



Operador Nacional do Sistema Elétrico

INSTRUÇÕES PARA
REALIZAÇÃO DE ESTUDOS E
MEDIÇÕES DE QEE
RELACIONADOS AOS NOVOS
ACESSOS À REDE BÁSICA

© 2011/ONS
Todos os direitos reservados.
Qualquer alteração é proibida sem autorização.

ONS RE 2.1 057/2008 – REV.2

INSTRUÇÕES PARA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS E MEDIÇÕES DE QEE RELACIONADOS AOS NOVOS ACESSOS À REDE BÁSICA

27 de setembro de 2010

Sumário

1	Introdução	4
2	Objetivo	5
3	Alteração desta revisão	5
3.1	Inclusão de texto	5
4	Estudos para avaliação de desempenho	6
4.1	Considerações iniciais	6
4.2	Estudo de distorção harmônica	7
4.2.1	Modelo geral	7
4.2.2	Determinação do “Equivalente Norton”	9
4.2.3	Determinação do “Lugar Geométrico”	10
4.2.4	Critérios de avaliação de desempenho	12
4.2.5	Conteúdo básico do relatório de estudo	13
4.3	Estudo de flutuação de tensão (cintilação)	13
4.3.1	Método simplificado de avaliação	13
4.3.1.1	Fornos a arco	13
4.3.1.2	Centrais eólicas	15
4.3.2	Critérios de avaliação de desempenho	16
4.3.3	Conteúdo básico do relatório de estudo	16
5	Medições	17
5.1	Considerações iniciais	17
5.2	Instrumentos de medição	18
5.3	Transdutores de tensão	19
5.4	Transformadores de corrente	21
5.5	Local de medição	21
5.6	Recomendações práticas	21
5.7	Realização de testes mínimos no campo	23
5.8	Ruídos e interferência	24
5.9	Relatório e arquivos de dados	24
6	Referências	26
	Lista de figuras e tabelas	27

1 Introdução

Cabe ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, dentre suas atribuições, realizar o gerenciamento do desempenho da rede básica do Sistema Interligado Nacional (SIN), no que se refere à qualidade de energia elétrica (QEE). Dentre os indicadores a serem gerenciados encontram-se aqueles relativos à conformidade da forma de onda, e dentre estes a distorção harmônica, o desequilíbrio de tensão e a flutuação de tensão.

De acordo com o submódulo 2.8 [1] dos procedimentos de rede, quando ocorrem solicitações de acesso de consumidores livres, agentes de geração, agentes de distribuição, agentes de importação e de exportação, cujas instalações não lineares possam comprometer o desempenho da rede básica, devem ser realizadas análises fundamentadas em indicadores de qualidade de energia elétrica. O mesmo tratamento deve ser dado às integrações de novas instalações da rede básica que apresentem característica não linear, sendo os fenômenos de flutuação de tensão, distorção harmônica e desequilíbrio de tensão os de maior interesse.

Os limites individuais de desempenho, relativos aos mencionados indicadores de QEE devem ser respeitados em todos os modos de operação possíveis, ou seja, tanto em operação normal como degradada da instalação do agente e da rede básica. Como exemplo de operação degradada, pode-se citar, no caso de instalações conversoras, a situação em que alguma ponte conversora de um determinado conjunto esteja fora de serviço, seja por manutenção seja por defeito. Nesse caso, via de regra, perde-se a compensação entre harmônicos resultantes de pontes alimentadas por tensões com diferentes ângulos de defasamento. No caso da rede básica é importante considerar condições de emergência (N-1), tais como a saída de linha de transmissão, transformador, etc., no entorno do ponto de acoplamento comum (PAC).

Cabe aos agentes que se conectam a responsabilidade de realizar medições e estudos específicos, relacionados ao desempenho de sua instalação quanto a QEE. As medições oferecem uma avaliação do impacto da nova instalação considerando as condições sistêmicas no momento da sua conexão. As informações obtidas pela medição permitem verificar o desempenho real, sem a necessidade da utilização de recursos de modelagem da rede elétrica que, como se sabe, retratam o efeito da instalação no PAC de forma aproximada e, tanto quanto possível, conservadora. Por outro lado, a realização dos estudos possibilita uma avaliação prospectiva do efeito da nova instalação no sistema, considerando diversas configurações sistêmicas no horizonte de operação disponível, incluindo condições de emergência (N-1), que poderão não ocorrer, necessariamente, durante as campanhas de medição. Assim sendo, ambos os procedimentos, estudo e medição, têm caráter complementar, pois se referem a momentos e situações diversas.

2 Objetivo

Este documento tem por objetivo apresentar aos futuros agentes acessantes da rede básica ou aqueles que já acessem a rede, mas estejam buscando um novo ponto de conexão ou ampliando suas instalações em conexões pré-existentes, informações que possam apoiá-los quanto à realização de estudos e campanhas de medição relacionadas à avaliação do impacto das novas condições de conexão na rede básica no que diz respeito aos indicadores de conformidade de tensão, quais sejam, distorção harmônica, desequilíbrio e flutuação de tensão.

Neste sentido serão explorados os aspectos relativos aos estudos para avaliação do impacto da nova condição de conexão no que se refere aos efeitos de distorção harmônica e flutuação de tensão, bem como os aspectos relacionados com a realização de campanhas de medição para aquisição de dados que permita determinar os valores dos indicadores correspondentes a distorção harmônica, desequilíbrio e flutuação de tensão.

Deve-se mencionar que as recomendações estabelecidas neste documento poderão sofrer alterações em função dos avanços observados no estado da arte, que estarão sendo continuamente observados e perseguidos pelo ONS.

Em caso de dúvida quanto à aplicação do estabelecido neste documento o agente deverá buscar orientação junto ao ONS de forma a esclarecer tais aspectos antes da realização dos estudos / medições requisitadas pelo submódulo 2.8 [1] dos procedimentos de rede.

3 Alteração desta revisão

3.1 Inclusão de texto

No 5.2 (Instrumentos de medição) os seguintes instrumentos de medição foram incluídos na lista daqueles considerados como aptos a participar de uma campanha de medição:

- SEL-734 fabricado pela Schweitzer Engineering Laboratories;
- MEDCAL-ST e MEDCAL-NT fabricado pela CESINEL.

4 Estudos para avaliação de desempenho

4.1 Considerações iniciais

Basicamente, os estudos tratam das avaliações de desempenho quanto à distorção harmônica e flutuação de tensão. Em casos como instalações com fornos a arco poderá ser necessário avaliar também o aspecto do desequilíbrio.

Observa-se que, em função dos resultados obtidos pelos estudos, poderão ser solicitados procedimentos complementares de medição, durante as campanhas de medição tratadas no item 4 destas instruções.

