



## Projeto de P&D – TPE 33

Desenvolvimento do Cabeça-de-Série do Sistema de Monitoramento da Condição de Sistemas Auxiliares de Motores pela Análise da Assinatura Elétrica

### Artigo em Congresso Nacional

#### Descrição:

L.E.L. DE OLIVEIRA, E.L. BONALDI, J.G.B. DA SILVA, R.N. DIAS, G. LAMBERT TORRES, L.E. BORGES 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, Fortaleza, Brasil, Aug. 17-19, 2011.

**VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL) e II Seminário de Eficiência Energética do Setor Elétrico (II SEENEL) - Sessões Técnicas**

Fortaleza, CE: 17 a 19/08/2011

Dia	Horário	SALA ESMERALDA		SALA AMETISTA		SALA TOPÁZIO		SALA SAFIRA		SALA OURO I									
		Nº	Título do Artigo	Empresa	Nº	Título do Artigo	Empresa	Nº	Título do Artigo	Empresa	Nº	Título do Artigo							
		VI CITENEL		VI CITENEL		VI CITENEL		VI CITENEL		II SEENEL									
		Medição		Meio Ambiente		Faturamento e Combate a Perdas		Planejamento		Educativa / Poder Público									
17 ago	11:20 às 11:35	416	Desenvolvimento de um Equipamento para os Estudos de Balanço Energético e da Qualidade de Energia	Light	221	Metodologia de Cálculo de Amplitude de Linhas Aéreas de Transmissão Considerando a Influência da Camada Limite da Atmosfera	Cemig D	189	Prospecção de Águas e Identificação de Águas de Combate a Perdas Comerciais	CELPE	209	Sistema de Suporte à Decisão para o Despacho Ótimo de Unidades Geradoras das Usinas da CESP	CESP	214	Projeto educacional "Elétrico nas Escolas"	ELEKTRO			
17 ago	11:35 às 11:50	451	Desenvolvimento de Transformador de Distribuição com Medição Integrada de Energia Elétrica	CEIMAR	230	Estudo Reaproveitamento do Balanço de Cargas de Isoladores devido à Ação do Vento	Cemig D	254	Determinação do MIST Ótimo para Empresas de Distribuição de Energia Elétrica	Light	212	Ferramenta de Análise de Risco Regulatório em Concessões de Geração de Energia Elétrica	CESP	318	Caravana RGE – Educando para a eficiência	RGE			
17 ago	11:50 às 12:05	541	Desenvolvimento de um Sistema de Detecção de Defeitos Precoce em Motores de Indução	Termopse	263	Avaliação do Controle Mecânico de Microfitas Aquáticas na Interrupção de Nutrientes na Água e como Bio-fertilizante na recuperação de Áreas Degradadas na Light Energy SA	Light	227	Metodologia para Análise de Ressonância de Equipamentos Eletromecânicos Incluindo Dispositivos Miligraças	Cemig D	213	Proposta de Metodologia para Validação de Serviços Analíticos das Usinas da CESP	CESP	415	Eficiência Energética nas Escolas Estaduais de São Paulo	AESEIPA			
17 ago	12:05 às 12:20	542	Desenvolvimento de Cabeça-de-Série do Sistema de Monitoramento da Condição de Motores de Sistemas Auxiliares pela Análise da Assinatura Elétrica	Termopse	205	Diversidade Genética de Populações e Conservação de Sítios de Piratinga-do-Sul - Byron cealuis	CESP	221	Padrão de Energia para Calibração de Medidores em Laboratório ou em Campo	Cemig D	236	Simulador de estratégias de participação em lotes de energia para geradores salientando certos jogos	Duke	491	Eficientização do Sistema de Iluminação das instalações do TCA com aplicação de LED	COELBA			
17 ago	12:20 às 12:35																AESEIPA		
17 ago	12:30 às 14:00																		
		VI CITENEL		VI CITENEL		VI CITENEL		VI CITENEL		VI CITENEL		VI CITENEL		VI CITENEL		VI CITENEL		VI CITENEL	
		Novos Materiais / Gestão de Bacias e Reservatórios		Meio Ambiente / Controle e Proteção		Faturamento e Combate a Perdas / Qualidade		Planejamento / Controle e Proteção		Eficiência Energética									
17 ago	14:00 às 14:15	286	Confecção de Protótipos de Cais de Medidores de Energia Elétrica utilizando Compostos de Resinas Termoplásticas com Fibras Naturais	COELBA	307	Soluções Sustentáveis e Práticas Socioambientais no Gerenciamento de Resíduos da Light S.A.	Light	285	Estrutura Vertical da Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição de Energia: Uma Proposta Alternativa.	ELEKTRO	277	Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação de Alternativas Equilibradas em Estudos de Expansão do Sistema de Transmissão: Uma Ótica Probabilística	CITEEP	239	Gerenciamento Automático de Sistemas de Bombamento para Irrigação de Lavouras de Arroz a partir do Controle da Lâmina d'Água	AES Sul			
17 ago	14:15 às 14:30	437	Otimização de Processos de Inspeção e Retiramento de Postes de Madeira em Serviço em Linhas de Distribuição de Energia Elétrica	AES Sul	324	Avaliação hidrográficas e técnicas de alternativas tecnológicas para mitigação de impactos em nascentes de cabeçote hidrográficas	Light	475	Metodologia para Análise dos Impactos Socio-ambientais e Socioambientais da Implantação de Tecnologias Antifraude na Distribuição de Energia Elétrica	Ampla	332	Valor da flexibilidade gerencial de investimentos em projetos de transmissão e distribuição	Cemig D	338	Influência da Carga Pulsada na Vida útil de Baterias	COPEL			
17 ago	14:30 às 14:45	459	Avaliação do Desempenho dos Materiais Poliméricos e da Interface de Isoladores Compostos Tipo Bastão	COPEL-D	339	Uso de enzima pesada na produção de concreto autocicatável	Tractebel Energia	479	Percepção de Preço, Valor e Comprometimento do Cliente no Setor de Energia Elétrica	Ampla	345	Inovações Tecnológicas Aplicadas as Linhas de Transmissão.	TAMESA	412	Desenvolvimento de uma Cabeça de Série de Secadora de Rolapas a Bomba de Calor - (cod aneel_4950-325/2010)	Cemig D			
17 ago	14:45 às 15:00	466	Estudo dos Efeitos da Degradação Sobre as Propriedades Mecânicas e Elétricas em Materiais Poliméricos de Ferramentais Usadas na Manutenção com Redes Energizadas	COPEL-D	375	Novas Alternativas para Sucessão de Empresas de Distribuição de Eletricidade	AESEIPA	469	Sistema de caracterização de perdas não técnicas baseado no perfil de consumidores para otimização de inspeções e recuperação de receita	COELDF	313	Metodologia de otimização para alocação de chaves automatizadas na rede CELG	CELG D	355	Otimização Energética Durante Partidas e Paradas de Processos Industriais	Tractebel Energia			

