

Desenvolvimento de Metodologia para Calibração de Transdutores de Tensão para Medição de Parâmetros de QEE em Redes de Alta Tensão

Erasmio Silveira Neto (CTEEP), Hédio Tatizawa (IEE/USP), Kleiber T. Soletto (IEE/USP), Antonio A.C. Arruda (IEE/USP), Nelson M. Matsuo (IEEUSP)

Resumo O controle dos parâmetros de qualidade de energia nas redes elétricas na atualidade vem adquirindo maior importância, pela crescente presença de cargas eletrônicas sensíveis, principalmente, e pela exigência dos consumidores por melhor qualidade de produtos e serviços associados à energia elétrica. Os procedimentos de calibração dos aparelhos analisadores dos parâmetros de qualidade de energia disponíveis já estão estabelecidos nas normas técnicas internacionais, notadamente na série IEC 61.000. Este trabalho apresenta resultados de pesquisa visando o desenvolvimento de circuito de ensaio para a avaliação de transdutores de tensão utilizados na medição de parâmetros de qualidade de energia, nas redes de alta tensão, sendo que esses procedimentos não estão cobertos na série de normas da IEC 61.000. Considera-se também que não são prontamente disponíveis laboratórios com essa capacitação.

Palavras-chave— transdutores de tensão, divisores de potencial capacitivo, qualidade de energia, transformador de potencial capacitivo.

I. INTRODUÇÃO

O controle dos parâmetros de QEE nas redes de distribuição e de transmissão de energia exige a disponibilidade de ferramental, na forma de pessoal, aparelhos de medição e transdutores adequados para a verificação dos parâmetros de QEE. Quanto aos transdutores, levantamentos já efetuados indicam a falta de consenso quanto aos procedimentos de calibração nos níveis de tensão típicos da rede básica [1,2]. Os resultados dessa pesquisa são de interesse geral, por envolver um problema técnico inerente às empresas que possuem instalações de alta tensão. Neste artigo, são apresentados os resultados objetivando o desenvolvimento do circuito de calibração dos transdutores de tensão para medição de parâmetros de QEE em redes de alta tensão, e as análises realizadas.

II. DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO DE ENSAIO

Na medição dos parâmetros de qualidade de energia em redes de alta tensão, um dos principais transdutores

utilizados são os Divisores de Potencial Capacitivos (DPC) [3], formados por capacitores modulares, os quais apresentam vantagens pela facilidade de instalação e modularidade, cobrindo desde tensões típicas das redes de distribuição até o nível de transmissão.

A Figura 1 mostra um DPC instalado em campo, formado por capacitores modulares de valor nominal 500pF, tensão 50kV.



Figura 1 – Divisor de potencial capacitivo – medição em linha de transmissão de 345kv.

Considerando-se o desenvolvimento de circuito de ensaio com a finalidade de medição dos principais parâmetros de qualidade de energia, o circuito de calibração e ensaio dos transdutores de tensão, deve compreender os seguintes componentes:

- fonte de tensão com recursos para a geração de tensões senoidais com baixa distorção harmônica, compreendendo as frequências harmônicas até a ordem 50^o (3000Hz), geração de formas de onda composta (fundamental + harmônicas), e de potência suficiente para a realização dos ensaios de calibração. Nesta pesquisa foi utilizada para essa finalidade a fonte de tensão 5001 iX,

de fabricação California Instruments.

- transformador elevador de tensão, a ser alimentado pela fonte de tensão, de forma a disponibilizar em alta tensão, as formas de onda produzidas pela fonte de tensão (formas de onda composta e em frequências harmônicas), com potência compatível com os ensaios a serem realizados. A opção pela obtenção de alta tensão dessa forma justifica-se, pela não disponibilidade de fontes de alta tensão capazes de gerar as formas de onda necessárias à pesquisa. Considera-se que a carga a ser submetida ao transformador deverá apresentar-se predominantemente sob a forma de transdutores de tensão, dos tipos DPC ou TPC (Transformador de Potencial Capacitivo), de natureza capacitiva.

- divisor de potencial capacitivo, formado por capacitores modulares de 500pF, tensão 50kV, fabricação ICAR.

- analisador de qualidade de energia. Nesta pesquisa, foi utilizado o analisador TOPAS 1000, de fabricação LEM/Fluke.

Nos ensaios, foi utilizado um transformador elevador de tensão com tensão 380V/300kV, potência 70kVA, conforme características apresentadas na Tabela I.

TABELA I - DADOS DO TRANSFORMADOR ELEVADOR

Enrolamento	Tensão (V)
Alta tensão	300.000
Baixa tensão	380
relação	789,47
Potência	70kVA

Nesses ensaios iniciais foi utilizado o circuito de ensaio conforme mostra esquematicamente a Figura 2.

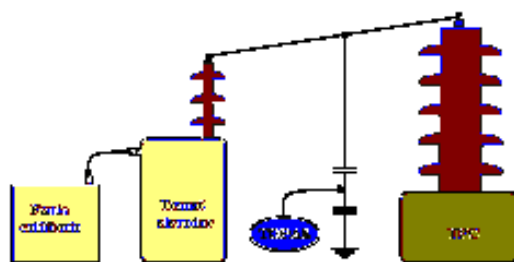


Figura 2 – Exemplo de circuito típico de calibração, mostrando fonte de tensão, transformador elevador, divisor de potencial capacitivo (Referência) e transformador de potencial capacitivo (objeto sob ensaio)

A. Circuito Equivalente do Transformador Elevador de Tensão

A opção de se alimentar o circuito de ensaio através de um transformador elevador implica na inserção no circuito, de uma indutância associada à reatância de dispersão do transformador elevador. Ressalta-se que essa opção faz-se necessária, devido a não disponibilidade, de fontes de alta tensão com as características necessárias para o atendimento dos objetivos da pesquisa. A composição dessa reatância de dispersão com a capacitância das cargas (DPC e TPC) resulta num efeito de ressonância, em determinadas frequências.

