramen-

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL, no projeto 2290- 0048.

E. L. Bonaldi, L. E. L. de Oliveira, J. G. B. da Silva e G. Lambert-Torres são pesquisadores no CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação e do Instituto Gnarus (e-mails: {levy.oliveira, erik.bonaldi, jonas.borges, germanolortres}@gmail.com).

F. S. Moreira trabalha na TermoPernambuco S/A (e-mail: felipe.moreira@termope.com.br).

L. E. B. da Silva é professor titular da Universidade Federal de Itajubá (e-mail: leborges@unifei.edu.br)

to da condição destes motores, visando à sua manutenção preditiva [2]. Entre estas técnicas, podem-se citar algumas mais comuns e difundidas, como: análise de vibrações, análise termográfica, análise de óleo etc. Dentre as técnicas menos conhecidas, se encontra a análise da assinatura elétrica, sob suas diferentes formas [4]: Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA – Motor Current Signature Analysis), Análise da Assinatura de Tensão (VSA – Voltage Signature Analysis), Análise da Assinatura de Potência Instantânea (IPSA - Instantaneous Power Signature Analysis) e variações destas, como, por exemplo, a Abordagem por Vetor de Park Estendida (EPVA – Extended Park's Vector Approach)[5-6].

A Análise da Assinatura Elétrica está baseada no acompanhamento de parâmetros extraídos de sinais de corrente e tensão do motor. Estes parâmetros constituem bons indicadores da condição em que a máquina se encontra. Estes parâmetros podem ser extraídos tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, sendo este último caso mais comum.

#### A. Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA)

MCSA é a técnica usada para analisar e acompanhar a tendência de sistemas energizados dinâmicos. A análise apropriada dos resultados da aplicação da técnica auxiliará a preditiva da planta na identificação de:

- Problemas no enrolamento do estator;
- Problemas rotóricos;
- Problemas no acoplamento e na carga acoplada; e
- Problemas no r

Esta técnica usa o motor de indução como um transdutor, permitindo que o usuário avalie a condição elétrica e mecânica a partir do painel de alimentação e consiste basicamente na monitoramento de uma das três fases da corrente de alimentação do motor.

Um sistema simples e suficiente para a implementação da técnica é composto de um transdutor de corrente, um condicionador de sinais e um analisador de espectro.

#### B. Análise da Assinatura de Tensão (VSA)

A técnica de Análise da Assinatura de Tensão segue a mesma estratégia da análise da assinatura de corrente, contudo o sinal analisado é o da tensão de alimentação do motor. Essa técnica é mais utilizada em análise de unidades geradoras.

No caso de motores, ela pode ser empregada com utilidade em casos de problemas oriundos da alimentação do motor e na análise do desequilíbrio elétrico estatístico em conjunto com a análise da assinatura de corrente. Pode ser utilizada também para se conhecer a origem de certas componentes no espectro de corrente, isto é, pode ser usada para se inferir se a origem da componente vem da rede ou tem sua origem no próprio conjunto.

#### C. Análise da Assinatura de Potência Instantânea (IPSA)

A análise da potência instantânea é outra técnica de análise de falhas baseada em análise espectral. Como o cabeçote-série desenvolvido nesse projeto permite a aquisição de sinais de tensão e corrente, torna-se possível a implementação e o uso dessa nova abordagem.

A grande diferença dessa técnica para MCSA e VSA é que ela considera as informações presentes nos sinais de tensão e corrente de uma fase do motor simultaneamente e a componente de falha aparece demodulada com a denominação de frequência característica.

#### D. Abordagem por Vetor de Park Estendida (EPVA)

As primeiras pesquisas envolvendo o uso do método do vetor de Park para o diagnóstico de avarias em motores tais como curto-circuito entre espiras, excentricidade do airgap, barras quebradas, etc.

A proposta inicial de detecção de avarias se baseava apenas nas distorções sofridas pelo círculo de Park em função do surgimento e do agravamento das avarias. Em seguida, foi proposta pelo método de EPVA a observação do espectro do módulo do vetor de Park [6].

A vantagem da técnica de EPVA reside no fato de a mesma combinar a simplicidade do método anterior (análise do círculo de Park) com a potencialidade da análise espectral. Além disso, a componente fundamental da alimentação do motor é automaticamente subtraída do espectro pela transformação de Park, fazendo com que as componentes características de falha apareçam com destaque. O ponto mais importante é o fato de a técnica considerar as três fases de corrente, gerando um espectro mais significativo por englobar informações das três fases. Esta característica é extremamente útil em casos onde falha só pode ser detectada se consideradas as três fases. Este é o caso de desequilíbrio elétrico estatístico em motores alimentados em malha aberta.