# Desenvolvimento do Cabeça-de-Série do Sistema de Monitoramento da Condição de Motores de Sistemas Auxiliares pela Análise da Assinatura Elétrica

Levy Ely de Lacerda de Oliveira, Erik Leandro Bonaldi, Jonas Guedes Borges da Silva, Ronan Nogueira Dias, Germano Lambert-Torres, Luiz Eduardo Borges da Silva, Paulo Henrique R. P. Gama

**Resumo** – Este artigo apresenta o trabalho em execução para desenvolvimento de três protótipos aperfeiçoados (cabeças-de-série) de um sistema de monitoramento remoto de motores de indução por análise da assinatura elétrica. O sistema visa ao monitoramento de motores de sistemas auxiliares de geração através do acompanhamento de parâmetros de seus espectros de corrente e tensão. Este sistema de monitoramento apresenta duas vantagens principais: apenas as fases do motor precisam ser acessíveis, cobrindo motores inacessíveis ou em locais de difícil acesso; 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. No processamento dos dados estão envolvidas técnicas de conjuntos aproximados e análise de componentes principais.

**Palavras-chave** – Assinatura Elétrica de Motores, Componentes Principais, Conjuntos Aproximados, Manutenção Preditiva, 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.

A manutenção preditiva é um dos tipos de manutenção mais racionais, pois se baseia na programação antecipada de intervenções, com base em uma avaliação de parâmetros indicativos da condição de operação de uma determinada máquina. A relação custo/benefício desta manutenção é apontada como a melhor em comparação aos outros tipos [1].

Neste projeto, desenvolvem-se 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.

Especificamente, o resultado esperado para este projeto é o desenvolvimento de um cabeça-de-série de um sistema de *hardware* e *software* para aplicação da técnica de análise da assinatura elétrica. O núcleo de *hardware* é constituído de um sistema remoto para aquisição de sinais elétricos, via rede ethernet, e de transdutores de corrente e tensão. O *software* é um aplicativo para o gerenciamento das coletas, processamento de sinais e auxílio ao diagnóstico.

Ao final, com o emprego das ferramentas desenvolvidas, espera-se contribuir para o aumento de disponibilidade dos sistemas de geração.

O projeto em questão é intitulado “Desenvolvimento do Cabeça-de-Série do Sistema de Monitoramento da Condição de Motores de Sistemas Auxiliares pela Análise de Assinatura Elétrica” e está inscrito na ANEEL sob o código TPE 33. Este projeto se encontra em execução e envolve as seguintes entidades participantes: CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação, Instituição Executora; Iberdrola Empreendimentos do Brasil, Instituição Consultora; e Termopernambuco S/A, Instituição Proponente.

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

### A. 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 monitoramento 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 (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].

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

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

R. N. Dias trabalha na TermoPernambuco S/A (e-mail: Ronan@gmail.com). P.H.R.P. Gama é pesquisador da B&G Pesq. E Des. (e-mail: paulogama@bgpesquisa.com.br)

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 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 freqüente. 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, pode-se destacar:

- Desequilíbrio elétrico rotórico: trinca/quebra de barras ou de anel de curto-circuito do rotor;
- Desequilíbrio elétrico estático: curto-circuito entre espiras no estador;
- Desbalanceamento mecânico: tanto do rotor em si quanto de cargas acopladas;
- 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 estática do motor. A base deste processo está nas variações do entreferro e ou nas oscilações de torque introduzidas pela anomalia.

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

### B. Padrão de Desequilíbrio Elétrico Rotórico

A detecção de barras quebradas ou trincadas através do espectro da corrente do estador 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 e mecânicos, cargas pulsantes, e 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.

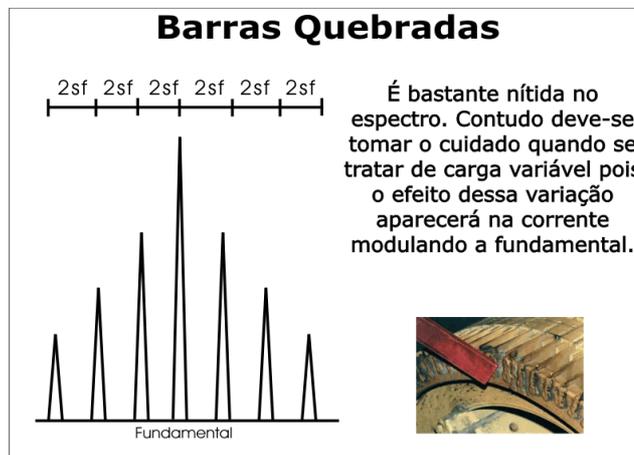


Figura 1. Esquema do padrão de barras-quebradas.

### C. 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 necessário 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 possibilidades ainda existem os aspectos construtivos que permitem um nível intrínseco 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 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 estático 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):

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

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.

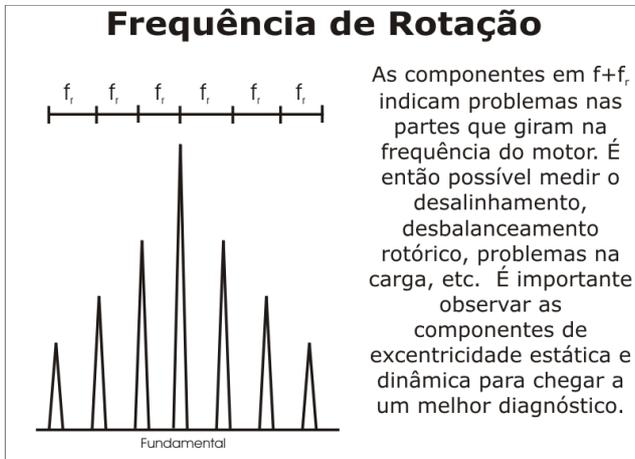


Figura 3. Esquema do padrão de excentricidade estática e dinâmica em baixa frequência.