Para fins de modelagem elétrica do transformador elevador de tensão, foi feito o levantamento do seu circuito equivalente, mostrado na Figura 3, obtido através de ensaios em vazio e em curto circuito, em 60 Hz.

Figura 3 – Circuito equivalente do transformador elevador onde: R_{eq} – resistência equivalente, X_{eq} – reatância de dispersão, X_m – reatância de magnetização, R_p – resistência equivalente de perdas em vazio

Com base nos ensaios em vazio e em curto circuito do transformador, foram obtidos os seguintes valores de parâmetros do circuito equivalente do transformador, apresentados na Tabela II:

TABELA II - CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR ELEVADOR

Parâmetro	Valores referidos ao lado de baixa tensão (Ω)	Valores referidos ao lado de alta tensão (Ω)
R_{eq} (Ω)	0,061	39,5k
X_{eq} (Ω)	0,282	182,5k
R_p (Ω)	222	143,7M
X_m (Ω)	9,08	5,87M

B. Modelagem do Circuito Equivalente de Ensaio

Com base nos valores dos parâmetros do transformador elevador (referidos ao lado de alta tensão) e do DPC, obtemos para o circuito de ensaio, o circuito equivalente apresentado na Figura 4.

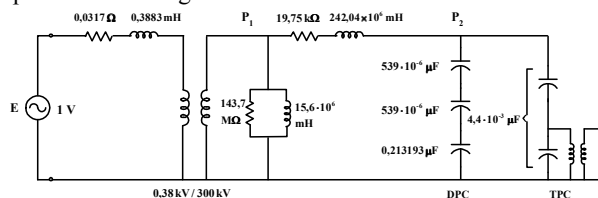


Figura 4 – Circuito de ensaio considerando o circuito equivalente do transformador elevador, divisor de potencial capacitivo (DPC) e transformador de potencial capacitivo (TPC).

C. Circuito de Ensaio - Modelagem e Simulações Computacionais.

Com o objetivo de se analisar o comportamento do circuito de ensaio frente a tensões harmônicas, foram realizadas modelagens e simulações computacionais utilizando-se o programa ATP. Foram utilizados nas simulações os valores dos parâmetros do transformador elevador (referidos ao lado de alta tensão) e do DPC, conforme apresentado no circuito equivalente da Figura 4.

Nas simulações computacionais realizadas empregan-

do-se o programa ATP e apresentadas a seguir, considerou-se uma amplitude de 1V (valor rms) aplicada na entrada do circuito de calibração, hipoteticamente fornecida pela fonte Califórnia. O objetivo dessas simulações computacionais foi o de avaliar a faixa de valores de tensão de saída em função das frequências harmônicas aplicadas na entrada, e também o comportamento da corrente fornecida pela fonte em função da frequência.

Adicionalmente, estudou-se o comportamento do circuito de ensaio em diversas situações, aplicando-se resistências, capacitâncias e indutâncias nos lados primário e secundário do transformador elevador, com a finalidade de se melhorar a curva de resposta em frequência do circuito, no sentido de se obter tensões de saída elevada e corrente de entrada reduzida.

A Figura 5 mostra a tensão de saída do circuito representado na Figura 4, em função da frequência, obtida através de simulação com o programa ATP.

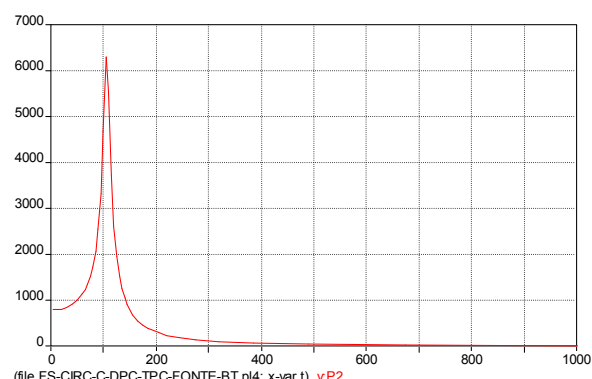


Figura 5 – Resposta em frequência do circuito representado na Figura 4.

As simulações computacionais indicam uma resposta não plana do circuito de ensaios, observando-se ressonância numa frequência de aproximadamente 120 Hz. O resultado das medições das tensões efetuadas com o aparelho analisador de qualidade de energia, no secundário do transformador elevador, e análise do espectro, confirmam esse resultado.

D. Avaliação do efeito da inserção de componentes passivos na amplitude de saída do transformador elevador e na corrente da fonte Califórnia

D.1 Avaliação do efeito da inserção de resistência de 0,5 ohm no lado de baixa tensão.

A Figura 6, mostra o circuito de ensaio, com a inserção de resistência de 0,5Ω no lado de baixa tensão.

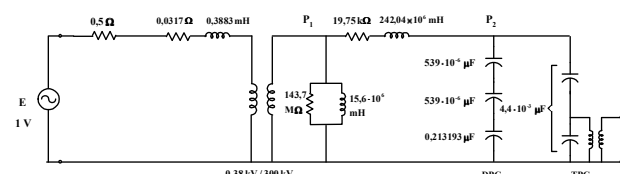


Figura 6 – Circuito de ensaio, com a inserção de resistência de 0,5 Ω no lado de baixa tensão.

As figuras 7 e 8 mostram a tensão de saída do circuito de ensaio, e a corrente de entrada, fornecida pela fonte Califórnia.

