

Impactos do 2º, 3º e 5º harmônico na temperatura e corrente de motores elétricos classes IE2, IE3 e IE4.

Iago R M R Morais. Jonathan M Tabora. Thiago M Soares. M. Emilia L Tostes.

Universidade Federal do Pará, Belém, Pará

Abstract: The search for improvement in energy efficiency has led to the use of new technologies as well as materials and the introduction of new policies for this purpose, which are adopted in many countries. Induction motors of classes IE2, IE3 IE4 and IE4 being the most efficient, were analyzed the effects of harmonics 2nd, 3rd and 5th order for winding Y connection, on the frame body temperature and the motor current. The IE4 class motor presented higher susceptibility in the tests regarding the influences of harmonic distortions in relation to the IE2 and IE3 class motors

Resumo: A busca por aprimoramento na eficiência energética levou ao emprego de novas tecnologias e materiais bem como a introdução de novas políticas para esse fim, que são adotadas em muitos países. Motores de indução de classes IE2, IE3 e IE4 sendo o IE4 o mais eficiente, foram analisados quanto os efeitos dos harmônicos de 2ª, 3ª e 5ª ordem com ligação em Y, na temperatura da carcaça e na corrente do motor. O motor IE4 apresentou nos testes maior susceptibilidade quanto as influencias das distorções harmônicas em relação aos motores IE2 e IE3.

Keywords: Energy efficiency; Induction motors; Temperature; Current; Harmonic distortions.

Palavras-chaves: Eficiência energética; Motores de indução; Temperatura; Corrente; Distorção harmônica.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, os motores elétricos assíncronos têm sofrido inúmeras melhorias em suas estruturas com o objetivo de reduzir suas perdas, e, portanto, aumentar seus níveis de eficiência. Tal fato pode ser observado com o surgimento dos motores de alto rendimento (IE2), premium (IE3) e super premium (IE4, ou, também conhecidos como motores híbridos), tendo em vista que esses motores são capazes de atingir rendimentos acima de 90%.

Na frequência fundamental, a literatura científica tem mostrado que esses motores têm apresentados comportamentos satisfatórios durante a sua operação, ou seja, eles têm sido capazes de apresentar elevados rendimentos durante a sua operação.

Recentemente cargas não lineares experimentaram um crescimento exponencial nos sistemas elétricos, o que resulta em impactos negativos nos sistemas motrizes, em especial para motores de indução MI que representam uma fatia de mais de 90% das máquinas elétricas Deprez (2008). No entanto, por outro lado, poucos trabalhos investigam o comportamento desses motores quando há distorções harmônicas na rede elétrica.

A presença de harmônicos de tensão em motores elétricos resulta em perdas adicionais de acordo com a ordem e a porcentagem do harmônico presente, além da tecnologia do motor. Os principais impactos estão resumidos em perdas harmônicas adicionais no rotor e estator, redução de torque,

ruído, escorregamento e vibrações mecânicas, o que contribui para o aumento da temperatura interna do motor, principalmente os enrolamentos do estator e o núcleo IEEE (1995); Debruyne (2013); Lima (2016); Fuchs (2004) Dessa maneira, os harmônicos de sequência negativos demonstraram ser mais prejudiciais quando comparados aos harmônicos de sequência positiva.

Em Debruyne, C. et al 2014, apresentaram-se os resultados de um trabalho que buscou investigar a influência da distorção harmônica no rendimento dos motores híbridos. Nesse artigo, os autores mostraram que as perdas adicionais causadas pela tensão distorcida se localizam no rotor. Além disso, observou-se que há uma complexa interconexão entre as componentes harmônicas.

Nesse contexto, Tabora, J. M. et al, 2019 apresentou um estudo realizado em motores IE2, IE3 e IE4, no qual avaliou-se o efeito das tensões harmônicas de 5ª e 7ª ordens na temperatura da carcaça desses motores. De acordo com esse trabalho, pôde-se observar que, embora esses MIs possuam rendimentos elevados, distorções harmônicas aumentam significativamente as perdas de energia elétrica dessas máquinas.

Tabora, J. M. et al, 2019 apresentou um estudo realizado em motores IE2, IE3 e IE4, no qual avaliou-se o efeito das tensões harmônicas de 5ª e 7ª ordens na temperatura da carcaça desses motores. De acordo com esse trabalho, pôde-se observar que, embora esses MIs possuam rendimentos elevados, distorções harmônicas aumentam

significativamente as perdas de energia elétrica dessas máquinas. É importante mencionar que os autores somente avaliaram motores com ligação delta.