#### D. 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 pode-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.

No caso das componentes relativas à correia, o padrão segue o esquema da figura 5. Além de se poder 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.

#### E. 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.

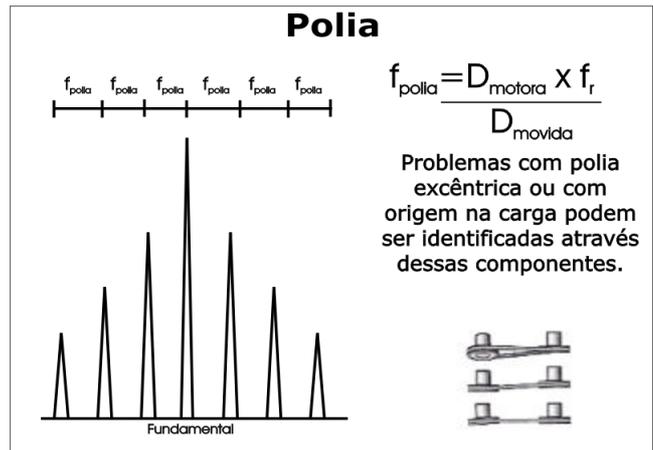


Figura 4. Esquema do padrão de falha na polia movida.

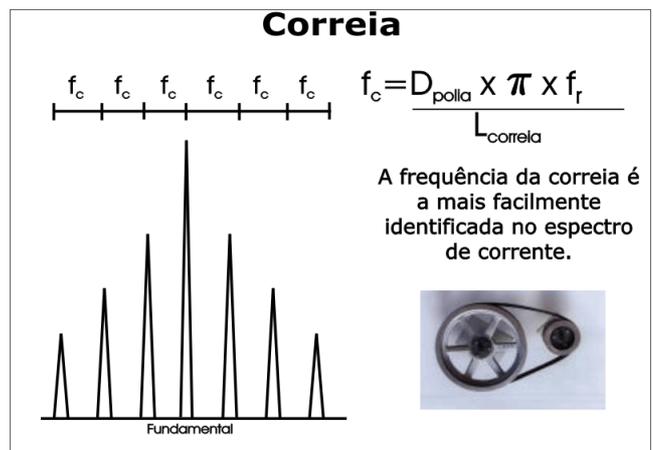


Figura 5. Esquema do padrão de falha em correia.

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.

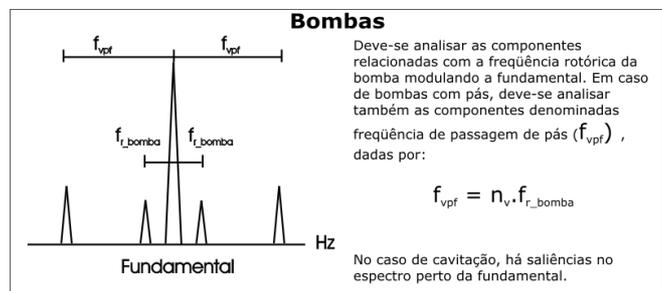


Figura 6. Esquema do padrão de falha em bombas centrífugas

### III. METODOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO

As ferramentas de mercado para aplicação desta técnica, em geral, estão voltadas para coleta manual de sinais *in locu* e dependem, portanto, da mobilização de um técnico coletor. Em geral, o *hardware* envolvido é uma maleta composta de

microcomputador laptop, associado a uma placa de aquisição de dados e os transdutores de corrente e tensão.

A idéia do projeto em questão é desenvolver um sistema de aquisição compacto e remoto que possa ser instalado em um painel sem a necessidade de instalação de um microcomputador conjuntamente. O sistema de aquisição estará conectado em rede e poderá ser comandado de qualquer computador também conectado e que possua o aplicativo.

É válido notar que sistemas remotos para aquisição de sinais com vistas à análise da assinatura elétrica existem, mas são muito poucos. A inovação está na criação de um sistema totalmente aberto ao usuário final, flexível em todos os seus aspectos e adaptado à aplicação final. Estas características não se encontram nos poucos produtos de mercado existentes.

A metodologia empregada para se conseguir os resultados almejados se iniciou com o estabelecimento de um projeto para desenvolvimento e validação de um protótipo. Conseguindo este objetivo, partiu-se para o presente projeto que visa ao desenvolvimento de um protótipo aperfeiçoado ou cabeça-de-série.

Em termos de hardware, a Tabela I, apresenta as principais diferenças de hardware entre o primeiro protótipo e o cabeça-de-série.

Tabela I – Comparativo entre Hardware do Protótipo e do Cabeça-de-Série

Característica	Protótipo	Cabeça-de-série
Alimentação	85 a 256Vca	5Vcc de fonte externa
Número de Canais	8 canais de aquisição multiplexados	6 canais de aquisição simultâneos
Características do Conversor. AD	Conversor AD de 16bits:	Conversor AD de 16bits:
	Freq. de Amostragem máxima do A/D: 100kHz	Freq. de amostragem máxima do A/D: 250kHz
	SINAD: 86 dB	SINAD: 82,5 dB
	ENOB: 14 bits	ENOB: 13,3 bits
	SFRD: 94 dB	SFRD: 93,5 dB
	INL: $\pm 3$ LSB (máximo)	INL: $\pm 3$ LSB (típico) e $\pm 8$ LSB (máximo)
Ganhos Programáveis	Ganhos ajustáveis de: 1, 2, 4 e 8	Ganhos ajustáveis de: 1, 2, 4 e 8
Frequência de amostragem	Frequências de amostragem disponíveis: 8,192kHz e 1,6384kHz	Frequências de amostragem disponíveis: 8,192kHz e 1,6384kHz
Características dos filtros anti-aliasing	Filtros anti-aliasing butterworth de oitava ordem, com 2 frequências de corte ajustáveis: 0,5kHz e 4,0kHz	Filtros anti-aliasing butterworth de quarta ordem, com 2 frequências de corte ajustáveis: 0,5kHz e 4,0kHz
Interface de comunicação	Interface para comunicação Ethernet em 10MBPS com conector RJ45	Interface para comunicação Ethernet em 10MBPS com conector RJ45
Conectores de Entrada	Conectores de entrada de sinal analógico do tipo BNC fêmea	Conectores de entrada de sinal analógico do tipo BNC fêmea
Entrada máxima sem saturação	Entrada máxima sem saturação do sinal analógico na entrada do AD: 3Vpico/ganho	Entrada máxima sem saturação do sinal analógico na entrada do AD: 3Vpico/ganho
Trigger	Não disponível	Configuração de trigger de aquisição por valor eficaz
Memória de sinal	Memória interna de 128kpontos, permitin-	Memória interna de 128kpontos, permitin-

