



## MONITORAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO ACIONADOS COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Isabela Oliveira Zaparoli\*<sup>1</sup>, Josemar de Souza Moreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PPGEL – Universidade Federal de São João Del Rei

**Resumo** - Os motores de indução têm papel importante na indústria. Uma vez que submetidos a perturbações na qualidade da energia, os mesmos podem funcionar de forma inadequada, comprometendo uma produção e causando perdas econômicas. Neste trabalho, apresenta-se uma contribuição à manutenção preditiva de motores elétricos utilizando um sistema composto por um aparelho portátil, associado a um software dedicado ao gerenciamento de dados, o equipamento Baker Explorer 3000 torna possível a análise de motores fornecendo informações como nível de tensão, desequilíbrio de tensão, fator de potência, potência consumida, torque, harmônicos, nível de corrente entre outras. Durante os testes foram simuladas cargas sobre o eixo do motor em 50%, 70%, 90%, 100% e 110%. O motor também foi submetido as condições de subtensão, sobretensão, desequilíbrio de fase e distorções harmônicas provenientes do inversor de frequência. A análise em tempo real sobre condições de funcionamento, possibilita a manutenção planejada e eficiente, aumentando a confiabilidade e disponibilidade de motores elétricos presentes nas indústrias.

**Palavras-Chave** - Análise Preditiva, Inversores de frequência, Motores de Indução, Potência Ativa, Corrente.

### PREDICTIVE MONITORING OF THREE-PHASE INDUCTION MACHINE OPERATED BY FREQUENCY INVERTERS

**Abstract** - Induction motors play an important role in the industry. Once subjected to disturbances in the quality of the energy, they can operate in an inadequate way, compromising a production and causing economic losses. In this work, a contribution is made to the predictive maintenance of electric motors using a system composed of a portable device, associated to a software dedicated to data management, the equipment Baker Explorer 3000 makes possible the analysis of motors providing information as voltage level, voltage unbalance,

power factor, power consumption, torque, harmonics, current level among others. During the tests, loads on the motor shaft were simulated at 50%, 70%, 90%, 100% and 110%. The motor has also been submitted to the conditions of undervoltage, overvoltage, phase unbalance and harmonic distortions from the frequency inverter. Real-time analysis of operating conditions enables planned and efficient maintenance, increasing the reliability and availability of electric motors in the industry.

**Keywords** - Active Power, Current, Frequency Inverters, Induction Motors, Predictive Analysis.

### I. INTRODUÇÃO

Com uma economia de mercados globalizada a concorrência entre as indústrias aumenta a cada dia. Isto leva a uma constante busca na diminuição dos custos dos produtos associada ao aumento da qualidade. Consequentemente, as máquinas passam a trabalhar de forma ininterrupta e submetidas a grandes velocidades. Com esse alto grau de produtividade, qualquer parada não programada (manutenção corretiva não planejada) causa grandes prejuízos. Portanto, uma melhoria no uso das técnicas de manutenção adequadas torna-se imprescindível. Conhecer as existentes, aprimorá-las e desenvolver novas tecnologias significam uma manutenção de melhor qualidade e, consequentemente, com menos tempo de horas paradas [1].

O motor de indução trifásico é o tipo de máquina elétrica mais difundido e utilizado nas indústrias. Isto se deve principalmente à sua robustez, rendimento aceitável e baixo custo. Ainda com advento de sistemas de controle de velocidade e torque aplicados a este tipo de motor, é comum sua utilização em processos críticos ou de grande importância para a planta, área antes dominada por motores de corrente contínua, [2].

As máquinas elétricas estão sujeitas a falhas que podem causar prejuízos econômicos e materiais às indústrias. O crescimento da competitividade e os novos desafios relacionados com o aumento da produtividade entre as indústrias têm exigido sistemas cada vez mais complexos e sofisticados, por isso, o sistema de monitoramento da condição dessas máquinas tem se tornado muito importante. Observa-se que a confiabilidade exigida para os motores

\* oliveirazaparoli@gmail.com

elétricos cresce constantemente devido à importância de suas aplicações e do avanço tecnológico. Neste cenário, o custo anual de manutenção representa, em média, 4,13% do faturamento bruto das empresas [3].

