

FATOR K



ITAIPU
TRANSFORMADORES

INDÚSTRIA DE TRANSFORMADORES ITAIPU LTDA.

CNPJ N° 46.958.948/0001-55

▶ ÍNDICE

1. FATOR K	3
1.1 Introdução	3
1.2 Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico	4
1.3 Seleção e Dimensionamento de Transformadores	7
1.4 Norma Europeia	7
1.5 Normas Americanas	8
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
3. ANEXOS	12

1 FATOR K

1.1 Introdução

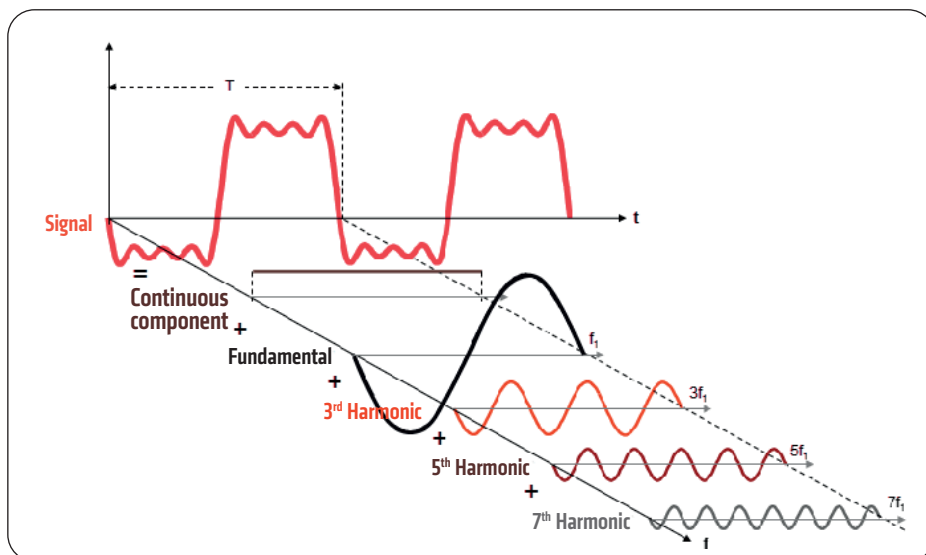
O intuito deste trabalho é ajudar o leitor na especificação do fator K de um transformador a ser instalado para alimentar cargas não lineares geradoras de harmônicas. Tecnicamente uma harmônica é uma componente de onda periódica, cuja frequência é definida como uma multiplicação da frequência fundamental. A rede elétrica brasileira apresenta frequência de 60 Hz, logo a tabela 1 apresenta alguns exemplos de harmônicos conhecidos:

Tabela 1 - Exemplos de componentes harmônicas

Harmônica	Frequência	Frequência
3 ^a	(3x60Hz)	180 Hz
5 ^a	(5x60Hz)	300 Hz
7 ^a	(7x60Hz)	420 Hz

Uma forma de onda periódica também pode ser decomposta como uma somatória de sinais de amplitudes e frequências definidas, visto na figura a seguir.