O agente deve submeter à apreciação do ONS, dentro do prazo estabelecido no Submódulo 3.3 [2] dos procedimentos de rede, sob a forma de relatório, todos os estudos realizados, incluindo informações detalhadas quanto aos dados, modelos e metodologia utilizados, bem como os resultados obtidos e as eventuais ações a serem desenvolvidas no sentido de adequar o desempenho da instalação aos padrões estabelecidos.

Apesar do Submódulo 23.3 [3] dos procedimentos de rede apresentar algumas orientações quanto à realização desses estudos, as quais poderão ser utilizadas pelo agente como referência para o desenvolvimento das suas análises, neste item tais orientações são complementadas e detalhadas, de forma a buscar um melhor nivelamento quanto aos requisitos dos estudos a serem encaminhados para apreciação do ONS.

Para os casos onde uma conexão a rede básica se realiza a partir de um sistema compartilhado, a avaliação do desempenho individual da conexão deve considerar o conjunto de empreendimentos que se utilizam deste sistema, ou seja, os limites individuais de desempenho que constam dos procedimentos de rede deverão ser atendidos pelo conjunto destas instalações. Como exemplo, pode-se citar o caso de um complexo eólico formado por várias centrais de geração eólicas (CGE) que se conectam a rede básica, a partir de uma mesma linha de transmissão.

O ONS poderá apresentar comentários e sugestões relacionados com os resultados das análises efetuadas pelo agente, o qual tem inteira responsabilidade pelos dados, modelos e metodologia utilizados nos estudos, bem como pelos resultados obtidos.

Os estudos devem levar em conta as instalações em operação normal e degradada, tanto da rede do agente como da rede externa.

O ONS deve repassar ao agente todas as informações disponíveis relativas a rede elétrica para a realização dos estudos.

4.2 Estudo de distorção harmônica

4.2.1 Modelo geral

Considerando que o objetivo do estudo de desempenho harmônico restringe-se a avaliar o impacto da nova instalação no PAC, e considerando as limitações ainda presentes nos estudos do tipo “fluxo de harmônicos”, quer seja do ponto de vista da validade dos modelos adotados para toda faixa de frequência de interesse, quer seja pela disponibilidade de dados, principalmente no que diz respeito à modelagem das cargas lineares, o método do “lugar geométrico” (LG) da impedância harmônica da rede básica no plano complexo X versus R , descrito neste documento, constitui-se no procedimento recomendado pelo ONS. Neste caso, a expressão rede básica, inclui também as outras redes interligadas com a rede básica, as quais já estão incluídas nos arquivos de dados a serem disponibilizados pelo ONS.

Assim sendo, espera-se que o relatório de estudo, a ser submetido pelo agente acessante ao ONS, inclua, pelo menos, dentre suas avaliações e análises, resultados decorrentes da aplicação deste método.

Para calcular os piores valores de tensão harmônica no PAC não é prático efetuar um cálculo de fluxo harmônico para cada ponto do LG, visando escolher valores máximos. A forma tradicional de avaliação é determinar “equivalentes Norton” (I_h , \check{Z}_{ih}) da rede interna do agente acessante vistos do PAC (instalação desconectada da rede básica), para cada harmônica significativa, considerando as condições operativas possíveis desta instalação.

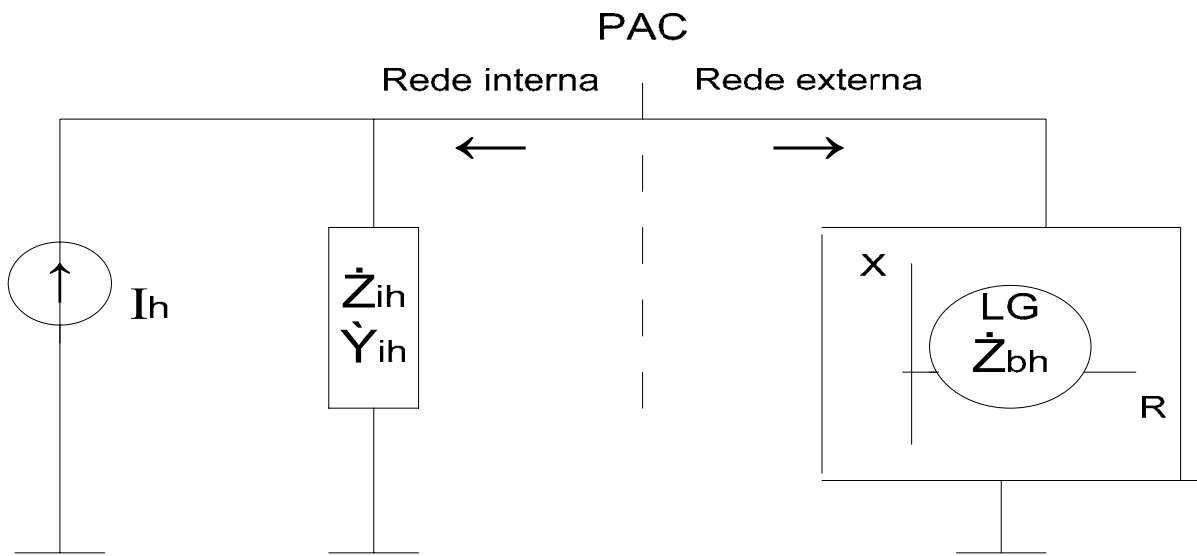
Como exemplo, pode-se citar o caso de um conversor ligado diretamente ao PAC, com seus filtros instalados nesse ponto. Nesta condição, o valor de I_h corresponde à corrente harmônica injetada pelo conversor e \check{Z}_{ih} corresponde à impedância equivalente dos filtros, incluindo eventuais capacitores etc.

Note-se que um LG de impedância (\check{Z}_{ih}) pode ser convertido a LG de admitância (\check{Y}_{ih}), no plano complexo B versus G , mediante inversão matemática do LG de impedância entre planos complexos.

O valor da impedância representativa da rede básica, pertencente ao LG da mesma, que maximiza o valor da tensão harmônica no PAC, para cada ordem harmônica (h), é obtido por cálculo geométrico no plano complexo de admitâncias, sendo a tensão harmônica máxima: $V_{hmax} = I_h/Y_{hmin}$. O denominador Y_{hmin} é o módulo da soma vetorial em paralelo da admitância Norton equivalente da rede do agente ($\check{Y}_{ih} = 1/\check{Z}_{ih}$) com a admitância correspondente ao ponto do envelope do LG de admitância da rede básica (\check{Y}_{bh}) que minimiza Y_{hmin} . O ponto no envelope que corresponde a esse menor módulo é encontrado geometricamente como a menor distância do extremo do vetor $-\check{Y}_{ih}$ ao LG de admitância harmônica da rede básica.