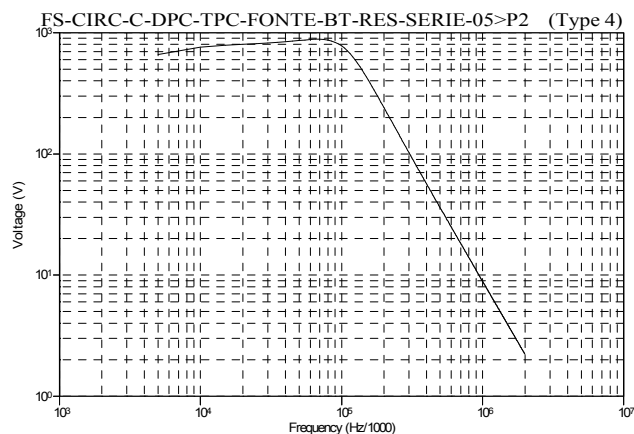


Figura 7 – Tensão de saída do circuito de ensaio (tensão aplicada sobre o DPC e TPC) com a inserção de resistência de 0,5Ω no lado de baixa tensão.

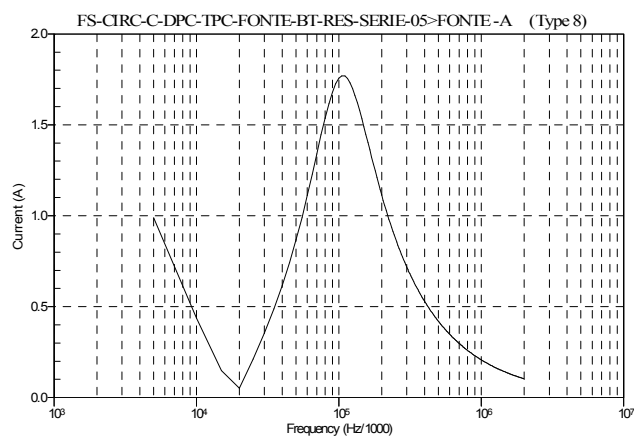


Figura 8 – Corrente exigida da fonte de tensão (fonte Califórnia) com a inserção de resistência de 0,5 Ω no lado de baixa tensão.

A inserção de resistência de 0,5W em série no lado de baixa tensão resulta em ganho satisfatório na tensão de saída do circuito de ensaio, porém com alta corrente na fonte de tensão.

D.2 Avaliação do efeito da inserção de indutância de 1,5 mH e resistência de 0,5Ω em série, e capacitância de 600 μF, em paralelo, no lado de baixa tensão.

A figura 9 mostra o circuito de ensaio, com inserção no lado de baixa tensão, de resistência de 0,5Ω em série, e indutância de 1,5mH e capacitância de 600μF em paralelo.

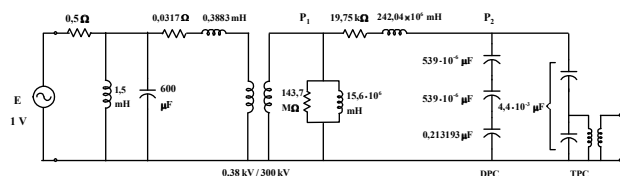


Figura 9 - Circuito de ensaio, com inserção no lado de baixa tensão, de resistência de $0,5\Omega$ em série, e indutância de $1,5\text{mH}$ e capacitância de $600\mu\text{F}$ em paralelo.

A figura 10 mostra a tensão de saída (no ponto de alimentação do DPC e TPC).

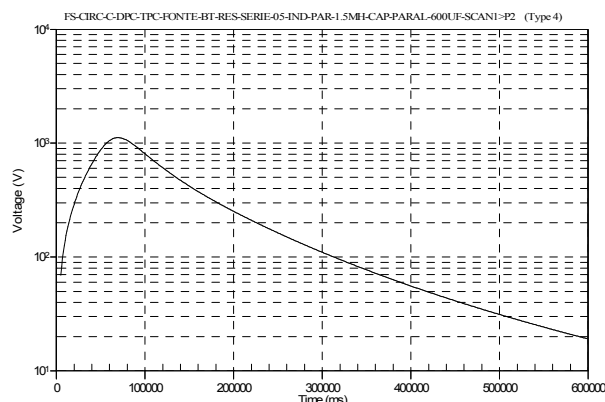


Figura 10 - Tensão de saída (no ponto de alimentação do DPC e TPC), com inserção no lado de baixa tensão, de resistência de $0,5\Omega$ em série, e indutância de $1,5\text{mH}$ e capacitância de $600\mu\text{F}$ em paralelo.

A figura 11 mostra a corrente exigida da fonte de tensão.

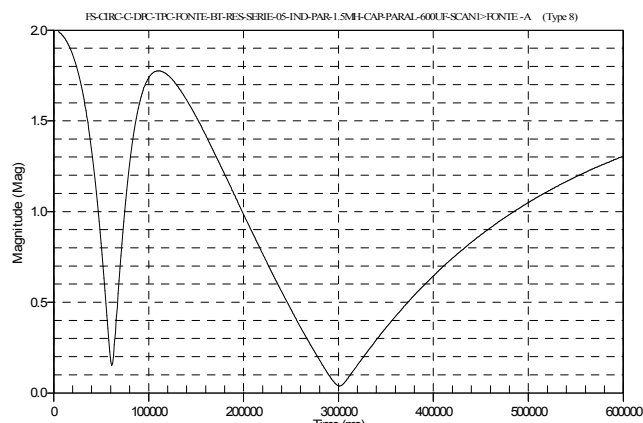


Figura 11 - Corrente exigida da fonte de tensão, com inserção no lado de baixa tensão, de resistência de $0,5\Omega$ em série, e indutância de $1,5\text{mH}$ e capacitância de $600\mu\text{F}$ em paralelo

