



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Monitoramento e Simulação de Motores sob Condições Não-Ideais: Efeito Combinado Desequilíbrio e Distorção Harmônica

Nelson C. de Jesus	Edson Luis Batista
AES Sul	AES Sul
nelson.jesus@aes.com	edson.batista@aes.com

Palavras-chave

Desequilíbrios

Harmônicos

Monitoramento

Simulações

Resumo

Este trabalho apresenta resultados de monitoramento da operação de motores de indução trifásicos sob condições fortemente distorcidas e desequilibradas. Com o objetivo de dar suporte as análises dos casos, foram realizadas também simulações do sistema a partir da modelagem no programa de transitórios eletromagnéticos ATPDRAW.

1. Introdução

Neste trabalho realiza-se uma análise e avaliação das condições de operação e desempenho do sistema, enfocando-se a operação de motores de indução utilizados no acionamento de sistemas de irrigação por meio de pivô central. O problema detectado preliminarmente referia-se a diferença entre as correntes trifásicas solicitadas pelos motores. De qualquer modo, tornou-se necessário uma verificação da qualidade da tensão, incluindo os níveis das tensões eficazes de fornecimento e regulação, bem como a conformidade da onda de tensão quanto aos aspectos de desequilíbrio e distorção harmônica. Cabe salientar que, normalmente, tensões idealmente senoidais e equilibradas não se constituem sob condições práticas atualmente no sistema elétrico, em função de sua própria dinâmica. Isso é particularmente fundamentado em sistemas com baixo nível de curto-circuito. Além disso, sabe-se da teoria de motores de indução que pequenos desequilíbrios de tensão geram grandes desequilíbrios nas correntes, os quais são prejudiciais ao funcionamento de máquinas girantes. Inicialmente, apresentou-se os limites globais recomendados, os quais foram adotados como referência, ou seja, um limite de 2% para o fator de desequilíbrio das tensões e um limite de 6% em relação a máxima distorção harmônica das tensões [1]. De forma aproximada, o fator de desequilíbrio entre as correntes é proporcional ao fator de desequilíbrio das tensões e da relação de impedâncias de seqüência positiva e negativa, a qual tem correspondência com a relação IP/IN, motivo pelo qual, naturalmente, os desequilíbrios das correntes são bem superiores aos das respectivas tensões aplicadas aos motores [2],[3],[4]. Os primeiros resultados das medições foram obtidos junto aos terminais de um motor de 125 CV conexão delta. Neste sentido, obteve-se desequilíbrios na ordem de 11%, considerando o

desvio máximo entre as correntes médias e fator de desequilíbrio médio para as tensões na ordem de 1,15%, considerando, portanto, uma operação dentro dos limites práticos de operação. Estes valores podem ser considerados normais, pois, em termos de compatibilidade, a principal grandeza refere-se ao desequilíbrio das tensões, cujo limite é de 2%, portanto, não violado nestas condições. Entretanto, a corrente em uma das fases é superior ao valor nominal sem considerarmos o fator de serviço. Como destaque negativo, as distorções harmônicas das tensões e correntes foram excessivas, violando os limites adotados como referência para as tensões, as quais definem a conformidade do sistema. Ficou evidente a influência dos harmônicos de 5ª ordem das tensões nas respectivas correntes. Observa-se, portanto, efeitos sobrepostos que tendem a diminuir as características de desempenho do motor. No segundo momento do monitoramento, avaliou-se as condições em um outro ponto de captação, nos terminais de motores de 200 CV. Neste caso, as tensões eficazes também permaneceram dentro de uma faixa adequada e normal de operação. O fator de desequilíbrio ($U-/U+$) calculado pelos instrumentos foi sempre inferior ao de referência, com um valor médio de 1,55%. Mais uma vez, as distorções harmônicas das tensões foram significativas e acima dos limites adotados. Por outro lado, nota-se uma diferença entre as correntes das fases próxima a 50 [A] em regime, o que resulta em desequilíbrio em torno de 20%, utilizando o mesmo método do desvio máximo entre as fases (NEMA). Verificou-se, no geral, que, em termos das tensões, as distorções harmônicas são relativamente altas e, tomando como base as correntes, o respectivo desequilíbrio é também significativo, o que induz a considerar que, sob estas condições, os motores operam sob tensões e correntes não-ideais, ou seja, não-senoidais e desequilibradas. Por tal fato, tem-se uma alteração das características de funcionamento, uma vez que os mesmos são projetados para operarem sob condições ideais e próximos aos dados nominais [5],[6]. De acordo com a análise dos resultados, verificam-se os principais fatores que influenciam a operação do sistema, bem como as alternativas para manutenção de condições adequadas de operação dos motores de indução trifásicos.

2. Resultados de Monitoramento:

2.1 Caso 1: MOTOR MIT1 - 125 CV

Este item apresenta a análise dos resultados de monitoramento obtidos em um motor de 125 CV, cujos dados nominais são apresentados a seguir.

$$\begin{aligned}U_N &= 380 \text{ V} \\f_N &= 60 \text{ Hz} \\ \text{Conexão} &\Delta \\I_N &= 171 \text{ A} \\I_p/I_N &= 7,3 \\ \cos\phi_N &= 0,87 \\\eta_N &= 91,8\% \\FS &= 1,15\end{aligned}$$

Onde:

U_N	- Tensão nominal
f_N	- Frequência nominal
I_N	- Corrente nominal
I_p/I_N	- Relação corrente de partida e nominal
$\cos\phi_N$	- Fator de potência nominal
η_N	- Rendimento nominal
FS	- Fator de serviço

Sob condições de operação plena da carga, foram registradas as tensões e correntes solicitadas pelo motor. As tensões eficazes (fase-neutro) registradas nos terminais do motor são apresentadas na figura 1.