#### E. Vantagens da Utilização das Técnicas de ESA

A grande vantagem das técnicas de análise da assinatura elétrica é não necessitar de acesso à máquina em si, apenas à sua corrente e/ou tensão, disponíveis no seu CCM - Centro de Controle de Motor. Deste modo, motores inacessíveis, motores em locais de difícil acesso e motores em locais inseguros podem também ser monitorados e inseridos num programa de manutenção preditiva. Como a aquisição de sinais é feita dentro de painéis elétricos, estes podem ser aproveitados, facilitando a instalação de equipamentos para monitoramento frequente. Os sinais de corrente e tensão podem ser adquiridos diretamente da máquina ou através de secundários de TCs e TPs, facilitando o acesso a motores de grande porte. Vale ressaltar que, em função dos parâmetros analisados, em geral, a resposta em frequência dos TCs e TPs não constitui empecilho.

Dentre as anomalias com potencial de detecção pela análise da assinatura elétrica, podem-se destacar:

- Desequilíbrio elétrico rotórico: trinca/quebra de barras ou de anel de curto-circuito do rotor;
- Desequilíbrio elétrico estatístico: curto-circuito entre espiras no estador;
- Desbalanceamento mecânico: tanto do rotor em si quanto de cargas acopladas; e,
- Desalinhamento mecânico: tanto do rotor em si quanto de cargas acopladas.

Este conjunto geral de anomalias detectáveis engloba grande parte dos processos particulares de falta que evoluem para falhas nos sistemas de acionamento baseados em motores de indução.

É importante notar que, mesmo as anomalias mecânicas no rotor ou na carga acoplada, acabam por se refletir na assinatura elétrica do motor através de sua influência sobre o torque mecânico do conjunto. O torque, por sua vez, tem impacto na corrente estatórica do motor. A base deste processo está nas variações do entreferro e ou nas oscilações de torque introduzidas pela anomalia.

### III. PADRÕES DE FALHAS

A seguir, são apresentados alguns padrões de falhas utilizados na análise da assinatura elétrica [3]:

#### A. Padrão de Desequilíbrio Elétrico Rotórico

A detecção de barras quebradas ou trincadas através do espectro da corrente do estator é feita observando-se duas componentes do espectro que se localizam próximas e em torno da componente fundamental.

Este tipo de falha ocorre normalmente na presença de esforços térmicos ou mecânicos, cargas pulsantes ou imperfeições no processo de manufatura da gaiola. A quebra de barras não leva o motor imediatamente à falha, ou seja, a máquina pode continuar funcionando mesmo com a existência de barras quebradas ou trincadas. Contudo, efeitos secundários consideráveis podem ocorrer como, por exemplo, as barras quebradas atingirem o estator.

A quebra de barras faz com que apareçam, no espectro de corrente, dois picos nas frequências dadas por (1):

$$(f \pm 2.k.f.s) \quad (1)$$

onde  $f$  é a frequência fundamental,  $k$  é 1,2,3... e  $s$  é o escorregamento.

A figura 1 ilustra este padrão.

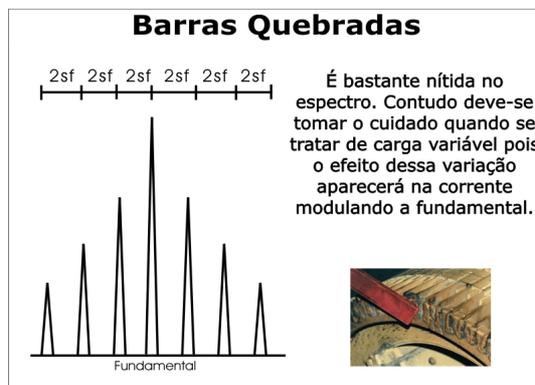


Figura 1. Esquema do padrão de barras-quebradas.

#### B. Padrão de Excentricidade do Entreferro

As causas mais comuns de excentricidade do entreferro são: imperfeição do processo de manufatura, rotor e eixo não concêntricos, núcleo do estator oval e empeno térmico do rotor.

Antes de se evoluir para as formas de detecção da falha e seus padrões, torna-se necessária a caracterização dos dois tipos de excentricidade: a estática e a dinâmica.