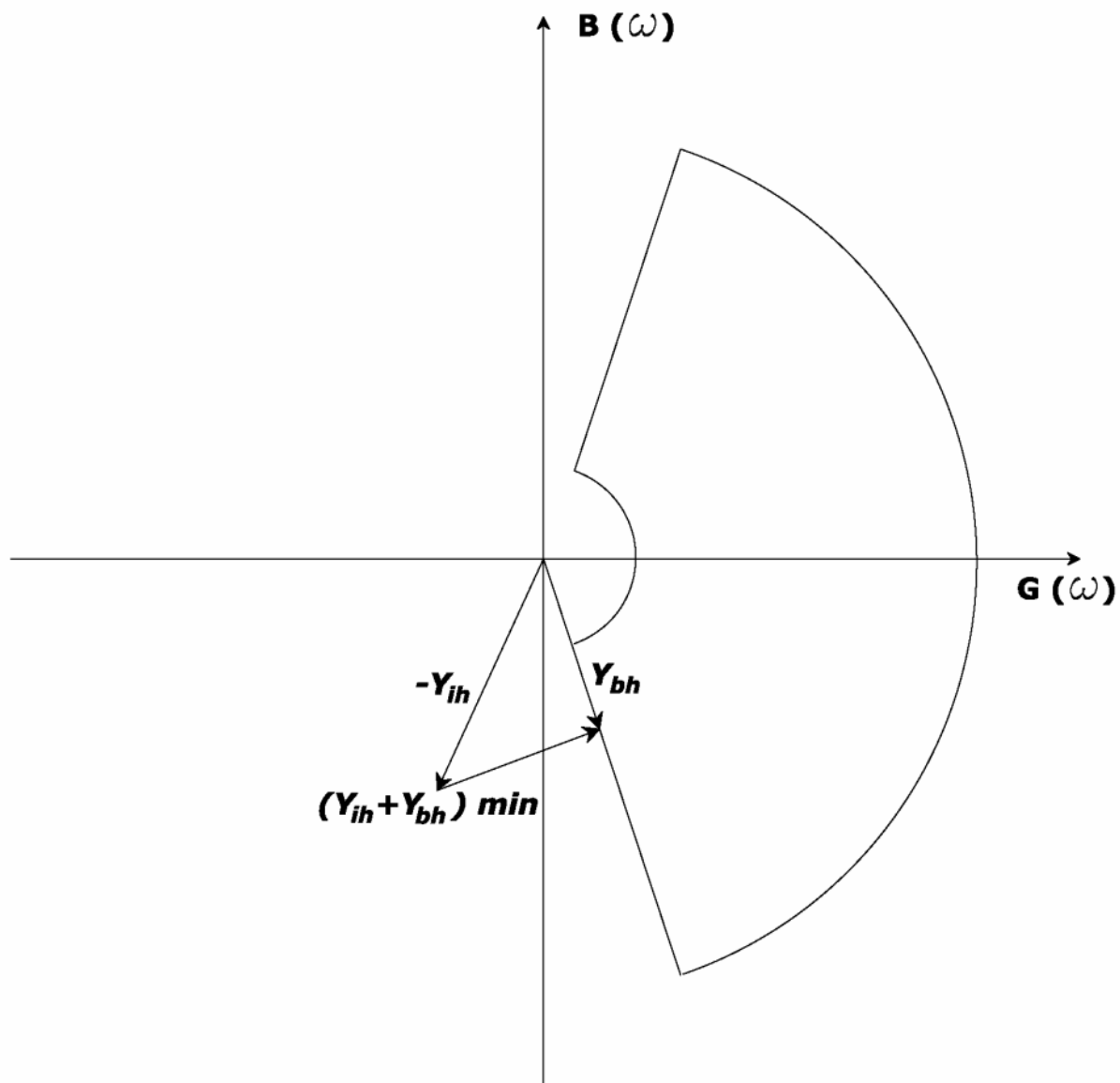
A Figura 4-1 ilustra o circuito equivalente, incluindo a admitância representativa do circuito Norton da instalação, com os filtros considerados como parte desta instalação, a admitância representativa da rede elétrica externa a instalação, a partir do PAC, e a fonte de corrente harmônica equivalente, resultante da combinação das fontes harmônicas principais presentes na instalação.

Figura 4-1: Representação do “Equivalente Norton” com o LG da rede básica



A Figura 4-2 ilustra de forma gráfica a utilização do método do “lugar geométrico” para obtenção do ponto do envelope do LG de admitância da rede básica (\dot{Y}_{bh}) que minimiza $Y_{hmin} = |\dot{Y}_{ih} + \dot{Y}_{bh}|$, considerando uma particular representação de LG.

Figura 4-2: Ilustração gráfica do método do “lugar geométrico”



4.2.2 Determinação do “Equivalente Norton”

As correntes harmônicas (I_h) utilizadas no cálculo de V_{hmax} podem ser determinadas a partir dos valores de correntes harmônicas geradas por cada um dos equipamentos não lineares presentes na instalação. Tais valores poderão ser determinados por simulação ou por medição. Observa-se que valores medidos, quando disponíveis, são os mais recomendados.

Destaca-se que os valores das correntes harmônicas geradas por equipamento conversor, quando obtidos por simulação, devem corresponder aos máximos individuais por harmônico, considerando tanto sua faixa de potência como seus modos de operação (normal ou degradada), bem como eventuais desequilíbrios

de impedâncias e relações de transformação dos transformadores conversores, erros relacionados com os ângulos de disparo e/ou extinção do processo de conversão, assim como máximo desequilíbrio de tensão (seqüência negativa). Tais valores são, normalmente, informados pelo fabricante do equipamento.

Caso o equipamento não linear corresponda a uma ponte conversora de 36 pulsos, deve-se considerar a possibilidade de operação desbalanceada, ou seja, sem a presença de uma de suas pontes de 6 pulsos. Tal condição, contudo, poderá ser menos crítica, caso o conversor disponha de mecanismo de proteção que retire de operação a ponte de 6 pulsos remanescente, responsável pelas correntes harmônicas $6 \cdot n \pm 1$ (n inteiro), ficando assim somente correntes harmônicas $12n \pm 1$ (n par), além das não características. Assim sendo, cada caso deverá ser tratado segundo suas características de operação.

Considerando a dificuldade decorrente do estabelecimento dos ângulos entre as correntes geradas pelas diferentes fontes, independentemente controladas, para uma mesma harmônica, a corrente resultante deverá ser obtida através da formulação proposta pela IEC 61000-3-6, reproduzida abaixo.

$$I_{n,total} = \left(\sum_{i=1}^m I_{n,i}^a \right)^{(1/a)}$$

Onde,

n - ordem harmônica

m – número total de fontes

a	Ordem da harmônica
1	$n < 5$
1,4	$5 \leq n \leq 10$
2	$n > 10$

Por outro lado, para a determinação de \dot{Y}_{ih} deve ser considerada, quando da presença de filtros, sua possível dessintonia, de acordo com a variação de capacitância por temperatura, falha de elementos internos de unidades capacitivas até o nível de trip, desajustes por passo de tapes de reatores para ajuste de sintonia, desvio de freqüência, etc.