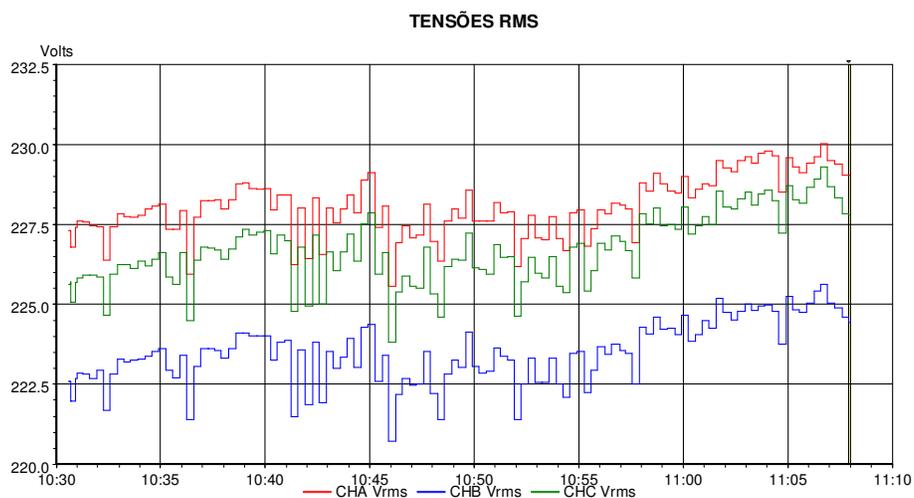


Figura 1 - Comportamento das tensões eficazes

O comportamento do fator de desequilíbrio das tensões é apresentado na figura 2, sendo que os níveis verificados ficaram na faixa de 1,08 a 1,23%, portanto, abaixo do limite recomendado de 2% [1].

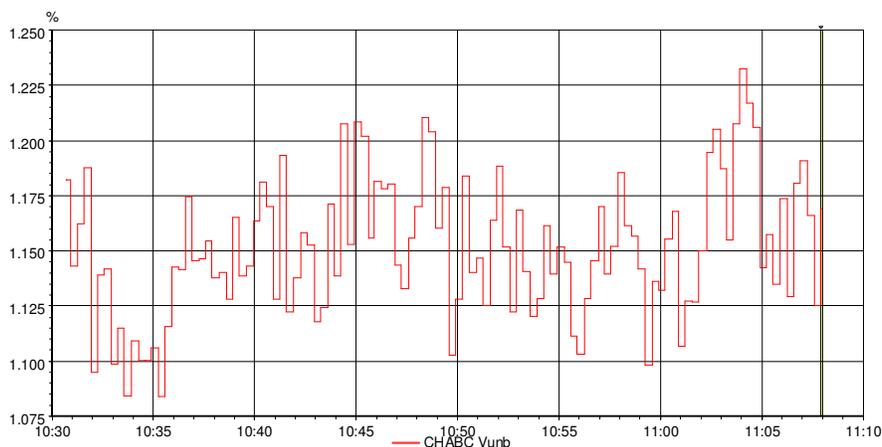


Figura 2 - Comportamento do fator de desequilíbrio das tensões

A figura 3 mostra as correntes trifásicas solicitadas pelo motor. Cabe salientar que as correntes permaneceram com um grau de desequilíbrio próximo a 11%, $(I_{MÁX}-I_{MIN})/I_{MED}$, o que implica em cerca de 20 A de diferença entre as fases A e B, visto que as correntes eficazes ficaram na média, com valores de 187,10 A para a fase A, 166,98 A para a fase B e 174,86 para a fase C. Se adotarmos o fator de acordo com a NEMA, calculando o desvio sobre o valor médio, o fator de desequilíbrio seria de 6,12%. Existe ainda a definição de seqüência negativa, que emprega o método dos componentes simétricos. De qualquer maneira, as fases A e C apresentam valores superiores aos nominais, excluindo-se o fator de serviço.

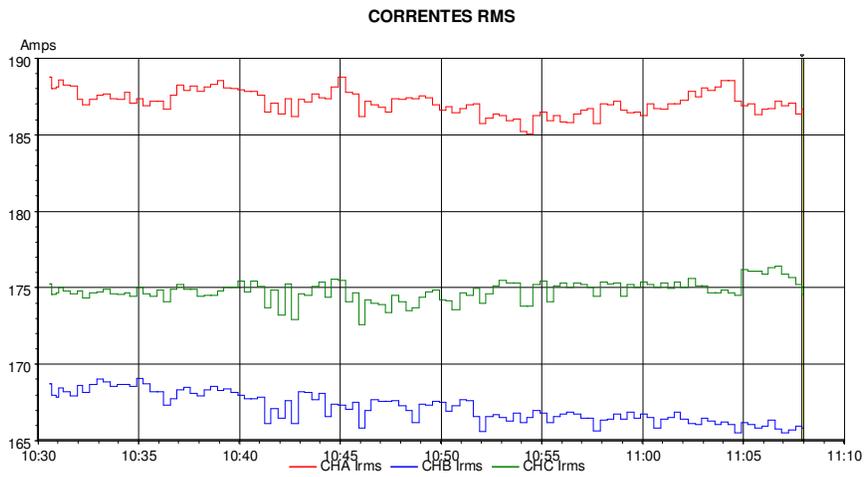


Figura 3 - Comportamento das correntes eficazes

O comportamento das tensões nos terminais do motor, quanto ao parâmetro de distorção harmônica total de tensão, pode ser visto na figura 4, sendo que para as fases B e C os valores apresentam relativa magnitude, superiores inclusive ao limite de 6%, adotado como referência para esta classe de tensão. A figura 5 mostra as distorções das correntes.

