

## Capítulo III

### Efeitos de harmônicos no sistema de distribuição e limites segundo as principais normas nacionais e internacionais – Parte II

Igor Amariz Pires\*

#### Iluminação

A lâmpada incandescente poderá ter uma diminuição na sua vida útil quando alimentada por tensões distorcidas, pois estas lâmpadas são sensíveis aos níveis de tensão a elas aplicados. Se a tensão de alimentação for maior que a tensão nominal devido aos harmônicos, a elevação da temperatura no filamento reduzirá a vida útil.

Para lâmpadas de descarga, o fenômeno mais conhecido devido aos harmônicos é um ruído audível. Os capacitores agregados a reatores eletromagnéticos, corrigindo o fator de potência, geram uma ressonância. Esta ressonância é comum na faixa de 75 Hz a 80 Hz, não interagindo, portanto, com o sistema de alimentação.

Alguns trabalhos fizeram estudos com lâmpadas fluorescentes alimentadas por reatores magnéticos com ondas de tensão distorcida. Em um desses, os resultados apresentados concluíram que lâmpadas com reatores eletrônicos são mais imunes aos harmônicos que sistemas com reatores eletromagnéticos nos aspectos de potência, fator de potência, eficiência e luminosidade. Porém, mantendo os níveis de distorção de tensão recomendados (THDv < 5%), a influência de harmônicos em lâmpadas fluorescentes não é significativa, independentemente do reator utilizado.

#### Máquinas rotativas

Tensões não senoidais aplicadas às máquinas elétricas podem causar sobreaquecimento, torques pulsantes ou ruídos. Além dos harmônicos vindos da rede elétrica, controladores de velocidade são alimentados por inversores que podem produzir

harmônicos, levando a uma grande distorção de tensão.

Um problema que surge na presença de harmônicos é um grande ruído audível se comparado a uma excitação puramente senoidal. Os harmônicos também produzem um fluxo de distribuição resultante no entreferro que pode causar ou contribuir para dois fenômenos: *cogging*, que é a recusa da partida suave, e *crawling*, um grande escorregamento.

Analisando um inversor de seis pulsos aplicado a um motor de indução, os harmônicos que este produz podem ser caracterizados pela Equação 1.

$$h = 6i \pm 1 \quad (1)$$

Em que:

$h$  = ordem harmônica

$i$  = inteiro positivo maior que zero

Estes harmônicos que aparecem em pares, como exemplo o 5° e o 7°, podem causar oscilações mecânicas em uma combinação turbina-gerador ou sistema carga-motor, que, por sua vez, são frutos dos torques oscilantes quando estes, causados pela interação entre correntes harmônicas e campo magnético da frequência fundamental, excitam uma ressonância mecânica.

Detalhando este fenômeno, o fluxo de cada corrente harmônica no estator produzirá uma força magnética no entreferro que irá induzir um fluxo de corrente no rotor da máquina rotativa. Como os harmônicos característicos podem ser definidos como sequências positiva e negativa, a rotação destes harmônicos será na direção contrária (sequência

negativa) ou a favor (sequência positiva) da rotação do rotor.

O 5º harmônico irá girar em uma direção contrária (sequência negativa), sendo, então, a corrente harmônica induzida no rotor consequência da diferença entre a frequência da fundamental induzida no entreferro e o 5º harmônico. Assim, o harmônico será  $5 + 1$  (fundamental), 6º harmônico.

Já o 7º harmônico terá a mesma interação no entreferro com a frequência fundamental. Porém, como o 7º harmônico irá girar na direção a favor (sequência positiva) da rotação da fundamental, o resultado da interação será  $7 - 1$ , 6º harmônico. Logo, do ponto de vista de aquecimento no rotor, o 5º e 7º harmônico no estator se combinam para produção de um 6º harmônico no rotor.

O 11º e o 13º harmônicos terão, da mesma maneira, esta interação, tendo como resultado uma indução no rotor de uma corrente de 12º harmônico. A Tabela 1 apresenta um resumo dos harmônicos característicos em um motor trifásico quando alimentado por um inversor de seis pulsos, que resume estas interações e outras características.

Assim, estes harmônicos no rotor levarão a um sobreaquecimento no rotor, uma redução de torque ou a torques pulsantes.

A Tabela 2 apresenta as rotações provocadas por harmônicos em motores monofásicos. Neste caso, haverá harmônicos triplos, pois há caminho de circulação de sequência zero, que é característica dos harmônicos triplos.