4.2.3 Determinação do “Lugar Geométrico”

Para o estabelecimento do LG representativo da rede básica, deve-se determinar primeiramente as impedâncias harmônicas da rede básica vistas do PAC, para cada harmônica, supondo sua conexão desligada, ou seja, desconsiderando o efeito do circuito interno da instalação, pois tal efeito já se encontra representado no “Equivalente Norton”.

O conjunto de impedâncias determinado, considerando diferentes cenários para a rede básica, presente e futuros, para estados diferentes quanto a níveis de carga (leve, média e pesada), bem como situações de operação degradada (N-1), irá compor os lugares geométricos no plano complexo da impedância harmônica da rede básica (\check{Z}_{bh}) vista do PAC.

A justificativa para considerar a impedância harmônica da rede básica vista do PAC sob a forma de LG é o fato desta impedância ser variável ao longo do tempo, formando nuvens de pontos no plano complexo durante a vida útil da instalação, e que a consideração de somente um ou poucos pontos desta impedância, dificilmente encontrará as condições de ressonância mais críticas que produzem maior distorção da tensão do PAC. Outro motivo para considerar LG é a imprecisão inerente dos cálculos de impedâncias harmônicas, ou seja, para um determinado ponto calculado, o ponto real pode estar na área no entorno desse ponto, no plano complexo, devido à imprecisão de dados, modelos e ferramentas de cálculo.

Os motivos descritos no parágrafo anterior justificam também a necessidade de se efetuar os cálculos de distorção harmônica para demonstrar que a filtragem, quando necessária, é adequada para manter a qualidade de tensão, estabelecida pelo ONS, no PAC ao longo do período de operação da instalação. Efetivamente, as campanhas de medição, necessárias para verificação do desempenho da instalação, no momento de sua entrada em operação, captura somente um ou poucos estados das redes externa e interna, enquanto que através do estudo, considerando a metodologia aqui descrita, é possível representar múltiplas configurações que poderão ocorrer ao longo do período operacional da instalação.

Para a representação dos LG de \check{Z}_{bh} , são tradicionalmente escolhidos círculos, setores anulares, polígonos, áreas limitadas por retas e arcos de circunferências etc, que envolvem com certa folga todos os pontos de impedância calculados para cada harmônica ou conjuntos de harmônicas vizinhas. Os LG de impedância são convertidos em LG de admitância (\check{Y}_{bh}) mediante as equações de conversão correspondentes. Os requisitos de distorção harmônica de tensão devem ser atendidos para qualquer valor de impedância dentro do LG de admitância para cada harmônica. Pode ser demonstrado que só interessam os pontos limítrofes do LG, ou seja, os pontos do envelope.

Dependendo dos conjuntos de impedâncias encontrados podem-se utilizar mais do que um LG, ou seja, poderão ser utilizados LG para grupos de harmônicas de ordens vizinhas que apresentem comportamento similar no plano complexo de impedâncias. Observa-se, contudo, que além do grupo de harmônicas de ordens vizinhas deve também ser considerado na formação do LG as impedâncias correspondentes as ordens harmônicas imediatamente inferior e superior ao grupo.

A Figura 4-2 ilustra um LG do tipo “setor angular” já convertido para o plano de admitâncias.

Nos cálculos para determinação de Z_{bh} , é muito importante a representação das cargas mediante modelos com amortecimento realista em função da frequência. Por exemplo, no caso de motores a resistência correspondente à potência ativa é válida somente para a frequência fundamental, não representando amortecimento para harmônicas, o qual depende somente da resistência dos enrolamentos e do circuito de magnetização. Considerando a inexistência de informações atualizadas quanto ao percentual de carga no SIN com característica linear, bem como o percentual de composição desta parcela da carga em relação aos seus tipos representativos (iluminação, motores, aquecimento por resistência, etc.), recomenda-se, em princípio, não considerar a representação de cargas nos estudos. Caso os resultados da simulação sem carga indiquem a violação de algum limite individual por harmônica ou total o agente deverá obter orientações com o ONS quanto a uma representação parcial das cargas.

Adicionalmente, caso a informação esteja disponível, deve-se considerar a variação com a frequência da resistência e da indutância das linhas de transmissão, transformadores, reatores, etc. Também, podem ser utilizadas curvas típicas de variação de parâmetros com a frequência, determinadas previamente para elementos similares.

4.2.4 Critérios de avaliação de desempenho

Os critérios de aceitação da nova instalação quanto aos limites individuais relacionados à distorção harmônica são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 4-1: Limites individuais de distorção harmônica

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
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			

Caso do estudo resultem valores de distorção harmônica superiores aos estabelecidos acima, o agente deverá apresentar solução, normalmente relacionada com a instalação de filtragem, que levem ao adequado desempenho da instalação no PAC.

4.2.5 Conteúdo básico do relatório de estudo

Para que o ONS possa avaliar o resultado do estudo o agente deve incluir no relatório as seguintes informações:

- a) Dados da rede interna da instalação, incluindo sua topologia e parâmetros elétricos dos cabos, transformadores, filtros, banco de capacitores, etc;
- b) Valores das impedâncias/admitâncias harmônicas da rede interna (Z_{ih}/Y_{ih}) consideradas na simulação do circuito apresentado na figura 3.2.1 do relatório apresentado;
- c) Valores das correntes harmônicas consideradas para cada fonte de corrente harmônica da instalação, valores estes medidos ou calculados;
- d) Valores das correntes harmônicas (I_h) consideradas na simulação do circuito apresentado na figura 3.2.1 do relatório apresentado;
- e) Valores das impedâncias “vistas” do PAC para cada condição de rede básica considerada (rede completa e N-1), indicando o ano de estudo e patamar de carga;
- f) Valores dos parâmetros dos lugares geométricos considerados para cada harmônico ou grupo de harmônicos, considerados no estudo.

4.3 Estudo de flutuação de tensão (cintilação)

4.3.1 Método simplificado de avaliação

Um estudo detalhado para avaliação da flutuação de tensão, realizado a partir da adequada modelagem da fonte de distúrbio, bem como dos equipamentos instalados para seu controle, tal como um compensador estático, normalmente demanda um tempo razoável para o seu desenvolvimento e seu sucesso está condicionado a fatores que, por exemplo, no caso de fornos a arco, corresponde à modelagem do arco, modelagem dos equipamentos e estratégia de controle.