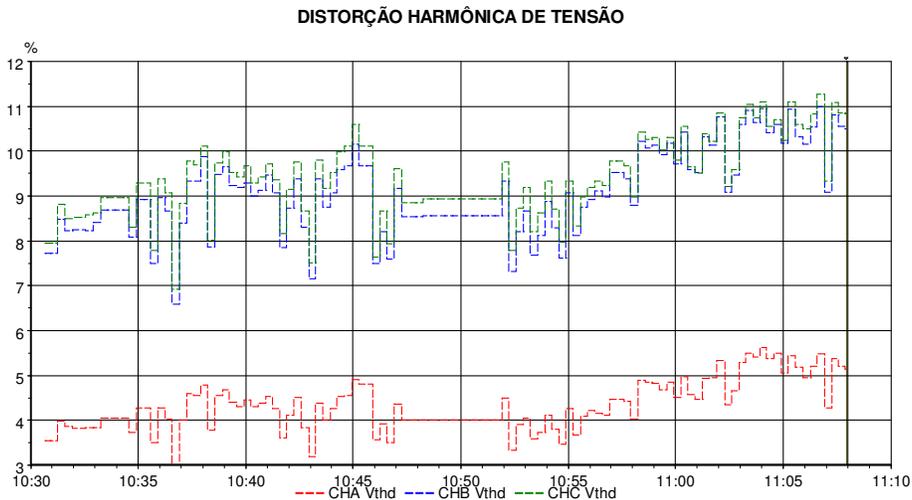


Figura 4 - Comportamento da distorção harmônica das tensões

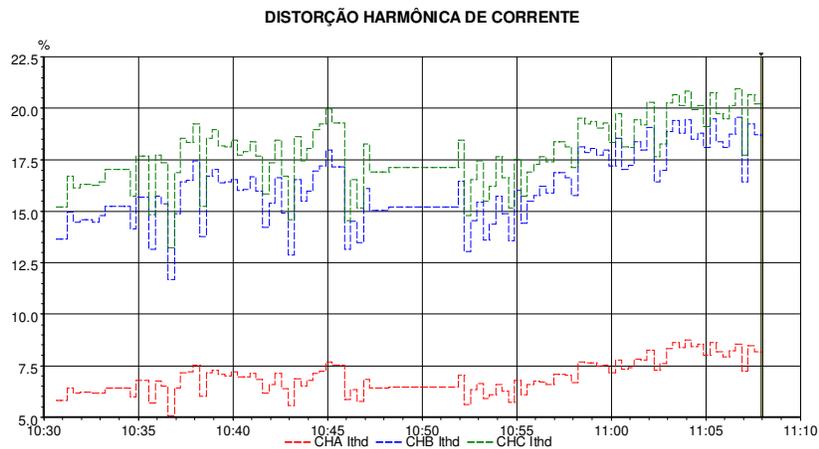


Figura 5 - Comportamento da distorção harmônica das correntes

As formas de onda das tensões registradas em um determinado ciclo no motor, para o mesmo intervalo anterior, são apresentadas na figura 6. Nota-se que as mesmas apresentam deformações nas três fases, ou seja, sob condições não-ideais no que se refere à conformidade da onda de tensão sob o aspecto de harmônicos.

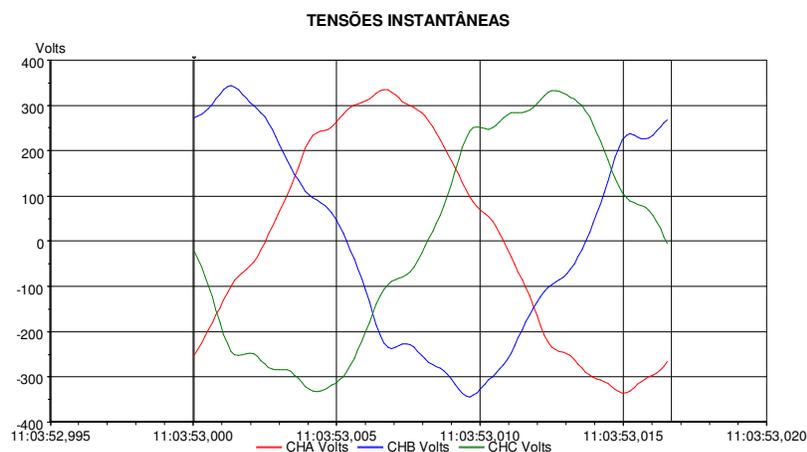


Figura 6 - Tensões instantâneas

A figura 7 ilustra o espectro harmônico da fase B, com valor de distorção total superior a 10% e, portanto, acima do limite recomendado para esta classe de tensão. Neste caso, observa-se que os principais harmônicos são os de 5º, 7º, 11º e 13º ordem. Dentre estes, o de maior magnitude é o componente de 5º ordem, sendo este um componente tipicamente de seqüência negativa, em sua condição equilibrada.