Na **excentricidade estática**, a posição do tamanho do entreferro radial mínimo é fixa no espaço, o núcleo do estator é oval ou há um posicionamento incorreto do rotor ou estator gerado por um desalinhamento. Além dessas possibilida-

des, ainda existem os aspectos construtivos que permitem um nível intrínseco de excentricidade devido às tolerâncias do processo de produção.

Na **excentricidade dinâmica**, o entreferro mínimo gira com o rotor. As principais causas são: diâmetro externo do rotor não-concêntrico, empeno térmico do rotor, defeito no mancal de rolamento, desbalanceamento do rotor ou da carga.

A figura 2 apresenta as condições de operação do rotor com o foco na excentricidade do entreferro.



Figura 2. Tipos de excentricidade (o círculo branco representa o centro estatórico e o círculo negro, o centro rotórico).

O padrão mais simples e mais prático para monitoramento deste tipo de falha reúne os efeitos das excentricidades estática e dinâmica e apresenta picos nas frequências dadas por (2):

$$(f \pm k.f_R) \quad (2)$$

onde  $f$  é a frequência fundamental,  $k$  é 1,2,3... e  $f_R$  é a frequência de rotação do motor.

A figura 3 ilustra este padrão.

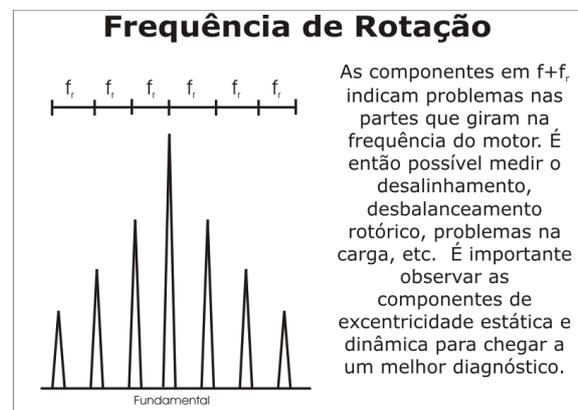


Figura 3. Esquema do padrão de excentricidade estática e dinâmica em baixa frequência.

#### C. Padrão de Sistema de Transmissão

A análise da assinatura da corrente monitora as componentes relativas às polias (motora e movida), correia e engrenagens. Já foi observado que problemas na carga podem repercutir nas frequências dos elementos do sistema de transmissão, sendo essa mais uma forma de inferir sobre falhas na carga acoplada além das componentes características da própria carga.

Através da análise da frequência de rotação, podem-se detectar problemas relacionados à polia motora. Já para a polia movida, basta considerar a relação de velocidade, resultando no padrão da figura 4.

Os problemas encontrados mais frequentemente são de polia excêntrica, polia com folga e desbalanceamento. Problemas relativos à carga acoplada também aparecem na mesma frequência, cabe ao analista cruzar informações de outras regiões do espectro para chegar a uma conclusão. Pode acontecer também de se suspeitar de problemas em duas ou mais partes do acionamento.

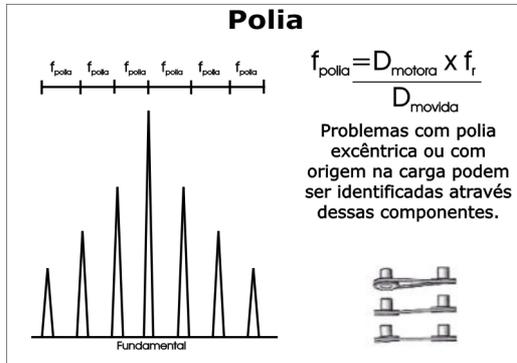


Figura 4. Esquema do padrão de falha na polia movida.

No caso das componentes relativas à correia, o padrão segue o esquema da figura 5. Além de se poderem diagnosticar problemas, como: correia frouxa, rachada, ou excessivamente esticada, pode-se também analisar problemas oriundos na carga e que aumentam a vibração na correia contribuindo para o aumento da amplitude dessas componentes.

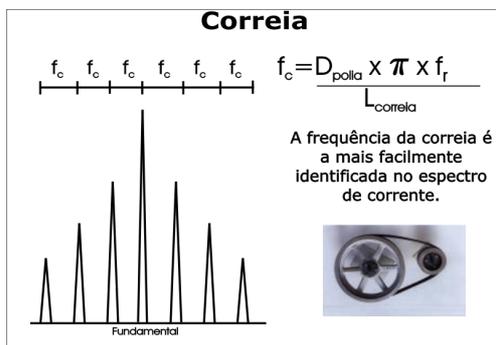


Figura 5. Esquema do padrão de falha em correia.