Observe-se, contudo, que metodologia mais simples poderá ser utilizada para a realização de uma avaliação expedita do comportamento da instalação sob da flutuação de tensão.

Usualmente, a flutuação de tensão é avaliada a partir do nível de Pst (valor médio medido em um intervalo de 10 minutos) definido nas normas IEC e nos procedimentos de rede do ONS. Da série de valores de Pst medidos em um período de 7 (sete) dias consecutivos é extraído, conforme estabelecido no submódulo 2.8 [1], o valor do indicador PstD95%. Este valor guarda uma correlação típica com o indicador PstD99% de 1,25.

4.3.1.1 Fornos a arco

No caso de fornos a arco em etapa de projeto, normalmente é feita uma avaliação simplificada do $Pst_{95\%PACcalc}$ no PAC, com a seguinte equação:

$$Pst95\%PACcalc = Pst99\%PACcalc / 1,25$$

Onde:

$$Pst99\%PACcalc = Kst * (SccFA / SccPAC) = Kst * Xpac / (Xpac + Xf)$$

Kst = fator de severidade, que corresponde a um coeficiente experimental, cujo valor fica entre 45 e 75. Este valor poderá ser determinado, posteriormente, através de campanha de medição;

SccFA = potencia de curto-circuito do forno, supondo os eletrodos tocando a massa fundida;

SccPAC = potência de curto-circuito no PAC;

Xpac = reatância de curto-circuito da rede de alimentação vista do PAC, em pu base 100 MVA;

Xf = reatância do circuito interno da usina siderúrgica entre o PAC e a ponta dos eletrodos, em pu base 100 MVA.

O valor de SccPAC deve considerar a operação do sistema degradada a partir do critério N-1, incluindo um número mínimo de unidades geradoras despachadas, de forma a minimizar a potência de curto-circuito do PAC. Quando parte do valor de SccPAC é devido a existência de usinas, principalmente térmicas, próximas a carga, deve-se avaliar o efeito da sua ausência no sistema, fato bastante provável, desde que algumas máquinas da usina não sejam programadas a operar como síncronos, quando não estiverem gerando potência ativa.

O cálculo do nível de curto-circuito no forno, ou da reatância Xf do circuito interno, pode ser feito considerando a reatância de projeto da transformação principal da usina siderúrgica (Xtr), dos cabos de ligação (Xca) ao primário do transformador do forno e do circuito restante até a ponta dos eletrodos (Xr).

Esta última reatância, Xr, em vez de ser determinada calculando-se detalhadamente a reatância do transformador do forno, a reatância dos cabos de alimentação dos eletrodos e a reatância dos próprios eletrodos, considerando o tape de operação (nem sempre conhecido), pode ser determinada em forma mais simples. Este cálculo se faz a partir da potência máxima de fusão (Sfusão) e do correspondente fator de potência (FP) visto do primário do transformador do forno. Efetivamente, se sabe que o ângulo da potência total deve ser igual ao ângulo da impedância do circuito, portanto podemos estabelecer a equação seguinte:

$$Xreff = \text{sen}(\arccos(\text{FP})) * 100 / \text{Stf}, \text{ em pu na base 100 MVA}$$

Sendo:

Xreff = reatância efetiva de operação do forno em fusão, em pu base 100 MVA

Stf = potencia nominal do transformador do forno, suposta igual à máxima potência de fusão, em MVA

A reatância de curto-circuito Xr do circuito restante guarda a seguinte relação empírica (conhecida na indústria siderúrgica) com a reatância efetiva Xreff, considerando que não deve ser incluída a reatância de arco:

$$X_r = X_{reff} / 1,15$$

Finalmente, podemos aplicar a seguinte relação:

$$X_f = X_{tr} + X_{ca} + X_r, \text{ em pu na base 100 MVA}$$

O valor resultante da aplicação da expressão acima ainda poderá ser atenuado por fatores relacionados ao emprego de equipamentos de controle (compensador estático). Quando existe mais do que uma fonte emissora de “flicker” conectadas em um mesmo PAC e relacionadas a um mesmo acessante, o efeito da operação simultânea destas fontes é determinado pela expressão abaixo, onde o fator “m” é igual a 3 e “n” é o número de fontes emissoras.

$$P_{stPAC_{calc,total}} = \left(\sum_{i=1}^n P_{stPAC_{calc,i}}^m \right)^{\frac{1}{m}}$$

4.3.1.2 Centrais eólicas

No caso de parques eólicos deve ser utilizada a metodologia recomendada pela IEC 61400-21 [06]. Neste caso os indicadores Plt e Pst, definidos nesta referência, são determinados a partir de dados fornecidos pelo fabricante e consideram a operação contínua nas condições de velocidade média do vento e para conexão da máquina com velocidade mínima (“cut in”) e velocidade nominal. A Tabela 3.2 indica os principais fatores a serem considerados.

Tabela 4-2: Dados para avaliação dos níveis de flicker

PARÂMETRO	UNIDADE	DESCRIÇÃO
SN	MVA	Potência Nominal do aerogerador
ΨK	Grau	Ângulo da Potência de curto circuito
SK	MVA	Potencia curto circuito Trifásico
va	m/s	Velocidade nominal média do vento
C(Ψk,va)	-	Coeficiente de flicker
Kf(Ψk)	-	Fator de flicker em face de uma variação em degrau, com va=“cut in”
		Fator de flicker em face de uma variação em degrau, com va nominal
KU(Ψk)	-	Fator de tensão em face de uma variação em degrau com va=“cut in”
		Fator de tensão face a uma variação em degrau com va nominal
N10	-	Máximo chaveamento em 10 minutos
N120	-	Máximo chaveamento em 120 minutos

4.3.2 Critérios de avaliação de desempenho

Os limites individuais de flutuação de tensão que devem ser atendidos por uma instalação não linear durante sua operação são apresentados a seguir.

PstD95%	PltS95%
$0,8 pu / FT$	$0,6 pu / FT$

Esses valores são expressos em função dos limites individuais para tensão secundária de distribuição 220 V e da atenuação esperada quando a flutuação de tensão se propaga dos barramentos da rede básica para os barramentos da rede secundária de distribuição.

FT é o fator de transferência aplicável entre o barramento da rede básica sob avaliação e o barramento da tensão secundária de distribuição, eletricamente mais próximo. FT é calculado pela relação entre o valor do PltS95% do barramento da rede básica sob avaliação e o valor do PltS95% do barramento da rede de distribuição. No caso de os FT entre os barramentos envolvidos não terem sido medidos, os FT apresentados na tabela abaixo podem, em princípio, ser aplicados para a avaliação da flutuação de tensão nos barramentos da rede básica.

