

## **Estudo do cálculo do PPV e incertezas envolvidas no sistema de medição**

**Objetivo:** Determinação do Potencial de Pico Prático (PPV – Practical Peak Voltage) segundo a Norma IEC 61676/2002 <sup>[1]</sup> utilizando diferentes sistemas de aquisição de dados. Determinar uma análise completa dos cálculos de incerteza dos sistemas em estudo, levando em conta a resolução em tensão, a taxa de amostragem e o número de amostras de cada sistema para que se possam validar os mesmos e estabelecer um sistema mínimo de referência para medida de PPV de acordo com as exigências da Norma IEC 61676.

Este procedimento leva ainda em conta a propagação de erro das correções da resposta em frequência normalmente empregadas em sistemas de referência utilizados para medição do PPV.

**O Programa:** Para que seja possível viabilizar o cálculo do PPV, um programa em linguagem JAVA “PPVCalc.jar” foi desenvolvido. O programa trabalha com arquivos de dados de tensão capturados pelo sistema de aquisição que é acoplado ao divisor de alta tensão no sistema de referência.

O programa possibilita a execução do cálculo do PPV e da incerteza expandida do PPV e seu fator de abrangência  $k$  de acordo com as recomendações do ISO Guia para expressão da incerteza de medição <sup>[2]</sup>.

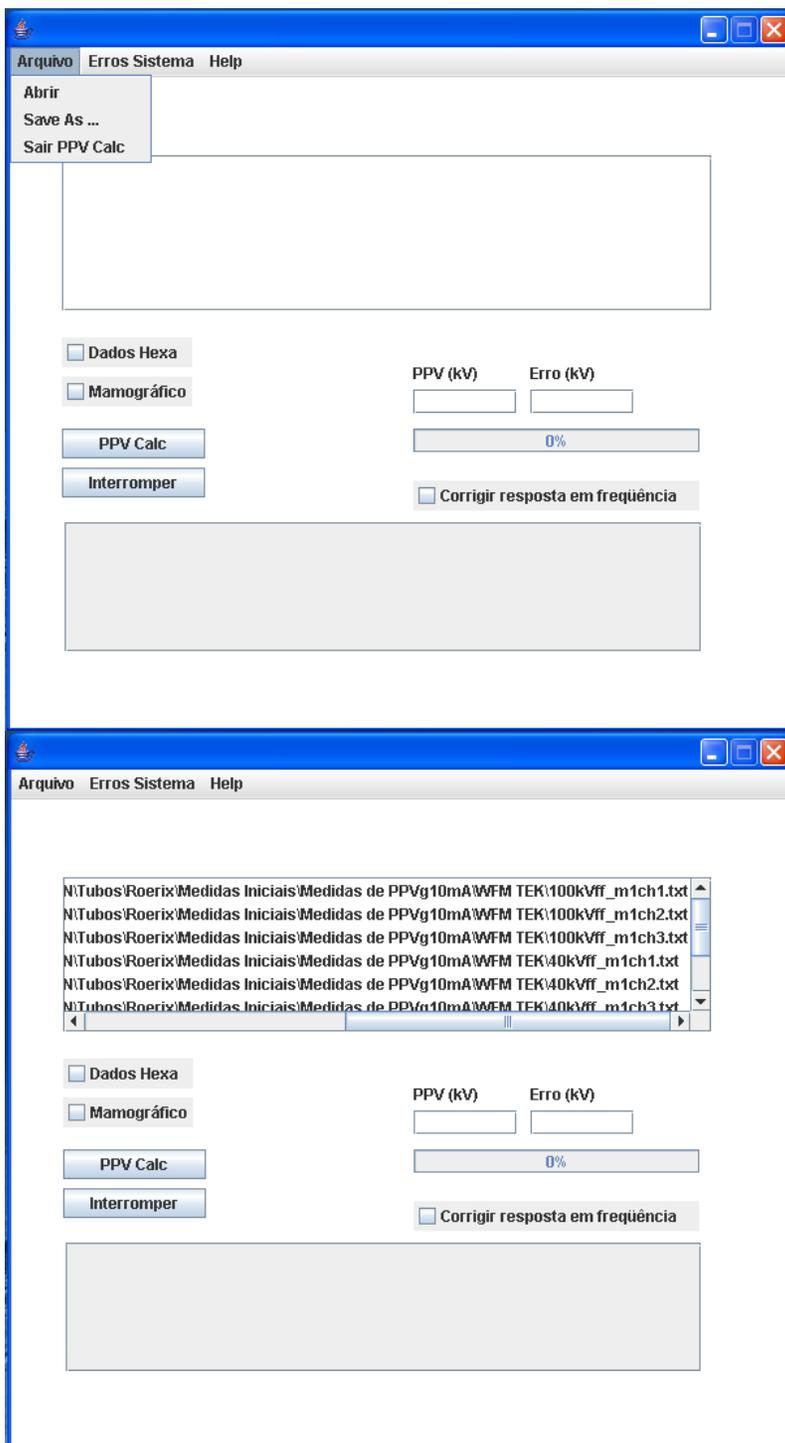
Em sua tela inicial é possível visualizar a entrada de dados do menu Arquivo, onde os arquivos com os dados armazenados das formas de onda de tensão obtidas pelo sistema de aquisição são carregadas. Vários arquivos podem ser carregados ao mesmo tempo para que os cálculos possam ser efetuados e os mesmos são apresentados em uma lista para que se possa garantir que os arquivos selecionados são os de interesse.

