



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

BR/GDS/24  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

## **GRUPO - X**

### **GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

#### **PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA E CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DAS CAPACIDADES NOMINAIS DE FILTROS DE CORRENTES HARMÔNICAS INSTALADOS EM PARQUES EÓLICOS**

**Miguel Pires De Carli (\*)  
ELETROBRAS ELETROSUL**

## **RESUMO**

Este Informe Técnico propõe uma metodologia para o cálculo das máximas solicitações de corrente em filtros passivos de parques eólicos e apresenta critérios conservadores que devem ser utilizados na definição das capacidades nominais dos elementos dos filtros, a fim de evitar sobrecargas durante sua vida útil.

Em um estudo de caso, baseado em um projeto de filtros passivos para parques eólicos fictícios, é realizado o cálculo das capacidades dos elementos dos filtros demonstrando a importância de se considerar tanto as correntes provenientes da distorção de tensão pré-existente na rede, como avaliar as correntes na indisponibilidade de outros filtros.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Harmônicos, Filtros Passivos, Capacidade Nominal, Parques Eólicos, Lugar Geométrico

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

A grande preocupação com o meio ambiente e a busca por fontes de energia limpas e renováveis tem motivado forte crescimento da energia eólica no Brasil e no mundo. Desde o lançamento do Proinfa, observa-se tanto o aumento do interesse por esta fonte de energia quanto a redução do custo do MWh negociado nos leilões. Somente com energia já contratada o Brasil deverá ter 8 GW instalados desta fonte no ano de 2016.

O aumento da inserção da energia eólica no sistema elétrico pode causar impactos na Qualidade de Energia Elétrica (QEE) do sistema, particularmente no que se refere à distorção harmônica de tensão. O principal motivo deste impacto são os retificadores e inversores utilizados nos aerogeradores de velocidade variável. A maneira usual de mitigar este impacto, quando os limites de distorção de tensão são excedidos, é instalar filtros harmônicos.

Diante desta expectativa de crescimento da inserção da energia eólica no sistema e da possibilidade de degradação da QEE, é fundamental que os empreendedores estejam preparados tanto para avaliar os impactos causados pelos seus empreendimentos, seguindo a metodologia estabelecida pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) em (1), como para especificar filtros harmônicos capazes de reduzir as distorções de tensão a valores aceitáveis e, fundamentalmente, de suportar as solicitações de correntes e tensões impostas nos seus componentes ao longo de sua vida útil.

Logo, o Informe Técnico (IT) propõe uma metodologia para o cálculo das máximas solicitações de correntes em filtros passivos de parques eólicos, baseada no procedimento de cálculo das capacidades nominais (*rating*) de filtros passivos para sistemas de transmissão em corrente contínua apresentado na norma IEC 62001 (2). O IT

(\*) Rua Dep. Antônio Edu Vieira, n° 999 – Pantanal – DPS/DVPT – CEP 88040-901 - Florianópolis, SC – Brasil  
Tel: (+55 48) 3231-7166 – Fax: (+55 48) 3234-2608 – Email: mcarli@eletrosul.gov.br

apresenta também critérios conservadores baseados nas normas IEC 62001 e IEEE 1531 (3), que devem ser utilizados na definição das capacidades nominais dos elementos dos filtros a fim de evitar sobrecargas durante sua operação.

Por fim, no estudo de caso de um complexo eólico fictício com duas configurações de filtro para a redução das distorções harmônicas é avaliada a capacidade dos elementos de cada uma destas configurações de filtros, demonstrando a participação das correntes dos aerogeradores e da rede na composição da corrente total que entra nos filtros. Além disto, é apresentado o impacto da indisponibilidade de filtros durante avaliação do *rating*.

## 2.0 - PROJETO DE FILTROS PASSIVOS PARA USINAS EÓLICAS

No Brasil, o ONS exige que um novo acessante ao sistema, seja de carga ou de geração, realize diversos estudos para verificar o impacto de seu empreendimento no sistema. Em um destes estudos, o acessante deve comprovar que a distorção de tensão gerada pelo seu empreendimento no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) atende aos limites estabelecidos no Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede (PR). Este estudo deve ser executado conforme um relatório de instruções para a realização de estudos e medições de QEE (1), o qual estabelece o método do Lugar Geométrico (LG) como a metodologia a ser utilizada para o cálculo das distorções.