#### D. Falhas em Bombas Centrífugas

A análise de falhas em bombas centrífugas é feita considerando-se a frequência de rotação da bomba e a frequência de passagem das pás. Além dessas frequências, deve-se monitorar também o aumento de saliências próximas da frequência da rede que são características da assinatura de bombas.

A análise da frequência de rotação da bomba indica problemas relacionados a desalinhamento ou desbalanceamento da bomba. Já o aumento das amplitudes das frequências de passagem das pás indica defeitos no interior da bomba como deterioração das pás, obstruções do fluxo, fluxo com variações abruptas de direção e posicionamento excêntrico do rotor dentro da carcaça e folga.

A figura 6 apresenta as frequências características de falhas em bomba.

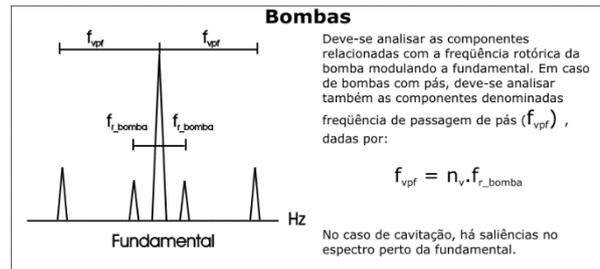


Figura 6. Esquema do padrão de falha em bombas centrífugas

#### IV. RESUMO DO PROCEDIMENTO DE PRODUÇÃO

O procedimento de produção deste sistema é constituído das seguintes etapas:

##### A. Partes Componentes

Para realização da primeira etapa do processo produtivo é necessário ter em mãos a lista de componentes, o arquivo de layout das placas eletrônicas e o desenho do gabinete.

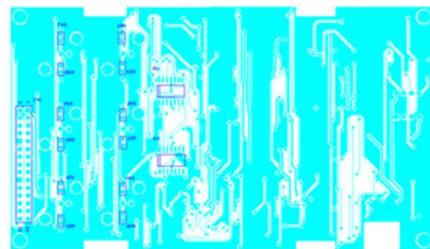


Figura 7. Exemplo de layout de uma das placas que compõem o hardware de aquisição.

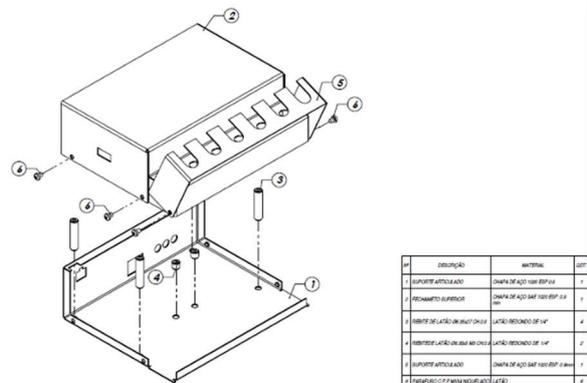


Figura 8. Desenho do gabinete.

##### B. Detalhes da Montagem

Para realização da segunda etapa do processo produtivo é necessário se ter à disposição a lista de componentes com as referências de posição, os próprios componentes e as placas eletrônicas de circuito impresso (figura 9). A Figura 10 mostra as placas montadas.

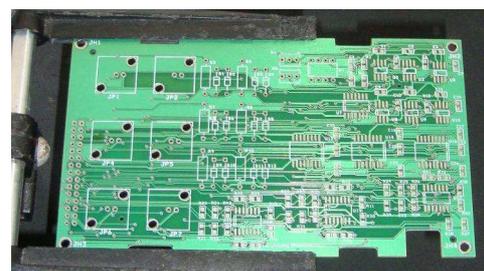


Figura 9. PCI da placa do circuito analógico.

### C. Programação do Micro-controlador e Finalização da montagem

O módulo micro-controlador utilizado é um Rabbitcore RCM-3010. A programação é feita em sua plataforma específica, utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado Dynamic C®.

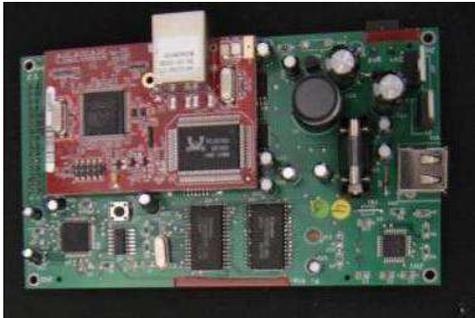


Figura 10. Placas montadas – vista superior.

