6.
FUNDAMENTOS DA EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE TF

O parâmetro estabilidade de freqüência de osciladores confere à medição de tempo e freqüência uma característica própria que a distingue de outros processos metrológicos. Por conseguinte, afeta também a expressão da incerteza que lhe é associada, neste caso mais adequadamente avaliada por meio da Variância de Allan, discutida neste capítulo.

Em conformidade aos preceitos internacionalmente consensados pelo Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*-GUM, 1998), este capítulo apresenta também as ferramentas do Guia da *European co-operation for Accreditation,* EA-4/02 (*Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration)*, que aplica os conceitos do GUM para as atividades de calibração.

6.1.
Conceitos básicos sobre a expressão da incerteza de medição

Os conceitos e recomendações aqui apresentados e baseados no guia EA-4/02 são importantes para o contexto desta dissertação e aplicados pelos laboratórios de calibração permitem estabelecer uma harmonização internacional necessária para a declaração da melhor capacidade de medição e sua intercomparação pelos diversos NMI.

6.1.1.
Linhas gerais e definições

a) A declaração do resultado de uma medição somente é completa se ela contiver tanto o valor atribuído ao mensurando quanto a incerteza de medição associada a este valor.

b) A **incerteza de medição** (***uncertainty of measurement***) é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. Pode-se usar o termo abreviado **incerteza** no lugar de **incerteza de medição** desde que não haja risco de causar confusão.

c) Os **mensurandos** são as grandezas particulares submetidas à medição.

MENSURANDO, m Objeto da medição. Grandeza específica submetida à medição (INMETRO, VIM, 2003).

d) O conjunto de grandezas de entrada pode ser agrupado em duas categorias de acordo com a maneira pela qual o valor da grandeza e sua incerteza associada tenham sido determinados:

i. grandezas cujas estimativas e incertezas associadas são diretamente determinadas na medição em curso. Esses valores podem ser obtidos, por exemplo, de uma única observação, de observações repetidas, ou através de julgamento baseado na experiência. Eles podem envolver a avaliação de correções para as indicações dos instrumentos bem como correções para grandezas de influência, tais como temperatura ambiente, pressão barométrica ou umidade;

ii. (b) grandezas cujas estimativas e incertezas associadas são incorporadas à medição a partir de fontes externas, tais como grandezas associadas aos padrões de medição calibrados, materiais de referência certificados, ou dados de referência obtidos de manuais.

e) Para uma variável aleatória, a **variância** de sua distribuição ou a raiz quadrada positiva da variância, chamada **desvio padrão** é utilizada como uma medida da dispersão de valores. A incerteza padrão da medição é associada ao resultado de medição y, designada por $u(y)$ é o desvio padrão do mensurando Y. Em alguns casos pode ser apropriado utilizar a **incerteza padrão relativa da medição** que é a incerteza padrão de medição associada a uma estimativa dividida pelo módulo desta estimativa e que é, portanto, adimensional. Este conceito não pode ser utilizado se a estimativa for igual a zero.

6.1.2.
Avaliação das incertezas de medição das estimativas de entrada

A incerteza de medição associada as estimativas de entrada é avaliada de acordo com os métodos de avaliação do Tipo A ou do Tipo B.

A **Avaliação do Tipo A da Incerteza Padrão** é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média.

A **Avaliação do Tipo B da Incerteza Padrão** é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza padrão é baseada em algum outro conhecimento científico.

6.1.3.
Avaliação do Tipo A da incerteza padrão

A avaliação do Tipo A da incerteza padrão pode ser aplicada quando tenham sido feitas várias observações independentes para uma das grandezas de entrada sob as mesmas condições de medição.

Suponha que a grandeza de entrada *Xi* medida repetidamente é a grandeza *Q*.

