



**XXII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GDS/22
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**PROPOSTA PARA ADEQUAÇÃO DOS LIMITES DE HARMÔNICOS DEVIDO À EXPANSÃO DAS NOVAS
FONTES NÃO LINEARES - INVERSORES E EÓLICAS**

Luiz Carlos de Alcântara Fonseca *

Jurandir de Almeida Cavalcanti

CHESF Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

RESUMO

Este informe técnico mostra a origem dos limites decrescentes de harmônicos, analisando as suas premissas, os equipamentos envolvidos, formulação destes limites e sua evolução. Analisa também os sistemas de geradores eólicos bem como as novas cargas poluidoras, mostrando como são oneradas pelos limites de tensões harmônicas impostas pelos agentes reguladores. Procura analisar os efeitos dos harmônicos nos diversos equipamentos e sistemas da rede elétrica. A partir destas premissas propõe uma adequação dos limites atualmente existentes.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da energia, Harmônicos, Limites de Harmônicos, Inversores, Usinas Eólicas.

1.0 - INTRODUÇÃO

A recomendação inglesa "Limits for Harmonics in the United Kingdom Electricity Supply System"(1), tem seus fundamentos expostos no documento Report on Limits for Harmonics in the UKL Electricity supply Industry (ACE Report no 73 1979) (2), elaborado pelo British Electricity Boards. O ponto de partida do estabelecimento desta norma foi a elaboração de uma tabela de limites de distorção de tensão válida para qualquer ponto do sistema e que está mostrada na Tabela 1 (1). Os números limites foram escolhidos baseados na distorção harmônica pré-existente na rede e no valor admissível de distorção considerada no projeto dos equipamentos elétricos (5%) Atualmente referência aponta para níveis de compatibilidade mais elevados podendo-se permitir uma distorção total da ordem de 8% (3).

Depois de se ter provido um guia para o limite de distorção máxima de tensão para a rede, uma tabela foi criada estabelecendo os limites de distorção de tensão que cada consumidor poderia ser permitido causar. Esta tabela permitiu também a elaboração de outra tabela com limites de corrente.

A Tabela 2 (2) foi adotada como limite de distorção que cada consumidor poderia causar no ponto de acoplamento comum e dá o acréscimo de distorção que cada consumidor individual poderia acrescentar aos níveis existentes (2,5%, para 0,415kV, por exemplo), considerando nenhum fator de diversidade. Esta tabela foi feita lendo-se em consideração as características próprias de penetração na rede, efeitos nocivos e intensidade de geração dos equipamentos poluentes para cada ordem harmônica. Note bem: "intensidade de geração dos equipamentos poluentes". Neste caso principalmente pontes conversoras com sua característica de geração de corrente de forma inversamente proporcional à ordem harmônica, para os harmônicos característicos e para os não

* Rua Delmiro Gouveia, 333 - CEP 50761-901 - Recife - PE - BRASIL
Tel.: +55 (081) 3229-2607 - FAX: +55 (081) 3229-2488 - E-mail: lfonseca@chesf.gov.br

característicos algo em torno de 20% do valor do calculado para um característico. Os limites individuais de harmônicos foram distribuídos de forma a que o somatório desse o valor do incremento da distorção permitida (2,5% no caso para 0,415kV).

Não deve desconsiderar também os efeitos nocivos, que dependem também da ordem do harmônico, mas como se pode deduzir dos valores da Tabela 2 (2) a influência da característica da geração inversamente proporcional é preponderante.

Daí foi também estabelecido os limites de corrente, o que também leva em consideração os tipos de equipamentos normalmente encontrados nas redes tradicionais ou seja pontes hexafásicas. Foi considerado que era mais prático para os consumidores e fabricantes que os limites de distorção harmônica fossem estabelecidas em termo de correntes harmônicas máximas permissíveis por consumidor. Isto porque os fabricantes podem mais facilmente calcular os valores de correntes harmônicas do que o aumento da distorção de tensão no ponto de acoplamento comum. Para este fim, se tomou a Tabela 2 (2) e com a consideração de que a impedância harmônica seria proporcional à impedância de curto-circuito, cujos valores típicos podem ser vistos na Tabela 3 (2), calcularam-se as correntes harmônicas máximas permitidas, ou seja, o sistema foi considerado não ressonante. Para uma maior potência de curto os níveis de correntes harmônicas para uma mesma distorção de tensão, poderiam ser mais elevados.