Segundo Murphy e Turnbull [4], inicialmente, a aplicação de inversores de frequência no acionamento de motores de indução veio acompanhada de diversos problemas, tais como: ventilação insuficiente em baixas rotações; perdas adicionais produzidas pelos harmônicos gerados pelo inversor; elevação da temperatura de operação da máquina, com possibilidade de redução da sua vida útil; oscilações no conjugado desenvolvido e problemas associados; dentre outros.

Em virtude dos avanços da eletrônica de potência e dos microprocessadores, realizados nas últimas décadas, tais problemas foram superados, embora outros como consequência, tenham surgido, [5] e [6]. Um deles é a ocorrência de oscilações transitórias de tensão nos terminais do motor, que, em alguns casos, podem alcançar valores que podem danificar o motor [7]. Casos críticos foram relatados onde a vida útil do motor foi reduzida a poucas semanas [8].

Com a industrialização, a proliferação de equipamentos eletrônicos é cada vez maior de forma a rentabilizar processos e otimizar lucros, levando a indústria a se preocupar cada vez mais com os parâmetros de qualidade de energia [9].

Os métodos tradicionais para diagnóstico de motores elétricos são de difícil aplicação requerendo equipamentos especializados. O uso de equipamentos com acessórios de avaliação da condição elétrica como alicate amperímetro e bobina de fluxo magnético não fornecem todos os parâmetros elétricos requeridos. Também não permitem um estudo eficiente da causa raiz do problema.

Motivado pela importância do acompanhamento preditivo de motores elétricos, principalmente no que se refere aos acionados por inversores de frequência, uma nova técnica de monitoramento é proposta neste trabalho. Trata-se de um sistema composto por um aparelho portátil, equipamento Baker Explorer 3000, associado a um software dedicado ao gerenciamento de dados. Através deste sistema é possível analisar o motor, seus componentes internos, a integridade do circuito de alimentação e a qualidade de alimentação. Também é possível estudar a influência dos inversores de frequência através do módulo VFD 3000 [10]. Essa opção demonstra como frequência, velocidade, torque e nível de tensão variam em relação ao tempo.

Justifica-se a escolha deste equipamento pela sua eficiência em análises que permitem o monitoramento *on-line* de todos os parâmetros elétricos requeridos proporcionando um estudo eficiente dos defeitos incipientes.

## II. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

O conceito de Qualidade de Energia está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Define-se bem o problema de qualidade de energia como sendo “Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos” [11]. Estas alterações ocorrem em várias partes do sistema de energia,

seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária.

### A. Variação da tensão

As máquinas elétricas são projetadas para funcionar com os níveis de tensão nominal de acordo com o especificado na sua placa de identificação. A operação acima ou abaixo do nível da tensão nominal terá como consequência o surgimento de correntes desequilibradas e não-senoidais, bem como um aumento na temperatura do motor.

De acordo com Mamede [12], considerando-se a instalação do motor num ponto do circuito em que a tensão está abaixo das condições nominais previstas (subtensão), as características destes são alteradas de acordo com os itens apresentados a seguir.

- Conjugado de partida diminui com o quadrado da tensão aplicada.
- Corrente de partida cai proporcionalmente à redução de tensão.
- Corrente a plena carga aumenta na mesma proporção.
- Fator de potência aumenta.
- Perdas estatísticas e rotóricas, em geral, também aumentam, aquecendo o enrolamento.
- Velocidade diminui, acarretando deficiências indesejáveis de ventilação.

Mamede [12] também afirma que, considerando-se a instalação do motor num ponto do circuito em que a tensão está acima das condições nominais previstas (sobretensão), as características destes são alteradas de acordo com os itens apresentados a seguir.

- Conjugado de partida aumenta com o quadrado da tensão.
- Corrente de plena carga diminui.
- Conjugado máximo aumenta com o quadrado da tensão.
- Fator de potência diminui.
- Perdas rotóricas e estatísticas, em geral, diminuem.
- Velocidade aumenta ligeiramente, melhorando as condições de troca de calor.