Dessa forma, este artigo apresenta os resultados de uma investigação conduzida em motores IE2, IE3 e IE4, que consistiu em avaliar a influência das tensões harmônicas de 2ª, 3ª e 5ª ordem na temperatura da carcaça desses motores, quando os mesmos apresentam uma ligação em estrela aterrado

2. METODOLOGIA E RESULTADOS

2.1 Metodologia

Para avaliar o efeito das tensões harmônicas de 2ª, 3ª e 5ª ordem nos motores de alto rendimento, premium e híbrido, realizaram-se testes nesses motores que consistiram em alimentar esses motores com tensões harmônicas de 2ª, 3ª e 5ª ordens separadamente utilizando a fonte CA trifásica de modelo FCATHQ, cujo fabricante é Supplier. É importante salientar que os motores foram ligados à fonte de tensão utilizando uma ligação estrela aterrado.

Os motores utilizados nas experiências realizadas foram acoplados a um freio de Foucault constituído de dois núcleos com o objetivo de aplicar uma carga mecânica no eixo dos motores. Esse freio forneceu um torque induzido de aproximadamente 92% a 95% do torque nominal dos motores, isso corresponde a 3.8 Nm.

Durante os testes, utilizaram-se o analisador de qualidade da energia de modelo PW3198, cujo fabricante é Hioki, para registrar os valores das tensões, corrente e potências harmônicas nos terminais do estator dos motores de indução; e a câmera infravermelha T620 da Flir para registrar a temperatura da carcaça dos motores. A Fig 1 mostra a bancada de teste montada no laboratório de qualidade da energia elétrica do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) para avaliar os motores elétricos.

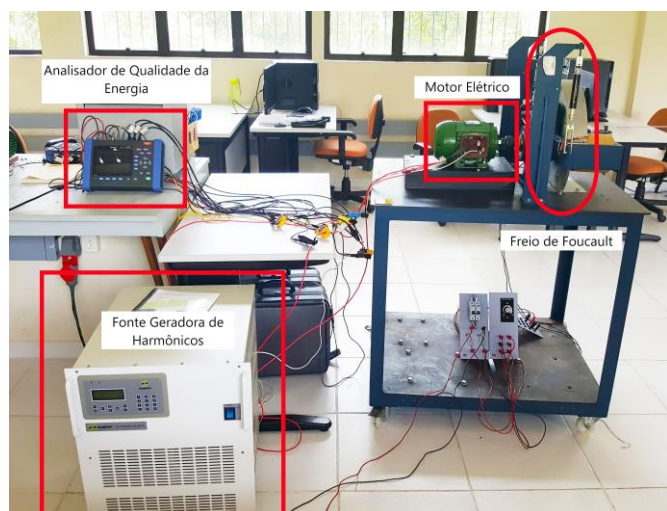


Fig. 1. Bancada de testes

Os dados de cada um dos motores são apresentados na tabela I

Tabela I. Parâmetros da máquina de indução

Classe do Motor	IE2	IE3	IE4
Tecnologia do Motor	SCIM	SCIM	LSPM
Potência Nominal	1 HP	1 HP	1 HP
Tensão Nominal	220 V/380 V	220 V/380 V	220 V/380 V
Velocidade nominal (r/min)	1730 RPM	1725 RPM	1800 RPM
Torque Nominal (Nm)	4,12	4,13	3,96
Corrente Nominal (A)	2,98/1,73	2,91/1,68	3,08/1,78
Eficiência Nominal (%)	82,60	82,6	87,4
Fator de Potência Nominal	0,80	0,82	0,73

A medição da temperatura da carcaça do motor, realizada por meio da câmera infravermelha T620 da FLIR, é fortemente dependente de alguns requisitos como temperatura e humidade do ambiente, a emissividade (que foi 0,94 nos testes realizados, este valor é devido ao tipo de pintura que os motores recebem) e distância da câmera ao motor (este último parâmetro está ligado a características do sensor da câmera).

Inicialmente os motores operaram até atingir suas temperaturas de regime permanente em ambiente controlado a 24°C. Dessa forma, os motores ficavam submetidos a uma tensão senoidal pura de 380 V pelo período de uma hora e dez minutos. Após atingir a temperatura de regime, aumentou-se 2% no valor da distorção harmônica de tensão a cada dez minutos até atingir o valor máximo de 25%. A captura de imagens foi realizada sempre a cada 10 minutos de cada teste, capturando-as sempre do mesmo ângulo lateral perpendicular ao motor para que o processo de obtenção de dados feito pelo software da própria fabricante da câmera seja o mais fiel possível, com pixels próximos aos medidos nas demais capturas. (fig. 2).