A corrente é calculada da seguinte forma

$$I_n(A) = \left(\frac{10 \times P_{cc}}{3} \right) \times \left(\frac{V_n(\%)}{n} \right) \quad [1]$$

Onde:

- $V_n(\%)$ = tensão harmônica, em %, máxima permissível (Tabela 2)
- P_{cc} = potência de curto-circuito no ponto de acoplamento comum (Tabela 3)
- n = ordem harmônica
- $I_n(A)$ = corrente harmônica em ampere.

A Tabela 4 (2) mostra o cálculo detalhado do limite de corrente harmônica para o nível de tensão de 0,415 kV, por fonte individual.

TABELA 1- Limites de distorção harmônica de (1)tensão em qualquer ponto do sistema

Tensão do Sistema (KV) no PAC (Ponto de Acoplamento Comum)	Distorção Harmônica Total da Tensão $V_t(\%)$	Distorção Harmônica Individual da Tensão (%)	
		ímpar	par
0.415	5	4	2
6.6 e 11	4	3	1,75
33 e 66	3	2	1
132	1,5	1	0,5

Tabela 2 - Limite de distorção harmônica de tensão por consumidor (2)

Tensão do Sistema	0,415 kV	11 kV	33& 66 kV	132 kV
Distorção Harmônica Total Máxima	2,5	2	1,5	1,5
n	Distorção Harmônica Individual Máxima			
2	0,7	0,5	0,25	0,25
3	0,75	0,5	0,25	0,3
4	0,7	0,5	0,25	0,3
5	1,0	0,5	0,5	0,5
6	0,5	0,5	0,3	0,3
7	2,0	1,0	0,5	0,5
8	0,5	0,5	0,3	0,25
9	0,5	0,5	0,25	0,25
10	0,5	0,75	0,25	0,25

TABELA 3 - Níveis de curto-circuito considerado na Inglaterra, por nível de Tensão

Nível de Curto – Circuito do Sistema	
Tensão do Sistema.(kV)	Nível de Curto-Circuito Considerado
0,415	10
6,6/11	100
33/66	500
132	1000

TABELA 4 - Cálculo do limite de corrente harmônica para 415 V.

Ordem Harmônica.	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vn (%) - Tabela I do G5/3	0,7	0,75	0,7	1,0	0,5	2	0,5	0,5	0,5
Vn (%) ÷ n	0,35	0,25	0,175	0,2	0,083	0,286	0,063	0,056	0,05
In (A) (valor do G5/3)	48	34	22	56	11	40	9	8	7

Para alguns tipos de equipamentos foram estabelecidos as potências máximas permissíveis correspondentes aos limites de correntes harmônicas, mais uma vez levou-se em consideração a geração típica dos conversores da época, principalmente pontes conversoras. Para se atingir os valores nominais dos equipamentos foram obtidas as correntes harmônicas geradas, através de medições e de dados publicados, tendo estes valores sido acordados com os fabricantes. Os valores de correntes acordados estão mostrados na Tabela 5 (2). Os limites para os harmônicos pares são menores, pois estes harmônicos, inexistentes quando há simetria em relação ao eixo dos tempos, são, normalmente, indício de componente DC no lado da carga, ou seja, no secundário de um transformador, o que indica uma operação extremamente desequilibrada de um conversor.