Figura 1 - Decomposição de sinal em componentes harmônicos

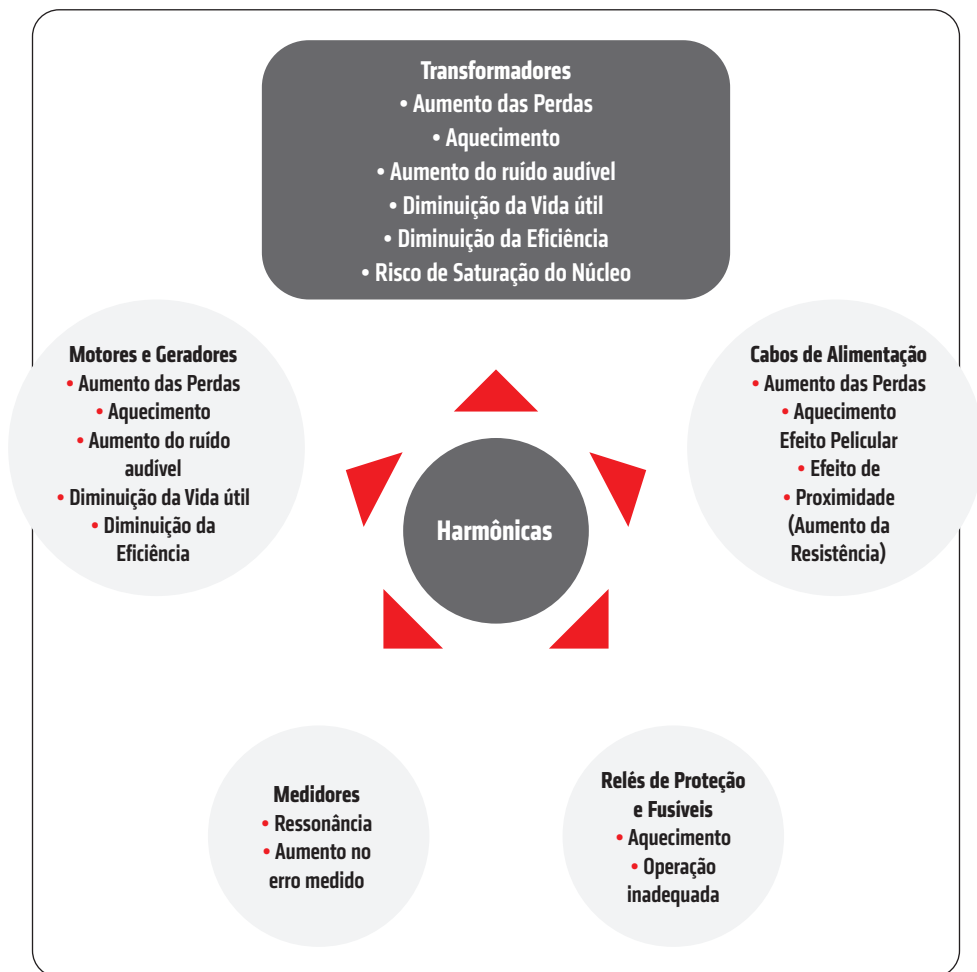


Fonte: Harmonics in Power Systems, 2009

1.2 Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico

O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga ou do seu efeito na fonte de alimentação. Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação, processamento de dados e de sincronização. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes, nos isolamentos e perdas adicionais.

Figura 2 - Principais efeitos de harmônicos nos equipamentos



No mundo real os equipamentos geradores de harmônicas estão presentes em todas as instalações industriais, comerciais e residenciais. As harmônicas são geradas pelas cargas não lineares, portanto tem-se por definição:

CARGA LINEAR

Uma carga é considerada linear quando a corrente que circula por ela tem a mesma forma senoidal que a tensão que a alimenta. Exemplo: lâmpadas incandescentes, aquecedor de água, transformadores de baixa potência, etc.

CARGA NÃO LINEAR

Uma carga é considerada não linear quando a corrente que circula por ela não tem a mesma forma senoidal que a tensão que a alimenta. Exemplo de cargas não lineares:

- Os computadores pessoais.
- Os fornos micro-ondas.
- Os equipamentos de som e televisão.
- Sistemas de Retificação e Acionamentos
- Fontes de Alimentação Monofásicas (Fontes Chaveadas)
- Reatores Eletrônicos para Iluminação
- Controladores de Tensão (controles de iluminação e aquecimento)
- Conversores Trifásicos e Acionamentos CA;
- Lâmpadas LED;
- Fornos a Arco Elétrico, Soldas a Arco e Lâmpadas de Descarga.

Figura 3 - Fontes de componentes harmônicos



1.3 Seleção e Dimensionamento de Transformadores

O impacto sobre os transformadores de distribuição devido às correntes com conteúdo harmônico criado pelas cargas não-lineares deve ser considerado durante o seu projeto. Um transformador sujeito a este fenômeno sofre uma redução da sua potência nominal levando à redução do seu tempo de vida e rendimento.

A corrente de uma carga não-linear pode refletir-se no transformador de distribuição através do aumento da vibração e aumento da temperatura (aumento das perdas e redução do tempo de vida do transformador). Para que o tempo de vida médio do transformador não se reduza, deverá ser diminuída a sua carga, isto é, deve-se proceder a uma desclassificação (De-Rating) do transformador de distribuição.

Uma Norma Europeia e duas Normas Americanas nos ajudam a determinar estes fatores.

- CENELEC (European Committee For Electrotechnical Standardization) - Fator K;
- IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) - Fator de perdas devido a harmônicas (FHL);
- UL (Underwriters Laboratories) - Fator K (KUL).