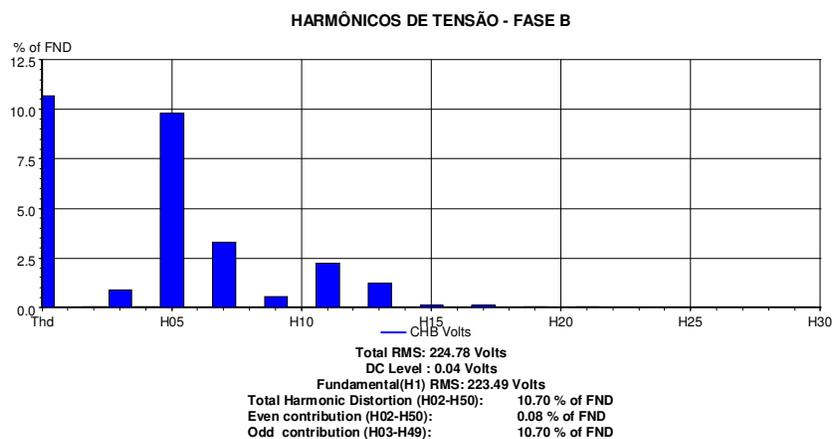


Figura 7 - Espectro harmônico de tensão da fase B

As correntes instantâneas no motor de indução trifásico de 125 CV são apresentadas na figura 8, onde somente a fase A apresenta característica ligeiramente próxima à onda idealmente senoidal.

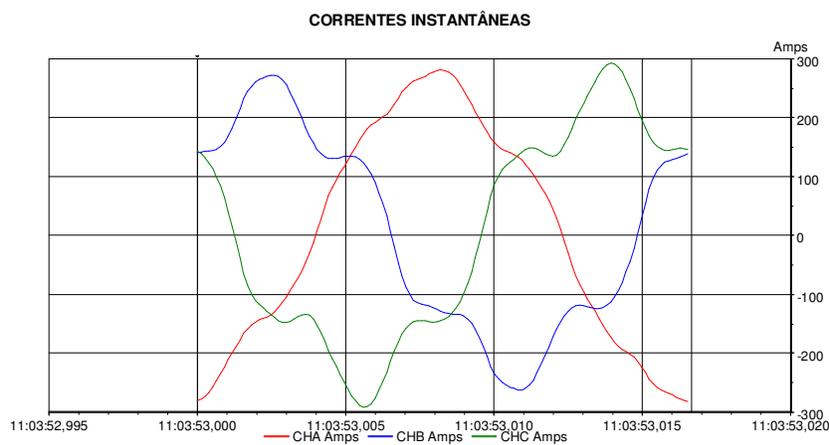


Figura 8 - Correntes instantâneas

A figura 9 apresenta o espectro harmônico da corrente nos terminais de entrada da fase B no referido motor, sendo esta, conjuntamente com a fase C, aquelas que apresentam os maiores valores de distorção total, em torno de 20%.

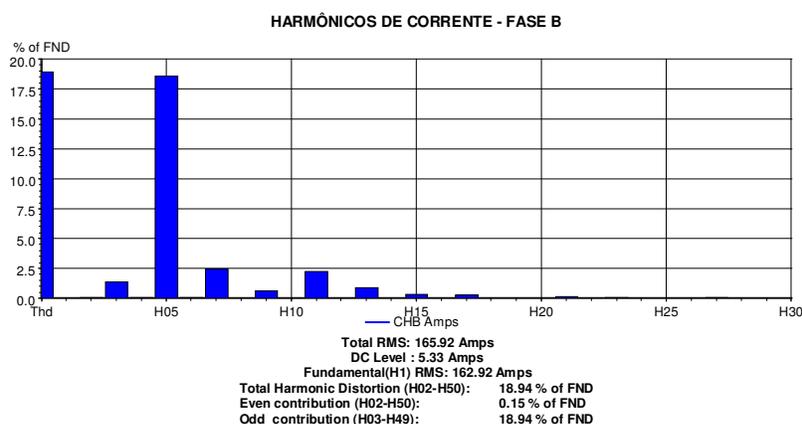


Figura 9 - Espectro harmônico de corrente da fase B

2.2 Caso 2: MOTOR MIT2 - 200 CV

Apresentam-se os resultados de monitoramento em outro ponto do sistema, obtidos em um motor de 200 CV, cujos dados nominais são apresentados a seguir.

$U_N = 380 \text{ V}$
 $f_N = 60 \text{ Hz}$
 Conexão Y
 $I_N = 280 \text{ A}$
 $I_p/I_N = 7,2$
 $\cos\varphi_N = 0,85$
 $\eta_N = 94,5\%$
 $FS = 1,1$

As tensões eficazes aquisitionadas nos terminais do motor são mostradas na figura 10. Neste ponto do sistema de distribuição foram registrados os maiores desequilíbrios nas correntes dos motores. Um outro registro importante observado no respectivo intervalo foi que o sistema de comando e proteção atuou por duas vezes (abertura do disjuntor geral), na tentativa insatisfatória de partida sob carga.