TABELA 5 - Correntes harmônicas geradas por tipo de equipamento

	Ordem Harmônica	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3- Pulsos	3 Pulsos controlado pela rede 3- Diodos.	50	33,3	25	20	16,7	14,3	12,5		10
6- Pulsos	6 Pulsos controlado pela rede 6- Diodos.				17,5		11			
	Semi controlada 3Tiristores /3 Diodos	35		22	20		14	10		3

De posse dos limites permissíveis de correntes harmônicas injetadas, Tabela 6 (1) e (2), e da percentagem das correntes harmônicas geradas por equipamentos, ou seja, pontes conversoras, e através de tentativas se chegaram aos valores nominais de potência dos equipamentos poluidores. Por exemplo: um equipamento de 100 kVA (tiristor, 6 pulsos) se enquadra dentro dos limites de corrente (para a tensão de 0,415kV) e a distorção total será de 1,87% quando a permissível é de 2,5%.

As Tabelas 7 e 8 obtidas de (4) e (7) mostram que a metodologia continua a mesma, pois os limites continuam decrescentes. Os harmônicos ímpares triplos são encontrados em menores valores na rede elétrica, pois, os equilibrados destas ordens, são filtrados nos deltas dos transformadores, por isso se pode atribuir limites menores para estas ordens. Os harmônicos pares, por serem gerados quando não há simetria de meia onda, portanto o seu aparecimento é indício de grande desequilíbrio num conversor, atribui-se valores menores para garantir que o equipamento conversor esteja em perfeitas condições de funcionamento, e não por ser necessário à compatibilidade eletromagnética com outros equipamentos. Normalmente estão associados a componentes contínuas em conversores a diodo e tiristorizados, em consequência seus valores devem ser mantidos de pequena ordem.

TABELAS 6 - Correntes harmônicas permitidas por qualquer consumidor no ponto de acoplamento comum considerando os limites do Estágio 2

Tensão de Suporimento no Ponto de Acoplamento Comum (kV)	ORDEM HARMÔNICA E CORRENTE (A)																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,415	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	5	5	5	6	4	6	
6,6 e 11	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
132	5	4	3	4	2	0.3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

TABELA 7 - Limites individuais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental. - Relatório ONS RE 2.1 045/2008 Rev.02 "Instruções para realização de estudos e medições relacionados aos novos acessos à rede básica".

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PAR	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DTHTS95%=3%				DTHTS95%= 1,5%			

TABELA 8 - Níveis de tensões harmônicas indicativas para o planejamento (em % da tensão fundamental) para sistemas de potências de MV, HV e EHV. - IEC 61000-3-6 Ed.2 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Assessment of Harmonic emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV Power systems.

Harmônicos Ímpares não Múltiplos de Três			Harmônicos Ímpares Múltiplos de Três			Harmônicos Pares		
Ordem Harmônica h	Tensão Harmônica %		Ordem Harmônica h	Tensão Harmônica %		Ordem Harmônica h	Tensão Harmônica %	
	MV	HV-EHV		MV	HV-EHV		MV	HV-EHV
5	5	2	3	4	2	2	1,8	1,4
7	4	2	9	1,2	1	4	1	0,8
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,4
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,5	0,4
$17 \leq h \leq 49$	$1,9 \cdot \frac{17}{h} - 0,2$	$1,2 \cdot \frac{17}{h}$	$21 < h \leq 45$	0,2	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,25 \cdot \frac{10}{h} + 0,22$	$0,19 \cdot \frac{10}{h} + 0,16$

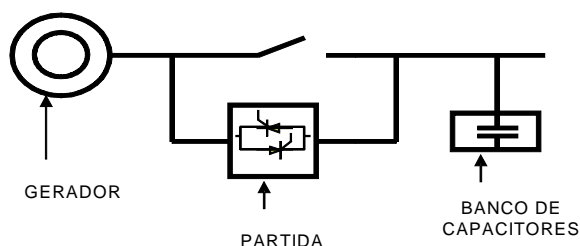
Os níveis indicativos para planejamento da distorção total de tensão são: THDMV= 6,5% e THDVHV-EHV=3%.