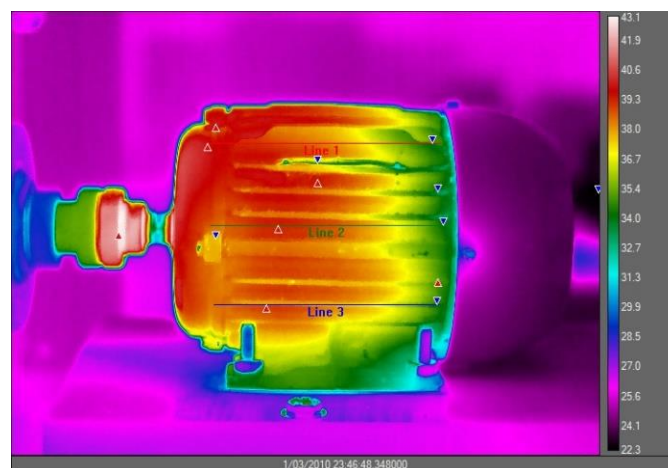


Fig. 2 Imagem termográfica lateral de um motor de indução

2.1 Resultados

Observa-se nas figuras 3, 6 e 9 que todos os motores de indução possuem a temperatura inicial semelhante, com exceção do motor premium IR3 que possui uma temperatura de trabalho ligeiramente maior.

2.2.1 Motor de alto rendimento IR2

Analisando a figura 3, que mostra a variação da temperatura em um ponto específico da carcaça do motor de alto rendimento registrada durante o teste experimental, é possível observar que, inicialmente, o 3º harmônico provoca temperaturas mais elevadas do que as causadas pelos harmônicos de 2ª e 5ª ordens. No entanto, tal situação se modifica ao longo do teste, onde o 2º harmônico passou a provocar uma maior elevação da temperatura da carcaça em relação aos demais harmônicos.

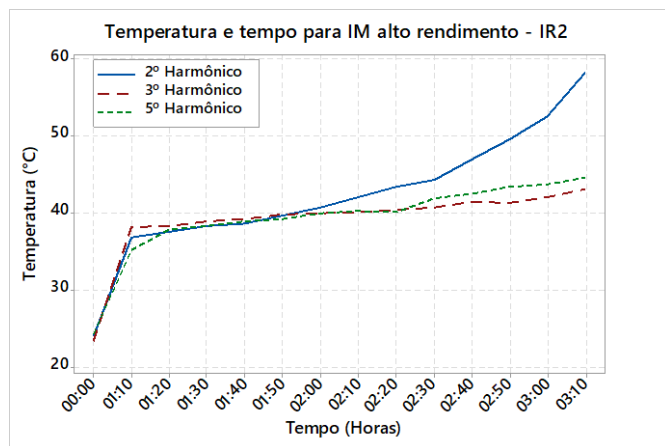


Fig. 3: Alto rendimento: temperatura x tempo

A fig. 4 apresenta as correntes harmônicas de 2ª, 3ª e 5ª ordem na fase A, é importante enfatizar que tal comportamento se manteve nas demais fases.

Analisando a fig. 4, pode-se verificar que a corrente do 2º harmônico se sobressaiu em relação às demais ordens harmônicas após aproximadamente uma hora e quarenta e cinco minutos de teste, uma vez que o mesmo apresentou um crescimento mais acentuado. Tal comportamento pode estar relacionado à sua característica de sequência negativa aliada a assimetria que os harmônicos de ordem par geram na rede.

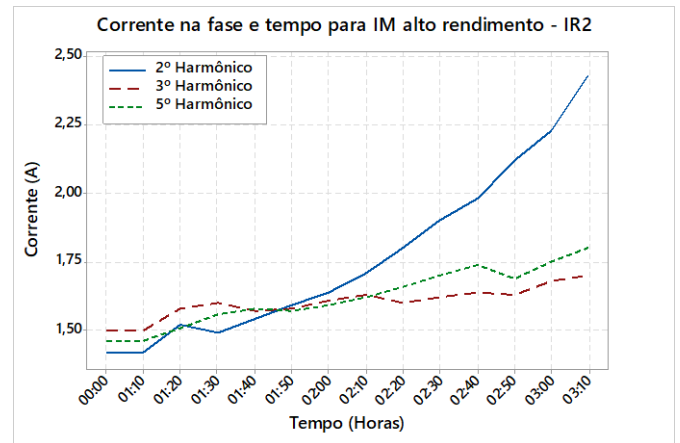


Fig. 4: Alto rendimento: corrente na fase A x tempo

Como os motores foram ligados em Y aterrado, analisou-se também a corrente do motor no condutor neutro, que está mostrado na fig. 5.

No condutor neutro, observou-se somente a presença da corrente do 3º harmônico devido a sua característica de sequência zero, no qual é possível perceber que seu valor é bastante significativo após duas horas e vinte minutos de teste, atingindo um valor máximo de 1,6 A.