	do uma resolução espectral de 0,0625Hz e 0,0125Hz, para as frequências de amostragem de 8,192kHz e 1,6384kHz, respectivamente	do uma resolução espectral de 0,0625Hz e 0,0125Hz, para as frequências de amostragem de 8,192kHz e 1,6384kHz, respectivamente
Dimensões	24,9 x 17,8 x 3,7cm (C x L x P)	15,1 x 12,5 x 5,0 (C x L x P)

As principais melhorias dizem respeito ao tipo e número de canais. O protótipo apresentava oito canais multiplexados o que permitia monitorar oito motores próximos, um de cada vez. No entanto, cada motor só poderia ter uma fase de corrente monitorada, ou seja, apenas a técnica de MCSA poderia ser empregada. Técnicas, como: IPSA e EPVA, não seriam possíveis. Além do mais, parâmetros comuns, como: potências e fatores de potência também ficariam de fora. Já o cabeça-de-série apresenta seis canais simultâneos, o que lhe permite monitorar desde seis motores, uma corrente para cada, até um motor, três tensões e três correntes, passando por todo tipo de situação intermediária.

Quanto às dimensões, houve uma melhoria considerável, pois a área de instalação foi reduzida de 443,22cm<sup>2</sup> (protótipo com fonte interna: 24,9 x 17,8cm, ver figura 7) para 241,25cm<sup>2</sup> (módulo de aquisição 15,1 x 12,5cm, ver figuras 8 e 9, e fonte externa 7 x 7,5cm). Além do mais, como, no cabeça-de-série, há a separação entre módulo de aquisição e fonte de alimentação, a sua instalação permite utilizar espaços não contínuos, o que é uma vantagem.

Outra melhoria foi a funcionalidade de gatilho de aquisição, adicionada ao cabeça-de-série, que permite colocar o hardware em espera até que determinado evento aconteça e, só então, adquirir um sinal. Isto é útil para o monitoramento de motores na partida ou quando só interessa a aquisição de sinais em uma determinada condição de carga.



Figura 7. Gabinete do protótipo.

A figura 8 e a figura 9 apresentam o desenho do gabinete do cabeça-de-série.

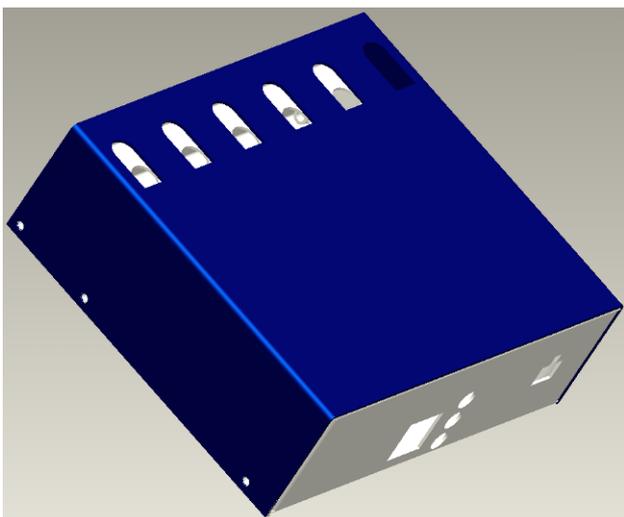


Figura 8. Desenho do gabinete do cabeça-de-série – fechado.

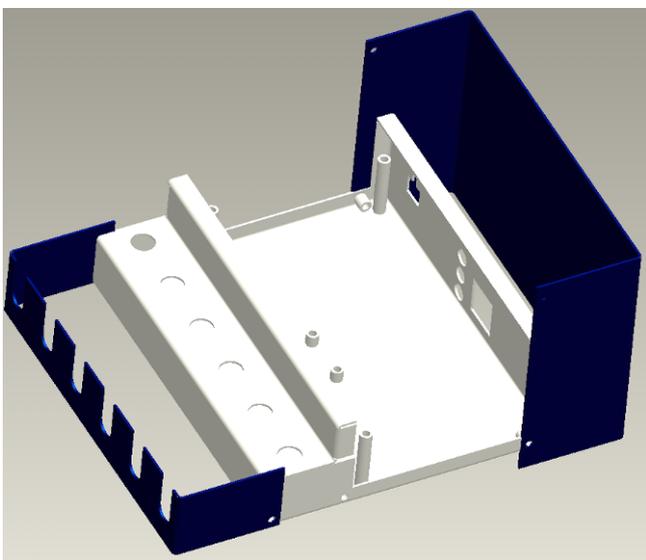


Figura 9. Desenho do gabinete do cabeça-de-série aberto.

#### IV. RESULTADOS PARCIAIS DO DESENVOLVIMENTO

Como o projeto se encontra aproximadamente em sua metade, serão apresentados os resultados parciais atingidos.

Todas as etapas desenvolvidas até o momento dizem respeito à parte de *hardware* do sistema, incluindo o módulo de aquisição e os transdutores de tensão e corrente.

O conjunto eletrônico de 3 unidades do cabeça-de-série já foi montado e testado quanto a operação básica e funcionalidades. A especificação técnica do cabeça-de-série é a mesma apresentada na Tabela I.