Sendo que: MV corresponde a 1 KV < Un ≤ 35 KV ,HV corresponde a 35 KV < Un ≤ 230 KV e EHV corresponde a 230 KV < Un

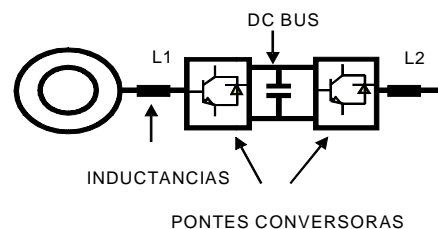
2.0 - CARACTERÍSTICA DOS GERADORES EÓLICOS E OUTROS EQUIPAMENTOS INVERSORES A FONTE DE TENSÃO (VSI).

Os geradores eólicos usam em sua grande maioria sistemas inversores tipo VSI e conseqüentemente os harmônicos gerados não têm o formato similar aos das fontes tipo ponte hexafásica, quer tiristorizadas quer a diodos, que se caracterizam pelo valor decrescente em relação à sua ordem, e sim dependem da frequência da onda portadora na criação da forma de onda senoidal. A Figura 1 mostra os tipos de geradores eólicos.

• ASSÍNCRONO (SCIG)

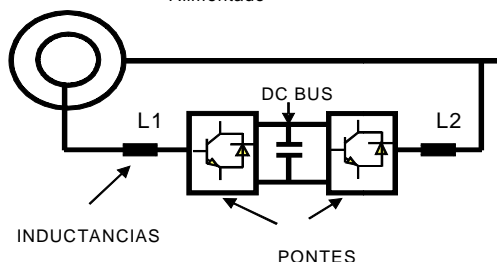


• ASSÍNCRONO CONVERSÃO TOTAL



• ASSÍNCRONO DUPLAMENTE ALIMENTADO (DFIG)

Gerador de Indução Duplamente Alimentado



• SÍNCRONO CONVERSÃO TOTAL

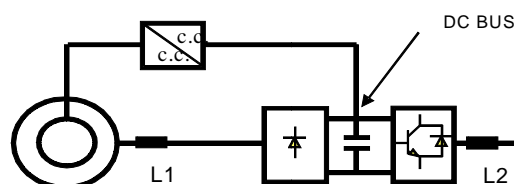


FIGURA 1 - Tipos de Geradores Eólicos.

A Figura 2 de (5) mostra uma análise em frequência deste tipo de equipamento, onde a frequência da onda portadora é de $f_{sw} = 900$ Hz e os harmônicos estão centrados em m_f ($m_f \pm 1$) e seus múltiplos tais como $2 \times m_f$, $3 \times m_f$. Onde $m_f = 15$, () e a Figura 3 é de um sistema SVM (Space Vector Modulation) onde a frequência da onda portadora é de $f_{sw} = 900$ Hz a onda criada não tem simetria de meia onda, portanto contém harmônicos pares além dos ímpares, mas não componente DC.

A Tabela 9 mostra o resultado de medições, em laboratório credenciado, das correntes harmônicas de um gerador eólico de indução duplamente alimentado.