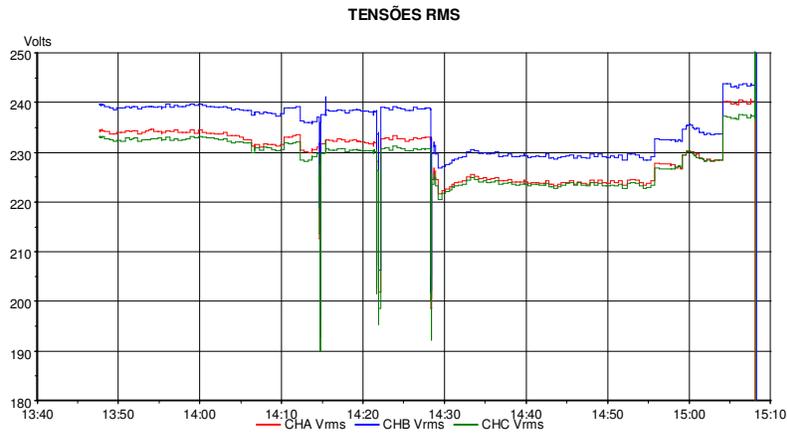


Figura 10 - Comportamento das tensões eficazes

As respectivas correntes eficazes são mostradas na figura 11.

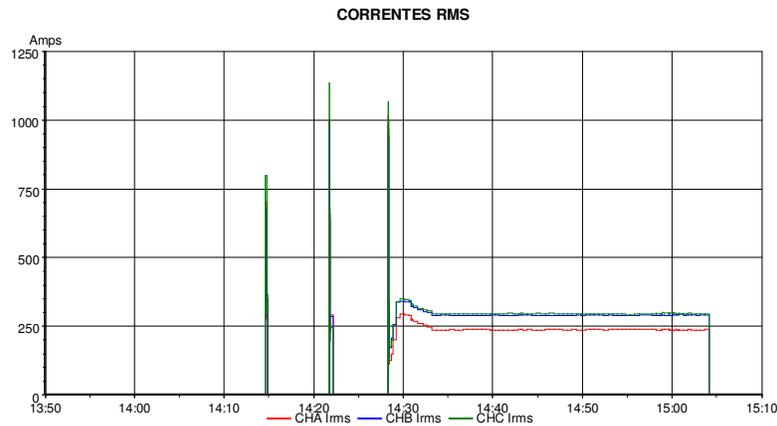


Figura 11 - Comportamento das correntes eficazes

Em função da ocorrência dos processos de partida, onde inclusive foram identificados problemas de operação com a atuação do sistema de proteção devido ao curto tempo de comutação do autotransformador durante a partida de um segundo motor, as correntes sob operação em regime são mostradas na figura 12. Neste caso, após o terceiro processo de partida, tem-se praticamente os mesmos níveis de desequilíbrios ($\cong 20\%$ se consideramos o desvio máximo das fases sobre a média). As fases B e C mostram novamente valores eficazes superiores aos nominais (280 A).

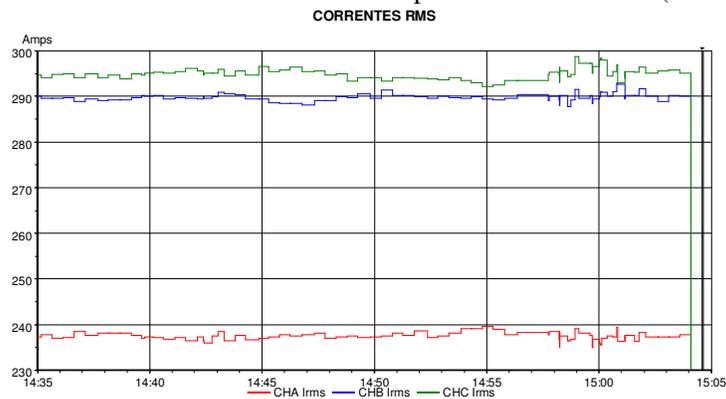


Figura 12 - Comportamento das correntes eficazes em regime

A figura 13 mostra a variação observada no fator de desequilíbrio das tensões, o qual diminui com a entrada em operação da carga. No período a vazio os valores máximos foram ligeiramente superiores ao de referência.

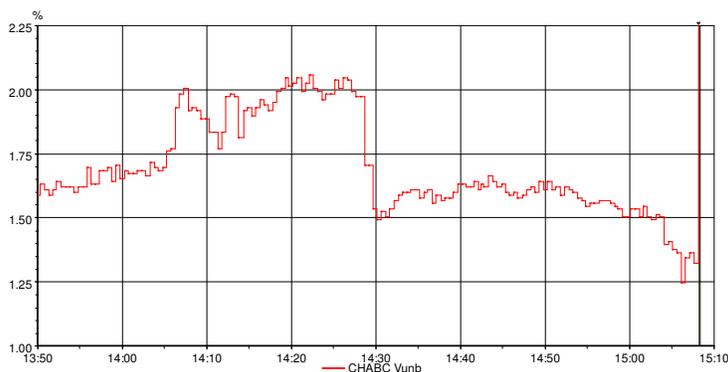


Figura 13 - Comportamento do fator de desequilíbrio das tensões

As distorções harmônicas, por outro lado, foram ainda mais significativas, excedendo sobremaneira o limite adotado. No período final das medições, a fase A atingiu valores superiores a 20%, já com a desconexão dos motores, como se verifica na figura 14. O comportamento das distorções nas correntes pode ser analisado pela figura 15, seguindo a mesma tendência de aumento com as elevações das tensões eficazes e respectivas distorções.