Este desenvolvimento é parte integrante da Dissertação de Mestrado:  
*Estudo da relação entre a carga de trabalho e a rugosidade da superfície de anodos de tubos de raios-X utilizados em radiologia diagnóstica*

IPEN/CNEN – USP

Aluno: Márcio Bottaro

Orientador: Maurício Moralles



Os cálculos podem ser efetuados para formas de onda de equipamentos utilizados na faixa de diagnóstico e CT ou Mamografia, sendo para isso necessário a indicação na tela inicial da opção “Mamográfico”. Para adequação ao coletor de

dados desenvolvido no IEE/USP, que apresenta dados hexadecimais em uma seqüência específica estabelecida, a opção “Dados Hexa” é disponibilizada no programa. Existe ainda a opção de correção da resposta em freqüência que será detalhada adiante.

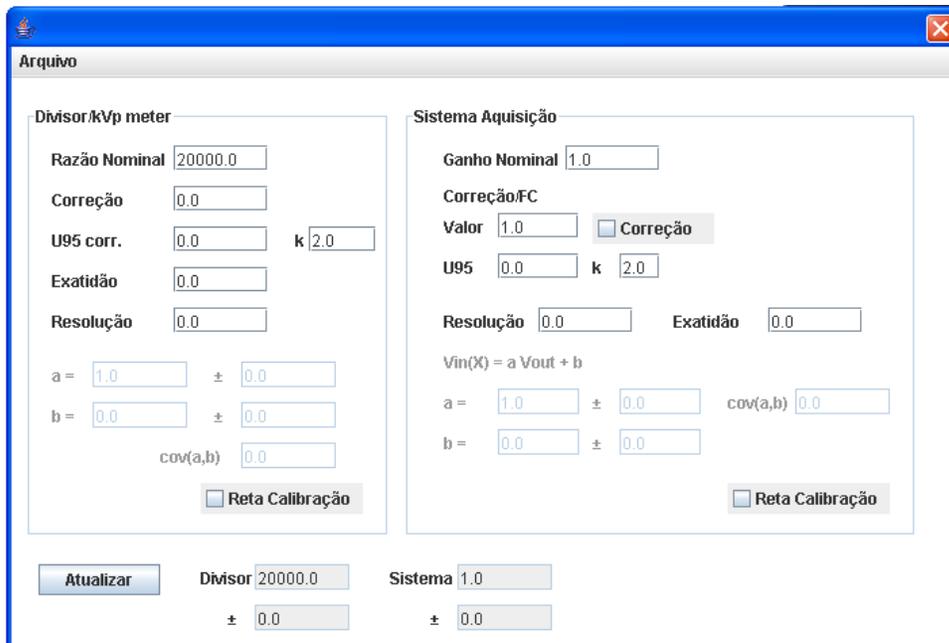
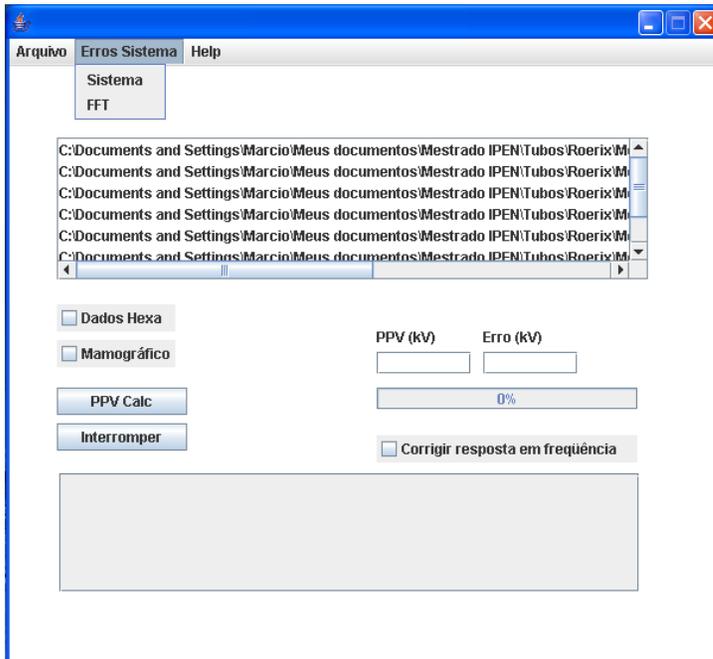
Com os dados selecionados, é necessária a determinação dos dados do sistema de aquisição e divisor de alta tensão ou medidor não invasivo, já que o medidor utilizado nos testes apresenta saída para sistema de aquisição. Para isso, um sistema de entrada de erros foi desenvolvido, onde todos os fatores de calibração suas respectivas incertezas podem ser inseridas, gravadas e recuperadas, de forma a possibilitar a personalização de cada aplicação. Existe ainda uma opção de restauração de valores padrão do programa.

Dentro do sistema de entrada de erros do divisor de alta tensão / medidor não invasivo (kVp meter) é possível estabelecer a razão nominal, a correção desta razão dada normalmente pela calibração do divisor, a incerteza da calibração e seu fator de abrangência (dados disponibilizados pelo certificado de calibração do divisor), sua exatidão declarada e ainda sua resolução nominal. No sistema de aquisição podemos dar entrada dos dados de seu ganho nominal, seu fator de calibração ou correção, a incerteza deste fator com seu grau de abrangência, sua exatidão declarada e sua resolução nominal.