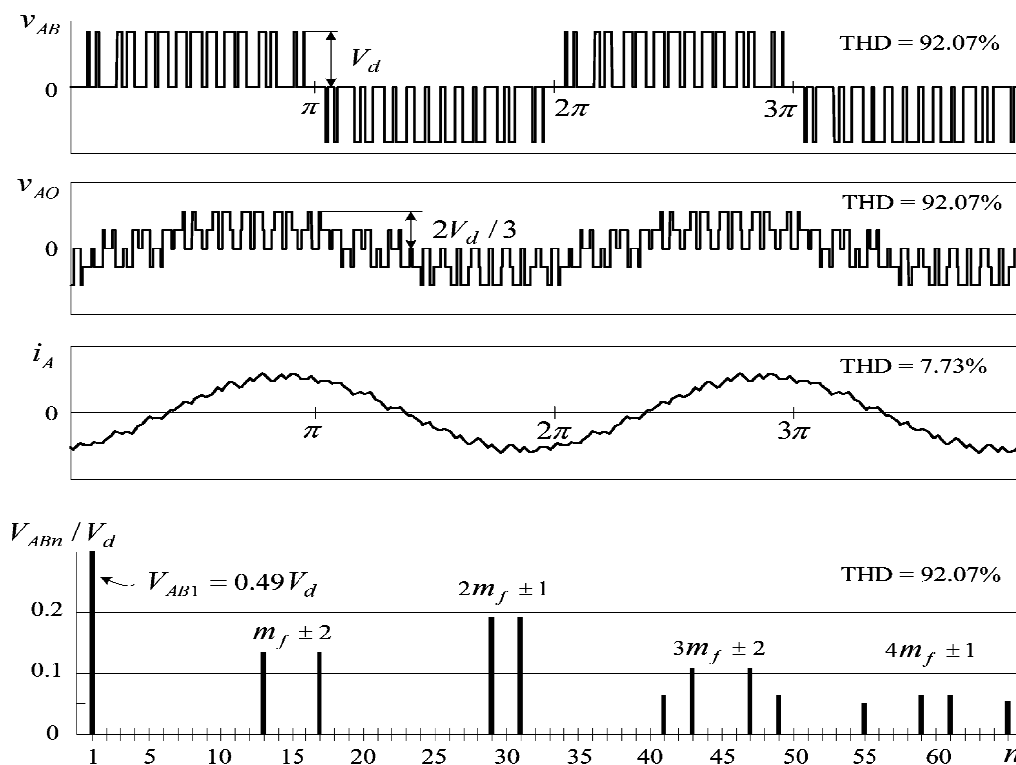


FIGURA 2 - Formas de onda de um PWM (Pulse Width Modulation) operando com $m_a = 0,8$, $m_f = 15$, $f_m = 60$ Hz e $f_{sw} = 900$ Hz.

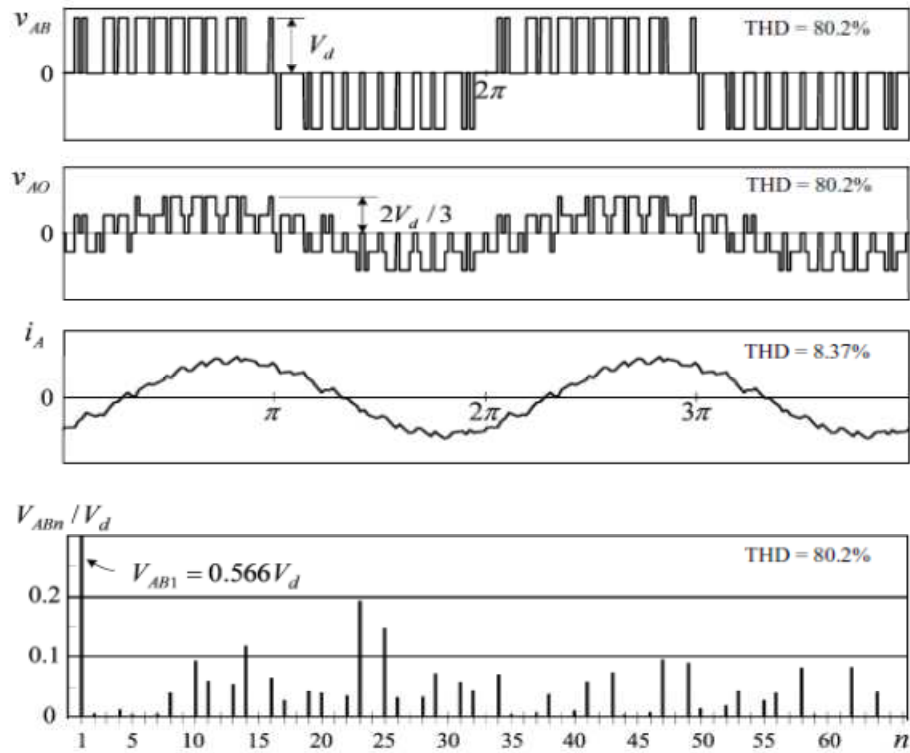


FIGURA 3 - Formas de onda de um SVM (Space Vector Modulation) operando com $m_a = 0,8$, $m_f = 15$, $f_1 = 60$ Hz e $f_{sw} = 720$ Hz.