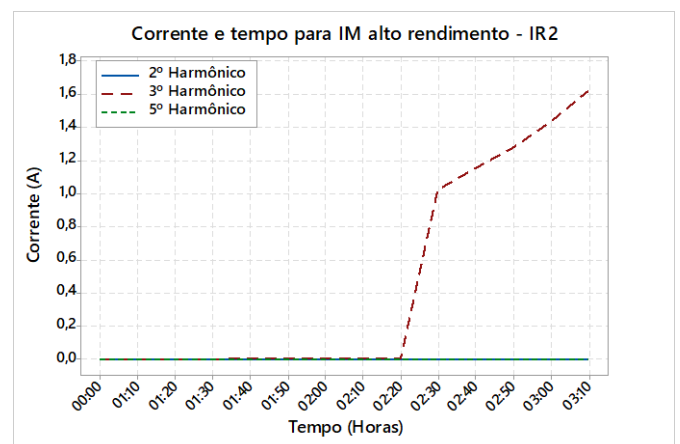


Fig. 5: Alto rendimento: corrente no neutro x tempo

A figura 6 demonstra a relação do fator de potência com o tempo, neste gráfico pode-se observar que o 3º harmônico tem influência quase nula no fator de potência em todo o experimento, mesmo quando é imprimido 25% de distorção harmônica no experimento. O 2º harmônico é o mais prejudicial, fazendo com que o fator de potência decaia até atingir aproximadamente 53%.

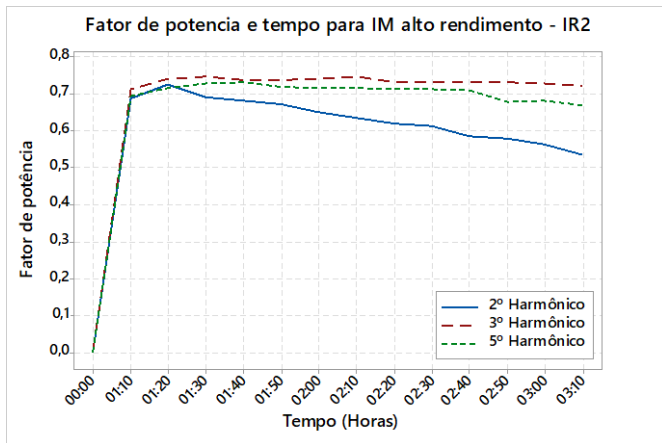


Fig. 6: Alto rendimento: fator de potencia x tempo

Inicialmente no momento 1:20h, o 3º harmônico é o que apresenta maior potencia ativa, sendo sensivelmente maior que as demais ordens harmônicas, como mostra a fig. 7. Ao decorrer do experimento o 2º harmônico acaba por apresentar um crescimento expressivo, chegando a ultrapassar o 3º harmônico, o que apresenta maior parte do experimento maior potencia ativa.

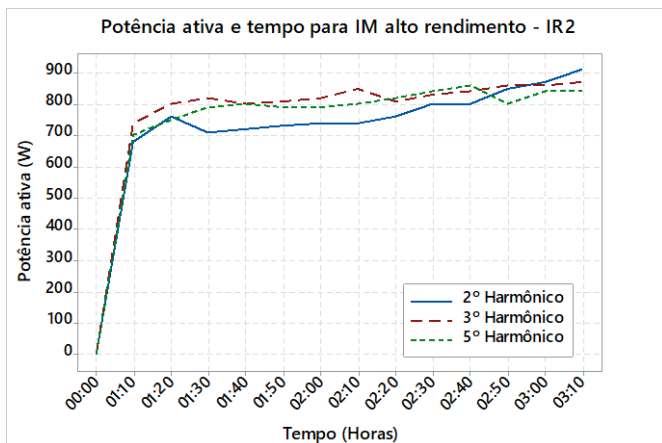


Fig. 7: Alto rendimento: potência ativa x tempo

2.2.2 Motor premium IR3

Analisando a fig. 8, que mostra a variação de temperatura em um ponto fixo da carcaça do motor premium, é possível verificar que o 5º harmônico, em um primeiro momento, provoca o aumento de temperatura mais acentuado, porém o 2º harmônico se sobressai após 1 hora e 50 minutos do teste.

Comparando a fig. 8 com a fig. 3, é possível observar que as tensões harmônicas de ordens 2, 3 e 5 provocaram um maior aquecimento da carcaça do motor premium em relação ao de alto rendimento, uma vez que as temperaturas registradas no motor premium foram maiores, para as mesmas condições de temperatura e humidade ambiente.