Tanto para o divisor/kVp meter e sistema de aquisição, é possível entrar com dados de retas de calibração, já que os fatores de calibração normalmente não são os mesmos em toda a faixa de utilização. Os erros dos parâmetros e suas covariâncias também devem ser inseridos para que se possa propagar o erro do sistema de forma correta.

Este desenvolvimento é parte integrante da Dissertação de Mestrado:  
*Estudo da relação entre a carga de trabalho e a rugosidade da superfície de anodos de tubos de raios-X utilizados em radiologia diagnóstica*

IPEN/CNEN – USP  
Aluno: Márcio Bottaro  
Orientador: Maurício Moralles



Na entrada de erros do sistema é possível estabelecer ainda os parâmetros de correção de resposta em frequência na opção FFT. Nesta entrada de dados é possível estabelecer a curva de resposta em frequência do divisor de alta tensão ou sistema, os erros dos parâmetros de correção e suas covariâncias para que as incertezas desta correção possam ser corretamente propagadas. Estas

informações também podem ser inseridas, gravadas e recuperadas, de forma a possibilitar a personalização de cada aplicação.

Para que o sistema efetue a correção de forma adequada, deve-se informar a frequência de amostragem dos dados, e no caso de se desejar um arquivo de espectro das magnitudes, deve-se estabelecer a frequência da última harmônica que se deseja apresentar. Esta informação não influencia a correção da resposta em frequência para o cálculo do PPV, mas é interessante quando queremos avaliar a capacidade dos vários sistemas em obter a informação relevante para o cálculo do PPV.

Arquivo

Frequência de Amostragem ...   Gerar Arquivo de espectro

Frequência última harmônica ...

Função de correção

$A+B1*X+B2*X^2+B3*X^3+B4*X^4+B5*X^5+B6*X^6$

Onde: X = Log10 Frequência

	A	B1	B2	B3	B4	B5	B6
A	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>					
B1	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>					
B2	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>				
B3	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>			
B4	<input type="text" value="0.0"/>						
B5	<input type="text" value="0.0"/>						
B6	<input type="text" value="0.0"/>						

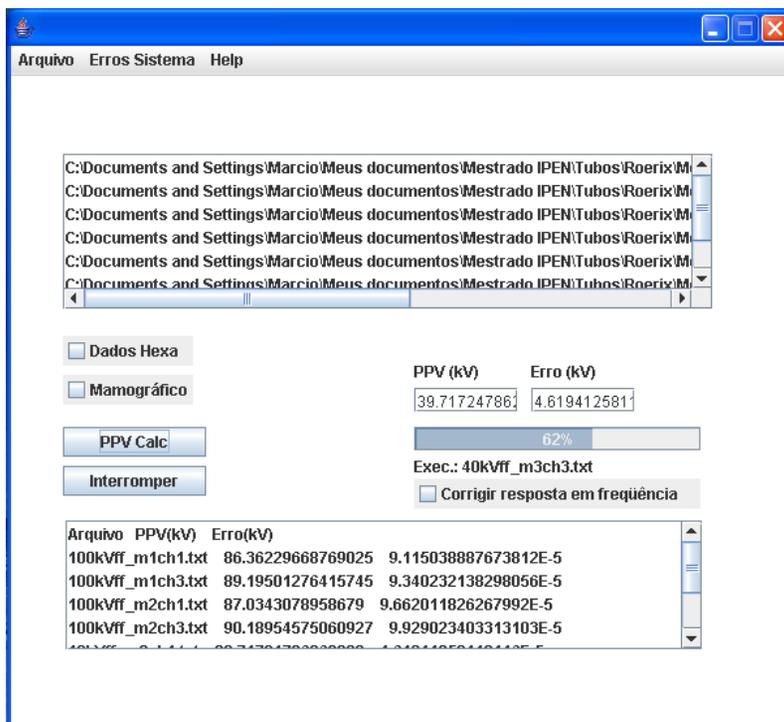
Atualizar

Após os dados serem inseridos, o procedimento de cálculo pode ser iniciado. O andamento da execução dos cálculos, que pode ser interrompido a qualquer momento, é exibido, mostrando o arquivo de dados em execução e os parâmetros calculados de PPV e erro para o último arquivo. Ao final de todos os cálculos, uma lista com os valores finais de PPV e erros relacionados a seus respectivos arquivos é exibida. Estes dados são armazenados no programa, podendo ser salvos em um arquivo de saída por meio do menu arquivo.

Se a opção de geração de espectro for acionada, a cada arquivo calculado, uma interrupção para que os dados de saída do espectros de magnitude em função da frequência sejam gravados é apresentada.

Este desenvolvimento é parte integrante da Dissertação de Mestrado:  
*Estudo da relação entre a carga de trabalho e a rugosidade da superfície de anodos de tubos de raios-X utilizados em radiologia diagnóstica*

IPEN/CNEN – USP  
Aluno: Márcio Bottaro  
Orientador: Maurício Moralles



**Detalhamento do cálculo do PPV efetuado pelo programa:** Anteriormente a qualquer cálculo efetuado pelo programa, os dados armazenados em cada arquivo são condicionados para que se possa eliminar a parte não útil do arquivo, ou seja, conjunto de dados que não fazem parte do sinal, mas que foram armazenados pelo sistema.