TABELA 9- Correntes Harmônicas injetadas por um Gerador Dados Fornecidos pelo Fabricante, obtidas em laboratório credenciado.

CURRENT HARMONIC MEASURED			MAXIMUM IEEE Std. 519-1992 (Systems between 69.001 V y 161.000 V) $I_{sc} / I_l < 20$ (3)	
HARMONIC Nº	MEASURED VALUE(%) (1)	COMPARISON VALUE(%) (2)	HARMONIC Nº	LIMIT VALUE (%)
	G52 / G58	G52 / G58		
2	0.24 / 0.25	1.13 / 2.47	<11	2
3	0.33 / 0.37			
4	0.18 / 0.35			
5	0 / 0.48			
6	0.24 / 0.37			
7	0 / 0.63			
8	0.14 / 0.02			
12	0.26 / 0.02	0.46 / 0.33	11 ≤ h < 17	1
14	0.2 / 0.13			
17 ≤ h < 23	0 / 0.11	0 / 0.11	17 ≤ h < 23	0.75
23 ≤ h < 35	0.48 / 0.99	0.48 / 0.99	23 ≤ h < 35	0.3
37	0.17 / 0	0.34 / 0.55	35 ≤ h	0.15
47	0 / 0.11			
48	0 / 0.11			
49	0.17 / 0.33			
THD (%) (1)	0.58 / 1.05	<	THD (%)	2,5(4)

3.0 - EFEITO DA ORDEM HARMÔNICA NOS EQUIPAMENTOS.

Normalmente os efeitos são crescentes com a ordem dos harmônicos. Os efeitos dos harmônicos nos equipamentos são de três naturezas (6):

- Stresses térmicos
 - Perdas no cobre
 - Perdas no ferro
 - Perdas dielétricas
- Stresses no isolamento
- Mal funcionamento da carga

Os dois primeiros fenômenos estão mais associados à duração dos harmônicos, são efeitos de longa duração, portanto, independente da ordem do harmônico envolvido. Enquanto o último, e também o segundo, estão envolvidos com o cruzamento com o zero, e com o pico da tensão o que depende mais do conteúdo harmônico e dos ângulos de fase dos mesmos, o que é de certo modo, aleatório. Nesta definição está também incluída a circulação de correntes harmônicas na armadura das máquinas, gerando torques pulsantes ou constantes e desenvolvimento de torque contrário à rotação nos motores de indução. Mas como a impedância dos capacitores diminui com a frequência, normalmente a maioria dos problemas com harmônicos aparecem em primeiro lugar nos bancos de capacitores em derivação. As normas destes equipamentos, no entanto, exigem que eles funcionem continuamente sob uma tensão eficaz, entre os terminais (incluindo harmônicos) não ultrapasse 1,10 vezes a tensão nominal.

A interferência telefônica (TIF) é distúrbio causado pelos harmônicos do sistema de potência nos sistemas de comunicação. Este distúrbio está associado à frequência através de uma curva de ponderação (C message), cuja dependência é com a sensibilidade do ouvido humano e não com a ordem da frequência.

Observa-se que uma distorção total de tensão da ordem de 5% é bem tolerada por estes equipamentos, muito embora 8% (3), como foi citado no item 1, deva ser considerado como o valor de referência para a compatibilidade eletromagnética.