Com *n* observações estatisticamente independentes ($n > 1$), a estimativa da grandeza *Q* é $\overline{q}$, a **média aritmética** ou a **média** dos n valores individuais observados q_j (j = 1,2,...,n):

$$\overline{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} q_j \qquad (6.1)$$

A incerteza de medição associada com a estimativa *q* é avaliada da seguinte forma:

Uma estimativa da variância da distribuição de probabilidade fundamental é a **variância experimental** $s^2(q)$ dos valores de qj que é dada por:

$$s^2(q)=\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(q_j-\overline{q})^2 \qquad (6.2)$$

O valor (positivo) da raiz quadrada de $s^2(q)$ é chamado **desvio padrão experimental.** A melhor estimativa da variância da média aritmética q é a **variância experimental da média** dada por:

$$s^2(\overline{q})=\frac{s^2(\overline{q})}{n} \qquad (6.3)$$

O valor (positivo) da raiz quadrada de $s^2(\overline{q})$ é chamada **desvio padrão experimental da média**.

A **incerteza padrão** $u(\overline{q})$ associada à estimativa de entrada q é o **desvio padrão experimental da média**.

$$u(\overline{q})=s(\overline{q}) \qquad (6.4)$$

Para uma medição que está bem caracterizada e sob controle estatístico, uma estimativa combinada ou **estimativa agrupada da variância** *sp* pode estar disponível e melhor caracterizar a dispersão do que o desvio padrão estimado obtido de um número limitado de observações. Se, em tal caso, o valor da grandeza de entrada *Q* for determinado como a média aritmética q de um número n observações independentes, a variância da média pode ser estimada por:

$$s^2(\overline{q})=\frac{s_p^2}{n} \qquad (6.5)$$

A incerteza padrão é o **desvio padrão da média:**

$$s(\overline{q}) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \qquad (6.6)$$

6.1.4.
Avaliação do Tipo B da incerteza padrão

A avaliação do Tipo B da incerteza padrão é a avaliação da incerteza associada com uma estimativa *xi* de uma grandeza de entrada *Xi* feita por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. A incerteza padrão *u*(*xi*) é avaliada pelo julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de *Xi*. Valores pertencentes a esta categoria podem ser obtidos a partir de:

- dados de medições,
- experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e
- instrumentos relevantes,
- especificações do fabricante,
- dados provenientes de calibração e de outros certificados,
- incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais ou publicações

O uso adequado da informação disponível para uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão de medição exige discernimento baseado na experiência e conhecimento geral, sendo essa uma habilidade que pode ser aprendida com a prática. Uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão bem fundamentada pode ser tão confiável quanto uma avaliação do Tipo A, especialmente em uma situação de medição em que a avaliação do Tipo A é baseada somente em um número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes.

6.1.5. Cálculo da incerteza padrão da estimativa de saída

a) Para grandezas de entrada não correlacionadas o quadrado da incerteza padrão associada com a estimativa de saída *y* é dado por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{N} u_i^2(y) \qquad (6.7)$$

A grandeza $u_i(y)$ (i = 1, 2, …, N) é a contribuição para a incerteza padrão associada à estimativa de saída *y* resultante da incerteza padrão associada à estimativa de entrada xi:

$$u_i(y) = c_i \, u(x_i) \qquad (6.8)$$

onde c_i é o **coeficiente de sensibilidade** (*sensitivity coefficient*) associado a estimativa de entrada x_i, isto é, a derivada parcial da função modelo *f* em relação a Xi, avaliada na estimativa de entrada xi,

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \left.\frac{\partial f}{\partial x_i}\right|_{X_1 = x_1 \ldots X_N = x_N} \qquad (6.9)$$

b) O coeficiente de sensibilidade ci descreve o quanto a estimativa de saída *y* é influenciada por variações da estimativa de entrada xi. Ele pode ser avaliado a partir da função modelo *f*, pela equação (6.9), ou usando métodos numéricos, isto é, calculando a mudança na estimativa de saída y devido a uma mudança na estimativa de entrada xi de + $u(xi)$ e - $u(xi)$ tomando, para os valores de ci a diferença resultante em *y* dividida $2u(xi)$. Algumas vezes pode ser mais apropriado encontrar a variação na estimativa de saída *y* de um experimento, simplesmente pela repetição da medição, por exemplo, $xi \pm u(xi)$.