A NBR 17094:2013 classifica a tolerância à variação de tensão e frequência em motores de indução como Zona A e Zona B, conforme a Figura 1. De acordo com esta norma, um motor de indução trifásico deve operar com sucesso em condições de funcionamento à carga nominal na zona A, porém, pode não atender completamente suas características de desempenho, apresentando alguns desvios. Já na zona B o motor deve operar em condições de funcionamento à carga nominal mas pode apresentar desvios superiores aqueles da zona A. Dessa forma, recomenda-se evitar o funcionamento prolongado na periferia da zona B.

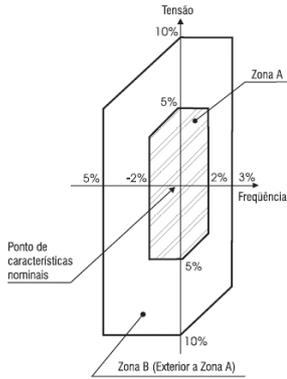
### B. Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as fases apresentam tensão com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos ou ainda, as duas condições simultaneamente [13].

A condição ideal do sistema trifásico caracteriza-se por tensões iguais entre fases e defasadas de 120° elétricos, representado em pu por:

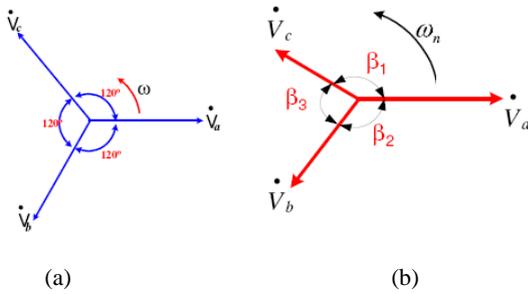
$$\vec{V}_a = 1,0 \angle 0^\circ \quad \vec{V}_b = 1,0 \angle -120^\circ \quad \vec{V}_c = 1,0 \angle 120^\circ$$

Figura 1: Limite das variações de tensão e de frequência. Fonte: ABNT [14].



A Figura 2 apresenta os exemplos de tensões equilibradas e tensões desequilibradas, respectivamente.

Figura 2: (a) Tensões Trifásicas Equilibradas, (b) Tensões trifásicas desequilibradas. Fonte: [13].



Segundo Ferreira [15], os desequilíbrios podem causar complicações nos motores de indução trifásicos conforme descrito a seguir.

- Surgimento de correntes de sequência negativa.
- Sobreaquecimentos e falhas dos dispositivos de proteção, implicando na redução da vida útil do MIT.
- Superaquecimento dos condutores acarretando uma maior solicitação do isolante, o que implica na diminuição da vida útil e no aumento das perdas.
- Manifestação de harmônicos não característicos devido a disparos desiguais nas válvulas retificadoras controladoras de equipamentos e cargas.

De acordo com Rezende [11], existem quatro métodos utilizados para a quantificação do desequilíbrio de tensão, que é dado por um fator K, Equação (1). São eles o método IEEE, o método NEMA, o método CIGRÉ e o método das componentes simétricas. O método IEEE e o método NEMA trabalham unicamente com os módulos das tensões, visto que muitos medidores de tensão não fornecem os valores angulares das tensões. Pelo método IEEE, o desequilíbrio de tensão pode ser quantificado por uma relação que expressa a maior diferença entre as tensões de linhas medidas e o somatório das mesmas.

$$K\% = \frac{3(V_{\max} - V_{\min})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} \times 100 \quad (1)$$

Onde,  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ , e  $V_{ca}$  correspondem aos módulos das tensões trifásicas, e  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$  são o maior e menor módulo das tensões de fase respectivamente.

A alteração na amplitude de tensão pode influenciar o fator de potência e a eficiência de motores elétricos, pois este equipamento é influenciado, diretamente, pelo valor da tensão de alimentação [16]. Normalmente, estes motores são projetados para suportar variações máximas numa faixa de 10% acima ou abaixo da tensão nominal.

### C. Distorção Harmônica

Distorção é a alteração em estado permanente da forma de onda de tensão ou corrente, que em função de cargas não lineares, distancia-se mais de ser idealmente senoidal [17]. Segundo Silva L. [17], as correntes harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares conectadas na rede de distribuição de energia elétrica. A circulação das correntes harmônicas gera tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação da tensão de alimentação.