A figura 12 apresenta o conjunto eletrônico montado. A figura 13 apresenta o conjunto na bancada para teste. O conjunto eletrônico é constituído por três placas: a placa do circuito analógico, a placa do circuito digital e a placa do módulo microcontrolador (placa vermelha na figura 11). A placa do módulo microcontrolador se liga à placa digital que se liga, por sua vez, à placa analógica.

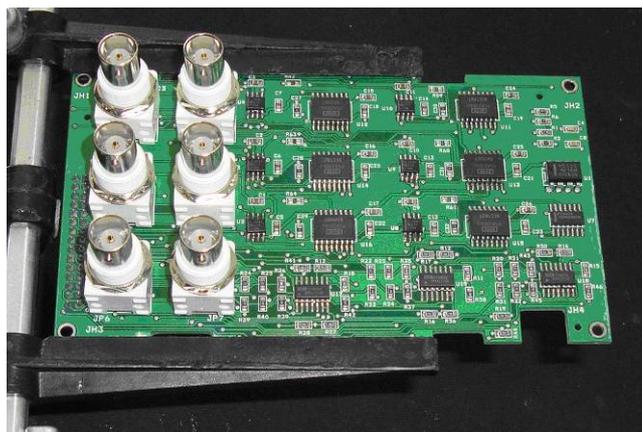


Figura 10. Placa do circuito analógico – vista superior.



Figura 11. Placa do circuito digital acoplada à placa do módulo microcontrolador – vista inferior.

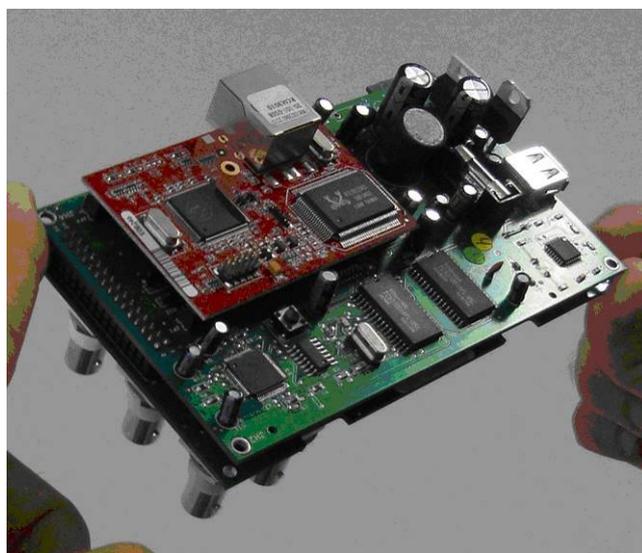


Figura 12. Conjunto eletrônico do cabeça-de-série – placa do circuito digital, placa do circuito analógico e módulo microcontrolador acoplados.

O conjunto foi testado em dispositivo de testes desenvolvido para este propósito. O dispositivo gera 6 sinais senoidais, com amplitude e fase arbitrários e compara os sinais gerados com os sinais medidos, através de um software. A

Tabela II apresenta os parâmetros de comparação entre os sinais gerados e os sinais medidos.

É importante ressaltar que os valores gerados se referem aos sinais digitais antes da conversão digital/analógica efetuada pelo dispositivo de teste, de modo que eles ainda so-

frerão uma distorção ao serem convertidos para sinais analógicos. Esta é, portanto, uma comparação de pior caso e, mesmo assim, os resultados são adequados para a aplicação.

As Tabelas III, IV e V fazem apresentam os mesmos resultados para os ganhos 2x, 4x e 8x.

Tabela II – Resultado do teste comparativo entre sinal gerado e sinal medido para o teste dos 6 canais com ganho 1x.

**Valores Gerados:**

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Média	2.75 mV	727 µV	-3.48 mV	2.43 mV	-3.6 mV	1.17 mV
Amplitude Máxima	2.5 V	2.5 V	2.5 V	2.5 V	2.5 V	2.5 V
Amplitude Mínima	-2.5 V	-2.5 V	-2.5 V	-2.5 V	-2.5 V	-2.5 V
Amplitude RMS	1.77 V	1.77 V	1.77 V	1.77 V	1.77 V	1.77 V
Frequência da Fundamental	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz
Amplitude da Fundamental	2.5 V	2.5 V	2.5 V	2.5 V	2.5 V	2.5 V
Fase da Fundamental	0°	240°	120°	270°	150°	30°
THD	0.02%	0.04%	0%	0.03%	0%	0.04%
Desequilíbrio	0%				0%	

**Valores Medidos:**

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Conversão A/D	Sinal está apropriado					
Média	-2.8 mV	14.3 mV	12.5 mV	6.33 mV	10.4 mV	-6.01 mV
Amplitude Máxima	2.52 V	2.53 V	2.53 V	2.52 V	2.52 V	2.5 V
Amplitude Mínima	-2.51 V	-2.48 V	-2.51 V	-2.5 V	-2.5 V	-2.51 V
Amplitude RMS	1.77 V	1.76 V	1.77 V	1.76 V	1.76 V	1.76 V
Frequência da Fundamental	60 Hz					
Amplitude da Fundamental	2.43 V	2.42 V	2.43 V	2.41 V	2.42 V	2.42 V
Fase da Fundamental	0°	240°	119.99°	270.02°	150°	30°
THD	0.25%	0.24%	0.25%	0.24%	0.25%	0.25%
Desequilíbrio	0.07%				0.04%	

Tabela III – Resultado do teste comparativo entre sinal gerado e sinal medido para o teste dos 6 canais com ganho 2x.