Barramento de tensão nominal ≥ 230 kV	FT = 0,65
69 kV \leq Barramento de tensão nominal < 230 kV	FT = 0,80
Barramento de tensão nominal < 69 kV	FT = 1,00

4.3.3 Conteúdo básico do relatório de estudo

Para que o ONS possa avaliar o resultado do estudo o agente deve incluir no relatório as seguintes informações: Do ponto de vista da avaliação do desempenho da instalação através de simulação o valor de Pst95%PACcalc deve resultar menor ou igual ao limite estabelecido para o indicador PstD95% conforme apresentado acima.

- Valores de potência de curto-circuito “vista” do PAC (SccPAC), indicando o ano correspondente ao horizonte do estudo, patamar de carga (leve ou pesada) e condição N-1 considerada;
- Valor do fator de severidade adotado no estudo;
- Valor da potência de curto-circuito do forno (SccFA), incluindo memória de cálculo para sua determinação;
- Valores de Pst95%PACcalc , para cada condição das configurações do sistema consideradas no estudo.

5 Medições

5.1 Considerações iniciais

Seguem-se algumas considerações a respeito das campanhas de medição para avaliação de desempenho das instalações com característica não linear, em conformidade com o submódulo 2.8 [1] dos procedimentos de rede e o relatório Re.ONS – 2.1 - 028/2005 “Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho” [5].

Quando da implantação de instalações/cargas com característica não linear, são realizadas medições, a cargo do agente, sob a forma de campanha de medição, por períodos não inferiores a 7 (sete) dias consecutivos, considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos.

As campanhas de medição devem envolver medições de flutuação, desequilíbrio e distorção harmônica de tensão. Dependendo das características da instalação e da sua conexão à rede básica e barramentos dos transformadores de fronteira, também devem ser medidas as correntes harmônicas resultantes da operação de cargas/dispositivos não lineares pertencentes a estas instalações.

De uma maneira geral, as medições deverão ser realizadas imediatamente antes e imediatamente depois da entrada em operação da instalação com característica não linear.

O ONS deve estabelecer, com o apoio dos agentes envolvidos, os locais de medição, tanto na rede básica como, se for o caso, nos barramentos dos transformadores de fronteira, nas demais instalações de transmissão (DIT) e no sistema de distribuição, bem como as condições operativas, normal ou degradada, que permitam avaliar o desempenho da instalação. Para tanto, tais discussões deverão ser iniciadas, pelo menos, seis meses antes da entrada em operação da instalação.

No caso de instalação do tipo complexo de geração eólica, tendo em vista que o impacto da sua operação na QEE do PAC depende do regime de ventos da região onde se encontra instalado, o ONS deverá estabelecer, em conjunto com o agente, tanto a data de início da campanha de medição, após entrada em operação do complexo eólico, como a sua duração.

Tal período de medição deverá ser estabelecido considerando os seguintes requisitos:

- Pelo menos noventa por cento das unidades geradoras que compõem o complexo eólico devem estar em operação ao longo de todo o período de medição;
- A produção do complexo eólico, durante o período de medição, deverá corresponder, no mínimo, aquela estabelecida pelo seu fator de capacidade.

Neste caso, além das medições que têm por objetivo determinar os valores dos indicadores de distorção harmônica, flicker e desequilíbrio de tensão, também deverão ser medidas as correntes harmônicas geradas por, pelo menos, um aerogerador de cada central de geração eólica que compartilha o sistema de transmissão, bem como as correntes harmônicas totais injetadas na rede elétrica, resultantes da operação do conjunto de aerogeradores. As medições de tais correntes têm por finalidade permitir reavaliar o estudo de desempenho da instalação quanto à distorção harmônica de tensão.

Considerando que os complexos eólicos poderão resultar da união de centrais de geração eólicas (CGE) de menor porte, compartilhando do mesmo sistema de uso exclusivo para conexão com a rede básica, a avaliação do impacto da instalação no PAC, através das campanhas de medição, deverá considerar tanto os efeitos resultantes da entrada em operação de cada CGE como de todo o conjunto.

Ao ONS cabe a prerrogativa de acompanhar, quando considerado necessário, tais campanhas de medição.

De acordo com o submódulo 2.8 [1] os indicadores a serem obtidos a partir das campanhas de medição são, pelo menos, os seguintes:

- Flutuação de tensão: PstD95% e PltS95%;
- Desequilíbrio de tensão: KS95%;
- Distorção harmônica de tensão: DTHTS95% e pelos indicadores correspondentes relativos aos harmônicos individuais.

O desenvolvimento adequado de uma campanha de medição depende de uma série de fatores, dentre os quais: instrumento de medição, tipo de transdutor e características elétricas dos cabos que conectam a sua saída até a entrada do medidor, etc.

5.2 Instrumentos de medição

Este subitem estabelece algumas recomendações e premissas que deverão ser seguidas nas campanhas de medição necessárias a aprovação dos novos acessos.

Os itens 13.2.2.5 e 13.2.2.6 do Submódulo 2.8 [1] dos procedimentos de rede estabelecem as condições básicas que os instrumentos de medição deverão atender para serem considerados adequados a participar de uma campanha de medição.

A partir da publicação da IEC 61000-4-30, a qual estabelece as condições para que um instrumento de medição seja considerado do tipo classe A, o ONS aceitará como adequados os instrumentos de medição que tenham obtido tal classificação através de laboratório nacional ou internacional credenciado para a realização dos ensaios necessários e emissão de atestado comprobatório. Caso

contrário o instrumento deverá ser ensaiado em laboratório, de acordo com o caderno de ensaios elaborado pelo ONS.

Atualmente, o ONS considera como aptos a participar de uma campanha de medição os seguintes instrumentos de medição:

- Power Sentinel fabricado pela Arbiter System;
- ImpedoGraph fabricado pelo CTLab;
- ION – 7600 fabricado pela Power Measument;
- RQE III e RM 100 fabricado pela Reason;
- Unilyser 902 e UP-2210 fabricado pela Unipower;
- PQ Analyser 1760 e 435 fabricado pela Fluke;
- G4430 Blackbox fabricado pela Elspec TD;
- ENCORE SERIES 61000 System, Power Visa, PowerGuide 4400, PowerXplorer PX5, PowerXplorer PX5-400 fabricados pela Dranetz BMI;
- SEL-734 fabricado pela Schweitzer Engineering Laboratories;
- MEDCAL-ST e MEDCAL-NT fabricado pela CESINEL.

Observe-se que tais medidores, além dos indicadores de tensão, também são aptos a medir corrente fundamental e harmônica, o que, em algumas situações poderá ser solicitado pelo ONS.

5.3 Transdutores de tensão

Existem disponíveis vários tipos de transdutores de tensão para a realização de campanhas de medição, cada um com suas características de resposta em frequência e com seu conjunto de vantagens e desvantagens para a utilização em campanhas de medição.