Na finalização da montagem, inicialmente é feita a inserção e fixação do micro-controlador no seu soquete na placa digital. Em seguida, é feita a inserção dos leds na placa, inserção do porta led no gabinete e posicionamento da placa digital no gabinete, conforme a figura 11.



Figura 11. Posicionamento da placa digital no gabinete.

Na operação seguinte, é feita a soldagem dos cabos de sinais na placa analógica e a conexão da placa analógica sobre a placa digital, conforme a figura 12.



Figura 12. Base do gabinete com as duas PCIs já parafusadas e com os cabos de sinal.

Na próxima operação, são fixados os conectores de sinal BNCs na tampa do gabinete. Em seguida, realiza-se a conexão dos cabos de sinal aos conectores BNC (figura 13).

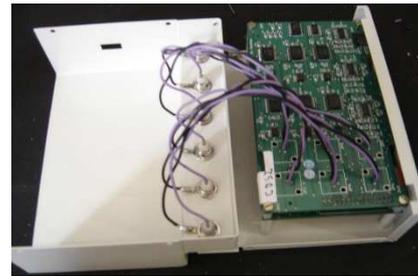


Figura 13. Gabinete com placas montadas e conexões de sinal realizadas.

Por fim, é feito o fechamento com parafusos e a colocação do adesivo de identificação, conforme as figuras 14.



Figura 14. Gabinete fechado com as placas, “leds” e adesivo de identificação.

### V. INSTALAÇÃO E MOTORES SOB MONITORAMENTO

Recomendou-se que os motores escolhidos fossem, de preferência, aqueles que apresentassem valor estratégico no processo de geração, facilidade de instalação e possibilidade de se medir também tensão. A presença de pontos de rede na sala elétrica também seria um fator importante na escolha dos motores uma vez que se deseja monitorá-los remotamente através de rede ethernet.

Ao todo cinco motores de bombas centrífugas receberam o monitoramento pela análise da assinatura elétrica.

Foram instalados transformadores de corrente de núcleo bipartido no secundário de TCs de medição já existentes no painel. Os transformadores instalados possuem relação de transformação de 0,3333V/A, compatível com a entrada em tensão dos equipamentos do lote pioneiro. Como não havia TPs no painel, os transdutores de tensão não puderam ser instalados.



(a)

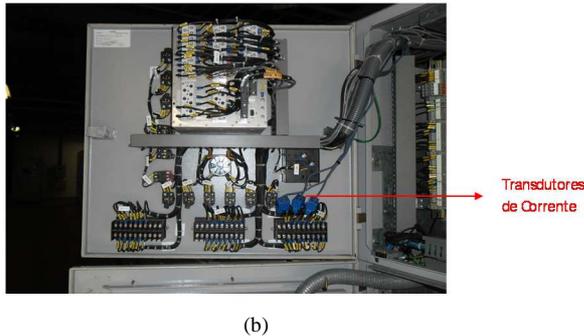


Figura 15. Instalação realizada no painel do motor 2LAC40AP001: (a) access point, fonte de alimentação e equipamento desenvolvido e (b) transdutores de corrente.

A rede instalada para a comunicação com os equipamentos é uma rede sem fio (wireless), composta por cinco roteadores conectados entre si através do serviço de extensão de nuvem chamado WDS. Já os equipamentos em análise estão conectados a estes dispositivos através de cabos ethernet (UTP). A figura 16 ilustra a topologia e configurações dos dispositivos de rede e dos equipamentos a ela conectados.

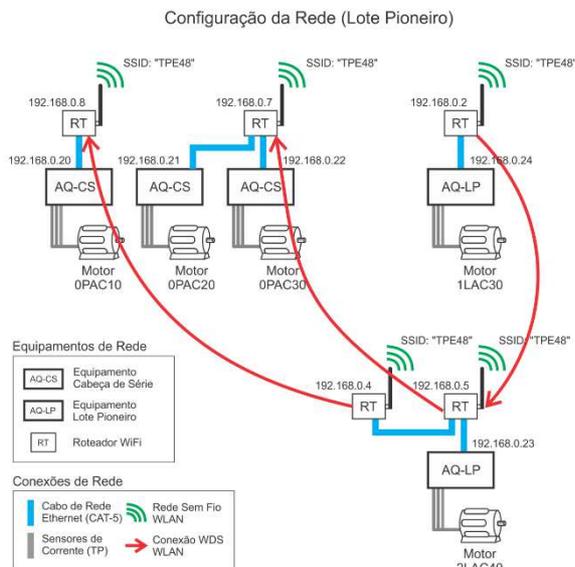


Figura 16: Diagrama da instalação da rede sem fio para acesso aos equipamentos Cabeça de Série e do Lote Pioneiro