**Valores Gerados:**

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Média	1.56 mV	411 µV	-1.97 mV	1.37 mV	-2.04 mV	662 µV
Amplitude Máxima	1.41 V	1.41 V	1.41 V	1.41 V	1.41 V	1.41 V
Amplitude Mínima	-1.41 V	-1.41 V	-1.41 V	-1.41 V	-1.41 V	-1.41 V
Amplitude RMS	1E+03 mV	1 V	999 mV	1E+03 mV	999 mV	1 V
Frequência da Fundamental	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz
Amplitude da Fundamental	1.41 V	1.41 V	1.41 V	1.41 V	1.41 V	1.41 V
Fase da Fundamental	0°	240°	120°	270°	150°	30°
THD	0.02%	0.04%	0%	0.03%	0%	0.04%
Desequilíbrio	0%				0%	

**Valores Medidos:**

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Conversão A/D	Sinal está apropriado					
Média	-5.01 mV	15.5 mV	9.85 mV	8.33 mV	8.51 mV	-10.3 mV
Amplitude Máxima	1.42 V	1.43 V	1.43 V	1.42 V	1.43 V	1.42 V
Amplitude Mínima	-1.42 V	-1.4 V	-1.42 V	-1.41 V	-1.41 V	-1.43 V
Amplitude RMS	998 mV	996 mV	1 V	994 mV	997 mV	995 mV
Frequência da Fundamental	60 Hz					
Amplitude da Fundamental	1.37 V	1.37 V	1.37 V	1.36 V	1.37 V	1.37 V
Fase da Fundamental	0°	240°	119.99°	270.02°	150°	30.01°
THD	0.24%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.24%
Desequilíbrio	0.08%				0.04%	

Tabela IV – Resultado do teste comparativo entre sinal gerado e sinal medido para o teste dos 6 canais com ganho 4x.

**Valores Gerados:**

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Média	725 $\mu$ V	191 $\mu$ V	-916 $\mu$ V	639 $\mu$ V	-947 $\mu$ V	308 $\mu$ V
Amplitude Máxima	658 mV	658 mV	658 mV	658 mV	658 mV	658 mV
Amplitude Mínima	-658 mV	-658 mV	-658 mV	-658 mV	-658 mV	-658 mV
Amplitude RMS	465 mV	465 mV	465 mV	465 mV	465 mV	465 mV
Frequência da Fundamental	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz
Amplitude da Fundamental	658 mV	658 mV	658 mV	658 mV	658 mV	658 mV
Fase da Fundamental	0°	240°	120°	270°	150°	30°
THD	0.02%	0.04%	0%	0.03%	0%	0.04%
Desequilíbrio	0%			0%		

**Valores Medidos:**

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Conversão A/D	Sinal está apropriado					
Média	-2.35 mV	12.1 mV	9.57 mV	6.36 mV	6.52 mV	-7.88 mV
Amplitude Máxima	660 mV	672 mV	669 mV	667 mV	668 mV	652 mV
Amplitude Mínima	-663 mV	-647 mV	-655 mV	-656 mV	-659 mV	-667 mV
Amplitude RMS	465 mV	463 mV	465 mV	462 mV	464 mV	464 mV
Frequência da Fundamental	60 Hz					
Amplitude da Fundamental	638 mV	636 mV	639 mV	635 mV	637 mV	636 mV
Fase da Fundamental	0°	240°	119.99°	270.02°	150°	30°
THD	0.25%	0.25%	0.25%	0.24%	0.25%	0.25%
Desequilíbrio	0.07%			0.05%		

Tabela V – Resultado do teste comparativo entre sinal gerado e sinal medido para o teste dos 6 canais com ganho 8x.

**Valores Gerados:**

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Média	308 $\mu$ V	81.4 $\mu$ V	-390 $\mu$ V	272 $\mu$ V	-403 $\mu$ V	131 $\mu$ V
Amplitude Máxima	280 mV	280 mV	280 mV	280 mV	280 mV	280 mV
Amplitude Mínima	-280 mV	-280 mV	-280 mV	-280 mV	-280 mV	-280 mV
Amplitude RMS	198 mV	198 mV	198 mV	198 mV	198 mV	198 mV
Frequência da Fundamental	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz	59.9 Hz
Amplitude da Fundamental	280 mV	280 mV	280 mV	280 mV	280 mV	280 mV
Fase da Fundamental	0°	240°	120°	270°	150°	30°
THD	0.02%	0.04%	0%	0.03%	0%	0.04%
Desequilíbrio	0%			0%		

**Valores Medidos:**

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Conversão A/D	Sinal está apropriado					
Média	-1.08 mV	12.2 mV	9.15 mV	7.07 mV	5.9 mV	-7.35 mV
Amplitude Máxima	281 mV	294 mV	291 mV	290 mV	291 mV	275 mV
Amplitude Mínima	-283 mV	-271 mV	-275 mV	-277 mV	-278 mV	-289 mV
Amplitude RMS	198 mV	197 mV	198 mV	197 mV	197 mV	197 mV
Frequência da Fundamental	60 Hz					
Amplitude da Fundamental	272 mV	271 mV	272 mV	270 mV	271 mV	271 mV
Fase da Fundamental	0°	239.99°	119.98°	270.02°	150°	29.99°
THD	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%
Desequilíbrio	0.08%			0.05%		

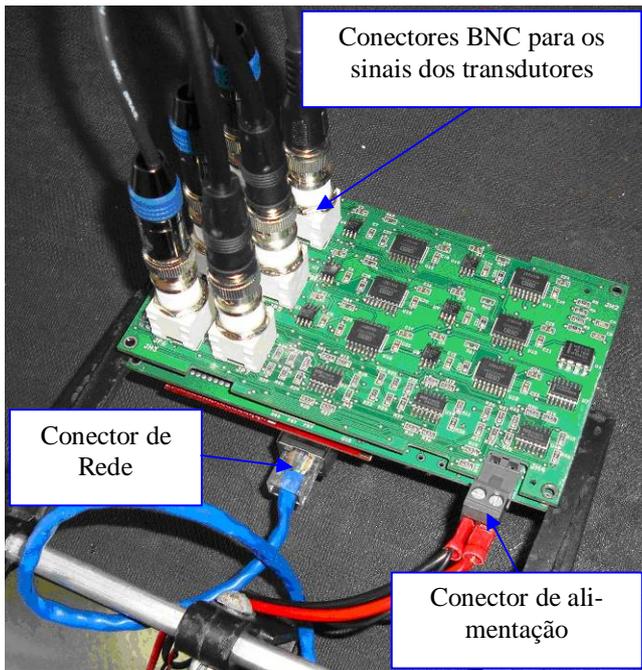


Figura 13. Conjunto eletrônico instalado em bancada para testes funcionais.

Além do conjunto eletrônico desenvolveram-se as especificações dos transdutores de corrente e tensão a serem utilizados com o módulo de aquisição. Os transdutores foram adquiridos e testados.