Dentro da classe SignCond.java, o método "SignalCond" retorna um vetor de dados filtrados, ignorando a parte dos dados em que não existe informação do potencial aplicado ao tubo de raios X. Seu resultado pode ser visualizado na figura abaixo. O sinal capturado pelo sistema de aquisição é armazenado dentro de um range fixo de 10000 posições de memória e depois condicionado para o tratamento dos dados. Este procedimento é fundamental para a análise de Fourier, já que o sinal de entrada não pode ser considerado periódico.

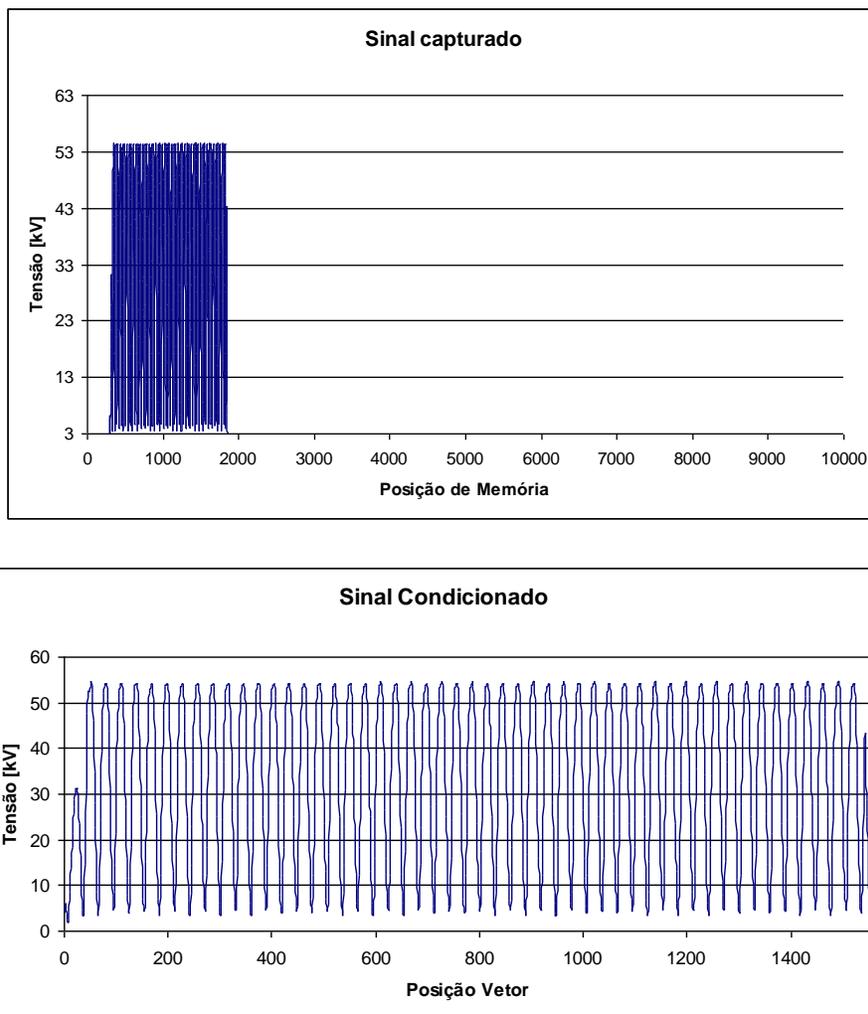


Figura 1 – Sinal armazenado e resultado de saída do método “SignalCond” classe SignCond.java

Após o condicionamento do sinal, este pode ser ou não corrigido pelo procedimento de Transformada Discreta de Fourier.

No caso de um sistema que não necessite de correção, partimos diretamente para o cálculo do PPV com base no vetor de dados já filtrado. Este filtro acelera o processo de cálculo do PPV e sua incerteza. Para uma dada probabilidade de ocorrência  $p(U_i)$  de um valor de tensão no intervalo  $[U_i - \Delta U/2, U_i + \Delta U/2]$ , o PPV  $\hat{U}$  pode ser dado por:

$$\hat{U} = \frac{\sum_{i=1}^n p(U_i) \cdot w(U_i) \cdot U_i}{\sum_{i=1}^n p(U_i) \cdot w(U_i)} \quad (1)$$

Onde  $U_i$  é dado em unidades de tensão e  $w(U_i)$  segue as condições abaixo.

Para aplicação em raios X diagnóstico convencional, dentário, CT e fluoroscopia:

$$U_i < 20\text{kV}, \quad w(U_i) = 0 \quad (2)$$

$$20\text{kV} \leq U_i < 36\text{kV}, \quad w(U_i) = \exp(a \cdot U_i^2 + b \cdot U_i + c) \quad (3)$$

Onde: a = -8,646855E-03  
 b = +8,170361E-01  
 c = -2,327793E+01

$$36\text{kV} \leq U_i \leq 150\text{kV}, \quad w(U_i) = d \cdot U_i^4 + e \cdot U_i^3 + f \cdot U_i^2 + g \cdot U_i + h \quad (4)$$

Onde: d = +4,310644E-10  
 e = -1,662009E-07  
 f = +2,308190E+05  
 g = +1,030820E+05  
 h = -1,747153E-02