Neste estudo de caso, observa-se a viabilidade da aplicação de tensão composta, (tensão em 60Hz e componente harmônica em 300Hz), obtendo-se ganhos elevados em 60Hz e 300Hz, com baixa corrente na saída da fonte de tensão, através da utilização de indutância de $1,5\text{mH}$ e capacitância de $600\mu\text{F}$, aplicados em paralelo no lado de baixa tensão do transformador. Por exemplo, a partir dos gráficos das figuras 10 e 11, pode-se verificar que para a

obtenção de tensão composta constituída por 100 kV em 60 Hz e 5 kV em 300 Hz, chega-se aos seguintes valores na fonte:

60 Hz: Tensão de 91 V e corrente de 18,2 A;

300 Hz: Tensão de 47,6 V e corrente de 1,9 A.

Através das análises apresentadas, verificou-se o comportamento do circuito de ensaio com a inserção de componentes passivos (resistência, capacitância e indutância) considerando-se várias configurações de associações em série e em paralelo.

Dessa forma, foi verificada a possibilidade da obtenção de formas de onda compostas, a serem utilizadas nas calibrações, através da inserção de componentes passivos, a fim de se resultar em altas tensões de saída com baixa corrente exigida da fonte. Estudos semelhantes aos apresentados foram realizados para outras composições de tensão em frequência fundamental e tensão em frequência harmônica, para frequências mais elevadas.

E. Dimensionamento dos capacitores, indutores e resistores utilizados na compensação reativa.

A inserção do indutor de $1,5\text{mH}$ promove o aparecimento do pico de tensão em 60Hz, apresentado na figura 10, e o mínimo de corrente em 60 Hz apresentado na figura 11.

A inserção do capacitor de $600\mu\text{F}$ causa o aparecimento do mínimo de corrente em 300 Hz, apresentado na figura 11.

A Figura 12 mostra a corrente na indutância de $1,5\text{mH}$ inserida no lado de baixa tensão.

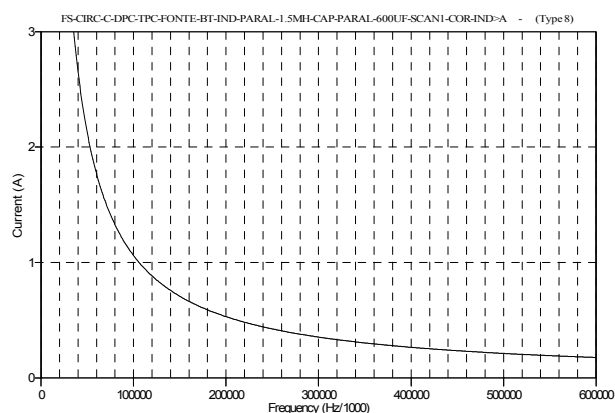


Figura 12 - Corrente na indutância de $1,5\text{mH}$ inserida no lado de baixa tensão.

Na figura 12 observa-se que para a frequência de 60Hz e tensão de entrada de 1V, a corrente na indutância alcança valores da ordem de 1,7A. Reportando à figura 10, verifica-se que para a obtenção de tensão de saída de aproximadamente 100kV, é necessária a aplicação de tensão de entrada de aproximadamente 100V. Dessa forma, estima-se que com a aplicação de tensão de entrada de 100V, a corrente na indutância pode atingir valores da ordem de 170A.

Com a aplicação de tensão de entrada de 100V, reportando a figura 9, verifica-se que o capacitor de 600 μ F fica submetido à tensão de 100V aproximadamente.

O efeito da aplicação do resistor de 0,5 Ω em série, no lado de baixa tensão, consiste no achatamento dos picos de tensão e de corrente. O achatamento dos picos de tensão e de corrente, nos gráficos de tensão de saída e de corrente de entrada em função da frequência, é vantajoso para efeito da montagem do circuito de ensaio em laboratório, por facilitar a sintonia do circuito, facilitando o ajuste dos valores dos componentes passivos, os quais dessa forma podem apresentar pequenos desvios em relação aos valores previstos sem prejuízo significativo quanto aos resultados esperados.

Pelo gráfico da figura 10, para uma tensão de entrada de 100V resulta uma tensão de saída de 100kV aproximadamente, em 60 Hz. Pelo gráfico da figura 11, a corrente de saída da fonte de tensão é de aproximadamente 18,7A nessa situação. A corrente de saída da fonte de tensão determina aproximadamente a potência nominal da resistência de 0,5 Ω , portanto a corrente nominal é da ordem de 20A.

F. Especificação dos capacitores, indutores e resistores utilizados na compensação reativa.

Com base nos resultados das análises apresentadas no item E, para a especificação dos componentes passivos a serem utilizados na compensação reativa foram adotadas as seguintes características, tomando-se como referência os valores disponíveis comercialmente para esses produtos:

F.1. Especificação dos capacitores

Para fins de especificação, adotou-se a tensão nominal para os capacitores de 380V, para utilização em corrente alternada.

Com base na disponibilidade no mercado, foram especificados capacitores que são geralmente utilizados para a correção de fator de potência e para circuitos de iluminação (capacitores de marcha). Esses capacitores comumente são fabricados em filme de polipropileno metalizado. Ainda com base na disponibilidade, foram definidos conjuntos de capacitores com os seguintes valores: 15 μ F, 31 μ F, 46 μ F, 62 μ F, 91 μ F. A figura 13 mostra um conjunto formado por esses capacitores.



Figura 13 – Conjunto de capacitores utilizados para a compensação reativa, com tensão nominal 380VCA.

F.2. Especificação dos resistores.

Tendo em vista a corrente da fonte da ordem de 20A, foram especificados resistores de 0,5 Ω , potência 200W, ajustáveis continuamente. A Figura 14 mostra um conjunto formado por esses resistores



Figura 14 – Resistores utilizados na compensação reativa, com valor nominal 0,5 Ω e potência nominal 200W cada.