Dessa forma, verificou-se que, apesar do motor premium apresentar um rendimento maior em relação ao motor de alto rendimento, a presença de harmônicos de tensão aumentou o aquecimento desse motor, o que pode indicar um aumento na

perda do mesmo e, conseqüentemente, uma diminuição do seu rendimento.

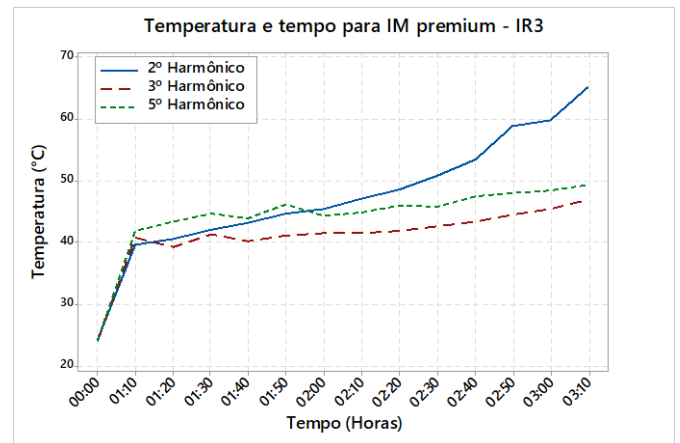


Fig. 8: Premium: temperatura x tempo

Ao analisar a corrente do motor premium na fase A, que está mostrada na fig. 9, é possível verificar que a corrente do 2º harmônico apresentou os maiores valores após 1 hora e 50 minutos. Além disso, ao comparar o gráfico da fig. 9 com a da fig 4, foi possível observar que a corrente do 2º harmônico apresentou um valor menor no motor premium, porém as correntes do 3º e 5º harmônicos foram bastante semelhantes.

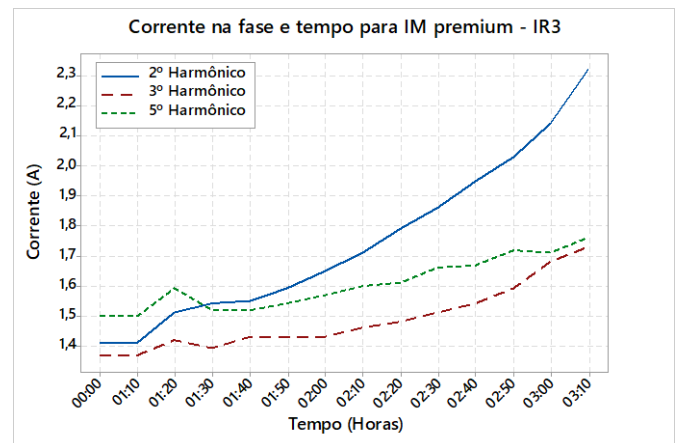


Fig. 9: Premium: corrente na fase A x tempo

Analisando a corrente do 3º harmônico medida no neutro do motor premium mostrado na fig. 10, observa-se que a corrente do motor premium apresentou um valor maior que a corrente de neutro do motor de alto rendimento, atingindo um valor máximo entre 2,5 e 3 A. Além disso, de forma semelhante, não observou-se corrente de 2º e 5º harmônico pois ambos são harmônicos de sequência negativa.

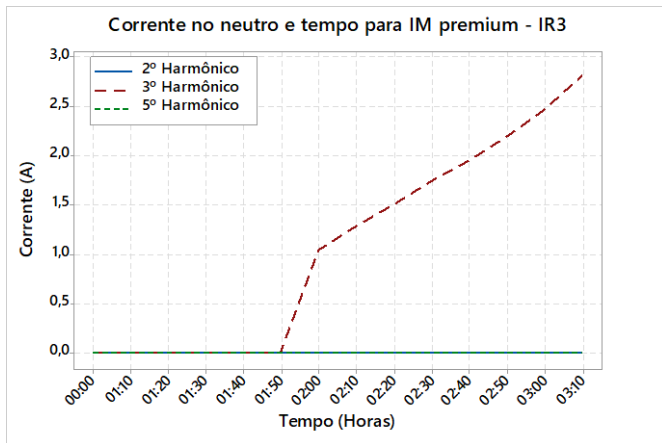


Fig. 10: Premium: corrente no neutro x tempo

O gráfico do fator de potência mostrado na figura 11, mostra que o motor premium é o que apresenta melhor resultado quando submetido a harmônicos de ordem 2, 3 e 5 dos 3 que são analisados nesse trabalho, pois se mantém acima de 60% em todo o período do experimento.