Para mamografia:

$$U_i \leq 50\text{kV}, \quad w(U_i) = \exp(k \cdot U_i^4 + l \cdot U_i^3 + m \cdot U_i^2 + n \cdot U_i + o) \quad (5)$$

Onde: k = -2,142352E-06  
 l = +2,566291E-07  
 m = -1,968138E-02  
 n = +8,506836E-01  
 o = -1,514362E+01

Quando utilizamos uma taxa amostragem constante, o que ocorre com quase a totalidade dos sistemas de aquisição, a probabilidade  $p(U_i)$  pode ser admitida como sendo 1, assim, podemos resumir a equação (1):

$$\hat{U} = \frac{\sum_{i=1}^n w(U_i) \cdot U_i}{\sum_{i=1}^n w(U_i)} \quad (6)$$

Onde:

Para implementação do cálculo do PPV, foi desenvolvido o método “PPVC”, dentro da classe PPVCalc.java. Este método carrega o vetor de dados filtrado e as entradas de correção e/ou curvas de calibração do sistema de entrada de erros. Para isso, o método “PPVC” pode trabalhar com as seguintes possibilidades:

1. Fator de calibração do divisor de alta tensão e fator de calibração do sistema de aquisição;
2. Fator de calibração do divisor de alta tensão e curva de calibração do sistema de aquisição;

3. Curva de calibração do divisor de alta tensão e fator de calibração do sistema de aquisição;
4. Curva de calibração do divisor de alta tensão e curva de calibração do sistema de aquisição.

Para cada opção, as seguintes equações podem ser empregadas, sendo  $Sis$  o fator de calibração associada ao sistema de aquisição e  $Div$  o fator de calibração associado ao divisor de alta tensão,  $V_o$  é a tensão indicada pelo sistema de aquisição:

$$\text{Caso 1: } U_i = Sis \cdot Div \quad (7)$$

$$\text{Caso 2: } U_i = (a \cdot V_o + b) \cdot Div \quad (8)$$

$$\text{Caso 3: } U_i = a \cdot Sis + b \quad (9)$$

$$\text{Caso 4: } U_i = a_{Div} \cdot (a_{Sis} \cdot V_o + b_{Sis}) + b_{Div} \quad (10)$$

A incerteza do cálculo do PPV pode ser obtida em cada um dos casos acima mencionados, levando em conta a configuração do sistema de medição empregado. Para isso, foi desenvolvido o método “PPVE” dentro da classe PPVCalc.java. Neste método, a incerteza de cada valor de  $U_i$  pode ser estabelecida da seguinte maneira:

Caso 1:

$$\sigma U_i^2 = Sis^2 \cdot \sigma Div^2 + Div^2 \cdot \sigma Sis^2 \quad (11)$$

Caso 2, sendo  $Sis = a \cdot V_o + b$ :

$$\sigma U_i^2 = \left[ \left( \frac{\partial V_o}{\partial a} \right)^2 \cdot \sigma a^2 + \left( \frac{\partial V_o}{\partial b} \right)^2 \cdot \sigma b^2 + 2 \cdot \left( \frac{\partial V_o}{\partial a} \right) \cdot \left( \frac{\partial V_o}{\partial b} \right) \cdot \text{cov}(a, b) \right] \cdot Div^2 + (Sis)^2 \cdot \sigma Div^2 \quad (12)$$

Caso 3:

$$\sigma U_i^2 = \left[ \left( \frac{\partial U_i}{\partial a} \right)^2 \cdot \sigma a^2 + \left( \frac{\partial U_i}{\partial b} \right)^2 \cdot \sigma b^2 + 2 \cdot \left( \frac{\partial U_i}{\partial a} \right) \cdot \left( \frac{\partial U_i}{\partial b} \right) \cdot \text{cov}(a, b) \right] + a^2 \cdot Sis^2 \quad (13)$$

Caso 4, sendo  $Sis = a_{Sis} \cdot V_o + b_{Sis}$  e  $Div = a_{Div} \cdot Sis + b_{Div}$ :

$$\sigma Div^2 = \left[ \left( \frac{\partial Div}{\partial a_{Div}} \right)^2 \cdot \sigma a_{Div}^2 + \left( \frac{\partial Div}{\partial b_{Div}} \right)^2 \cdot \sigma b_{Div}^2 + 2 \cdot \left( \frac{\partial Div}{\partial a_{Div}} \right) \cdot \left( \frac{\partial Div}{\partial b_{Div}} \right) \cdot \text{cov}(a_{Div}, b_{Div}) \right] \quad (14)$$

$$\sigma Sis^2 = \left[ \left( \frac{\partial Sis}{\partial a_{Sis}} \right)^2 \cdot \sigma a_{Sis}^2 + \left( \frac{\partial Sis}{\partial b_{Sis}} \right)^2 \cdot \sigma b_{Sis}^2 + 2 \cdot \left( \frac{\partial Sis}{\partial a_{Sis}} \right) \cdot \left( \frac{\partial Sis}{\partial b_{Sis}} \right) \cdot \text{cov}(a_{Sis}, b_{Sis}) \right] \quad (15)$$

$$\sigma U_i^2 = \sigma Div^2 + a^2 \cdot \sigma Sis^2 \quad (16)$$

Cada valor de  $\sigma U_i$  irá compor um vetor de coeficientes de sensibilidade, ou seja, as derivadas parciais obtidas da equação de cálculo do PPV(6).