F.3 Especificação dos indutores utilizados na compensação reativa.

Considerando a previsão de corrente durante os ensaios da ordem de 170A, foram definidos para utilização indutores de núcleo de ar, construídos em fio de alumínio de seção 50mm², com valor nominal de 1mH cada, e com corrente nominal de 300A. Estes indutores, mostrado na figura 15, foram fabricados no IEEUSP.



Figura 15 – Indutor utilizado na compensação reativa, valor nominal de 1mH e corrente nominal de 300A.

As Figuras 16 e 17 mostram a implementação laboratorial do circuito de ensaio.



Figura 16 - Implementação do circuito de ensaio – transformador elevador (à esquerda), TPC (centro) e DPC (à direita), e indutores de 1mH para compensação reativa (em primeiro plano).



Figura 17 - Implementação do circuito de ensaio, com o analisador de QEE TOPAS 1000 à esquerda e fonte de tensão Califórnia 5001 iX à direita, em primeiro plano.

G. Obtenção de alta tensão em 60Hz e com forma de onda composta.

A Figura 18 mostra a tensão de saída do transformador de ensaio, alimentado pela fonte Califórnia ajustada para fornecer tensão composta por componentes senoidais de frequências 60 Hz, 180Hz, 300Hz e 400Hz. A medição foi efetuada com analisador TOPAS 1000 acoplado ao DPC. A Figura 19 mostra o espectro da tensão de saída do transformador de alta tensão.

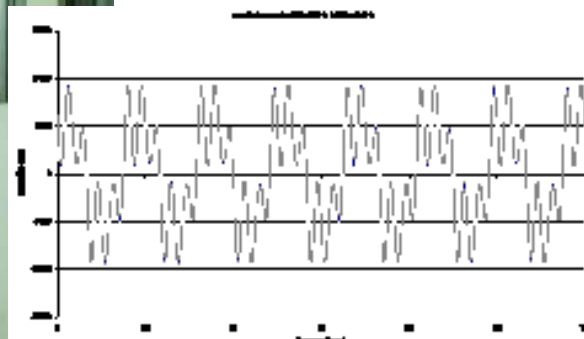


Figura 18 – Tensão de saída do transformador de ensaio, tensão de entrada com componentes de 60 Hz, 180Hz, 300Hz e 400Hz.

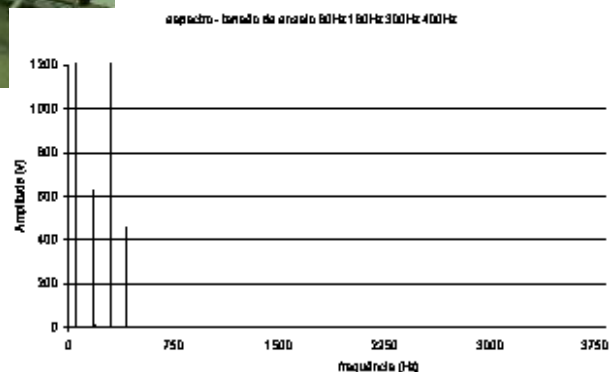


Figura 19 – Espectro da tensão de saída do transformador de ensaio, tensão de entrada com componentes de 60 Hz, 180Hz, 300Hz e 400Hz.

Conforme pode ser observado na Figura 19, na saída do transformador de alta tensão aparecem somente as

componentes harmônicas efetivamente injetadas na entrada do transformador (60Hz, 180Hz, 300Hz e 400Hz), mostrando o comportamento linear do transformador. No que se refere às amplitudes das tensões obtidas, estas são determinadas pela relação de transformação (do transformador) e pelas características da resposta em frequência do circuito de ensaio.

Utilizando o circuito de ensaio desenvolvido utilizando-se a compensação reativa, alimentando o transformador elevador com a fonte de tensão Califórnia (potência 5kVA), foi possível a obtenção de alta tensão com baixa distorção harmônica, a qual foi aplicada no transformador de potencial capacitivo (TPC). A figura 20 mostra a forma de onda, medida no secundário do divisor de potencial capacitivo (DPC) através analisador de QEE TOPAS 1000, com aplicação de tensão de 96kV no TPC (capacitância de 4400pF), disponibilizando-se portanto uma potência de aproximadamente 15kVA nesse ensaio. A figura 21 mostra o espectro obtido.

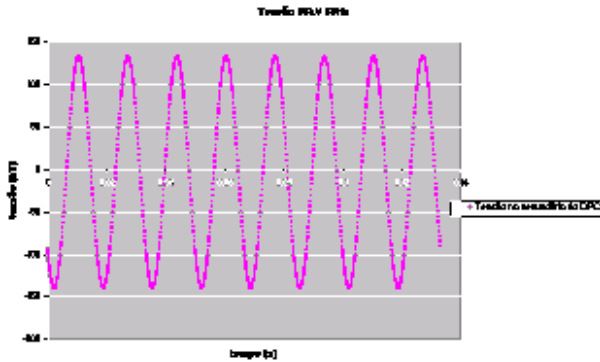


Figura 20 - Obtenção de alta tensão – 96kV – distorção harmônica total de 0,14% – forma de onda

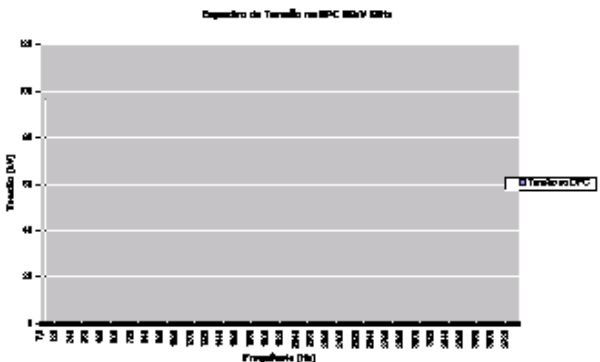


Figura 21 - Obtenção de alta tensão – 96kV – distorção harmônica total de 0,14% - espectro

A figura 22 mostra exemplo da obtenção de forma de onda composta, constituída por tensão em 60 Hz com amplitude de 96kV somada a 5% de tensão em 3º harmônica (300Hz). A figura 23 mostra o espectro da tensão obtida nesse ensaio.