1.4 Norma Europeia

CENELEC - EN 50541-2:2013(Three phase dry-type distribution transformers 50 Hz, from 100 kVA to 3 150 kVA, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - Part 2: Determination of loadability of a transformer loaded with non-sinusoidal current) – Este documento substituiu o HD 538,3 S1:1997

O documento normativo da CENELEC é composto por duas partes sendo que a segunda parte permite a determinação da redução de potência do transformador (desclassificação ou DeRating) quando este alimenta cargas não-lineares. Tratando sucintamente a informação de que um transformador de distribuição, quando é exposto a cargas não-lineares, apresenta um fator de desclassificação quantificado pela relação $1/K$, sendo o fator K obtido através da seguinte equação:

$$K = \left[1 + \frac{e}{1 + e} \left(\frac{I_1}{I_{ef}} \right)^2 \sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^q \left(\frac{I_h}{I_{ef}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$DR_K = \frac{1}{K}$$

Onde:

e = Estimativa das perdas por correntes parasitas à frequência fundamental (60Hz no Brasil) divididas pelas perdas por efeito de Joule [$e = \frac{P_{EC}}{P_{Joule}}$] [pu];

h = Índice da harmônica de corrente;

I_{ef} = Valor eficaz da corrente aplicada [A], obtido através de: $I_{ef} = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 \right]^{\frac{1}{2}}$

I_h = Amplitude da h harmônica da corrente [A];

I_1 = Amplitude da harmônica fundamental da corrente [A];

q = Constante, que depende do tipo de enrolamentos (fisicamente) e da frequência. Habitualmente é utilizado o valor de 1.7, pois os transformadores são construídos com enrolamentos feitos a partir de cabo de seção retangular.

DR_K = Índice de desclassificação de transformador utilizando a norma europeia.

1.5 Normas Americanas

IEEE - ANSI - Std C57.110-1998 - "FHL"

Este documento, *IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*, aprofunda o estudo da desclassificação de transformadores sujeitos a cargas não-lineares.

Estabelece que o fator de perdas devido a harmônicas de corrente (FHL) é obtido através da relação entre total de perdas devido a correntes parasitas e as perdas por correntes parasitas sem conteúdo harmônico. Ou seja:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h \max} \left(\frac{I_h}{I_{ef}} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h \max} \left(\frac{I_h}{I_{ef}} \right)^2}$$

Sendo que:

I_h = Amplitude da corrente da h harmónica [A]

h = Índice da harmónica da corrente.

Underwriters Laboratory UL 1561 & UL1562 - "K-Factor, KUL"

Importante saber que na comunidade científica americana, existe uma norma adicional supracitada, que defende que o K- Factor é definido por:

$$K_{UL} = \sum_{h=1}^{h=h \max} \left(\frac{I_h}{I_{ef}} \right)^2 h^2$$

Para além de ser uma função da distribuição do conteúdo harmónico da corrente, o KUL está dependente da amplitude desta última. O KUL relaciona-se com o FHL através da seguinte expressão definida em:

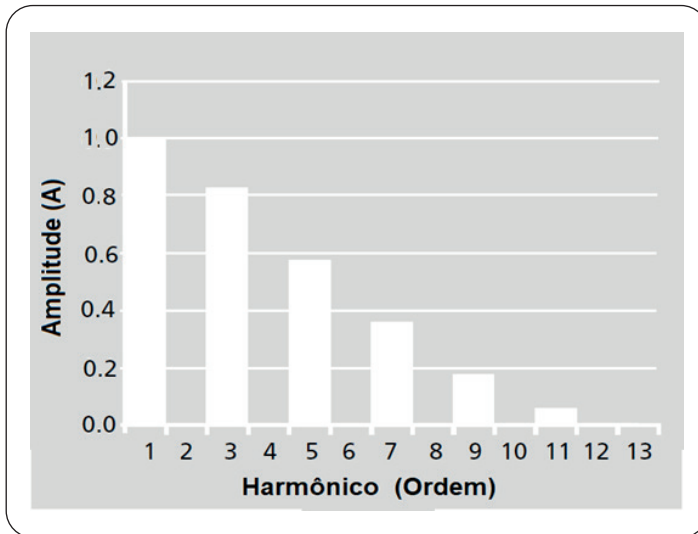
$$K_{UL} = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h=h \max} (I_h)^2}{I_{ef}^2} \right] F_{HL}$$

Tendo em vista a correlação entre o Fator K calculado pela IEEE (FHL) e o calculado pela UL (KUL) do ponto de vista prático calcula-se o De-Rate (CENELEC - EN 50464-3:2007) e o Fator K (UL 1561 & UL1562).