A figura 14 apresenta o transdutor de corrente especificado para medição de corrente diretamente nas fases do motor. Este transdutor é similar ao i1000s da Fluke, que foi utilizado no protótipo do primeiro projeto. As figuras 17 e 18 apresentam comparativos do espectro dos dois transdutores em regiões importantes do espectro. Outras comparações foram realizadas, aprovando este novo transdutor.



Figura 14. Especificação do transdutor de corrente para medição direta nas fases dos motores.

A figura 15 apresenta o transdutor de corrente especificado para medição de corrente no secundário de TCs de painel. As figuras 19 e 20 apresentam comparativos do espectro dos dois transdutores em regiões importantes do espectro. Outras comparações foram realizadas, aprovando este novo transdutor.

A figura 16 apresenta o transdutor de tensão para medição direta até 480Vca ou medição em secundário de TP de painel. As figuras 21 e 22 apresentam comparativos da tensão de entrada do transdutor e de sua saída, o sinal atenuado.

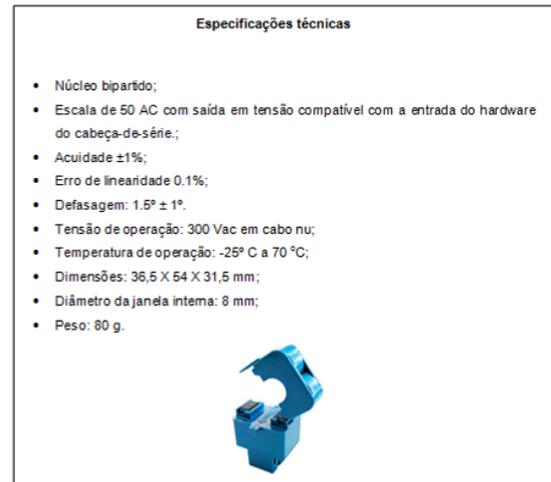


Figura 15. Especificação do transdutor de corrente para medição no secundário de TCs de painel.

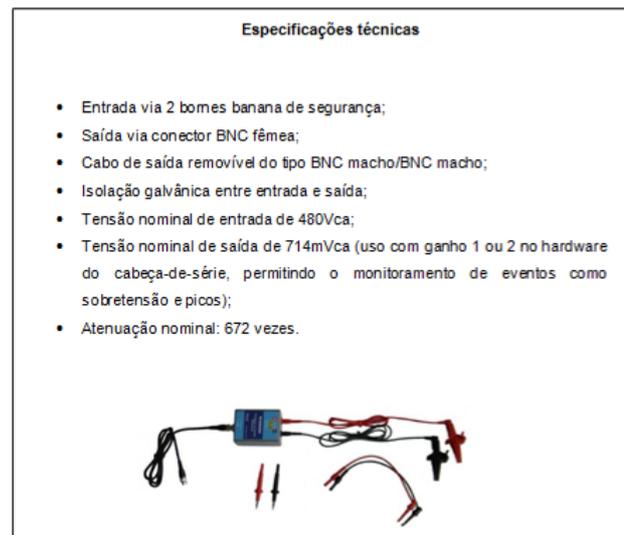


Figura 16. Especificação do transdutor de tensão para medição direta nas fases do motor até 480Vca ou medição em secundário de TP de painel.

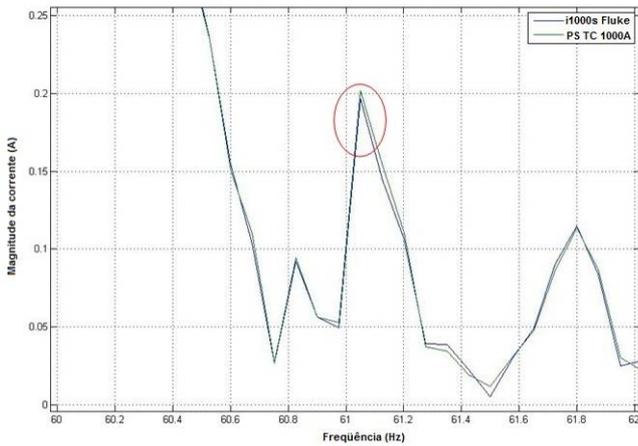


Figura 17. Comparativo de espectros entre o i1000s da Fluke e o PS TC 1000A na região da primeira componente da direita indicativa de desequilíbrio rotórico em um motor normal de 4 pólos.

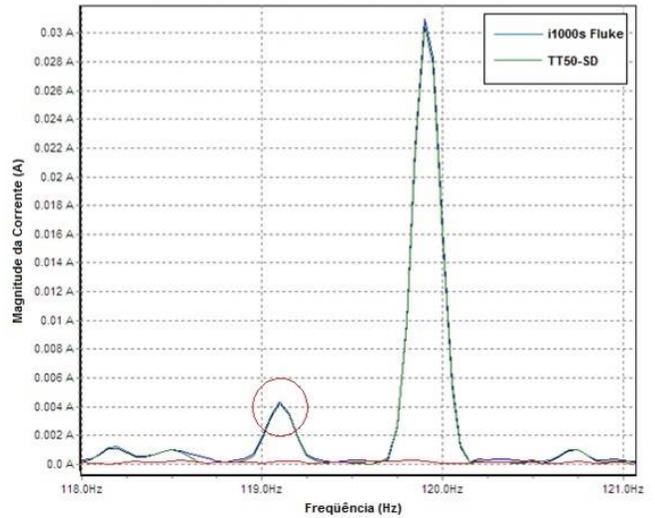


Figura 20. Comparativo de espectros entre o i1000s da Fluke e TT50-SD na região da primeira componente da direita indicativa de desbalanceamento/desalinamento rotórico em um motor normal de 2 pólos.