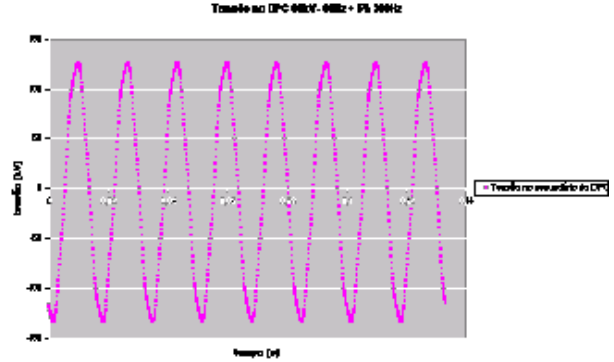


Figura 22 - Obtenção de alta tensão – 96kV em 60 Hz com 5% de 5ª harmônica (300Hz) – forma de onda

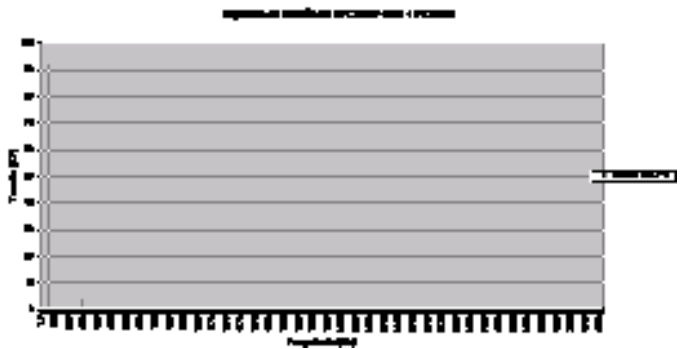


Figura 23 - Obtenção de alta tensão – 96kV em 60 Hz com 5% de 5ª harmônica (300Hz) – espectro

H. Comentários sobre os requisitos de exatidão na medição de componentes harmônicas prescritos nas especificações.

A Tabela III, extraída da norma IEC 61000-4-7 - 2º edition 2002 08 (Test and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and interpretation, for power supply systems and equipment connected thereto), indica os requisitos de exatidão da instrumentação para a medição de corrente, tensão e potência das componentes espectrais na faixa de frequências até 9kHz, que apresentam-se superpostas à componente fundamental em sistemas de potência (50Hz ou 60Hz).

Tabela III - Requisitos de exatidão em medições de tensão, corrente e potência (considerando componentes harmônicas)

Tabela III - Requirements for accuracy for voltage, current and power measurements

Classe	Descrição	Simulação	Medição
I	Voltim	$U_m \leq 10\% U_{nom}$ $U_m \leq 10\% U_{nom}$	$\pm 0,05\%$ $\pm 0,05\% U_{nom}$
	Corrente	$I_m \leq 0,05 I_{nom}$ $I_m \leq 0,05 I_{nom}$	$\pm 0,05\%$ $\pm 0,05\% I_{nom}$
	Potência	$P_m \leq 10\% P_{nom}$ $P_m \leq 10\% P_{nom}$	$\pm 0,1\%$ $\pm 0,1\% P_{nom}$
II	Voltim	$U_m \leq 0,05 U_{nom}$ $U_m \leq 0,05 U_{nom}$	$\pm 0,05\%$ $\pm 0,05\% U_{nom}$
	Corrente	$I_m \leq 0,01 I_{nom}$ $I_m \leq 0,01 I_{nom}$	$\pm 0,1\%$ $\pm 0,1\% I_{nom}$

U_m - Valor máximo da tensão da componente harmônica
 I_m - Valor máximo da corrente da componente harmônica
 P_m - Valor máximo da potência da componente harmônica
 U_{nom} - Tensão nominal
 I_{nom} - Corrente nominal
 P_{nom} - Potência nominal

Nota 1 - Classe I harmoniza-se com os requisitos de precisão estabelecidos nos procedimentos de medição de tensão, corrente e potência, sendo que, para a medição de tensão, a precisão deve ser de $\pm 0,05\%$ e para a medição de corrente e potência, a precisão deve ser de $\pm 0,1\%$.
 Nota 2 - Classe II harmoniza-se com os requisitos de precisão estabelecidos nos procedimentos de medição de tensão, corrente e potência, sendo que, para a medição de tensão, a precisão deve ser de $\pm 0,05\%$ e para a medição de corrente e potência, a precisão deve ser de $\pm 0,1\%$.
 Nota 3 - Os requisitos de precisão estabelecidos nos procedimentos de medição de tensão, corrente e potência, são os requisitos estabelecidos nos procedimentos de medição de tensão, corrente e potência, sendo que, para a medição de tensão, a precisão deve ser de $\pm 0,05\%$ e para a medição de corrente e potência, a precisão deve ser de $\pm 0,1\%$.

A Tabela III distingue duas classes de instrumentos de medição, sendo os de classe I aqueles utilizados onde são requeridas medições mais precisas, como por exemplo na verificação de limites de emissão harmônica, o que enquadra-se no escopo deste projeto de pesquisa. Definindo U_m como valor medido da tensão harmônica e U_{nom} a faixa de tensão nominal do instrumento, considerando-se o aparelho TOPAS 1000 utilizado nesta pesquisa, o valor de U_{nom} é de 600V.