Para o caso dos parques eólicos, quando é verificado através de estudos que eles provocam distorções acima dos limites permitidos, filtros devem ser instalados junto ao parque. A solução de filtragem pode ser passiva, ativa ou híbrida. Neste IT somente será abordada a solução de filtros passivos.

O projeto de filtros passivos pode ser dividido basicamente em duas partes: avaliação da performance e a definição das capacidades nominais dos filtros. A avaliação da performance consiste em calcular as distorções resultantes da aplicação de uma determinada configuração e parâmetros de filtros. Após o cálculo da performance, são definidas as capacidades nominais dos filtros com base nas máximas correntes e tensões impostas em seus elementos. Este processo normalmente é iterativo e complexo devido as diversas questões que devem ser observadas no projeto, conforme segue (2), (3):

- Definição da necessidade ou limitação de potência reativa dos filtros, tanto por balanço de reativos como por variação de tensão provocada durante chaveamentos;
- Limites de distorção harmônica a serem respeitados, dependendo no nível de tensão do PAC;
- Condições de operação do sistema (regime normal e em contingência);
- Condições de operação dos filtros (indisponibilidade e dissintonias);
- Limitações de área para instalação dos filtros;
- Avaliação das perdas e custos.

## 3.0 - CÁLCULO DAS CAPACIDADES NOMINAIS

Os estudos para a definição das capacidades nominais dos filtros são realizados para determinar as máximas solicitações contínuas de corrente e tensão em seus equipamentos. Os resultados destes estudos são usados para especificação e projeto dos capacitores, reatores, resistores e pára-raios utilizados nos filtros.

Para evitar danos e sobrecargas nos equipamentos a avaliação da capacidade nominal deve considerar as condições mais severas esperadas para os filtros. Portanto, devem ser considerados efeitos de dissintonias nos filtros, a maior tensão fundamental, o maior desvio de frequência efetivo, as correntes de outras fontes e possíveis ressonâncias entre os filtros e o sistema. Além disto, as normas (2) e (3), incluem ainda a avaliação do *rating* na contingência de filtros, pois caso esta análise não seja considerada, a indisponibilidade de um filtro pode requerer o desligamento dos outros filtros da mesma instalação para evitar sobrecargas ou danos nos equipamentos.

Citando um exemplo, o Edital do leilão do sistema de transmissão das usinas do Rio Madeira requeria que os filtros fossem dimensionados para que, durante a operação, não haja necessidade de desligamento por "*overrating*" em condições operativas normais e de contingências simples (n-1) da rede externa, mesmo em caso de operação com indisponibilidade de um filtro.

Portanto, a definição das capacidades nominais dos equipamentos que compõem os filtros é uma responsabilidade do empreendedor e deve ser feita de forma conservadora para sua segurança e para evitar o desligamento de filtros, sobrecargas ou até mesmo a necessidade de redução do despacho de seu parque eólico.

Nas próximas seções são apresentados o método de cálculo das correntes inicialmente proposto em (5), alguns critérios conservadores normalmente utilizados no cálculo do *rating* dos filtros e parâmetros utilizados para a definição das capacidades nominais dos equipamentos.

### 3.1 Método de Cálculo

A definição das capacidades nominais dos filtros é feita considerando um circuito semelhante ao utilizado para o cálculo da performance dos filtros, contudo assumindo condições mais conservadoras, como a inclusão de distorções harmônicas pré-existentes na rede e cenários de operação mais severos ou menos prováveis.

O cálculo das máximas solicitações nos filtros, em regime permanente, é baseado no circuito apresentado na Figura 1a. O circuito representa as correntes harmônicas  $I_h$  geradas pelos aerogeradores modeladas como uma fonte de corrente harmônica de Norton, a impedância harmônica da rede interna do parque eólico  $Z_{lh}$  vista do PAC, a impedância harmônica equivalente de todos os filtros  $Z_{Fh}$  e a impedância harmônica da rede externa  $Z_{Eh}$  representada como um lugar geométrico das impedâncias, mostrado na Figura 1b. Além disto, como forma de considerar as correntes provenientes das distorções de tensão pré-existentes no sistema é modelada também uma fonte de tensão harmônica  $V_{bh}$ .