4.0 - PROPOSTA DE LIMITES

Como foi visto nos itens 1 e 3 a diferenciação para os harmônicos pares e triplos não tem correlação com compatibilidade eletromagnética, nem o valor decrescente pela ordem tem influência na maior parte dos equipamentos sensíveis. Como a geração de harmônicos, com as cargas de inversores, tende a crescer, não teria mais sentido a manutenção dos limites decrescentes de harmônicos. A proposta seria ter como referência a distorção total de tensão, valor este relevante para os efeitos tanto imediatos como de longa duração nos equipamentos sensíveis. Mantendo-se as tensões individuais com um limite único, e não decrescente com a ordem harmônica. Atenção deve ser dada ao somatório das diversas fontes (8) e ao cálculo da distorção total. Sendo que neste caso o uso das máximas correntes individuais (4), que não ocorrem no mesmo ângulo de disparo, seria muito rigoroso, sendo mais adequado o uso da potência do equipamento que apresente a maior distorção total.

5.0 - CONCLUSÕES

A origem dos limites decrescentes de harmônicos foram os equipamentos retificadores a diodo ou tiristorizados, anteriormente os a válvula de mercúrio, que geram correntes harmônicas relacionadas ao número de pulsos e são inversamente proporcional a esta ordem.

A partir da suportabilidade dos equipamentos para um nível de distorção total, foram distribuídas as distorções individuais, considerando-se: os níveis existentes de distorção, características próprias de penetração na rede, efeitos nocivos e a intensidade de geração dos equipamentos poluentes, ou seja, montagem com diodos e tiristores

Inclusive foi possível se estabelecer limites de potência para conexão de equipamentos, uma vez que se dispunha do perfil de correntes harmônicas geradas por cada tipo de equipamento e da consideração de um valor de impedância harmônica proporcional a potência de curto da barra.

As novas fontes de harmônicos do tipo VSI não têm o mesmo tipo de perfil das fontes a diodo ou tiristorizadas. Os efeitos dos harmônicos embora sejam, de certo modo, dependentes da ordem harmônica, para uma dada distorção total esta influência é pequena, ao menos dos bancos de capacitores (6), portanto, os limites decrescentes de harmônicos não são mais adequados. Em decorrência destas observações está proposto um critério de limitar pela distorção total, considerar a condição de potência do equipamento que forneça a maior distorção total invés do uso das maiores contribuições individuais e também uma atenção no índice do fator alfa do somatório das diversas fontes.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Limits for Harmonics in the United Kingdom Electricity Supply System. The Electricity Council – Chief Engineers' Conference, September 1976. Engineering Recommendation G.5/3.
- (2) ACE Report no 73 (1979) Report on Limits for Harmonics in the UK Electricity supply Industry. British Electricity Boards.
- (3) IEC 1000-2-2-1990-Part 2 : Environment-Section 2: "Compatibility levels for low-frequency conducted

disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems"

- (4) Relatório ONS RE 2.1 045/2008 Rev.02 "Instruções para realização de estudos e medições relacionados aos novos acessos à rede básica".
- (5) High-Power Converters and AC drives. Bin Wu. IEEE Press 2006
- (6) Effects of Harmonics on Power system Equipment and Loads. A.P. Sakis Meliopoulos, K. R. Chakravarthi e Thomas Ortmeyer. IEEE 1984
- (7) IEC 61000-3-6 Ed.2 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Assessment of Harmonic emission limits for the connection of distorting instalations to MV, HV and EHV Power systems.
- (8) Harmônicos no sistema interligado devido a uma usina eólica – estudo detalhadocomparando com método expresso. L. C. de A. Fonseca, J. A. Cavalcanti. XXI SNPTEE, Florianópolis, SC, Agosto de 2010.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Luiz Carlos de Alcântara Fonseca nasceu em 20 de julho de 1953, em Recife, Pernambuco, é engenheiro eletricista formado em 1977 pela UFPE, e especializou-se em Sistema de Potência pelo PTI em 1979.

Mestre em Sistema de Potência pela UFPE, em 2003.

De 1977 a 2013, trabalha no Departamento de Planejamento do Sistema de Transmissão da CHESF, se especializou em estudos de Qualidade da Energia, atualmente está desenvolvendo Estudos de Transitórios Eletromagnéticos e de Qualidade da Energia.

Suas áreas de interesse são: Compatibilidade Eletromagnética, Transitórios Eletromagnéticos e Qualidade da Energia.