## VI. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA

As atividades referentes à avaliação do desempenho global do equipamento lote pioneiro foram determinadas com base nas instalações dos equipamentos na TermoPE e nos sinais coletados ao longo do período. As condições a que os equipamentos foram submetidos são as condições reais de aplicação prática dos equipamentos, incluindo instalação de rede, local de instalação, tipos de motores e o plano de aquisição de dados. Portanto, os resultados de desempenho observados nesta etapa são bem representativos para a validação final dos equipamentos do lote pioneiro.

De forma geral, o equipamento desenvolvido foi analisado segundo o seu desempenho nas seguintes áreas: Rede e comunicação de dados; Qualidade e durabilidade dos equipamentos; Aquisição de sinais e identificação de falhas; Usabilidade e qualidade do Software de Análise.

### A. Rede e Comunicação de Dados

Por se tratar de um equipamento de coleta de dados remoto via rede, a análise do seu desempenho do ponto de vista da comunicação de rede é de suma importância. Nesse sentido, a análise da rede e da comunicação de dados entre os equipamentos e computador de análise, onde está o Software de Análise, foi efetuada segundo os seguintes critérios: 1) Disponibilidade para conexão; 2) Taxa de transmissão de dados; 3) Perda de pacotes e dados durante as comunicações.

Para avaliação do primeiro critério, foram considerados erros ao se conectar na rede sem fio e erros de conexão com o equipamento de aquisição. Quando não é possível estabelecer a conexão, o Software de Análise emite um alerta de erro “E-AQ1” com a mensagem “Não é possível estabelecer conexão com o hardware de aquisição. Verifique se o endereço de IP é válido ou se o hardware de aquisição está corretamente instalado”.

Durante o período de avaliação, a equipe da TermoPE encarregada de efetuar a coleta de dados reportou este tipo de mensagem em alguns motores em diferentes dias. Tais casos foram analisados e verificou-se que, em todos os casos, a mensagem foi emitida quando os equipamentos se encontravam desenergizados, por ocasião de parada da unidade. Portanto, a disponibilidade do equipamento para conexões foi considerada adequada durante todo o período de análise.

Com relação ao segundo critério, verificou-se o desempenho de “throughput” de dados dos equipamentos com relação ao medido em laboratório. A taxa de dados do equipamento do Lote Pioneiro medida pela equipe executora, no momento da instalação, foi de aproximadamente 10,75 KB/s, ao passo que a média em laboratório foi de 13,22 KB/s (acréscimo de 4,4 segundos no processo de aquisição). A diferença se deve principalmente ao fato da rede utilizada ser sem fio. Apesar disso, os valores apresentados estão aceitáveis e dentro do esperado.

Por fim, caso haja perdas de pacote e de dados durante o processo de aquisição, o mesmo é capaz de se recuperar e efetuar novas tentativas de envio. Contudo, caso estas tentativas falhem, o software emite um dos seguintes alertas: “E-AQ3: O hardware de aquisição ficou inativo por um certo período de tempo e a conexão foi terminada” e “E-AQ4: O hardware de aquisição solicitou um pacote de dados que não pôde ser enviado”. Também não foi relatado nenhum erro dessa natureza pela equipe da TermoPE durante as atividades de coleta de dados.

### B. Qualidade e Durabilidade dos Equipamentos

Para considerar a durabilidade e qualidade dos equipamentos, foram considerados quaisquer defeitos ou erros nos equipamentos sob análise que tenham sido observados nas visitas da equipe executora ou que tenham sido reportados pela equipe da TermoPE.

Os requisitos de qualidade e durabilidade do equipamento são determinados pela sua aplicação, ou seja, por se tratar de um equipamento industrial para a análise de motores auxiliares de usinas termelétricas. Sendo assim, espera-se que o equipamento apresente um baixo índice de defeitos de fabricação (qualidade) e que o mesmo não apresente falhas resul-

tantes de desgaste em um período inferior a dois anos (durabilidade).