Basicamente, os tipos de transdutores que poderiam ser utilizados em campanhas de medição são:

- TPI – transformador de potencial indutivo;
- TPC – transformador de potencial capacitivo;
- DPC – divisor de potencial capacitivo;
- TCB – tape capacitivo de bucha.

Para cada uma das perturbações relacionadas com os fenômenos de distorção harmônica, desequilíbrio e flutuação de tensão, no entanto, os diversos tipos de transdutores de tensão apresentam características que os diferenciam. Observe-se ainda que enquanto os transdutores do tipo TPC e TPI encontram-se, normalmente, instalados nos barramentos das subestações onde serão realizadas as medições, os transdutores DPC e TCB necessitam de ações

complementares de instalação, tal como a realização de desligamentos, dificultando a realização prática da campanha de medição. Além disto, ressalta-se que o agente deverá avaliar o impacto da instalação de tais transdutores quanto ao aumento do risco de perturbação e ocorrência na operação do sistema decorrente de falhas nestes equipamentos. Abaixo seguem alguns comentários quanto ao desempenho destes transdutores em função do fenômeno a ser medido.

– Desequilíbrio de tensão

Enquanto que os fenômenos de flutuação de tensão e distorção harmônica são medidos em cada fase, a medição do desequilíbrio depende da composição relativa entre fases. Assim sendo, dependendo da classe de precisão do transdutor, pode-se introduzir na medição um desequilíbrio adicional devido a diferença de relação de transformação encontrada em cada fase.

Os transdutores do tipo DPC e TCB, apresentam maior possibilidade de introduzir tal desbalanço adicional no resultado da medição quando comparados com os transdutores do tipo TPI e TPC. Assim sendo, estes últimos são mais recomendados para a medição de desequilíbrio.

– Flutuação de tensão

De uma maneira geral todos os transdutores apresentam desempenho adequado quanto à medição da flutuação de tensão. Tal desempenho decorre do fato de que o efeito da cintilação, relacionado à flutuação de tensão, é um fenômeno fundamentalmente associado às frequências subsíncronas, nas quais os transdutores apresentam razão de transformação, praticamente, constante com a frequência.

– Distorção harmônica de tensão

Os transdutores de tensão existentes nos sistemas elétricos de potência são projetados para operarem em 60 Hz. Para harmônicos, alguns deles não apresentam resposta linear ou constante com a frequência, quais sejam o TPC e o TPI. Uma possível maneira de compensar os erros dos transdutores às frequências harmônicas seria obter sua função de transferência e, através dela, corrigir os harmônicos medidos. Observa-se, contudo, que além das dificuldades práticas para se realizar o teste de resposta em frequência, devido à necessidade de desligamento de instalações da rede básica, também existem dificuldades técnicas, dado que o transdutor, durante o teste, é alimentado por tensão cuja amplitude é bastante inferior ao seu valor nominal de operação. Assim sendo, a medição através de TPC ou TPI acarretam em algum erro de medida, sendo que a utilização de TPC não é recomendada, mesmo para harmônicas de baixa ordem. Por outro lado, a utilização de transdutor do tipo TPI, mesmo com as restrições comentadas anteriormente, apresenta, normalmente, resposta em frequência razoavelmente constante até a 15a

harmônica. Não obstante apresentarem uma característica de resposta em frequência linear, o que é favorável para a realização de medições de distorção harmônica, os transdutores do tipo DPC e TCB apresentam a desvantagem, como comentado acima, de aumentar o risco de perturbação e ocorrência no sistema.

5.4 Transformadores de corrente

Quanto aos transformadores de corrente convencionais (TCs) pode-se dizer que, geralmente, são precisos para medições de harmônicos, apresentando resposta de frequência adequada para frequências até 1500 Hz.

TCs de classe de medição são preferidos para medições de harmônicos pelo fato de serem naturalmente mais precisos que os TCs de classe de transmissão, utilizados nas funções de proteção do sistema elétrico.

5.5 Local de medição

De uma maneira geral, as medições deverão ser realizadas no ponto de acoplamento comum (PAC) o que corresponde ao barramento de conexão do agente à rede básica.

No entanto, observa-se que, no caso do transdutor de tensão disponível no PAC ser do tipo TPC, as medições de distorção harmônica poderão ser prejudicadas, devido ao reconhecido comportamento não linear da sua relação de transformação quando da variação da frequência. Neste sentido, deve-se avaliar a possibilidade de conjugar os resultados de tal medição realizada no PAC com outros resultados de medição realizadas em local próximo ao PAC e que disponha de transdutor do tipo TPI. Tal localização deverá ser definida, caso a caso, em conjunto e seguindo as orientações do ONS.

5.6 Recomendações práticas

O objetivo deste item é ressaltar alguns aspectos relacionados a realização prática das medições, incluindo alguns cuidados que devem ser tomados em favor da qualidade dos resultados.

- Seleção do período de monitoração

O período de monitoração deve ser escolhido de modo a representar, pelo menos, uma semana típica de operação do Sistema Elétrico e da instalação que está sendo avaliada. Portanto, deve ser escolhido um período sem feriados ou desligamentos programados que possam tirar a representatividade dos dados obtidos. No caso de centrais de geração eólica, em função da dependência dos resultados da medição com relação ao regime de ventos, o período de medição poderá ser estendido para um mês, atendendo as recomendações estabelecidas no item 4.1.

– Conexão dos medidores aos transdutores de tensão

A conexão dos instrumentos de medição ao lado de baixa dos transdutores de tensão deve ser efetuada considerando as seguintes recomendações:

- Prever alimentação para os instrumentos eletrônicos de medição através do banco de baterias, existentes nos serviços auxiliares, ou através de fonte condicionada de tensão, como “no breaks”. Tal procedimento visa evitar que a ocorrência de variações de tensão de curta duração comprometa os resultados da campanha;
- A conexão dos medidores às três fases e ao neutro do secundário dos TPCs e TPIs deverá ser feita dentro da sala de controle da subestação. Ressalta-se que a conexão deve ser feita ao neutro do secundário e não a algum ponto qualquer da malha de terra da subestação, bem como que os cabos para ligação entre o secundário dos TPCs e TPIs e os instrumentos de medição devem ser dimensionados de acordo com as normas da concessionária e devem ser evitados percursos extensos dentro da sala de controle;
- Nos casos em que os sinais secundários de TPCs ou TPIs sofrem um processo de transdução para corrente contínua no pátio da subestação e os sinais CC são levados para a sala de controle deve-se buscar soluções em que os sinais do secundário sejam acessados no pátio da subestação;
- Os equipamentos de medição devem ser condicionados preferencialmente em invólucros metálicos de forma a minimizar os níveis de ruídos eletromagnéticos existentes. O fabricante dos equipamentos de medição normalmente estabelece em sua especificação os níveis de interferência a que o equipamento pode ser submetido e os cuidados no seu condicionamento.
- A temperatura e a umidade no local da medição devem estar dentro da faixa permitida pelo fabricante do equipamento.
- Os equipamentos de medição deverão ser colocados sobre uma superfície que não esteja sujeita a choques e vibrações mecânicas sendo aconselhável que a concessionária e o prestador de serviços estabeleçam um procedimento de limitar o acesso ao local e informar estes cuidados a todos operadores da subestação.