O 2º harmônico é o que mais tem impacto no motor IR3, seguido pelo 3º e 5º harmônico respectivamente. O 5º harmônico possui um efeito brando nesse motor quando comparado somente o fator de potência, quando analisado os demais gráficos o 3º harmônico é o menos prejudicial para esta tecnologia.

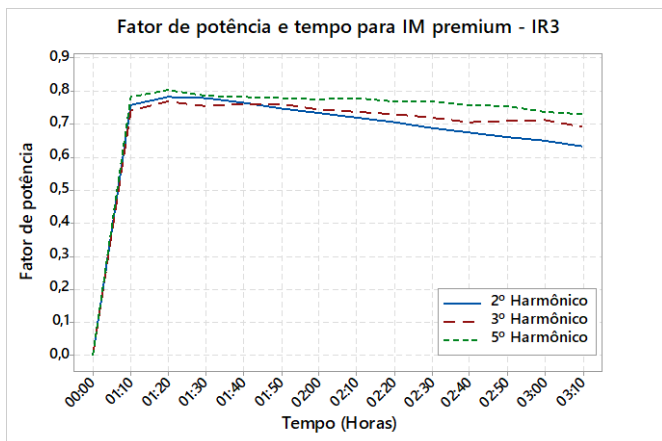


Fig. 11: Premium: fator de potência x tempo

A potência ativa para o 5º harmônico é inicialmente a com o maior incremento do experimento como mostrado na figura 12, porém com 4% de distorção até 16% de distorção harmônica, o gráfico do 2º e 5º harmônico são semelhantes, somente no momento em que os testes atingiram 18% de distorção as linhas desses dois harmônicos voltam a se distanciar, onde o harmônico de ordem 2 apresenta maior incremento. O 3º harmônico apresentou a menor demanda de potência ativa ao longo do experimento, como observado.

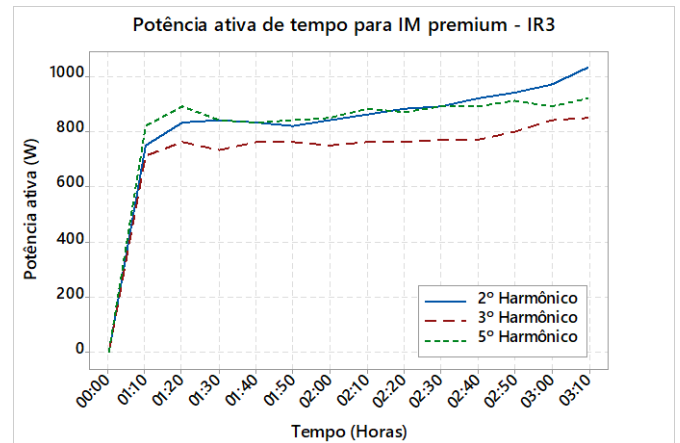


Fig. 12: Premium: Potência ativa x tempo

2.2.3 Motor híbrido IR4

No motor híbrido, a temperatura da carcaça registrada apresentou um valor menor que o do motor premium quando foi aplicado uma tensão de 2º harmônico nos seus terminais, porém maior que o do motor de alto rendimento, conforme pode visto na fig. 13. Além disso, a temperatura provocada pela aplicação do 5º harmônico de tensão se sobressaiu em relação à temperatura causada pelo 3º harmônico.

Diferentemente do motor híbrido, os demais motores apresentaram temperaturas um pouco maiores quando foi aplicado uma tensão harmônica de ordem 3 nos terminais dos motores de alto rendimento e premium.

Além disso, a fig. 13 mostra que o 2º, 3º e 5º harmônicos provocaram aumentos de temperatura semelhantes, porém, após 2 horas e 10 minutos de teste, a temperatura provocada pelo 2º harmônico apresentou uma variação mais acentuada.

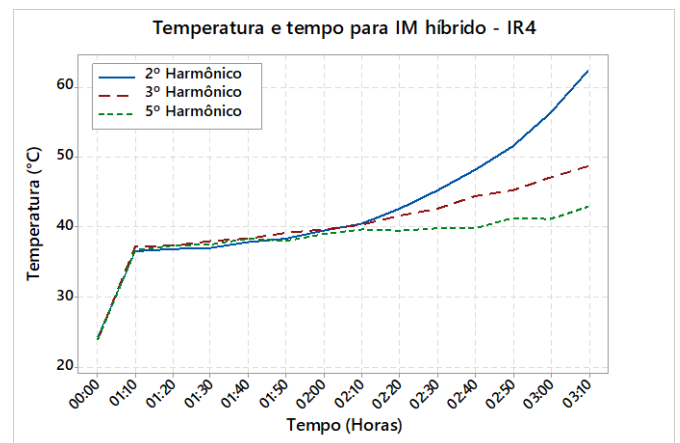


Fig. 13: Híbrido: temperatura x tempo

As correntes dos 2º e 3º harmônicos medidas na fase A do motor híbrido, mostrada na fig. 14, apresentou valores maiores em relação à corrente dos motores de alto rendimento e híbrido, atingindo 2,75 A para o 2º harmônico e 2,25 A para o 3º harmônico.