Conhecidos os valores de tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema, utiliza-se de procedimentos quantitativos para expressar a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda.

Podem ser utilizados a "Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV) e a "Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI)", Equações (2) e (3), respectivamente, onde  $V_h$  é o valor eficaz da tensão de ordem "h";  $I_h$  é o valor eficaz da corrente de ordem "h";  $V_1$  é o valor eficaz da tensão fundamental;  $I_1$  é o valor eficaz da corrente fundamental e h é a ordem da componente harmônica. Esses procedimentos podem ser empregados tanto para sinais de tensões como para correntes.

$$DHTV = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h_{\max}} V_h^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (2)$$

$$DHTI = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h_{\max}} I_h^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (3)$$

## III. METODOLOGIA

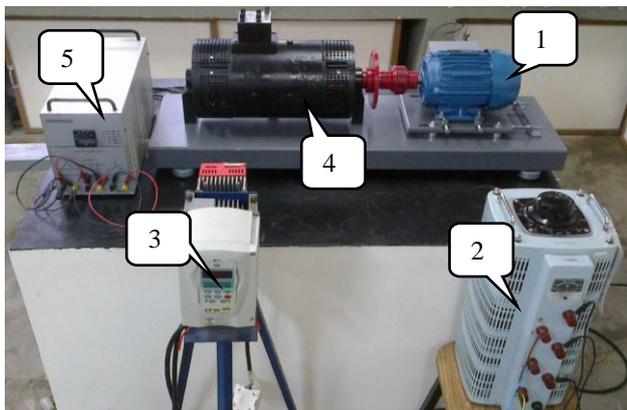
Os testes foram desenvolvidos em uma bancada (Figura 3), do Laboratório de Sistemas Dinâmicos (LASID) da Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ) onde foram analisados nível de tensão, desequilíbrio de tensão, fator de potência, potência consumida, torque, nível de corrente, desequilíbrio de corrente e distorção harmônica. A bancada é composta por um motor de indução trifásico {1}, WEG, 2 CV, 1750 rpm, 220V, 60 Hz, 4 polos, categoria N, 5,98 A, rendimento 84,2%. Para a alimentação do sistema foi utilizado o Varivolt trifásico {2} e o inversor de frequência WEG CFW 09 {3}.

O sistema de carga é composto por um motor CC funcionando como gerador de corrente contínua {4} MOTRON M610-VIRB-2K, 5 CV, 2000 rpm, alimentado por um gerador monofásico CC ligado aos terminais de campo, dessa forma a carga foi aplicada no motor através do ajuste da corrente de campo do gerador CC. Já os terminais de armadura foram ligados a um banco de resistores {5}.

Antes dos testes foram verificadas possíveis folgas mecânicas (base do motor) além do balanceamento dinâmico e alinhamento a laser. O inversor de frequência foi

parametrizado inserindo-se os dados de placa do motor e selecionando o controle escalar V/F 60 HZ.

Figura 3: Bancada de Testes do Laboratório de Sistemas Dinâmicos.



As análises do motor de indução trifásico foram feitas utilizando alicates amperímetro e conectores tipo jacaré, ambos os sensores integram o equipamento Baker Explorer 3000, Figura 4, tecnologia desenvolvida para monitoramento de equipamentos em operação (*on-line*) e monitoramento remoto do Centro de Controle do Motor (CCM), sendo uma unidade portátil e resistente para o uso nas situações mais críticas e agressivas.

Figura 4: Equipamento Baker Explorer 3000. Fonte: Baker [10].



Com a ligação dos alicates amperímetro e conectores tipo jacaré às três fases, os sinais foram processados e memorizados, possibilitando a análise através do próprio equipamento.

A Figura 5 apresenta o painel principal do programa, onde são exibidos no lado direito botões de domínio de testes. Cada botão permite acesso aos seus resultados de testes específicos. É atribuída uma cor a cada botão dependendo do resultado do teste, sendo que verde indica a máquina dentro da tolerância, nenhuma ação é necessária, amarelo indica cuidado, uma ação deve ser tomada para evitar problemas futuros, vermelho indica aviso, uma ação deve ser tomada para corrigir o problema já a cor azul indica que não há limites aplicáveis [10].