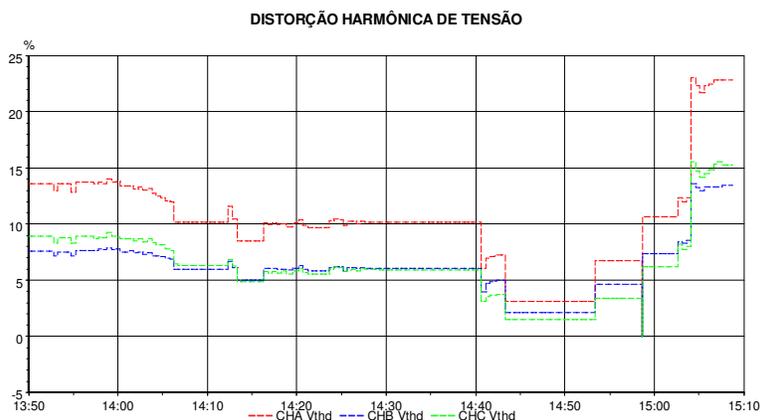


Figura 14 - Comportamento da distorção harmônica das tensões

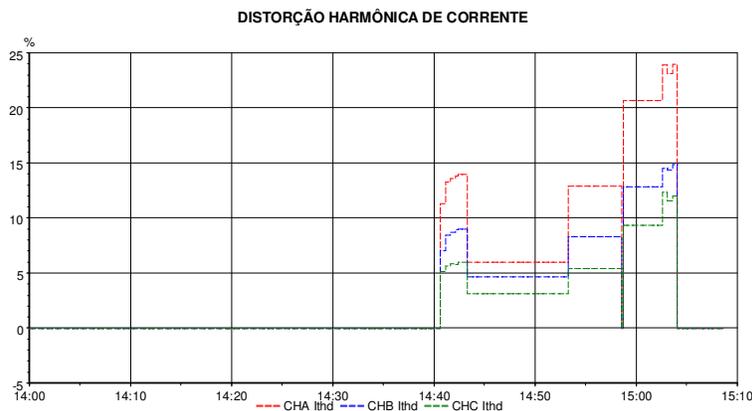


Figura 15 - Comportamento da distorção harmônica das correntes

Para um determinado momento do monitoramento, têm-se as tensões instantâneas sob condições de carga, como retratado na figura 16.

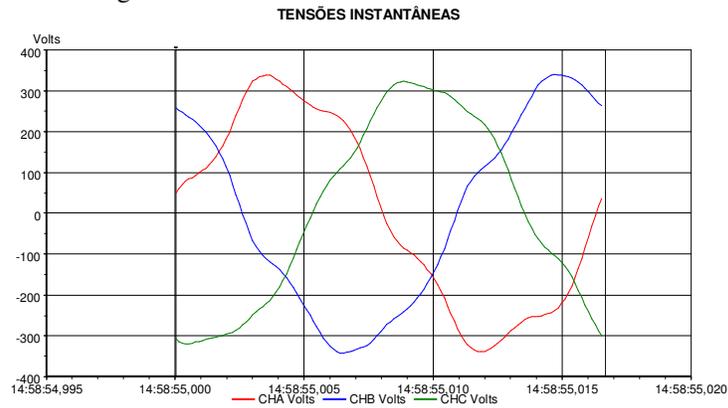


Figura 16 - Tensões instantâneas

Analisando a fase de maior distorção, tem-se o seguinte conteúdo harmônico e distorção total, como mostra a figura 17.

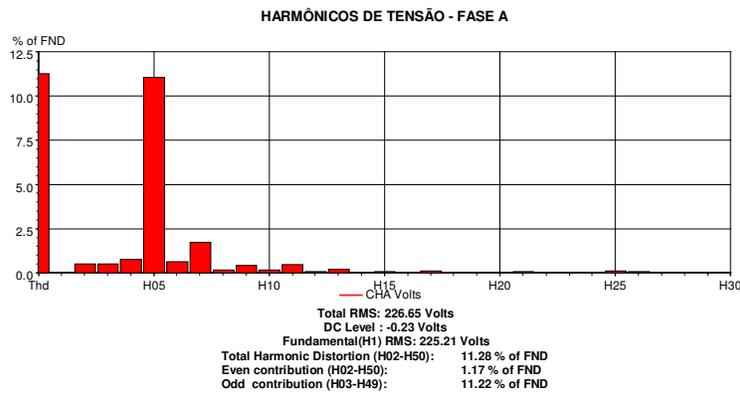


Figura 17 - Espectro harmônico de tensão da fase A

Para o mesmo ciclo das tensões mostradas na figura 16, têm-se as correntes equivalentes como mostra a figura 18. Já a figura 19 apresenta o espectro harmônico da corrente da fase A.