Por outro lado, a Tabela IV, extraída dos Procedimentos de Rede submódulo 2.2 do O.N.S. - Operador Nacional do Sistema (cuja utilização foi autorizada pela resolução ANEEL 791/02 de 24/12/2002) apresenta os limites máximos das amplitudes das componentes de tensão harmônica expressos em porcentagem da tensão fundamental.

Tabela IV – Limites globais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental

Tensão				Corrente			
Ordem harmônica	Limite (%)	Ordem harmônica	Limite (%)	Ordem harmônica	Limite (%)	Ordem harmônica	Limite (%)
3, 5, 7	2%	3, 5, 7	2%	3, 5, 7	2%	3, 5, 7	2%
9, 11, 13	1,5%	9, 11, 13	1,5%	9, 11, 13	1,5%	9, 11, 13	1,5%
15 a 25	1%	15 a 25	1%	15 a 25	1%	15 a 25	1%
≥ 27	0,5%	≥ 27	0,5%	≥ 27	0,5%	≥ 27	0,5%

Considerando a medição de parâmetros de qualidade de energia em redes de alta tensão com tensão superior a 69kV através de transdutores de tensão (neste projeto através de Transformadores de Potencial Capacitivo), verifica-se que estes tipicamente apresentam tensão secundária da ordem de 115V e $115/\sqrt{3}$. Considerando o limite máximo da Tabela IV, para harmônicas de ordem

3,5 e 7, que é de 2%, hipoteticamente a tensão de saída no secundário do TPC seria de $2\% \times 115V = 2,3V$.

Reportando à Tabela III e considerando $U_{nom} = 600V$ para o aparelho TOPAS 1000, a medição do valor de tensão de 2,3V corresponde a 0,4% da tensão U_{nom} do aparelho. Dessa forma, com base na Tabela III, a medição deve apresentar erro máximo de $\pm 0,05\%$ de $U_{nom} = 600V$ portanto erro máximo de 0,3V. Portanto, na medição de tensões harmônicas próximas aos valores limites do ONS para as ordens harmônicas 3, 5 e 7, é aceitável um erro máximo de $0,3V \div 2,3V \times 100\% = 13\%$

Para as mesmas condições de contorno, a estimativa do erro máximo tolerável para a medição das tensões harmônicas de ordem superior para valores próximos aos limites do ONS comparece na Tabela V.

Tabela V – Limites (do ONS) de tensões harmônicas $V \geq 69kV$ versus erro máximo (IEC61000-4-7)

ordem harmônica	Limite (ONS)		erro máximo
	ímpar	par	
3, 5 e 7	2%	1%	13%
		2,4 e 6	26%
9, 11 e 13	1,5%		17%
		≥ 8	52%
15 a 25	1%		26%
≥ 27		0,5%	52%

I. Ensaios de calibração em TPC tensão 145kV – 8300nF

Os resultados dos ensaios de calibração efetuados no TPC 145kV estão representados na Tabela VI.

Na Tabela VI, comparecem os valores de tensão senoidal no lado de alta tensão do transformador elevador, medidos através do Divisor de Potencial Capacitivo adotado como referência, os valores medidos através do Transformador de Potencial Capacitivo, e o erro calculado.

Tabela VI – Resultado dos ensaios de calibração – TPC 145kV.

Ordem harmônica	Frequência (Hz)	DPC AT (V)	TPC AT (V)	Erro
1	60	24034,81	24289,17	1,06%
3	180	1435,76	1490,79	3,83%
5	300	530,20	582,52	9,87%
7	420	188,06	236,96	26,00%
9	540	60,42	92,91	53,77%
10	600	31,72	49,42	55,79%
11	660	16,62	27,44	65,15%
12	720	8,31	14,28	71,94%
13	780	0,76	1,29	70,33%
14	840	3,78	12,12	221,0%
15	900	4,53	7,27	60,53%

Na Tabela VI estão representados os resultados das

medições realizadas utilizando-se o circuito de ensaios de calibração implementado. Os ensaios foram realizados considerando-se a aplicação de tensão harmônica superposta a tensão senoidal em 60Hz, sendo efetuadas medições com o analisador de QEE TOPAS 1000 do sinal disponibilizado no ramo secundário do Divisor de Potencial Capacitivo (DPC) e no ramo secundário do Transformador de Potencial Capacitivo (TPC).

Por inspeção da Tabela VI, observa-se a acentuada variação da tensão de saída secundária do TPC como função da frequência. O modelo equivalente para 60 Hz mostrado na Fig. 24 não forneceu resposta próxima à obtida em ensaios, possivelmente pela presença de elementos adicionais no modelo do TPC, não evidenciados nos ensaios (em vazio e em curto circuito) utilizados para o levantamento desses parâmetros.

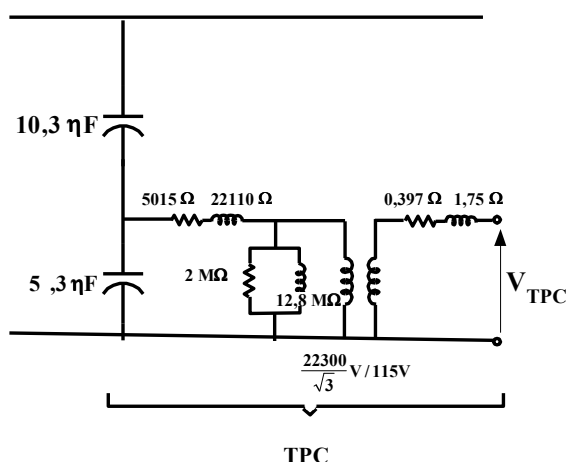


Figura 24 – Modelo equivalente do TPC

A tensão no TPC foi calculada adotando-se a relação de transformação em 60Hz com valor de 755,3:1. A tensão primária do TPC foi calculada adotando-se a relação de transformação com valor de 761,821:1 em 60Hz.