Para o desequilíbrio de fase, optou-se por não usar o inversor de frequência pois o mesmo apresenta uma saída equilibrada estando a alimentação da rede desequilibrada. A simulação do desequilíbrio foi feita conectando uma fase direto da rede e passando as outras duas pelo variômetro.

Na Figura 6, tem-se um gráfico fornecido pela WEG, obtido através de estudos que apresenta as curvas de rendimento, fator de potência, escorregamento e corrente em relação a potência fornecida. O gráfico em questão foi

utilizado para comparação e garantia da confiabilidade dos dados obtidos durante esta pesquisa.

Figura 5: Painel principal do programa. Fonte: Baker [10].

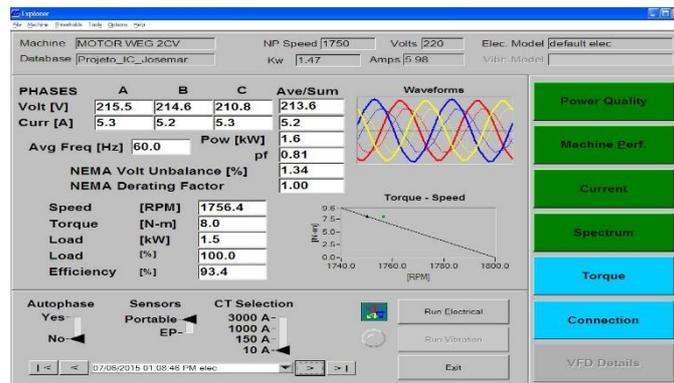
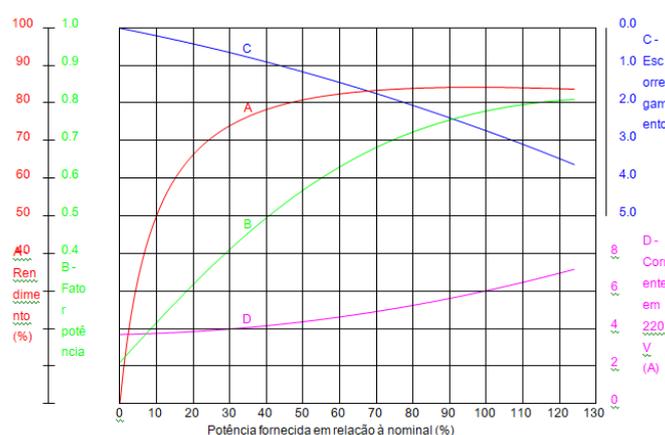


Figura 6: Curvas características em função da Potência. Fonte: Catálogo WEG [19].



#### IV. RESULTADOS

Na Tabela I, tem-se os dados obtidos através do Baker Explorer, relacionando nível de tensão, equilíbrio de tensão, fator de potência, potência consumida, torque, nível de corrente, desequilíbrio de corrente e distorção harmônica aos diferentes níveis de carga.

Tabela I: Análise com diferentes Níveis de Carga.

Dados	Percentual de Carga				
	50%	70%	90%	100%	110%
Carga no Eixo do Motor	218,27	218,49	214,35	213,64	213,46
Nível de Tensão (V)	1,26	1,4	1,28	1,34	1,09
Desequilíbrio de Tensão (%)	0,63	0,71	0,79	0,81	0,83
Fp (P.U)	740	1030	1320	1470	1620
Potência (W)	3,95	5,57	7,16	8	8,84
Torque (N.m)	3,59	4,08	4,82	5,25	5,7
Nível de Corrente (A)	0,88	0,93	0,97	0,95	0,95
Desequilíbrio de Corrente (%)	2,22	2,25	2,3	2,34	2,37
THD (%)					

Na Tabela II, tem-se os dados ao simular subtensões e sobretensões com o motor a plena carga.

Por se tratar de uma condição que pode rapidamente causar danos ao sistema, o desequilíbrio de fase foi simulado com uma carga de 9,5% no eixo do motor e posteriormente com cargas próximas a nominal (entre 97% e 98%). Na Tabela III, tem-se os dados obtidos nas três análises.

Tabela II: Análises com Subtensão e Sobretensão.