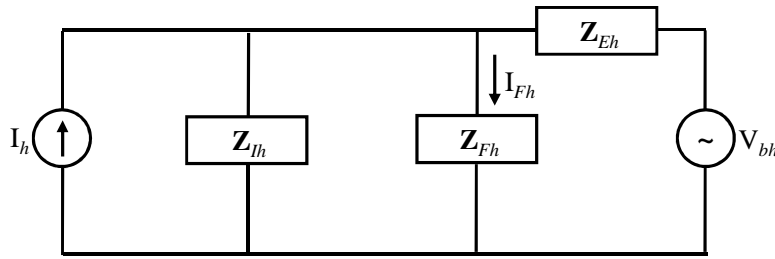


Figura 1a – Modelo geral para o cálculo do rating

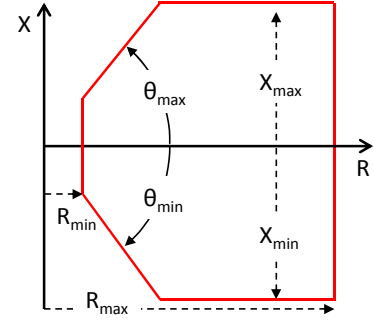


Figura 1b – LG hexagonal

Neste circuito, a corrente harmônica que flui em cada um dos filtros é o resultado da soma de duas componentes, a contribuição vinda dos aerogeradores e a contribuição do sistema. Usando o princípio da superposição é possível obter o valor das correntes totais nos filtros.

O circuito apresentado na Figura 2 permite o cálculo das correntes  $I_{Fah}$  geradas pelos aerogeradores nos filtros.

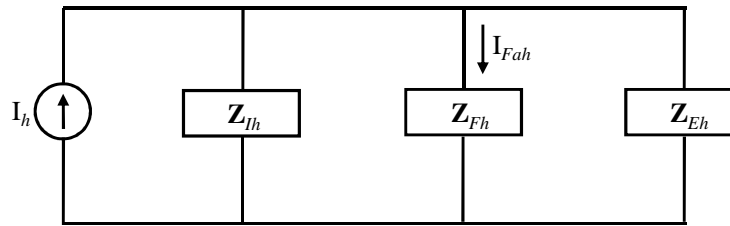


Figura 2 – Modelo para o cálculo do rating – aerogeradores

A corrente harmônica gerada pelos aerogeradores em um dos  $n$  filtros é calculada segundo a Equação 1, onde  $Y_{Fnh}$  é a admitância harmônica do filtro  $n$ . A máxima corrente  $I_{Fanh}$  e o maior estresse nos filtros ocorrem quando o módulo da soma das admitâncias do denominador da Equação 1 é minimizado, o que equivale a maximizar a impedância resultante do circuito (i.e., pior ressonância paralela).

$$I_{Fanh} = \left| I_h \frac{Y_{Fnh}}{Y_{lh} + Y_{Fh} + Y_{Eh}} \right| \quad (1)$$

Para o cálculo das correntes harmônicas originadas pelas distorções pré-existentes no sistema, a impedância harmônica da rede, representada por um LG, está em série com o paralelo das impedâncias da rede interna e dos filtros, como mostra a Figura 3. A fonte de tensão harmônica  $V_{bh}$  que representa as distorções de tensão pré-existentes na rede é colocada atrás da impedância da rede, como está previsto em (2).

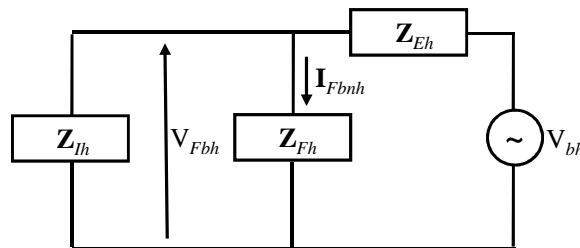


Figura 3 - Modelo para o cálculo do rating – sistema

A corrente harmônica gerada pela rede em um determinado filtro é função da tensão  $V_{Fbh}$  que está sobre ele e de sua impedância como pode ser observado nas Equações 2 e 3. A corrente no filtro é maximizada quando o módulo do denominador da Equação 2 é minimizado.