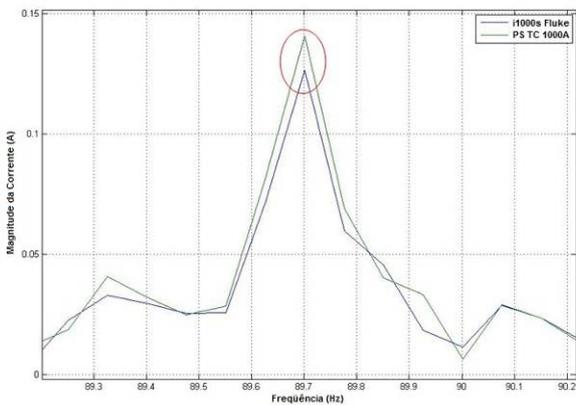


Figura 18. Comparativo de espectros entre o i1000s da Fluke e o PS TC 1000A na região da primeira componente da direita indicativa de desbalanceamento/desalinamento rotórico em um motor normal de 4 pólos.

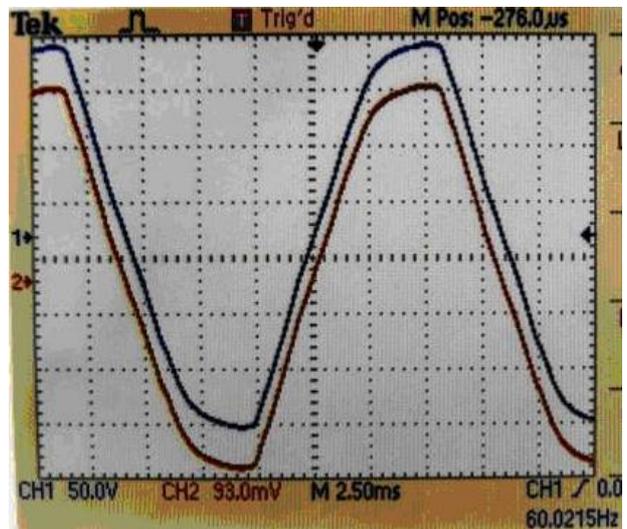


Figura 21. Comparativo entre tensão de entrada (azul) e tensão de saída do transdutor de cabeça de série (vermelho), medidas no osciloscópio e deslocadas na vertical para comparação.

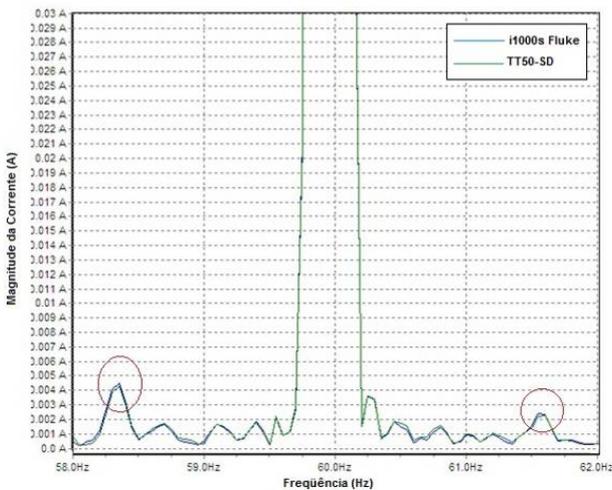


Figura 19. Comparativo de espectros entre o i1000s da Fluke e o TT 50 SD na região da primeira componente da direita indicativa de desequilíbrio rotórico em um motor normal de 2 pólos.

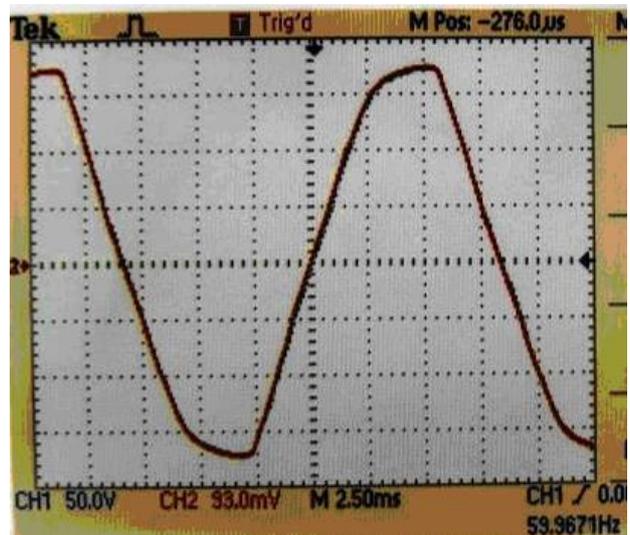


Figura 22. Comparativo entre tensão de entrada (azul) e tensão de saída do transdutor de cabeça de série (vermelho), medidas no osciloscópio e sobrepostas.

## V. BENEFÍCIOS AUFERIDOS

Uma vez que o projeto se encontra em fase de execução, não há ainda benefícios auferidos de sua aplicação. No entanto, já se podem sugerir formas de se medir este benefício.

O modo mais natural de se medir estes benefícios é a estimação da diferença entre o lucro cessante relacionado às paradas não-programadas evitadas e o lucro cessante relacionada à respectiva parada programada, com base no diagnóstico fornecido através do sistema desenvolvido, de acordo com (3):

$$E = \sum_i LNP_i - LP_i \quad (3)$$

onde E é a economia acumulada gerada pelo sistema, em reais;  $LNP_i$  é o lucro cessante da parada não-programada no evento i, em reais;  $LP_i$  é o lucro cessante da parada programada no evento i, em reais; e i é índice do evento. Vale ressaltar que, para o cálculo de E após a ocorrência de um evento n, os valores de LNP e LP para eventos anteriores devem ser corrigidos para a data do evento n.

Fica evidente, no entanto, que esta medição é dependente do surgimento de anomalias severas e detectáveis nos motores monitorados.

## VI. CONCLUSÕES

Uma visão geral do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento em execução e da técnica de Análise da Assinatura Elétrica foi apresentada.

Os desenvolvimentos relacionados à parte de *hardware* do sistema de monitoramento proposto foram também apresentados. Eles englobam o conjunto eletrônico do cabeça-de-série e os transdutores de corrente e tensão especificados.

Sugeriu-se ainda uma metodologia para medição dos benefícios do projeto após sua conclusão.

As atividades do projeto se encontram dentro dos prazos estabelecidos em seu cronograma.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. K. Pinto e J. A. Nascif, *Manutenção Função Estratégica*, Rio de Janeiro: QualityMark, 2001, p. 49.
- [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.