Dados	Subtensão		Sobretensão	
	7%	13%	6%	10%
Nível de Tensão (V)	204,9	191,16	233,78	242,76
Desequilíbrio de Tensão (%)	1,22	1,57	1,33	1,25
Fp (P.U)	0,83	0,85	0,76	0,72
Potência (W)	1470	1470	1480	1480
Torque (N.m)	7,99	8	8	7,98
Nível de Corrente (A)	5,36	5,63	5,15	5,18
Desequilíbrio de Corrente (%)	1,19	1,15	0,85	0,76
THD (%)	2,32	2,38	2,29	2,34

Tabela III: Análises com Desequilíbrio de Tensão.

Dados	Percentual de Carga		
Carga no Eixo do Motor	9,50%	98,60%	97%
Nível de Tensão (V)	223,61	220,03	213,66
Desequilíbrio de Tensão (%)	2,59	3	5,94
Fp (P.U)	0,15	0,79	0,79
Potência (W)	140	1450	1430
Torque (N.m)	0,74	7,92	7,82
Nível de Corrente (A)	2,84	5,21	5,36
Desequilíbrio de Corrente (%)	10,64	13,16	30,78
THD (%)	1,6	1,65	2,03

Ao observar os dados das simulações com diferentes cargas na condição normal, notou-se uma subtensão dentro dos limites aceitáveis. Os valores de distorção harmônica total THD, desequilíbrio de tensão e desequilíbrio de corrente também estão dentro dos limites aceitáveis não ultrapassando 5% no desequilíbrio de tensão.

Observou-se que na condição de plena carga, a leitura de corrente do motor é de 5,24 A ao invés de 5,98 A como informado na placa. A assistência técnica da WEG afirma que uma variação de até 5% da corrente é aceitável o que leva a afirmar que neste caso, o motor está se comportando de forma melhor que o esperado. O mesmo foi observado no fator de potência, que por ser maior que o dado de placa, indica que o motor está consumindo mais potência ativa. A Figura 6 apresenta o painel principal da análise em condições normais à plena carga.

Na condição de sobrecarga em 110% houve um pequeno aumento no fator de potência e os dados apresentados mantiveram-se dentro dos limites, visto que o fator de serviço do motor é de 1.15.

Ao simular subtensões de 7% e 13% com carga nominal, observou-se um aumento de corrente significativo na segunda análise, onde o nível de tensão está abaixo do determinado pela norma NBR 17094:2013. Já para as sobretensões de 6% e 10% notou-se uma redução do fator de potência.

Com o desequilíbrio de tensão ficou claramente comprovado a eficiência do Baker Explorer 3000 em alertar quanto aos limites estabelecidos para o bom funcionamento do motor. A Figura 7 ilustra o painel principal para a primeira condição de desequilíbrio à plena carga.

Os botões de Qualidade de energia e Corrente estão em amarelo, alertando atenção quanto aos desequilíbrios de tensão e corrente. As Figuras 8.a e 8.b informam o desequilíbrio percentual das tensões e correntes, respectivamente.

O segundo teste de desequilíbrio de tensão apresentou um aumento dos desequilíbrios de tensão e corrente. Na Figura 9, os botões de Qualidade de energia, Performance da máquina e Corrente estão em vermelho, alertando cuidado.

Nas Figuras 10.a e 10.b tem-se o desequilíbrio percentual das tensões e correntes, respectivamente.

Figura 7: Painel principal do primeiro teste de desequilíbrio à plena carga. Fonte: Baker [10].