$$V_{Fbh} = V_{bh} \frac{(Y_{Ih} + Y_{Fh})^{-1}}{Z_{Eh} + (Y_{Ih} + Y_{Fh})^{-1}} \quad (2)$$

$$I_{Fbnh} = \left| \frac{V_{Fbh}}{Z_{Fnh}} \right| \quad (3)$$

O cálculo da corrente harmônica total no filtro devido à combinação das correntes harmônicas vindas dos aerogeradores e da rede como apresentado acima, de forma independente, pode ser resultado da soma das piores correntes de cada uma das fontes, obtidas em pontos distintos da impedância da rede. O uso simultâneo de duas impedâncias distintas em cada um dos circuitos pode gerar resultados inconsistentes e excessivamente conservadores. Portanto, a máxima corrente harmônica em um determinado filtro,  $I_{Fnh}$ , é o resultado da soma das duas correntes utilizando a Equação 4 proposta na IEC 61000-3-6 (5) e considerando a mesma impedância da rede para o cálculo das duas parcelas.

$$I_{Fnh} = \sqrt[\beta]{(I_{Fanh})^\beta + (I_{Fbnh})^\beta} \quad (4)$$

O valor de  $\beta$  depende da ordem harmônica da seguinte forma: 1 para  $h < 5$ , igual 1,4 para  $5 \leq h \leq 10$  e igual a 2 para  $h > 10$ . A norma IEC 62001 sugere a utilização da raiz quadrada da soma dos quadrados para somar o efeito das duas fontes.

### 3.2 Critérios Conservadores

#### 3.2.1 Tensão do Sistema

Para o cálculo das capacidades nominais dos equipamentos dos filtros deve ser considerada a faixa de variação de tensão em regime permanente, tipicamente entre 0,95 e 1,05 pu. Segundo a norma IEC 62001, para valores que excedam esta faixa, o tempo de duração das sobretensões deve ser especificado.

#### 3.2.2 Distorções de Tensão Pré-existent

É importante que o efeito da distorção de tensão pré-existente no sistema seja considerado no cálculo do *rating* dos filtros e para isso utiliza-se uma fonte de tensão de Thévenin atrás da impedância do sistema como mostrado na Figura 1. A magnitude das tensões harmônicas pode ser baseada em dados de medição ou nos limites de desempenho, mas sempre limitada por um valor total de distorção (2).

O Edital do leilão do sistema de transmissão das usinas Rio do Madeira estabelecia que as correntes provenientes da rede externa deveriam ser definidas com base nos limites globais inferiores de tensão harmônica estabelecidos no Submódulo 2.8 dos PR. Um dos fabricantes de um dos bipolos do Madeira utilizou fontes de tensão harmônica aplicadas diretamente sobre os filtros; além disto, foram considerados três conjuntos diferentes de fontes harmônicas e o que gerou os piores resultados foi selecionado para cada caso (6).

#### 3.2.3 Impedância do Sistema

A representação da impedância harmônica do sistema para o cálculo das capacidades nominais dos filtros deve ser diferente da forma utilizada para a avaliação da performance. Nos estudos de *rating* uma ampla gama de condições de rede deve ser usada para assegurar que as capacidades dos equipamentos serão adequadas para suportar durante toda a sua vida útil prevista. Uma forma prática de se conseguir isto é ampliar a área do diagrama de impedâncias utilizado, ou mesmo optar por uma forma mais conservadora de representação da rede, e.g., setor anular. Todavia é importante assegurar que um valor realista de resistência mínima está sendo considerado para garantir que não ocorra uma condição de ressonância não amortecida (2).

Por exemplo, no projeto dos filtros do bipolo 2 do sistema de transmissão do Madeira foram adotadas margens de segurança para a impedância harmônica da rede utilizada no cálculo do *rating* dos filtros (6). A impedância mínima considerada foi 80% do valor original e a impedância máxima foi aumentada de 20%. Os ângulos foram expandidos em  $\pm 5\%$ , limitados em  $\pm 85\%$  quando os ângulos originais fossem inferiores a estes valores.

#### 3.2.4 Efeitos de Dissintonia

Para assegurar que os filtros não terão suas capacidades nominais excedidas, os seguintes fatores devem ser considerados: as tolerâncias de variação garantidas dos equipamentos, a variação de frequência, a variação de temperatura (máxima e mínima absolutas), posição do tape dos reatores e falha de unidades capacitivas.

### 3.3 Capacidades dos Equipamentos

As capacidades nominais dos equipamentos dos filtros são, usualmente, definidas pelos fabricantes com base nas especificações dos equipamentos e segundo (3) é desejável que elas sejam superiores às necessidades para operação contínua com as cargas harmônicas conhecidas (uma margem mínima de 10% é sugerida), visto que o custo incremental para adicionar capacidade ao filtro é menor que o custo médio do filtro harmônico.