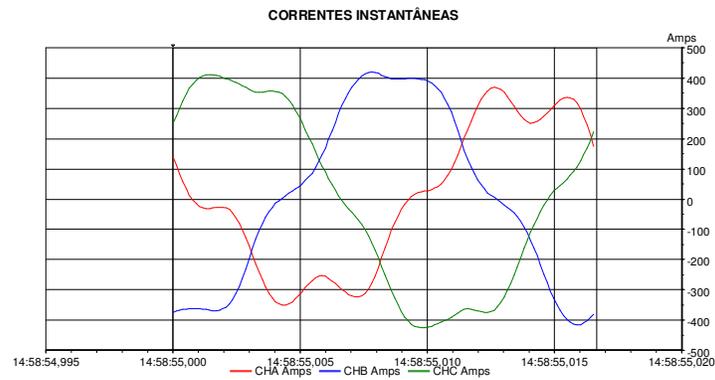


Figura 18 - Correntes instantâneas

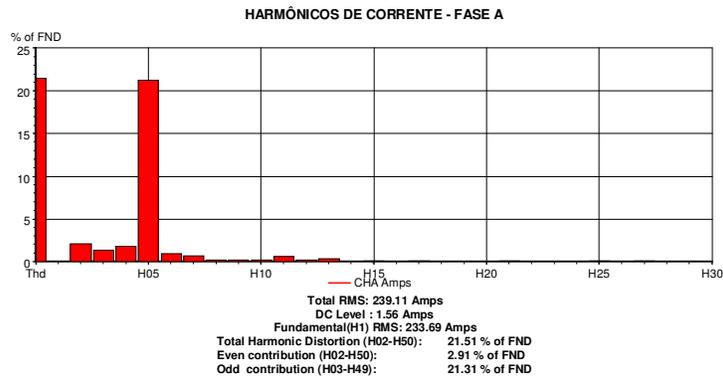


Figura 19 - Espectro harmônico de corrente da fase A

3. Resultado de Simulação:

Tomando-se como base um determinado instante do monitoramento no MIT de 200 CV, modelou-se de modo aproximado às respectivas formas de ondas das tensões aplicadas ao motor por meio das principais componentes harmônicas, incluindo-se as respectivas magnitudes e ângulos.

Os resultados das respostas das correntes são similares aos obtidos em campo, com uma pequena diferença de distorção. Este caso é considerado como base, no qual obteve-se as tensões e correntes apresentadas respectivamente nas figuras 20 e 21. A título de validação da modelagem, a figura 22 mostra os resultados reais das correntes obtidas em medições, comprovando-se a resposta do motor frente a condições não-ideais de alimentação.

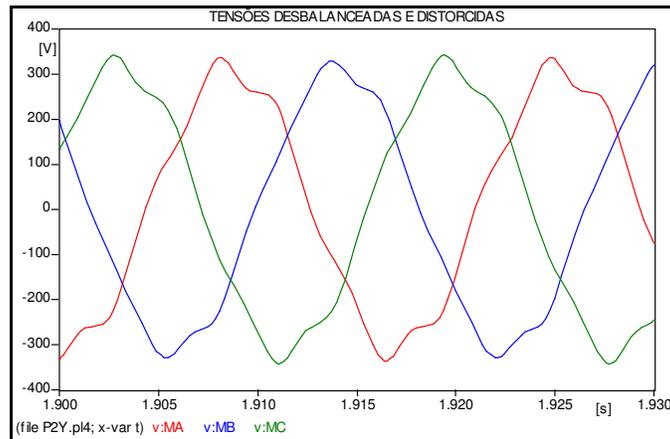


Figura 20 - Simulação das tensões a partir dos resultados das medições

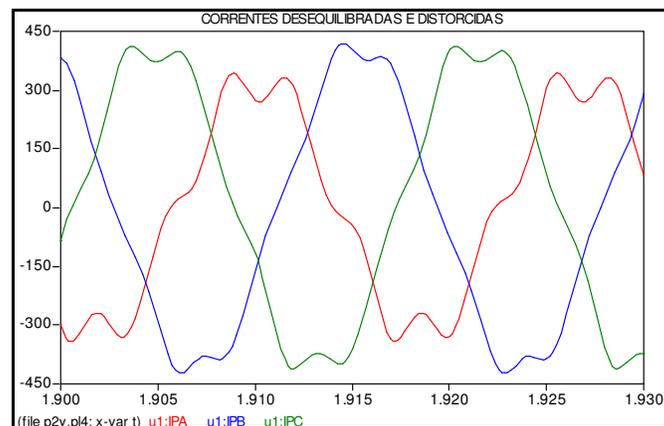


Figura 21 - Simulação das correntes a partir dos resultados das medições

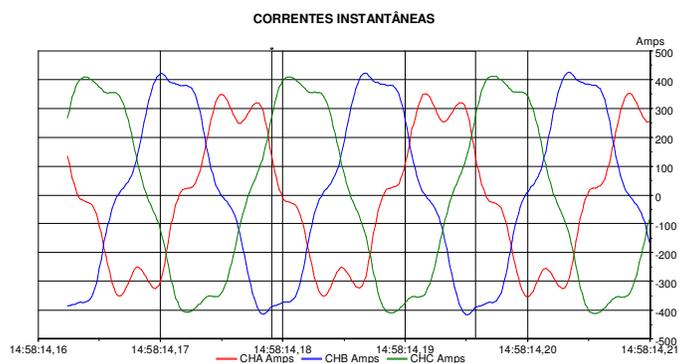


Figura 22 - Correntes obtidas nas medições em campo

A seguir, tem-se um resumo dos principais casos das simulações considerando apenas as condições não-ideais. Observa-se que as distorções harmônicas neste caso específico não foram preponderantes nos desequilíbrios entre as correntes, apesar de níveis acima dos recomendados (6%). Analisando os casos sem harmônicos, ou seja, somente com tensões na frequência fundamental, verifica-se a forte influência dos ângulos das tensões, pois as tensões de seqüência negativa são decisivas no desequilíbrio entre as correntes. Aliás, pelos resultados das simulações, mesmo sem a presença de harmônicos, o desequilíbrio será alto, até mesmo ligeiramente superior à condição real. Por outro lado, considerando uma adequação em termos de defasamento angular, ou seja, os módulos foram considerados os mesmos obtidos em um determinado instante das medições, alterando-se principalmente o ângulo de uma das fases em 2,3 graus, equilibrando os fasores das tensões em termos de seus argumentos, sendo este o caso mais favorável em termos de redução do desequilíbrio das correntes. A tabela 1 mostra o caso base e, a seguir, na tabela 2, tem-se os resultados com a simulação do desequilíbrio das tensões somente em termos de módulo, a partir das componentes fundamentais com a adequação dos argumentos das tensões.