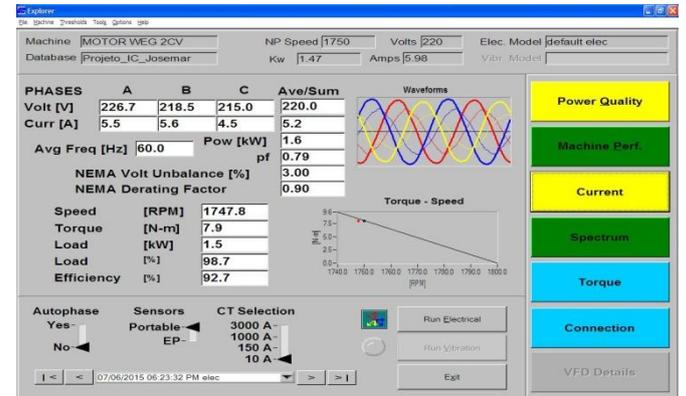
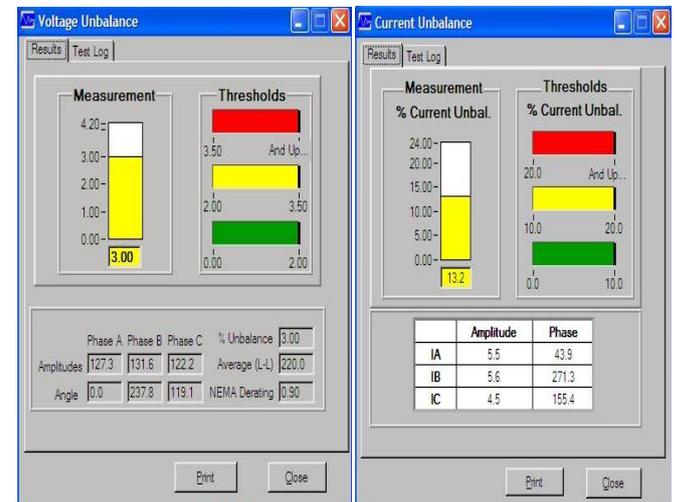


Figura 8: Desequilíbrio de tensão (a) e corrente (b). Fonte: Baker [10].



(a)

(b)

## V. CONCLUSÕES

Analisando os dados encontrados nesta pesquisa, pode-se concluir que as distorções harmônicas causadas pelo uso do inversor de frequência mantiveram-se dentro dos padrões aceitáveis para todas as condições de funcionamento.

Os valores de corrente do motor para as condições de funcionamento à plena carga foram menores que o valor nominal de placa. Isso implica dizer que o motor apresentou um desempenho melhor que o esperado. Além disso, os valores de fator de potência encontrados nos testes são maiores que o valor informado em placa.

De posse destas informações, aconselha-se não usar a corrente nominal informada em placa como parâmetro para afirmar que um motor está trabalhando à plena carga. Para isto, é necessário um estudo apurado com o auxílio de instrumentos que permitam determinar o valor real da carga no eixo do motor.

Figura 9: Painel principal do segundo teste de desequilíbrio à plena carga. Fonte: Baker [10].

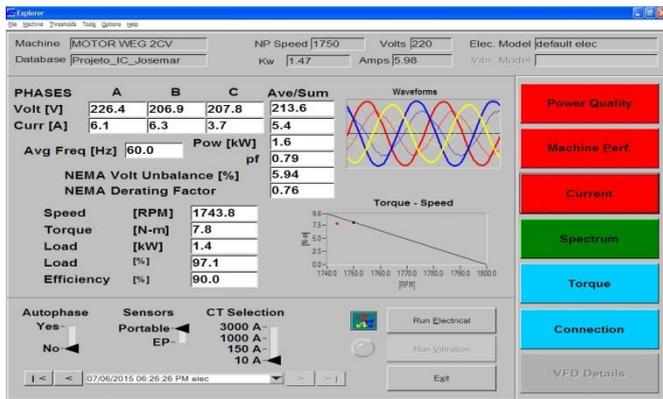
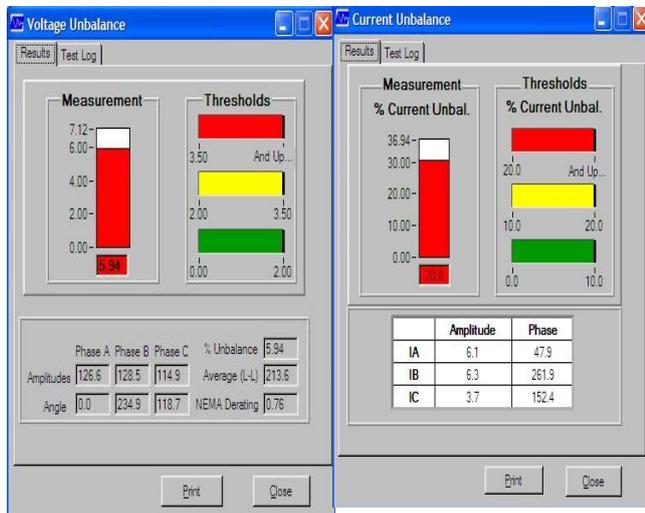


Figura 10: Desequilíbrio de tensão (a) e corrente (b). Fonte: Baker [10].