As especificações fornecidas ao fabricante devem permitir que as temperaturas e tensões sobre os vários equipamentos que constituem o filtro, bem como o efeito corona sejam previstos para fins de projeto. Para isso, de acordo com a norma IEEE 1531, é mais apropriado especificar um espectro de correntes harmônicas em cada filtro do que a corrente total eficaz. A partir deste espectro, o aquecimento total e estresse dielétrico podem ser calculados, bem como outras variáveis necessárias.

Na sequência são apresentados alguns dos principais parâmetros utilizados para a definição das capacidades dos capacitores, reatores e resistores usados nos filtro passivos.

#### 3.3.1 Capacitores

Para os capacitores, os parâmetros decisivos são a corrente térmica, a tensão de fase máxima incluindo harmônicos e a tensão máxima para a determinação da distância de escoamento, respectivamente, calculados como nas Equações 5, 6 e 7. Segundo (2), existem diversas outras equações menos conservadoras que a apresentada na Equação 6 para o somatório das tensões harmônicas sobre os capacitores dos filtros.

$$I_C = \sqrt{\sum_{h=1}^{50} I_{Ch}^2} \quad (5)$$

$$V_C = \sum_{h=1}^{50} I_{Ch} X_{Ch} \quad (6)$$

$$V_{CCr} = \sqrt{\sum_{h=1}^{50} (I_{Ch} X_{Ch})^2} \quad (7)$$

Onde,  $X_{Ch}$  é a reatância harmônica de ordem h do capacitor e  $I_{Ch}$  é a corrente harmônica de ordem h no capacitor.

#### 3.3.2 Reatores

Para os reatores, os parâmetros decisivos são a corrente térmica, a tensão de fase máxima incluindo harmônicos e a tensão máxima para a determinação da distância de escoamento, respectivamente, calculados como nas Equações 8, 9 e 10. Onde,  $X_{Lh}$  é a reatância harmônica de ordem h do reator e  $I_{Ch}$  é a corrente harmônica de ordem h no reator.

$$I_L = \sqrt{\sum_{h=1}^{50} I_{Lh}^2} \quad (8)$$

$$V_L = \sum_{h=1}^{50} I_{Lh} X_{Lh} \quad (9)$$

$$V_{LCr} = \sqrt{\sum_{h=1}^{50} (I_{Lh} X_{Lh})^2} \quad (10)$$

#### 3.3.3 Resistores

A corrente térmica e a tensão de fase máxima de resistores devem ser especificadas como nas Equações 11 e 12, respectivamente. A potência nominal do resistor é dada pela Equação 13.

$$I_R = \sqrt{\sum_{h=1}^{50} I_{Rh}^2} \quad (11)$$

$$V_R = \sum_{h=1}^{50} I_{Rh} R \quad (12)$$

$$P_R = \sum_{h=1}^{50} I_{Rh}^2 R \quad (13)$$

## 4.0 - ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste IT é realizado em um complexo eólico fictício composto por 15 de parques, os quais têm como PAC uma barra de 525 kV do sistema interligado nacional. A rede interna do complexo é composta por um transformador 525/138 kV, uma linha de circuito duplo em 138 kV, um transformador 138/34,5 kV e a rede de média tensão, que conecta os aerogeradores ao transformador 138/34,5 kV, é composta por cabos subterrâneos. A Figura 4 mostra de forma simplificada a forma de conexão dos parques ao sistema e um arranjo típico para redes de média tensão de parques eólicos.

Nos parques eólicos, um grupo de 100 aerogeradores é do tipo máquina assíncrona de dupla alimentação, com potência nominal de 2,0 MW. Os outros 100 aerogeradores são do tipo máquina síncronas atrás de conversores, também com potência nominal de 2,0 MW. Desta forma, o complexo eólico tem uma potência de 400 MW. Os grupos de 100 aerogeradores são fornecidos por fabricantes distintos, i.e., tem correntes harmônicas diferentes.