Considerando a fabricação do lote dos equipamentos Cabeça de Série (3 unidades) e Lote Pioneiro (6 unidades), nenhum dos equipamentos instalados (5 no total) apresentou defeito de fabricação no período analisado. A avaliação deste critério é superficial, pois o tamanho do lote ainda é pequeno e o número de dispositivos fabricados e instalados ainda é baixo.

Com relação à durabilidade, não foram observados nenhum defeito nos equipamentos Cabeça de Série (instalados há mais de 2 anos) ou nos equipamentos do Lote Pioneiro (instalados há 7 meses) instalados.

Os equipamentos Cabeça de Série foram incluídos na análise para aumentar a significância da análise, pois estão em serviço por um período maior e apresentam características iguais aos equipamentos do Lote Pioneiro, visto que não foram feitas alterações nas placas de circuito impresso, componentes eletrônicos e gabinete.

### C. Usabilidade e Qualidade do Software de Análise

A melhor forma de avaliar o desempenho do software de análise é através de uma análise de sua usabilidade e confiabilidade. Com relação à sua usabilidade, foram analisadas as principais ferramentas do software, considerando as dúvidas, dificuldades e sugestões de melhoria reportadas pela equipe da TermoPE ao utilizar o programa. Já com relação à confiabilidade, foram analisados os erros (os chamados BUGS) e eventos que impediram a utilização do sistema.

No geral, o pacote computacional apresentou boa usabilidade e boa confiabilidade.

## VII. RESULTADOS DE TESTES DE CAMPO

A análise do processo de aquisição de sinais e identificação de falhas é de suma importância para se avaliar o desempenho do sistema como um todo, visto que representam o objetivo principal do sistema. Portanto, avaliou-se o processo de aquisição em si, a qualidade dos sinais adquiridos pelo equipamento, bem como a qualidade do espectro obtido do ponto de vista de identificação de falhas.

Além disso, algumas etapas do processo, como ajuste de parâmetros de aquisição e a configuração dos tipos de aquisição foram considerados.

Nenhuma falha foi identificada nos motores monitorados durante o período de análise. De qualquer forma, os principais parâmetros de monitoramento foram identificados nos sinais adquiridos, sendo possível considerar que o desempenho do equipamento está de acordo com os requisitos do projeto.

Nesse sentido, as figuras 17 e 18 ilustram os parâmetros de desbalanceamento/desalinhamento (frequência de rotação) e quebra de barras destacados na assinatura do motor OPAC20. Já a figura 19 evidencia o histórico destes parâmetros no período monitorado.

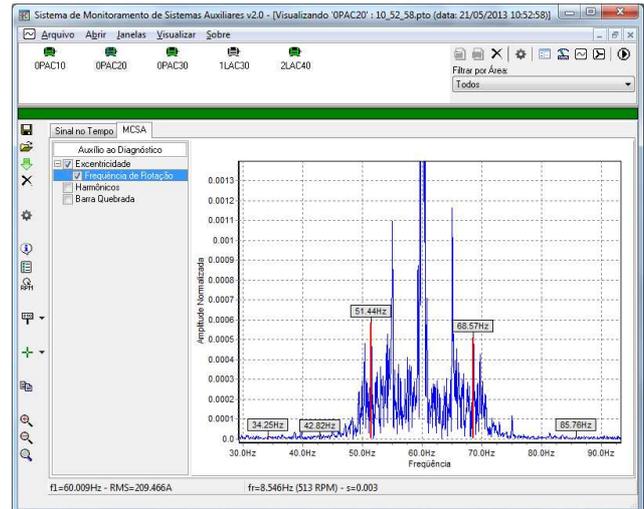


Figura 17. Componentes de desbalanceamento/desalinhamento rotórico destacadas na assinatura de corrente do motor OPAC20.

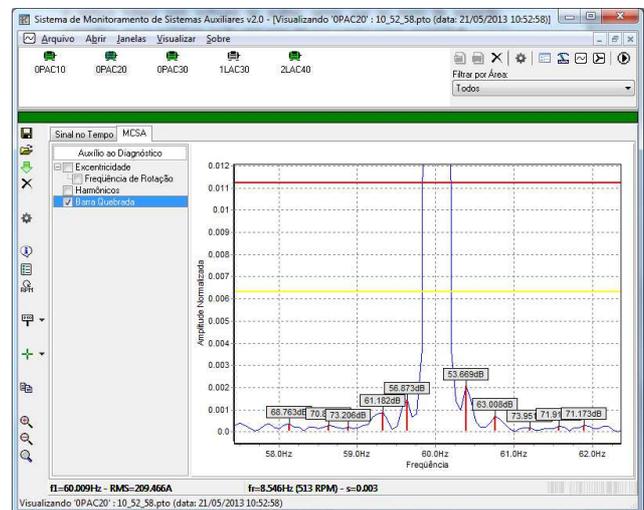


Figura 18. Componentes de quebra de barras destacadas na assinatura de corrente do motor OPAC20.