**TABELA 1**  
**HARMÔNICOS DE UM MOTOR TRIFÁSICO ALIMENTADO POR INVERSOR DE SEIS PULSOS**

Ordem harmônica	Frequência (Hz)	Sequência de fases	Harmônico no estator	Rotação harmônica*	Harmônico no rotor
1	60	+	1	A favor	-
5	300	-	5	Contrária	6
7	420	+	7	A favor	6
11	660	-	11	Contrária	12
13	480	+	13	A favor	12
17	1020	-	17	Contrária	18
19	1140	+	19	A favor	18
23	1380	-	23	Contrária	24
25	1500	+	25	A favor	24

\* Em relação à rotação do campo girante fundamental

**TABELA 2**  
**DIREÇÃO DE ROTAÇÃO DOS HARMÔNICOS EM MOTORES MONOFÁSICOS**

Ordem harmônica	Direção*
3	Contra
5	A favor
7	Contra
9	A favor
11	Contra
13	A favor
15	Contra
17	A favor
19	Contra

\* Em relação à rotação do campo girante fundamental

**TABELA 3**  
**PERDAS NO MOTOR**

<b>Perdas</b>	<b>Associadas a</b>	<b>Formulação</b>
Enrolamentos do estator	Resistência do enrolamento	$W_1 = mr_1^s [(I_1^s)^2 + I_{har}^2]$
Enrolamento do rotor	Torque provocado pela sequência negativa	$W_2 = \frac{T_n s I}{7.04}$
Perdas no núcleo	As perdas no núcleo do estator é função da densidade de fluxo no mesmo. O aumento nas perdas devido aos harmônicos se constitui em uma pequena fração da perda total, podendo então ser desprezado	
Perdas por atrito e ventilação	Estas perdas não dependem da forma de onda da tensão aplicada	
Perdas harmônicas no rotor	Correntes harmônicas induzidas no rotor	$W_{2k} = m(I_k^r)^2 r_k^r$
<b>Perdas complementares</b>		
Perdas "zig-zag" no rotor	Associado ao fluxo pulsante nas ranhuras do rotor	$W_{zz} = m C_{db} r_1^r [C_0 I_0^2 + C_L I^2]$
Perdas finas no estator	Correntes parasitas devido ao fluxo de dispersão axial nas laminações do estator	$W_{se} = 0.3 C_1 m \sum_{k=1}^n (I_k^s)^2 k f_1$
Perdas finais no rotor	Correntes parasitas devido ao fluxo de dispersão axial nas laminações do rotor	Igual a do estator
Outras perdas	As outras perdas não mencionadas provavelmente aumentarão na presença de harmônicos. Entretanto, usualmente são pequenas, sendo consideradas as mesmas que quando excitado por uma onda puramente senoidal	
<b>Legenda:</b>		
$W_k$ = perdas em Watts, sendo $k$ índice que identifica cada perda		
$C_0, C_1, C_L$ e $C_{db}$ = constantes empíricas		
$m$ = número de polos		
$k$ = ordem harmônica		
$I_{har}$ = valor rms das correntes harmônicas excluída a fundamental		
$f_1$ = frequência fundamental		
$nsl$ = escorregamento, em r/min (fundamental)		
$T$ = torque		
$r_{ks}, r_{kr}$ = resistência no estator e rotor, respectivamente, para cada harmônico de ordem $k$		
$I_{ks}, I_{kr}$ = Correntes no estator e rotor, respectivamente para o harmônico de ordem $k$		
$I_0$ = corrente fundamental a vazio		
$I$ = corrente total no estator		

Outras perdas causadas por harmônicos nos enrolamentos, tanto no rotor quanto no estator, serão perdas por efeito pelicular e aumento nas correntes parasitas.

Existe ainda uma formulação matemática para cada perda existente no motor, incluindo os harmônicos. Um resumo destas é apresentado na Tabela 6. Para avaliá-las, foram escolhidas cinco formas de onda de tensão, sendo uma puramente senoidal em 60 Hz e quatro com harmônicos característicos. Estas formas de onda, chamadas de A a D, estão descritas na Tabela 7. Estas ondas foram, então, aplicadas em dois motores trifásicos idênticos de 20 hp, 220 V e 60 Hz. Os resultados das perdas obtidas em plena carga, tanto experimentalmente quanto computacionalmente, (utilizando as fórmulas da Tabela 6) são apresentados na Tabela 8.

Os resultados apresentados utilizaram frequências fundamentais de 15 Hz e 60 Hz. Analisando os resultados apresentados, somente com distorções de tensão acima de 140% (situação C e D), as perdas serão o dobro em relação às perdas na situação em que a tensão é senoidal. Na situação A, com a tensão distorcida de 30,2%, que é uma situação muito difícil de ocorrer, as perdas ficaram 20% acima da situação com tensão senoidal. Desta forma, com as distorções de tensão normalmente encontradas na rede elétrica (em torno de 5%), o motor não terá grandes perdas devido aos harmônicos de tensão.