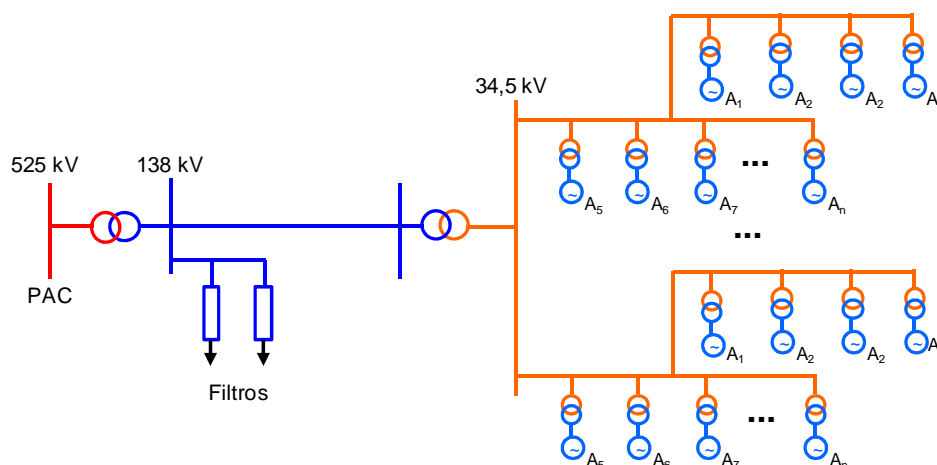


Figura 4 – Esquemático do complexo eólico e ponto de conexão dos filtros

Como nos estudos de distorção de tensão deste complexo eólico se verificou que os limites individuais de distorção eram superados, foi elaborado um projeto de filtros passivos para reduzir as distorções aos valores permitidos.

O estudo de caso visa avaliar as capacidades nominais dos elementos R, L e C de um projeto de filtros passivos que atenda a todo o complexo, demonstrando a participação das correntes dos aerogeradores e da rede na composição das correntes totais. Além disto, também é avaliado o impacto da avaliação do *rating* durante a contingência de filtros na instalação.

#### 4.1 Premissas do Projeto

Na definição da configuração e dos parâmetros filtros foram adotados algumas premissas de forma a garantir o atendimento aos requisitos do ONS para parques eólicos, e neste sentido, verificou-se que os filtros:

- não poderiam apresentar potência total superior a 172 Mvar no conjunto, de forma a garantir a geração/absorção de reativos em potência ativa nominal, conforme Submódulo 3.6 dos PR;
- deveriam ser modularizados em “ilhas” de no máximo 50 Mvar para não provocar variações de tensão superiores a 5 % no PAC em caso de chaveamento, proposital ou não, conforme Submódulo 3.6 dos PR;
- deveriam garantir o atendimento aos limites de distorção de tensão definidos no Submódulo 2.8 dos PR em regime normal ou contingência simples no sistema mesmo na pior combinação das máximas dissintonias dos reatores ( $\pm 2\%$ ) e capacitores ( $\pm 2,4\%$ ) dos filtros.

#### 4.2 Configuração e Parâmetros dos Filtros

Para resolver os problemas de distorção de tensão do complexo eólico foram adotadas duas configurações de filtros a serem instaladas na barra de 138 kV, como indicado na Figura 4: um filtro Tipo C (CT) sintonizado na 2ª ordem harmônica e um filtro de sintonia simples (ST) sintonizado na 4ª ordem harmônica, com as configurações respectivamente apresentadas nas Figuras 5a e 5b. Os parâmetros, o fator de qualidade e a potência de ambos os filtros estão apresentados na Tabela 1.

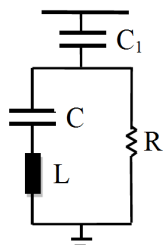


Figura 5a: filtro Tipo C

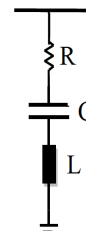


Figura 5b: filtro de sintonia simples

Tabela 1 – Parâmetros dos filtros

Harmônico	Fator de Qualidade	R (ohm)	L (H)	C (microF)	C1(microF)	Q (Mvar)
2	2,3	125,72	0,0966	72,7884	24,2628	174,19
4	45	3,4996	0,1044	4,2109	-	32,25

Como o filtro Tipo C, sintonizado na 2ª ordem harmônica, tem uma potência de 174,19 Mvar é necessário que um reator de 130 Mvar seja instalado em paralelo com este filtro e manobrado simultaneamente pelo mesmo disjuntor, de forma a não provocar variações de tensão superiores a 5 %. O filtro sintonizado na 4ª ordem harmônica deverá ser manobrado por outro disjuntor.