Tabela 1- Fator de Desequilíbrio com Distorções e Desequilíbrio em Módulo e Ângulo

DISTORÇÃO E DESEQUILÍBRIO EM MÓDULO E ÂNGULO							
	FUNDAMENTAL	DTT (%)	RMS (V/A)	K_U (ΔV_{seq})	K_U (U-/U+)	K_I (NEMA)	K_I (I-/I+)
U_A	222,06 $\angle 173^\circ$	8,96	222,95	1,38%	1,95%	14,52%	14,74%
U_B	223,09 $\angle 55,3^\circ$	5,38	223,41				
U_C	227,33 $\angle 293,4^\circ$	6,65	227,83				
I_A	232,26 $\angle 140,5^\circ$	16,57	235,44				
I_B	292,05 $\angle 28,3^\circ$	7,70	292,90				
I_C	296,62 $\angle -105,3^\circ$	9,51	297,95				

Tabela 2 - Fator de Desequilíbrio sem Distorções e Desequilíbrio em Módulo

DESEQUILÍBRIO EM MÓDULO							
	FUNDAMENTAL	DTT (%)	RMS (V/A)	K_U (ΔV_{seq})	K_U (U-/U+)	K_I (NEMA)	K_I (I-/I+)
U_A	222,06 $\angle 173^\circ$	-	222,06	1,41	0,72	5,41	5,44
U_B	223,09 $\angle 53^\circ$	-	223,09				
U_C	227,33 $\angle 293^\circ$	-	227,33				
I_A	257,65 $\angle 139,6^\circ$	-	257,65				
I_B	277,51 $\angle 23,1^\circ$	-	277,51				
I_C	282,05 $\angle -102^\circ$	-	282,05				

Onde:

- ↻ DTT (%) - Distorção harmônica total (tensão e corrente);
- ↻ $K_U (\Delta V_{MED})$ - Máximo desvio em relação à média das tensões sobre a média;
- ↻ $K_U (U-/U+)$ - Componente de seqüência negativa sobre a positiva de tensão;
- ↻ $K_I (NEMA)$ - Máximo desvio em relação à média das correntes sobre a média;
- ↻ $K_I (I-/I+)$ - Componente de seqüência negativa sobre a positiva de corrente.

4. Considerações Finais

Este trabalho objetivou descrever uma avaliação dos resultados de monitoramento de motores trifásicos sob condições não-ideais. Destacam-se, especialmente, os fortes desequilíbrios nas correntes dos motores, tanto no de 125 CV em delta quanto no de 200 CV em estrela.

Deste modo, apresentou-se uma análise dos parâmetros relacionados ao desequilíbrio e distorção harmônica das tensões do sistema. Dentre os componentes individuais, o harmônico de 5º ordem é o mais significativo, como visto em todos os pontos de monitoramento. Neste caso, o sistema operava com baixo carregamento, permanecendo, entretanto, os diversos transformadores a vazio e os respectivos bancos de capacitores para correção do fator de potência, onde obviamente estão instalados. Os problemas detectados em termos de qualidade de energia, excluindo-se os eventos das atuações da proteção geral, referem-se ao forte desequilíbrio das correntes e elevadas distorções harmônicas das tensões e correntes. Sob as mesmas condições observadas nas medições, deve-se proceder no sentido de desclassificação (Derating) do motor ou alternativas adicionais, pois se o mesmo trabalhar em regime de carga plena pode ter a sua vida útil comprometida. Neste enfoque, devem ser seguidos os procedimentos e recomendações de manutenção, dando ênfase especial ao sistema de lubrificação e alinhamento no que tange também a possíveis vibrações, em função das condições atuais de operação e pela própria característica sazonal típica da carga, que faz com que os motores deixem de operar por intervalos de tempo significativos. Os resultados das simulações serviram para esclarecer de forma simplificada a influência dos parâmetros de desequilíbrios e harmônicos na operação dos motores. Ressalta-se que, como observado nos espectros harmônicos, as componentes de seqüência zero das tensões não são significativas, o que não compromete alguns cálculos executados para o fator de desequilíbrio, mesmo utilizando-se as tensões de fase, já que se recomenda o tratamento pelas tensões de linha. De qualquer forma, tratando-se do fator de desequilíbrio, verificou-se comportamentos similares com e sem harmônicos e que o desequilíbrio das correntes é fortemente influenciado pela diferença angular. Alternativas mitigadoras foram recomendadas, como a utilização de sistemas com controle das tensões de saída, com o uso de condicionadores, ou mesmo soft-start na operação sob regime, ou inversores de frequência, além de estudos detalhados dos desequilíbrios angulares e propagação de harmônicos no sistema sob a influência da saturação de transformadores.

5. Referências Bibliográficas

- [1] ONS - Procedimentos de Rede, Submódulo 2.2: Padrões de Desempenho da Rede Básica, Dezembro de 2002.
- [2] IEEE Std. 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [3] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practice for Harmonic Control in Electrical System.
- [4] Power Quality Centre, Technical Note No. 6: Voltage Unbalance, Integral Energy, Outubro de 2002.
- [5] W. H. Kersting. Causes and Effects of Unbalanced Voltages Serving an Induction Motor, IEEE Transactions on Industry Applications, Fevereiro de 2001.
- [6] C. Y. Lee, B. K. Chen, W. J. Lee, Y. F. Hsu. Effects of Various Unbalanced Voltages on the Operation Performance of an Induction Motor under the Same Voltage Unbalance Factor Condition, IEEE Transactions on Industry Applications, Março de 1997.