Considerando a resposta acentuadamente não plana da tensão de saída do TPC em função da frequência, foram calculados fatores de correção para cada ordem harmônica, tomando-se por base os valores da Tabela VI.

Dessa forma, para uma correção dos valores lidos na saída do TPC, conforme a ordem harmônica, deve-se multiplicar a leitura pelos fatores de correção determinados na calibração, conforme Tabela VII.

Tabela VII – Fatores de correção da tensão secundária do TPC, em função da ordem harmônica.

ordem	Frequência	fator de correção
1	60	0,99
3	180	0,96
5	300	0,91
7	420	0,79
9	540	0,65
10	600	0,64
11	660	0,61
12	720	0,58
13	780	0,59
14	840	0,31
15	900	0,62

A Fig. 25 mostra a curva de calibração, em função da frequência, tomando-se por referência a Tabela VII.

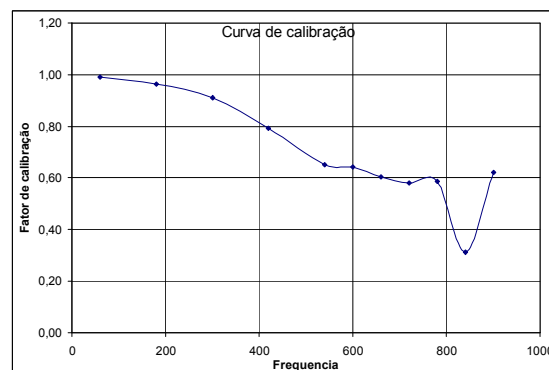


Figura 25 – Curva de calibração do TPC em função da frequência.

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios realizados permitiram concluir que o circuito de ensaio possibilita a geração de altas tensões com baixa distorção harmônica, com a utilização do transformador elevador e a fonte de baixa distorção harmônica. Para a realização de ensaios em TPC com maior capacitância, ou para a obtenção de tensões de ensaios maiores, ou para a geração de componentes harmônicas de ordem elevada (maior frequência), faz-se necessário a disponibilização de fontes de tensão similares à fonte Califórnia 5001iX utilizada, porém com potência mais elevada. Essa alternativa mostra-se factível, apresentando custo associado mais elevado.

Outra constatação importante refere-se à exatidão requerida na medição das grandezas, tomando-se como referência a norma IEC 61000-4-7. Levando-se em consideração que a tensão nominal dos medidores de qualidade de energia é da ordem dos valores de tensão secundária dos circuitos de distribuição, em torno de 400V a 600V, e os valores de tensão harmônica típicos presentes nas re-

des elétricas situam-se em torno de alguns pontos percentuais em relação à tensão em frequência fundamental, resulta que os valores de tensão harmônica a serem medidos situam-se próximos aos limites associados à exatidão desses aparelhos.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bradley DA, Bodger PS, Hyland PR, Harmonic response tests of voltage transducers for the New Zealand power systems, IEEE T-PAS, vol PAS-104, n° 7, 1985
- [2] Seljeseth H, Saethre EA, Ohnstad T, Voltage transformer frequency response. Measuring harmonics in Norwegian 300kV and 132kV power systems. Proceedings IEEE 8° International Conference on Harmonics and Quality of Power ICQHP '98, Athens, 1998.
- [3] Dugan, RC, McGranaghan, MF, Santos, S, Beaty, HW, Electrical Power systems quality, 2nd Edition, McGraw-Hill, 2004.
- [4] Metodologia de Ensaio para Calibração de Transdutores de Tensão para Medição de Parâmetros de Qualidade de Energia em Sistemas de Transmissão de Rede Básica – Relatório Final., Nota Técnica DPC 001 / NT 008 / OR, IEEUSP/CTEEP, São Paulo, 2007..

V. BIOGRAFIAS

Erasmio Silveira Neto nasceu em Botucatu – SP em 06 de Agosto de 1960. Engenheiro Eletricista graduado pela FEB - Fac. de Engenharia de Barretos em 1983, com Especialização em Materiais para Equipamentos Elétricos pela UFPR/LACTEC (1994). Trabalha na CTEEP – Cia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista desde 1985.

Hédio Tatizawa nasceu em Álvares Machado – SP em 22 de maio de 1958. Ele graduou-se pela Escola Politécnica da USP, em 1984, onde concluiu mestrado (1994) e doutorado (2001) em Sistemas de Potência. Trabalha no IEEUSP - Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP desde 1985.

Antonio Augusto Chaves de Arruda nasceu em São Paulo – SP em 29 de julho de 1956. Engenheiro Eletricista graduado pelo Instituto Mauá de Tecnologia em 1979, com Curso de Especialização em Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI(2002). Trabalha na CTEEP – Cia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista desde 1982.

Paulo Futoshi Obase nasceu em Santa Isabel – SP em 11 de junho de 1975. Ele graduou-se pela Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da UNESP, em 2001. Concluiu o mestrado pela EPUSP em 2004 em Sistemas de Potência. Trabalha no IEEUSP - Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP desde 2002.

Kleiber Tadeu Soletto nasceu em São Paulo – SP em 13 de novembro de 1963. Ele graduou-se pela Faculdade de Engenharia Industrial – FEI – São Bernardo do Campo SP, em 1988. Concluiu o mestrado (1998) e doutorado (2004) em Sistemas da Qualidade pela EPUSP. Trabalha no IEEUSP - Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP desde 1989.