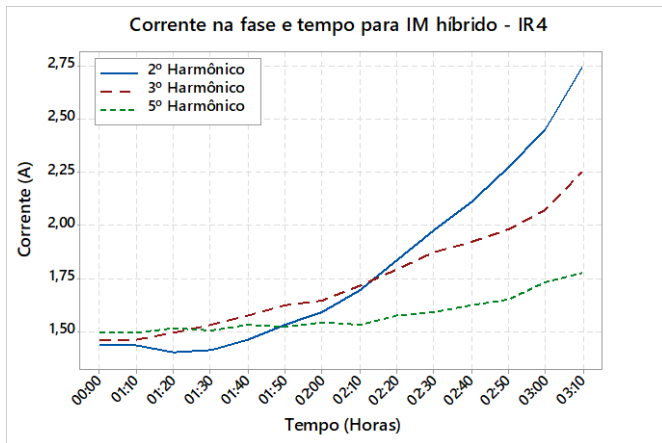


Fig. 14: Híbrido: corrente fase A x tempo

No caso do neutro apresentado na fig. 15, observou-se a presença de duas correntes harmônicas: 2º e 3º harmônicos. No caso da corrente do 3º harmônico, notou-se que ela surgiu após 1 hora e 10 minutos de teste, enquanto que a corrente do 2º harmônico surgiu após 2 horas e 20 minutos de teste. Além disso, verificou-se que a corrente do 3º harmônico atingiu valores maiores que a corrente do 2º harmônico.

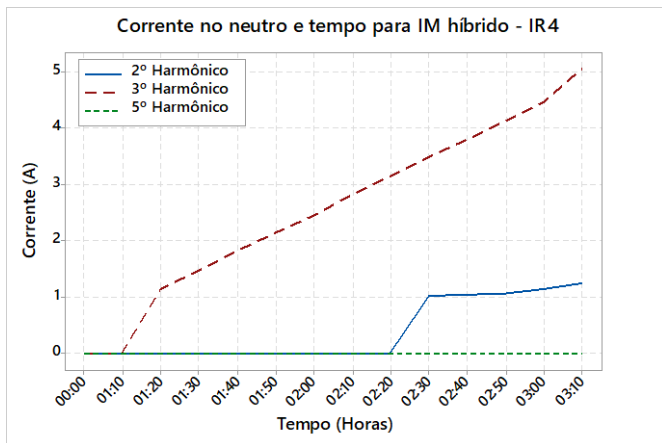


Fig. 15: Híbrido: corrente no neutro x tempo

A figura 16 que apresenta o fator de potência para o motor híbrido, mostra que esta tecnologia é muito sensível a distúrbios quando relacionados ao fator de potência, o 2º harmônico provoca uma queda para cerca de 50% no fator de potência, os outros harmônicos de maneira semelhante provocam uma redução drástica no fator de potência. Este é o resultado mais radical para fator de potência.

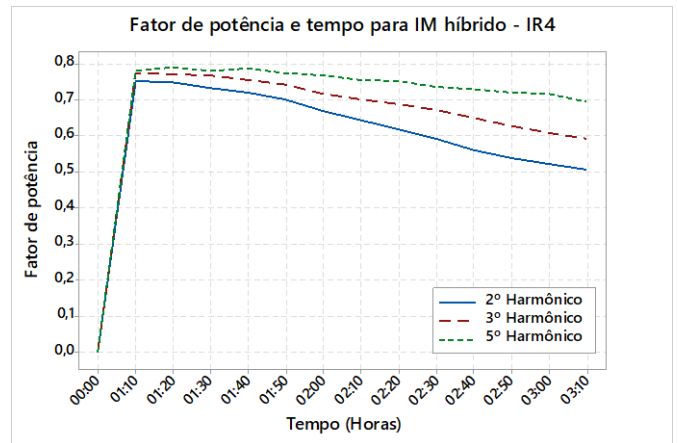


Fig. 16: Híbrido: fator de potência x tempo

O gráfico de potência ativa mostrado na figura 17, mostra que para o 3º e 5º ocorre pequenas mudanças ao longo do experimento que somente em 16% de distorção harmônica tornam-se mais expressivas para 3º harmônico e 20% para o 5º harmônico. O harmônico de 2º ordem é o que provoca efeitos com menor distorção, e ao final do experimento é o que causou maior impacto.