A Tabela 2 apresenta as máximas tensões harmônicas e o DTHT, para todas as faixas de potência, no PAC do complexo eólico, antes e após a instalação dos filtros.

Tabela 2 – Tensão harmônicas no PAC antes e após a instalação dos filtros

h	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DTHT
Antes	3,60	1,60	2,41	0,75	0,18	1,10	0,11	0,35	0,01	4,83
Após	0,27	0,39	0,19	0,56	0,03	0,43	0,06	0,34	0,01	0,94

#### 4.3 Cálculo das Correntes nos Elementos R, L e C

O cálculo das máximas correntes nos elementos R, L e C dos filtros foi realizado de acordo com o método proposto na seção 3.1 deste IT e utilizando os valores de  $\beta$  na Equação 4 propostos na norma IEC 61000-3-6. Além disto, foram utilizados os mesmos lugares geométricos hexagonais representativos das impedância da rede externa utilizados para o cálculo da performance, não foram considerados efeitos de dissintonias e foi adotada uma tensão fundamental igual a 1,05 pu. As tensões pré-existentes adotadas, da 2ª a 50ª ordem, são baseadas em dados de medição com as tensões das ordens mais baixas majoradas de forma a compor um DTHT próximo ao limite global inferior permitido para uma barra de 525 kV, ver Tabela 3.

Tabela 3 - Tensões harmônicas pré-existentes na rede

h	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DTHT
$V_{bh}$ (%)	1,00	1,50	1,00	1,75	0,267	1,25	0,011	0,063	0,017	2,99

##### 4.3.1 Comparação das Contribuições de Corrente

Nesta seção é realizada uma comparação das contribuições de correntes vindas dos aerogeradores e da rede na composição da corrente total a que os dois filtros da solução proposta podem ser submetidos sem considerar a contingência de nenhum dos filtros. A Tabela 4 apresenta além das correntes totais em cada uma dos filtros, as correntes vindas dos aerogeradores e da rede caso elas fossem avaliadas de forma independente, ou seja, cada uma podendo ter seu valor máximo em pontos distintos do lugar geométrico representativo da rede externa, por isso a soma das duas correntes é maior que a corrente total. A corrente térmica ( $I_T$ ) também é apresentada.

Tabela 4 – Composição das correntes nos filtros (A)

h	Filtro de 2ª ordem harmônica			Filtro de 4ª ordem harmônica		
	$I_{aerogerador}$	$I_{rede}$	$I_{total}$	$I_{aerogerador}$	$I_{rede}$	$I_{total}$
2	10,94	38,87	44,80	1,01	3,59	4,13
3	6,11	23,91	26,04	3,52	13,78	15,00
4	0,34	7,88	7,97	7,43	172,66	174,73
5	3,38	16,26	16,48	4,34	20,87	21,15
6	0,31	2,21	2,22	0,23	1,69	1,70
7	6,12	14,70	16,88	3,50	8,41	9,66
8	0,94	0,22	1,01	0,44	0,10	0,47
9	0,94	0,53	1,12	0,38	0,21	0,45
10	0,11	0,09	0,11	0,04	0,03	0,04
$I_T$	765,3	766,9	767,4	142,0	224,9	226,7

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4 as correntes vindas da rede são predominantes na composição da corrente total de ambos os filtros, sobretudo para as ordens harmônicas com tensões pré-existentes mais elevadas. Por outro lado, para as ordens com menor distorção pré-existente, como a 8ª, 9ª e 10ª, as correntes dos aerogeradores predominam na corrente total. Este resultado demonstra que para a avaliação das capacidades nominais de filtros passivos para parques eólicos não se pode ignorar as correntes harmônicas vindas da rede.

##### 4.3.2 Influência da Indisponibilidade de Filtros

Esta análise visa a demonstrar a importância de se considerar a indisponibilidade de filtros para o cálculo das máximas correntes a que os filtros podem ser submetidos. A Tabela 5 apresenta para cada um dos filtros, as correntes harmônicas totais e a corrente térmica considerando os dois filtros em operação e com o outro filtro indisponível.

Verifica-se na Tabela 5 que as correntes no filtro CT (amortecido) foram pouco influenciadas pela indisponibilidade do filtro de sintonia simples, todavia, para o filtro ST, na indisponibilidade do filtro CT as correntes de algumas ordens harmônicas sofreram grande elevação em relação à situação com os dois filtros disponíveis. A corrente térmica do filtro ST sofreu um elevação de 32 % na indisponibilidade do outro filtro.