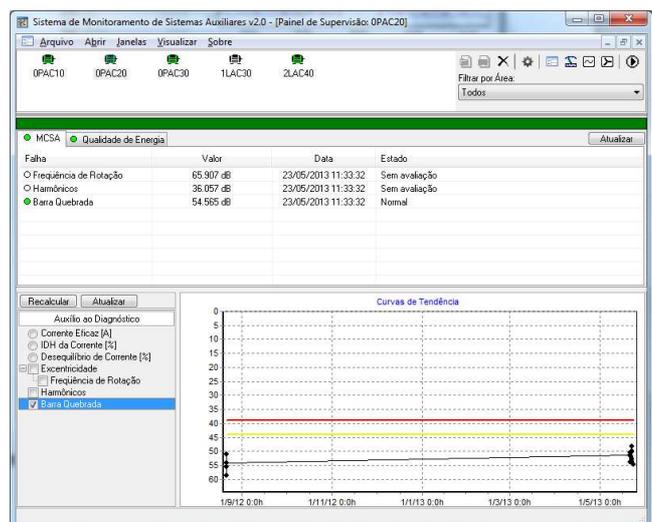


Figura 19. Curva de tendência do parâmetro de quebra de barras do motor OPAC20.

## VIII. CONCLUSÕES

Uma visão geral do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento executado e da técnica de Análise da Assinatura Elétrica foi apresentada. Os equipamentos produzidos no lote pioneiro responderam conforme os requisitos de projeto.

Os principais resultados atingidos foram:

- Aperfeiçoamento do cabeça-de-série visando à produção em escala.
- Monitoramento de 5 motores do sistema auxiliar de geração.
- Disponibilidade de equipamentos para monitorar mais 4 motores.
- Capacitação dos profissionais da Usina com relação às técnicas e conhecimentos utilizados no projeto.
- Monitoramento da condição de máquinas elétricas rotativas com ênfase nos motores de indução e suas cargas que compõem os sistemas auxiliares de geração.
- Os resultados alcançados para a TermoPE podem ser aplicados em qualquer outra unidade geradora de qualquer outra concessionária no país.
- Além disso, como o sistema está baseado em uma plataforma flexível de desenvolvimento, sua adequação para outros processos de geração e até mesmo outros tipos de máquinas elétricas é viável.
- Melhoria da infraestrutura de monitoramento da usina, uma vez que vários conjuntos dos sistemas auxiliares estarão monitorados com a instalação dos equipamentos produzidos no lote pioneiro.

Em termos de relevância científica, esta linha de projetos gerou três dissertações de mestrado, duas teses de doutorado e uma qualificação de doutorado. Todos esses trabalhos estão relacionados e detalhados no relatório final do projeto.

Já em termos tecnológicos, nesta linha de projetos, foi solicitada ao INPI uma patente de invenção intitulada “PROCESSO AUTOMÁTICO DE DIAGNÓSTICO DE BARRAS QUEBRADAS EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS”.

## IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. E. L. de Oliveira, E. L. Bonaldi, J. G. B. da Silva, R. N. Dias, G. L. Torres, L. E. B. da Silva, P. H. R. P. Gama, “Desenvolvimento do Cabeça-de-Série do Sistema de Monitoramento da Condição de Motores de Sistemas Auxiliares pela Análise da Assinatura Elétrica “VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), Ago. 2011.
- [2] A. J. M. Cardoso, *Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos*, Coimbra: Coimbra Editora, 1991.
- [3] E. L. Bonaldi, "Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados", Tese de Doutorado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 2006.
- [4] M. H. Benbouzid, “A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, pp. 984-993, Oct. 2000.
- [5] S. M. A. Cruz e A. J. M. Cardoso, “Diagnosis of the Multiple Induction Motor Faults Using Extended Park’s vector Approach” in *International Journal of Comadem*, pp 19-25, 2001.
- [6] S. M. A. Cruz e A. J. M. Cardoso, “Diagnosis of Stator Inter-Turn Short Circuits in DTC Induction Motor Drives”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, NO. 5. September/October 2004.