Os coeficientes de sensibilidade para um dado valor  $U_i$  podem ser obtidos, de acordo com a resolução abaixo:

$$\frac{\partial \hat{U}}{\partial U_i} = \left[ \frac{[w'(U_i) \cdot U_i + w(U_i)] \cdot \left[ \sum_{i=1}^n w(U_i) \right] - \left[ \left( \sum_{i=1}^n w(U_i) \cdot U_i \right) \cdot w'(U_i) \right]}{\left[ \sum_{i=1}^n w(U_i) \right]^2} \right] \quad (17)$$

Cada expressão  $w'U_i$  é apresentada a seguir, pelas derivadas parciais das expressões (2) a (4):

Para aplicação em raios X diagnóstico convencional, dentário, CT e fluoroscopia:

$$U_i < 20\text{kV}, \quad w'(U_i) = 0 \quad (18)$$

$$20\text{kV} \leq U_i < 36\text{kV}, \quad w'(U_i) = \exp(a \cdot U_i^2 + b \cdot U_i + c) \cdot (2a \cdot U_i + b) \quad (19)$$

$$36\text{kV} \leq U_i \leq 150\text{kV}, \quad w'(U_i) = 4d \cdot U_i^3 + 3e \cdot U_i^2 + 2f \cdot U_i + g \quad (20)$$

Para mamografia:

$$U_i \leq 50\text{kV}, \quad w'(U_i) = \exp(k \cdot U_i^4 + l \cdot U_i^3 + m \cdot U_i^2 + n \cdot U_i + o) \cdot (4k \cdot U_i^3 + 3l \cdot U_i^2 + 2m \cdot U_i + n) \quad (21)$$

Assim, o método “PPVE” processa o vetor de erros, admitindo um fator de correlação entre eles  $r=0$ , de acordo com a expressão abaixo:

$$\partial \hat{U}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \hat{U}}{\partial U_i} \cdot \sigma U_i^2 \quad (22)$$

No caso de existir a necessidade de correção da resposta em frequência, é preciso efetuar a DFT, ou FFT (Transformada Rápida de Fourier) por se tratar de um processamento por rotina computacional, do vetor de entrada filtrado. Para isso foi desenvolvida a classe FFTcalc.java que apresenta os métodos “DFTcorrect” e “FSpectra”. Os dois métodos, um para correção e outro para geração de espectro de saída de magnitude em função da frequência, respectivamente, utilizam da DFT como base de cálculo, através de uma rotina em linguagem JAVA.

Os coeficientes obtidos pela transformada de Fourier de um sinal não periódico podem ser descritos pelo método de senos e cossenos como:

$$\text{xxxxx} \quad (23)$$

Para que se possa efetuar o cálculo com estes dados, é necessário um duplo vetor de entrada, com os dados de tempo e amplitude. Isto dificulta e torna mais complexa a rotina de programação, e, como na maioria dos dados armazenados

por sistemas de aquisição a única informação apresentada é um vetor de amplitudes, é necessária uma adaptação da equação (23).

Esta adaptação para o processamento matemático computacional, com o uso de um vetor de dados de amplitude apenas, é muito utilizada na prática de tratamento de sinais elétricos e imagens <sup>[3]</sup>, sendo necessário apenas, que a taxa de amostragem do sistema apresente variações desprezíveis, o que normalmente é alcançado por sistemas microcontrolados que constituem praticamente a totalidade dos sistemas de aquisição. Esta formulação é apresentada pelos seguintes coeficientes:

Para os reais temos: 
$$\text{Re } X[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x[i] \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot i}{N}\right)$$

Sendo: 
$$\text{Re } \bar{X}[k] = \text{Re } X[k] \cdot \frac{2}{N} \quad \text{e} \quad \text{Re } \bar{X}[0] = \text{Re } X[0] \cdot \frac{1}{N} \quad (24)$$

Para os imaginários temos: 
$$\text{Im } X[k] = -\sum_{i=0}^{N-1} x[i] \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot i}{N}\right)$$

Sendo: 
$$\text{Im } \bar{X}[k] = \text{Im } X[k] \cdot \frac{2}{N} \quad \text{e} \quad \text{Im } \bar{X}[0] = \text{Im } X[0] \cdot \frac{1}{N} \quad (25)$$

Onde:

$\text{Re } \bar{X}[k]$  = coeficientes reais;

$\text{Im } \bar{X}[k]$  = coeficientes imaginários;

k = freqüência de cada senóide ou cossenóide no sinal, variando de 0 a N/2;

i = índice do vetor do sinal;

N = número de amostras total do sinal

A magnitude de cada freqüência decomposta do sinal pode ser obtida de forma vetorial e é dada por:

$$\text{Mag}X[k] = \sqrt{\text{Re } \bar{X}^2[k] + \text{Im } \bar{X}^2[k]} \quad (26)$$

Esta informação no método “FSpectra” compõe um vetor duplo de magnitudes e freqüências respectivamente, que podem ser gravados para visualização em qualquer ferramenta gráfica disponível.

A correção da resposta em freqüência é efetuada nos coeficientes das equações (24) e (25) e é dada por:

$$f(X) = A + B1 \cdot X + B2 \cdot X^2 + B3 \cdot X^3 + B4 \cdot X^4 + B5 \cdot X^5 + B6 \cdot X^6 \quad (27)$$

Onde:

X = Log<sub>10</sub> Freqüência;

A propagação de erro da correção deve levar em conta todas as covariâncias dos parâmetros da função da equação (27) que são dados de entrada disponíveis no programa.