Exemplo prático:

Considerando o espectro de harmônicos abaixo, calcule o fator K.

Figura 4 - Exemplo de espectro de harmônicos



Ordem do Harmônico	Corrente (x In)	(I_n/I_1)	$(I_n/I_1)^2$	(I_n/I_1)	$(I_n/I_1)^2$	$n^2(I_n/I_1)^2$	$n^q (q=1,7)$	$n^q(I_n/I_1)^2$
1	1,000	1,000	1,000	0,676	0,457	0,457		
3	0,820	0,820	0,672	0,554	0,307	2,766	6,4730	4,3525
5	0,580	0,580	0,336	0,392	0,154	3,844	15,4258	5,1893
7	0,380	0,380	0,144	0,257	0,066	3,234	27,3317	3,9467
9	0,180	0,180	0,032	0,122	0,015	1,200	41,8998	1,3576
11	0,045	0,045	0,002	0,030	0,001	0,112	58,9342	0,1193
		Soma=	2,188			Fator K = 11,614	$\Sigma=$	14,97
		I _{total} (A _{rms})	1,479				$\Sigma(I_1/I)^2=$	6,841
		$(I_1/I)^2$	0,457				$e/(1+e)=$	0,091
							K²=	1,622
							K=	1,27
							De-rate=	78,52%

Ou seja, um transformador para alimentar uma carga não linear com o espectro acima deve ter FATOR K = 12 (11,614).

Por outro lado, caso essa carga estiver sendo alimentada por um transformador com K=1 (UL), deve-se praticar uma Desclassificação (De-Rate) = 78,52% (percentual da potência nominal do transformador) para garantir que não ocorra diminuição na vida útil do transformador

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ESTUDO COMPARATIVO DA DESCLASSIFICAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO - CARLOS FILIPE DE JESUS MARQUES DIAS - DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES.
- Copper Development Association (Publication 144)
- Rating of Transformers supplying Harmonics-Rich Loads – David Chapman – Copper Development Association (Leonardo Energy).
- ABB Document Title: Loading transformers with non sinusoidal currents (1LES100070-ZB)

3 ANEXOS

ANEXO 1

Classificações de acordo com a IEEE - ANSI - Std C57:110-1998

K FACTOR

K-1	<ul style="list-style-type: none">• Standard transformer• Standard lightning• Motors
K-4	<ul style="list-style-type: none">• Induction heater• SCR• AC Drive
K-9	<ul style="list-style-type: none">• DC Drive
K-13	<ul style="list-style-type: none">• School pulse lightning• Hospital
K-20	<ul style="list-style-type: none">• Data processing computer• Computer room

Fator K=1: Um transformador com essa classificação foi projetado para lidar apenas com os efeitos de aquecimento de correntes de Foucault e outras perdas resultantes de carga em corrente senoidal de 60 Hz no transformador. Esse transformador pode ou não ser projetado para lidar com o aumento do aquecimento de harmônicos em sua corrente de carga. As aplicações são motores, iluminação incandescente, aquecimento por resistência, geradores de motores (sem inversores de estado sólido).

Fator K=4: Um transformador com essa classificação foi projetado para fornecer KVA classificado, sem superaquecimento, a uma carga composta de 100% da corrente fundamental normal de 60 Hz, onda senoidal, mais: 16% da corrente fundamental. Corrente de 3ª harmônica; 10% do fundamental como 5º; 7% do fundamental como 7º; 5,5% do fundamental como 9º; e porcentagens menores através do 25º harmônico. O "4" indica sua capacidade de acomodar quatro vezes as perdas de corrente de Foucault de um transformador K-1. Os usos são iluminação HID, aquecedores por indução, soldadores, nobreaks com filtro de entrada opcional, CLP e controles de estado sólido.

Fator K=9: Um transformador K-9 pode acomodar 163% da carga harmônica de um transformador K-4.

Fator K=13: Um transformador K-13 pode acomodar 200% da carga harmônica de um transformador classificado como K-4. Esses transformadores são usados para vários circuitos de tomadas em instalações de assistência médica, UPS sem filtragem de entrada opcional, Produção ou montagem de equipamentos de linha, Escolas e instalações de sala de aula.