**TABELA 4**  
**FORMAS DE ONDA APLICADA NO EXEMPLO**

Harmônico	Percentual de tensão em relação à fundamental			
	A	B	C	D
5	20,0	20,0	21,3	26,0
7	14,3	14,8	16,2	25,3
11	9,1	10,0	12,7	86,8
13	7,7	8,6	12,5	81,8
17	5,9	7,0	15,1	18,8
19	5,3	6,6	19,2	17,0
23	4,4	6,3	85,3	49,6
25	4,0	6,4	82,7	42,3
29	3,4	6,5	16,5	7,5
31	3,2	6,6	12,2	5,6
35	2,9	7,8	8,9	8,2
37	2,7	9,7	8,5	2,4
41	2,4	13,2	9,5	2,0
43	2,3	17,6	11,6	3,1
47	2,1	84,5	46,8	17,6
49	2,0	83,4	43,2	19,6
53	1,9	16,3	7,7	5,8
55	1,8	11,7	5,3	5,8
THDv (%)	30,2	127,3	143,8	146,1

Resultados do exemplo de aplicação de ondas de tensão distorcidas em motores de indução trifásicos

**TABELA 5**  
**RESULTADOS DO EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO DISTORCIDAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Motor	Forma de onda	Frequência Fundamental (Hz)	Medida (W)	Simuladas (W)
1	Senoidal	15	902	712
2	A	15	1070	1015
	B	15	1440	1272,6
	C	15	1680	1680,9
	D	15	2900	2791
	Senoidal	60	1303	1122
	A	60	1600	1437,7
	Senoidal	15	912	741
	B	15	1400	1229,5
	C	15	1950	1613
	D	15	1935	2664

O ângulo de fase dos harmônicos é analisado para se descobrir seu efeito na performance de motores de indução trifásico. Para chegar a tanto, os autores que desenvolveram tal trabalho executaram alguns testes em motores, apresentando resultados da influência de mudança angular no 2º harmônico: quando em fase, a eficiência do motor era de 72,46% passando para 71,88%, quando a defasagem for de 180º para um THD de tensão de 20%. Percebe-se que a influência do ângulo de fase não é muito pronunciada, sendo confirmada por meio da afirmação de que as perdas nos motores de indução são independentes do ângulo de fase dos harmônicos.

Alguns outros pesquisadores fizeram estudos de estimação de vida útil do isolamento de motores quando submetidos a desbalanceamentos e harmônicos. Em um desses, foi construído um modelo térmico do motor em que se avaliam as anomalias mencionadas. Este modelo proposto dividiu o motor geometricamente em componentes concentrados, com interconexões por meio de impedâncias térmicas.

Os componentes concentrados são derivados das informações dimensionais do motor, propriedades térmicas, material utilizado na construção e coeficientes de transferência térmica. Em vários resultados mostrados, como exemplo, para um desbalanceamento de tensão de 3%, um espectro harmônico de  $V_3 = 4\%$ ,  $V_5 = 3\%$ ,  $V_7 = 5\%$ ,  $V_9 = 2\%$  e  $V_{11} = 1\%$ , tendo então um  $THD_v = 7,4\%$  e o motor operando em carga nominal, a redução de vida útil do isolamento seria de 24,3%.

Em um estudo probabilístico do impacto destas variações na temperatura final do motor, baseando na média, variância e distribuição de probabilidade de cada harmônica, um pesquisador percebeu que as harmônicas de tensão variam no tempo. Por isso, ele estimou os efeitos das flutuações de tensões harmônicas no aumento da temperatura de motores de indução com rotor em gaiola. Como resultado do trabalho, para motores com constantes térmicas no rotor maior que 60 minutos, essas máquinas toleram distorções de tensão com uma média de 4% e um máximo de 10%, desde que este máximo não ultrapasse 36 segundos, causando um aumento admissível de temperatura de 3%.

O grau de imunidade aos harmônicos para máquinas síncronas é dado por

$$\sqrt{\sum (U_h / h)^2} < 1,3\% \text{ a } 2,4\%.$$

Para máquinas assíncronas, o grau de imunidade é

$$\sqrt{\sum (U_h / h)^2} < 1,5\% \text{ a } 3,5\%, \text{ onde } u_h \text{ é dado em porcentagem}$$

*\*IGOR AMARIZ PIRES é engenheiro eletrícista, mestre e doutorando em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com ênfase em qualidade da energia elétrica.*

#### CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Confira todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)