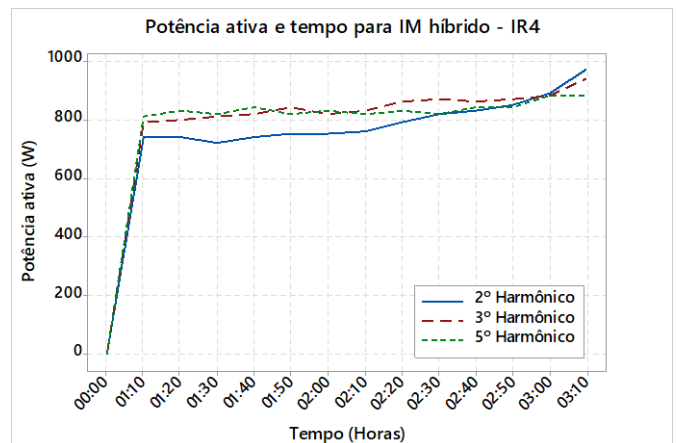


Fig. 17: Híbrido: potência ativa x tempo

2. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado buscou analisar o impacto dos harmônicos de 2ª, 3ª e 5ª ordem nos motores de indução trifásicos de classe IR2, IR3 e IR4, sua influência na temperatura da carcaça do motor, corrente de fase e neutro, potência ativa e fator de potência quando estes motores estão ligados em Y, visando a substituição de motores de classes mais antigas para motores de classes mais novas com tecnologia de melhor eficácia energética.

Foi observado que o 2º harmônicos de sequência negativa resulta nos piores impactos em relação à temperatura, consumo e fator de potência para as três tecnologias analisadas. O 2º harmônico revelou ser a distorção mais prejudicial para os MI, em especial para o motor híbrido que atingiu uma temperatura e corrente de fase elevada aliado com fator de potência baixo.

O 3º harmônico de sequência zero resultou ser pior para ligação Y quando comparado com o 5º harmônico de sequência negativa, resultando em correntes elevadas no condutor neutro, comparado com as correntes de fase. A corrente no condutor neutro é mais elevada em motores com tecnologia mais eficiente.

Embora o motor híbrido seja o mais eficiente e seja candidato para substituir os motores classes IR2 e IR3, também é o mais sensível quanto a distorções harmônicas. Motores de alta eficiência embora sejam fabricados com uma tecnologia posterior aos outros motores analisados, mostraram-se nos testes os mais robustos para redes poluídas.

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que a implementação do motor IR3 de eficiência premium resultará em grandes economias energéticas e econômicas para o Brasil. Além disso o trabalho também mostrou que esse motor resulto ser mais robustos na presença de harmônicos quando comparado com o motor híbrido de eficiencia super premium, bem como menores consumos quando comparado com o motor de alto rendimento.

REFERÊNCIAS

- Almeida A. T. et al. (2014) "Beyond Induction Motors—Technology Trends to Move Up Efficiency," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 3, pp. 2103-2114..
- Debruyne C., Vandeveld L., Desmet J., (2013) "Harmonic effects on induction and line start permanente magnet machines"
- Debruyne C. *et al.* (2014) Influence of Supply Voltage Distortion on the Energy Efficiency of Line-Start Permanent-Magnet Motors
- Deprez W. (2008). "Energy efficiency of the induction machines: a critical assessment." Ph. D. dissertation, KU Leuven University. Leuven, Bélgica
- Fuchs E. F., Roesler D. J., Masoum M. A. S. (2004) Are harmonic recommendations according to IEEE and IEC too restrictive? Trans. Power Deliv.
- IEEE Sts 1159-1995. (1995) "Recommended pratices for monitoring electric power quality"
- Lima E. C. de, Filho J. M. de C., Sá J. S. de. (2016) "Diagnosis of inductions motors operating under distorted and unbalanced voltages". 17th International conference on harmonics and quality of power (ICHQP); pp. 786-791
- Paul WaIde, and Conrad u. (2011) Brunner, International energy agency (IEA), ". Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems", Disponível em: < <https://doi.org/10.1787/5kgg52gb9gjd-en>>Acesso em 06 de janeiro de 2019
- Singh G. K. (2005). A research survey of induction motor operation with nonsinusoidal supply wave forms," Elect. Power Syst. Res., vol. 75, no. 2/3.
- Tabora, J M. et al. (2019) Fifth & Seventh Harmonic Effects on the Performance of IE2, IE3 & IE4 Induction Motor Classes. Brasil
- Tabora, J M. et al. (2019) Impactos do 5º Harmônico na Temperatura de Motores Elétricos Classes IE2, IE3 e IE4. Brasil