Assim, como podemos efetuar a DFT direta para transferir os dados do domínio do tempo para frequência, o método “DFTcorrect”, após a correção da informação dada pelos coeficientes  $\text{Re } \bar{X}[k]$  e  $\text{Im } \bar{X}[k]$  no domínio da frequência, efetua a DFT inversa, como segue:

$$x[i] = \sum_{k=0}^{N/2} \text{Re } \bar{X}[k] \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot i}{N}\right) + \sum_{k=0}^{N/2} \text{Im } \bar{X}[k] \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot i}{N}\right) \quad (28)$$

Da mesma forma que na classe PPVCalc.java, na classe FFTcalc.java, o erro deve propagado para as magnitudes para que os dados de saída do método “FSpectra” possa ser mais completo. Assim, para a DFT direta podemos definir os seguintes coeficientes de sensibilidade de acordo com as equações (24) e (25) respectivamente:

$$\sigma \text{Re } \bar{X}[k]^2 = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \frac{\partial \text{Re } \bar{X}[k]}{\partial x[i]} \right)^2 \cdot \sigma x[i]^2 \quad (29)$$

$$\sigma \text{Im } \bar{X}[k]^2 = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \frac{\partial \text{Im } \bar{X}[k]}{\partial x[i]} \right)^2 \cdot \sigma x[i]^2 \quad (30)$$

A equação da magnitude (26) então, terá também seus coeficientes de sensibilidade, compondo a sua incerteza final:

$$\sigma \text{Mag}X[k]^2 = \left( \frac{\partial \text{Mag}X}{\partial \text{Re } \bar{X}[k]} \right)^2 \cdot \sigma \text{Re } \bar{X}[k]^2 + \left( \frac{\partial \text{Mag}X}{\partial \text{Im } \bar{X}[k]} \right)^2 \cdot \sigma \text{Im } \bar{X}[k]^2 \quad (31)$$

Como as correções da resposta em frequência da equação (27) estão relacionadas tão somente aos coeficientes das equações (24) e (25), o erro final no domínio do tempo do sinal corrigido, efetuado por meio da equação (28) que expressa a DFT inversa, pode ser dado por:

$$\sigma x[i]^2 = \sum_{k=0}^{N/2} \left[ \left( \frac{\partial x[i]}{\partial \text{Re } \bar{X}[k]} \right)^2 \cdot \sigma \text{Re } \bar{X}[k]^2 + \left( \frac{\partial x[i]}{\partial \text{Im } \bar{X}[k]} \right)^2 \cdot \sigma \text{Im } \bar{X}[k]^2 \right] \quad (32)$$

**Alguns dados obtidos:** Foram avaliados dois sistemas de aquisição de sinais. As características dos sistemas estão relacionadas abaixo (valores aproximados para simulação e avaliação inicial). O divisor de alta tensão empregado trabalha com os dois sistemas de aquisição de dados simultaneamente. Um dos sistemas de aquisição de dados foi desenvolvido especialmente para aquisição de dados e

carga de trabalho do gerador de alta tensão utilizado. Devido a resposta uniforme do divisor até 10kHz, não foi efetuada correção da resposta em freqüência dos dados obtidos:

Divisor de Alta Tensão:

- Exatidão da razão de divisão: 1%;
- Ganho de resposta em freqüência:  $\approx 1$  ( $f \leq 10\text{kHz}$ );
- Calibração da Razão em tensão contínua:  $20250 \pm 35$  ( $k=1$ )

Sistema de Aquisição:

- Osciloscópio Digital (Alta Freqüência)
- Exatidão:  $\approx 0,1$  mV;
- Resolução:  $\approx 305$   $\mu\text{V}$ ;
- Correção da calibração em tensão contínua:  $1 \text{ mV} \pm 0,1 \text{ mV}$ ;
- Freqüência de aquisição: 62,5 kS/s;
- Número de amostras: 25000.

Sistema desenvolvido

- Exatidão:  $\approx 1$  mV;
- Resolução:  $\approx 9,8$  mV;
- Fator de calibração em tensão contínua:  $1 \pm 0,001$ ;
- Freqüência de aquisição: 3,5 kS/s
- Número de amostras: 10000.

O gerador de alta tensão empregado apresenta as seguintes características:

Gerador monofásico dois pulsos, 60Hz, 40-125kV Heliophos-4B;