– Calibração

Os instrumentos a serem usados na campanha de medição devem ser calibrados antes de ir ao campo. O período entre a última calibração e a data da campanha de medição deverá ser inferior a um ano. O certificado de calibração deverá ser emitido por laboratório credenciado pelo INMETRO. O referido certificado deverá ser anexado ao relatório da medição.

Cabe ressaltar que após receber este certificado, a empresa proprietária do instrumento precisa implementar os ajustes necessários ao equipamento. Em equipamentos analógicos estes ajustes são obtidos através da graduação de controles de ganho, de nível de sinal, resistência de potenciômetros e outros. Em modernos equipamentos digitais durante a calibração são automaticamente gerados arquivos de correção que residem no próprio instrumento e, portanto, não são necessários ajustes adicionais.

No caso de equipamentos usados nas campanhas de medição do ONS estes devem ser calibrados nos requisitos de tensão CA, frequência elétrica e tempo.

A correta calibração dos instrumentos é imprescindível para a medição do indicador K que exprime o desequilíbrio de tensão através de percentagem entre as amplitudes das componentes de seqüência negativa e positiva. Como se sabe o cálculo das componentes de seqüência positiva e negativa considera as tensões nas três fases; na eventualidade de uma fase específica estar descalibrada o valor do indicador K estará comprometido.

5.7 Realização de testes mínimos no campo

Após a conexão dos instrumentos de medição aos transdutores de tensão recomenda-se a realização de alguns testes no ambiente real.

– Teste de amplitude do sinal

Todas as fases do instrumento de medição devem ser conectadas entre uma única fase e o neutro do transdutor, durante um período correspondente de pelo menos 30 minutos.

O objetivo deste teste é verificar se o resultado das amplitudes das tensões nas três fases é a mesma e conseqüentemente os níveis de flutuação e distorção harmônica da tensão são os mesmos para as três fases.

Caso o instrumento de medida tenha a disponibilidade de mostrar os níveis de tensão eficaz que foram aquisitados durante o teste, este valor deve ser comparado com o de um multímetro digital transportável que também tenha permanecido conectado aos mesmos bornes.

Na eventualidade dos níveis medidos de amplitude rms, flutuação ou distorção harmônica de tensão diferir em mais de 5% entre as fases, ou ainda, apresentarem valores absurdos e incompatíveis, a campanha deve ser suspensa até que se descubra a causa da discrepância encontrada.

– Teste da seqüência de fases

As fases “A”, “B”, “C” e neutro de todos os instrumentos devem ser conectadas ao secundário dos transdutores durante um período correspondente a pelo menos 30 minutos.

O objetivo deste teste é verificar se a seqüência de fases está correta. Para tanto, verifica-se o resultado do indicador K, desequilíbrio de tensão, que é obtido pela percentagem da componente de seqüência negativa com relação a positiva. Se eventualmente o valor do indicador K, durante os 30 minutos, superar o nível de 10% será um indicativo de que há problemas com os sinais oriundos dos transdutores, como:

- Inversão da seqüência de fases. Caso seja constatado este problema é necessário inverter duas fases do secundário do transdutor e repetir o teste por mais 30 minutos.
- Sinais discrepantes oriundos eventualmente de outras fontes que não os transdutores de tensão.

Mesmo que algum dos instrumentos de medida tenha a disponibilidade de mostrar a seqüência de fase em tempo real ainda assim o teste deve ser executado, pois há o perigo do instrumento que mede o desequilíbrio de tensão estar conectado com a seqüência inversa.

Na eventualidade de se inverter a seqüência de fases e ainda assim o valor do indicador K apresentar valor incompatível, a campanha deve ser suspensa até que se descubra a causa da discrepância encontrada.

5.8 Ruídos e interferência

Considera-se que dentro da sala de controles da subestação ou em sala de relés os ruídos e interferências que porventura existam sejam compatíveis com os medidores, analisadores e computadores portáteis a serem utilizados.

5.9 Relatório e arquivos de dados

A apresentação dos resultados das medições quer em formato de relatório quer em formato de planilha de dados constitui-se em etapa importante do processo de realização das campanhas de medição.

O relatório Re.ONS – 2.1- 028/2005 “Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho” [5].elaborado pelo ONS em conjunto com o CEPEL, apresenta orientações para a elaboração do relatório para leitura bem como a formatação da planilha de resultados. Tal formatação é importante ser seguida para que o ONS possa armazenar tais resultados em sua base de dados técnica. O nome deste arquivo deverá ter o seguinte formato: **CAMPQUALYYYYMMDDHHMMSS.xls**, onde:

- **CAMPQUAL** – nome indetificador do arquivo - não deve ser alterado.

- **YYYYMMDD** – data identificadora da campanha.
- **HHMMSS** – hora identificadora da campanha

Observa-se que, a critério do agente acessante, o relatório poderá trazer outros aspectos no sentido de enriquecer seu conteúdo, contudo, o mínimo que se espera corresponde ao indicado no documento acima referenciado.

Ressalta-se que deve ser anexada ao relatório cópia do certificado de calibração do(s) instrumento(s) de medição utilizado(s) na campanha, bem como um atestado do prestador de serviço quanto a efetiva realização dos testes mínimos de campo, quais sejam: teste de amplitude do sinal e teste da seqüência de fases, conforme indicado no item 4.6.

6 Referências

- [1] – Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes (revisão 3) – 07/07/2008.
- [2] – Submódulo 3.3 - Solicitação de acesso (revisão 5) – 07/07/2008
- [3] – Submódulo 23.3 - Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos (revisão 2) – 25/09/2007
- [4] – Guide for the specification and design evaluation of AC filters for HVDC systems. CIGRÉ Working Group 14-30.
- [5] - Re. ONS – 2.1- 028/2005 – Revisão 2 - Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho
- [6] - Norma Internacional IEC 61400-21, “Wind Turbine Generators Systems – Part 21: Measurements and Assessment of Power Quality Characteristics of grid Connected Wind Turbines”.

Lista de figuras e tabelas

Figuras

Figura 4-1: Representação do “Equivalente Norton” com o LG da rede básica	8
Figura 4-2: Ilustração gráfica do método do “lugar geométrico”	9

Tabelas

Tabela 4-1: Limites individuais de distorção harmônica	12
Tabela 4-2: Dados para avaliação dos níveis de flicker	15