Tabela 5 – Correntes nos filtros (A)

h	Filtro CT de 2ª ordem harmônica		Filtro ST de 4ª ordem harmônica	
	Sem Indisp.	ST 4ª Indisp.	Sem Indisp.	CT 2ª Indisp.
1	765,21	765,21	141,66	141,66
2	44,80	43,05	4,13	13,80
3	26,04	25,99	15,00	172,25
4	7,97	13,33	174,73	176,65
5	16,48	17,59	21,15	26,41
6	2,22	2,97	1,70	2,94
7	16,88	21,24	9,66	87,74
8	1,01	1,02	0,47	1,54
9	1,12	1,12	0,45	0,48
10	0,11	0,12	0,04	0,04
$I_T$	767,4	767,5	226,7	299,2

#### 4.3.3 Definição das Capacidades Nominais

As Tabelas 6 e 7 apresentam a corrente térmica e a tensão de fase máxima incluindo harmônicos para cada um dos elementos dos filtros CT e ST. Transformando os valores eficazes dos capacitores principais dos filtros em pu, tem-se uma tensão de 1,11 pu para o capacitor C1 do filtro CT e 2,12 pu para o capacitor C do filtro ST. Esta tensão elevada no capacitor C do filtro ST pode indicar a necessidade de se dimensionar o equipamento para uma classe de tensão superior a do sistema ou de modificações no projeto.

Tabela 6 – Tensões e correntes no filtro CT

Equipamento	$I_T$ (A)	V (kV)
R	25,6	7,8
L	766,0	36,5
C	766,0	28,8
C1	767,4	88,1

Tabela 7 – Tensões e correntes no filtro ST

Equipamento	$I_T$ (A)	V (kV)
R	299,2	2,2
L	299,2	86,4
C	299,2	169,3

## 5.0 - CONCLUSÃO

Este IT apresentou uma proposta de metodologia e critérios para a avaliação das capacidades nominais dos elementos R, L e C de filtros passivos para parques eólicos. A metodologia proposta é uma adaptação do método utilizado para projeto de filtros de sistemas de transmissão em corrente contínua.

Através das análises realizadas o IT demonstrou importância de se considerar os critérios conservadores no cálculo do *rating*, como possíveis indisponibilidades de filtros, e principalmente a influência das distorções de tensão da rede, pois estas podem predominar na composição da corrente total nos filtros, particularmente para as ordens harmônicas com elevada distorção de tensão pré-existente. Portanto, ressalta-se a importância da definição das capacidades nominais dos filtros por parte dos empreendedores, a qual deve ser feita de forma conservadora para minimizar as chances de sobrecarga ou necessidade de desligamento dos filtros durante a vida útil da instalação.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. ONS RE 2.1 057/2008 - *Instruções para a Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acesso à Rede Básica* – REV.2. Rio de Janeiro, 2011.
- (2) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC/TR 62001: Guide to the specification and design evaluation of AC filters for high-voltage direct current (HVDC) systems*. Frankfurt, 2009.
- (3) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IEEE Std 1531: IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters*. New York, 2009.
- (4) DE CARLI, M. P. *Estudo do Problema e Metodologias para a Análise de Harmônicos em Parques Eólicos com a Proposição de um Estudo de Caso para a Especificação de Filtros*. 185 f. Monografia (Especialização em Sistemas de Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis: 2012.
- (5) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC/TR 61000-3-6: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 38: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems*. Genebra, 2008.
- (6) JUSAN, F. C., et al. *Sistema de Transmissão CCAT do Madeira: Estudo de Desempenho Harmônico e Rating dos Filtros CA do Bipolo 2*. Florianópolis: SNPTEE, 2011.



## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Miguel Pires de Carli nasceu em Porto Alegre, RS, Brasil, em 22 de Novembro de 1978. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2007. Ingressou na Eletrobras Eletrosul em 2001 e trabalhou no Departamento de Operação do Sistema até 2007. Especialista em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 2012. Atualmente trabalha no Departamento de Planejamento do Sistema. É membro do Cigré com atuação no CE B4 de Elos de Corrente Contínua e Eletrônica de Potência e no C4 de Desempenho de Sistemas Elétricos.