Fator=20, K=30, K=40: O número mais alto de cada uma dessas classificações de fator K indica capacidade de lidar com quantidades sucessivamente maiores de conteúdo de carga harmônica sem superaquecimento. Alguns desses transformadores são usados em inversores de velocidade variável SCR, circuitos com equipamento exclusivo de processamento de dados, instalações de tratamento intensivo e sala de operações do hospital.

ANEXO 2

Equivalência entre o fator K (UL) e Fator K (EN50541-2:2013 que substituiu a HD 538)

THD	0.136	0.194	0.241	0.281	0.350	0.413	0.443	0.472	0.501	0.529	0.585	0.641	0.727
K-Factor UL	2.00	3.00	4.00	5.00	7.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	15.00	17.00	20.00
OVER RATING FACTOR K HD 538 Eddy = 0.15 RI2 loss	1.02	1.04	1.06	1.08	1.12	1.15	1.17	1.19	1.20	1.22	1.25	1.28	1.33
$I_1(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.991	0.982	0.972	0.963	0.944	0.924	0.914	0.904	0.894	0.884	0.863	0.842	0.809
$I_3(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.097	0.137	0.168	0.194	0.238	0.275	0.291	0.307	0.322	0.336	0.363	0.388	0.423
$I_5(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.058	0.082	0.101	0.117	0.143	0.165	0.175	0.184	0.193	0.202	0.218	0.233	0.254
$I_7(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.042	0.059	0.072	0.083	0.102	0.118	0.125	0.132	0.138	0.144	0.156	0.166	0.181
$I_9(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.032	0.046	0.056	0.065	0.079	0.092	0.097	0.102	0.107	0.112	0.121	0.129	0.141
$I_{11}(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.026	0.037	0.046	0.053	0.065	0.075	0.079	0.084	0.088	0.092	0.099	0.106	0.115
$I_{13}(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.022	0.032	0.039	0.045	0.055	0.063	0.067	0.071	0.074	0.078	0.084	0.090	0.098
$I_{15}(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.019	0.027	0.034	0.039	0.048	0.055	0.058	0.061	0.064	0.067	0.073	0.078	0.085
$I_{17}(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.017	0.024	0.030	0.034	0.042	0.048	0.051	0.054	0.057	0.059	0.064	0.069	0.075
$I_{19}(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.015	0.022	0.027	0.031	0.038	0.043	0.046	0.048	0.051	0.053	0.057	0.061	0.067
$I_{21}(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.014	0.020	0.024	0.028	0.034	0.039	0.042	0.044	0.046	0.048	0.052	0.055	0.060
$I_{23}(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.013	0.018	0.022	0.025	0.031	0.036	0.038	0.040	0.042	0.044	0.047	0.051	0.055
$I_{25}(\text{pu } I_{\text{rated}})$	0.012	0.016	0.020	0.023	0.029	0.033	0.035	0.037	0.039	0.040	0.044	0.047	0.051

Remark: this equivalence list is valid up to 3150kVA transformers

ABB Document Title: Loading transformers with non sinusoidal currents (1LES100070-ZB)

Interpretação/exemplo

Supondo-se que um transformador seja solicitado a fornecer 2000kVA (chamado de potência fundamental de acordo com a IEC 61378-1), enquanto o conteúdo harmônico da rede é definido conforme $K_{factor}(UL)=12$, a potência equivalente (que inclui o efeito harmônico) dessa unidade deve ser igual à potência fundamental multiplicada pelo fator $K(HD538)$ adequado de acordo com a tabela acima.

Isto é:

Potência Fundamental – 2000kVA

Conteúdo harmônico líquido – $K(UL)-12 \Rightarrow$ Fator $K(HD538)$ igual a 1,20

Potência equivalente - $2000 \times 1,20 = 2400kVA$

Como resultado disso, o transformador deve ter tamanho físico de potência nominal de 2400kVA e o limite de aumento de temperatura também deve ser garantido com uma potência equivalente.

  itaiputransformadores  itaipu.transformadores



+55 16 3263 9400

comercial@itaiputransformadores.com.br | www.itaiputransformadores.com.br
Av. Sérgio Abdul Nour, 2106 . Distrito Industrial II . Itápolis SP . Brasil