Configuração de ensaio: 70kVp, 80mA, 320ms

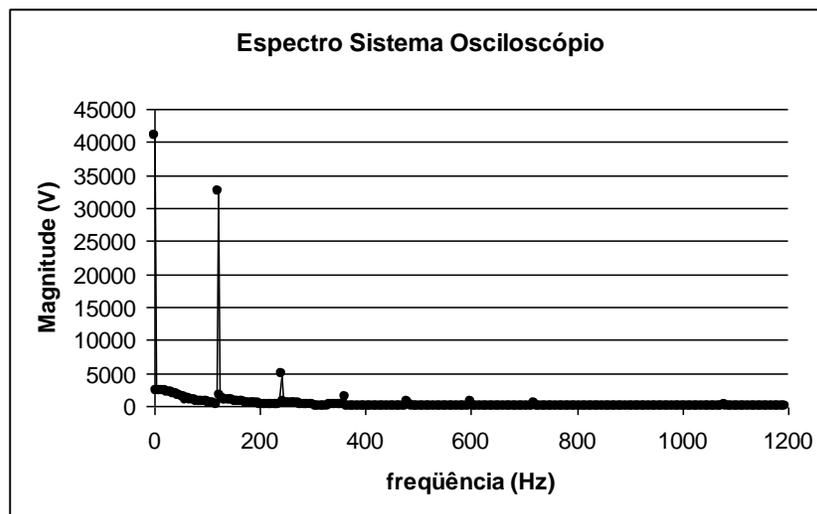
Alguns resultados do cálculo do PPV com a propagação de erro sem a correção da resposta em freqüência são apresentados na tabela abaixo:

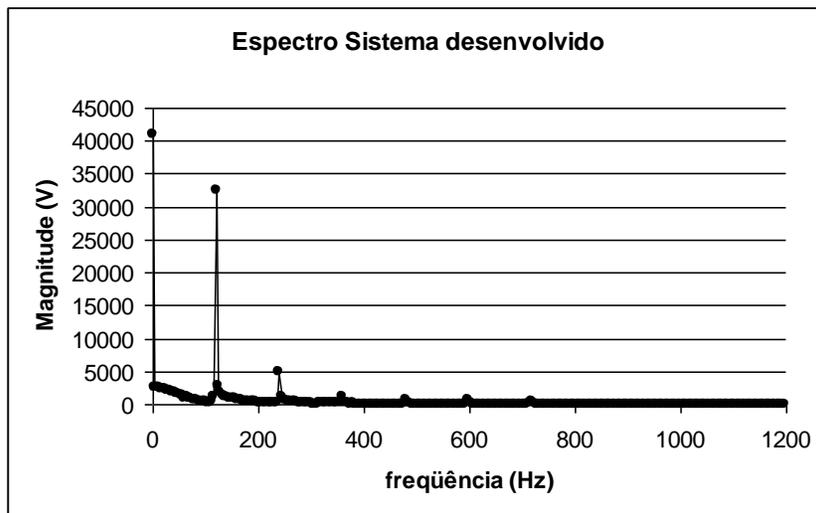
Sistema Desenvolvido		Sistema Osciloscópio	
PPV(kV)	Erro(kV)	PPV(kV)	Erro(kV)
87,90052054	0,645773401	87,44201	6,79E-06
40,38131627	0,301985342	40,31351	3,18E-06
46,94199332	0,368067495	46,84032	3,90E-06
54,4750122	0,475630933	54,37684	5,06E-06
63,67247044	0,456356045	63,54215	4,82E-06

73,36239414	0,531445375	72,99919	5,60E-06
78,94522973	0,580444443	78,57086	6,12E-06

Os erros indicados apresentam fator de abrangência  $k = 1$ . Fica evidente a melhor exatidão do sistema de alta resolução (15 bits) comparado ao sistema de baixa resolução desenvolvido (8 bits). A exatidão do valor do PPV apresenta dependência direta com a quantidade de amostras e conseqüentemente com a taxa de amostragem, no entanto, para esta configuração consegue-se erros inferiores a 1% ( $k=1$ ) mesmo com um sistema de baixa resolução e com taxa de amostragem e número de amostras muito inferior ao sistema padrão empregado atualmente.

Considerando o erro da base de tempo dos dois sistemas desprezível, podemos avaliar inicialmente a resposta em freqüência dos mesmos. Para que se possa efetuar uma avaliação mais detalhada da capacidade de de resposta em freqüência dos dois sistemas, as saídas de magnitude em função da freqüência são apresentadas nos gráficos abaixo, com análise até a 20<sup>a</sup> harmônica de 60Hz. Os sinais forma capturados simultaneamente. O método "FSpectra" não está completamente desenvolvido, então os erros das magnitudes ainda não são exibidos nesta primeira versão do programa PPVCalc.jar.





É possível perceber, que para a frequência de operação do equipamento de raios X utilizado no processo, os dois sistemas apresentam praticamente as mesmas respostas, sendo o sistema desenvolvido aceitável para avaliação dos dados e cálculo do PPV neste gerador.

**Conclusão:** O programa é capaz de executar o cálculo do PPV com a correção da resposta em frequência como estabelecido pela Norma IEC 61676. A propagação de erro no cálculo do PPV quando envolve as diversas contribuições do sistema de referência ainda é um tema que praticamente não foi estudado, exigindo maior aprofundamento para que possam ser feitas comparações entre vários sistemas de aquisição e assim estabelecer sistemas de referência simplificados, com boa eficiência e baixo custo.

Como os dados das equações de correção de dados da resposta em frequência apresenta um fator de correlação, esta correlação deve ser aplicada na propagação de erro do PPV, o que implica na reformulação ou criação de novos métodos de execução dentro da classe PPVCalc.java.

<sup>1</sup> INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Dosimetric instruments for non-invasive measurement of X-ray tube voltage in diagnostic radiology**. Pergamon Press, New York, 2002 (IEC-61676).

<sup>2</sup> ISO GUM -

<sup>3</sup> Ynoguti, C. A., **Curso: Transformada discreta de Fourier**. Instituto Nacional de Telecomunicações. Material disponível em: <http://www.inatel.com.br>