(a)

(b)

O uso da tecnologia Baker Explorer pode melhorar o plano de manutenção preditiva em plantas industriais, evitando paradas não planejadas, garantindo menores perdas na produção e aumentando a confiabilidade dos motores.

## REFERÊNCIAS

- [1] Brito, J. N., 2002. *Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 214p. Tese (Doutorado).
- [2] Silva, J. G. B., 2008. *Aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) no Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos através da Assinatura Elétrica de Motores de Indução*. Universidade Federal de Itajubá. Tese (Doutorado).
- [3] Kardec, A., Nascif, J., 2009. *Manutenção: Função Estratégica*. Qualitymark Ed., Rio de Janeiro, 384 p, ISBN 85-7303-898-5, Terceira Edição.
- [4] Murphy, J. M. D. and Turnbull F. G., 1989. *Power Electronic Control of AC Motors*. Pergamom Press, Second Edition.
- [5] Kerkman R. J., 1996. Twenty Years of PWM AC Drives: When Secondary Issues Become Primary Concerns. IEEE 22o IECON, vol. 1, pp. LVII-LXIII.
- [6] Saunders L. A., Skibinski G. L., Evon S. T. and Kempke D. L., 1996. *Riding the Reflected Wave - IGBT Drive Technology Demands New Motor and Cable Considerations*. IEEE 43rd IAS Annual Meeting, pp. 75-84.
- [7] Kerkman R. J., Leggate D. and Skibinsky G. L., 1997. *Interaction of drive modulation and cable parameters on AC motor transients*. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 33, n. 3, pp. 722-731.
- [8] Fenger M., Campbell S. R. and J. Pedersen, 2002. *Dealing with Motor Winding Problems Caused by Inverter Drives*. IEEE 44th IAS Annual Meeting, pp. 65-76.
- [9] Gonçalves, J. A. R. 2008. *Estudo do Comportamento do Motor de Indução Trifásico Sujeito a Perturbações na Qualidade da Energia*. Leiria: Faculdade de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 164p. Dissertação (Mestrado).
- [10] Baker, I. C., 2013. *User's Manual EXP3000/EXP3000R*. Baker Instrument Company. Avenue Suite 100 Fort Collins, CO 80525.
- [11] Rezende, P. H. O., 2013. Samesima, M. I., 2013. *Efeitos do Desequilíbrio de Tensões de Suprimentos nos Motores de Indução*. Horizonte Científico, v. 6, n. 2.
- [12] Mamede, J., 1997. *Instalações Elétricas Industriais*. 5ª edição. LCT - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 656 p.
- [13] Ferreira Filho, A. L.; Oliveira, M. A.; Pinto, M. G. S., 2005 *Ferramenta computacional para quantificação do desequilíbrio de tensão*. Seminário Brasileiro em Qualidade de Energia Elétrica. Belém. NESC, p.93-98.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17094: Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução - Parte 1:Trifásicos. Novembro de 2013.
- [15] Ferreira Filho, A. L., 2008. *Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão*, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 163p. Tese (Doutorado).
- [16] Faiz, J.; Ebrahimour, H.; Pillay, P., 2006. *Influence of unbalanced voltage supply on efficiency of three phase squirrel cage induction motor and economic analysis*. Energy Conversion and Management, v.47, n.3, p.289-302.
- [17] Lamim Filho, P. C. M., 2007. *Monitoramento "On-Line" de Motores de Indução Trifásicos*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Tese (Doutorado).
- [18] Silva, L.C.E. 2008. *Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa*. Universidade Estadual Paulista, 203 p. Dissertação (Mestrado).
- [19] WEG. Ecatalog. Disponível em: [http://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_motor\\_curva\\_web.asp](http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_curva_web.asp). Acesso em: 03/07/2015.