c) Enquanto que *u(xi)* é sempre positiva, a contribuição *ui(y)* de acordo com a equação (6.8) é positiva ou negativa, dependendo do sinal do coeficiente de sensibilidade *ci*. O sinal de *ui(y)* deve ser levado em conta, no caso de grandezas de entrada correlacionadas.

d) Se duas grandezas de entrada X_i and X_k forem de algum modo correlacionadas, isto é, se forem mutuamente dependentes de uma ou de outra forma, sua covariância deve também ser levada em conta como uma contribuição à incerteza. A habilidade para levar em conta o efeito de correlações depende do conhecimento do processo de medição e do julgamento das dependências mútuas das grandezas de entrada. De um modo geral, deve-se ter em mente que negligenciar correlações entre as grandezas de entrada pode levar a avaliações incorretas da incerteza padrão do mensurando.

e) A covariância associada com as estimativas de duas grandezas de entrada X_i e X_k pode ser considerada nula ou tratada como insignificante se:

   i. as grandezas de entrada forem independentes, por exemplo, porque elas foram repetidas, mas não simultaneamente observadas em diferentes experimentos independentes, ou porque, elas representam grandezas resultantes de diferentes avaliações que tenham sido feitas de modo independente, ou se

   ii. cada uma das grandezas de entrada X_i e X_k pode ser tratada como constante, ou se

   iii. investigações não fornecerem informações que indiquem a presença de correlação entre as grandezas de entrada X_i e X_k.

   iv. Às vezes correlações podem ser eliminadas pela escolha apropriada da função modelo.

f) A análise de incertezas para uma medição, às vezes chamada de planilha de incerteza de Medição, deve incluir uma relação de todas as fontes de incerteza junto com as incertezas padrão associadas da medição e os métodos para avaliá-las. Para medições repetidas, o número *n* de observações também deve ser declarado. Para garantir maior clareza, recomenda-se apresentar os dados relevantes para esta análise na forma de uma tabela. Nesta tabela todas as grandezas devem ser representadas por um símbolo *Xi* ou uma identificação abreviada. Para cada grandeza, devem ser especificadas pelo menos a estimativa *xi*, a incerteza padrão de medição associada *u(xi)*, o coeficiente de sensibilidade *ci* e as diversas contribuições de incerteza *ui(y)*. A dimensão de cada uma das grandezas também deve ser declarada junto aos valores numéricos fornecidos na tabela.

g) Um exemplo formal deste arranjo é apresentado na tabela 4, sendo aplicável ao caso de grandezas de entrada não correlacionadas. A incerteza padrão associada com o resultado da medição *u(y)* fornecida no canto inferior direito da tabela é a raiz quadrada da soma quadrática de todas as contribuições de incerteza apresentadas na coluna mais à direita. A parte sombreada da tabela não é preenchida.

Um esquema de arranjo organizado das grandezas, estimativas, incertezas padrão, coeficientes de sensibilidade e contribuições de incertezas utilizadas na análise de incerteza de uma medição está ilustrada na tabela 4.

Tabela 4 – Tabela para análise de incerteza de medição

Grandeza Xi	Estimativa x_1	Distribuição de probabilidade[2]	Incerteza Padrão $u(x_1)$	Coeficiente de sensibilidade c_1	Contribuição para a incerteza padrão $u_1(y)$	Graus de Liberdade[3]
X_1	x_1		$u(x_1)$	c_1	$u_1(y)$	V_1
X_2	x_2		$u(x_2)$	c_2	$u_2(y)$	V_2
- -	- -					- -
X_N	x_N		$u(x_N)$	c_N	$u_N(y)$	V_N
Y	y	$k=$			$u(y)$	V_{eff}

6.1.6.
Incerteza expandida da medição

Para fins de normalização, os laboratórios de calibração credenciados declaram uma incerteza expandida de medição U, obtida pela multiplicação da incerteza padrão u(y) da estimativa de saída y por um fator de abrangência k:

$$U = ku(y) \qquad (6.10)$$

Nos casos em que uma distribuição normal (Gaussiana) possa ser atribuída ao mensurando e a incerteza padrão associada à estimativa de saída tenha suficiente confiabilidade, o fator de abrangência padronizado k =2 deve ser utilizado. A incerteza expandida atribuída corresponde a uma **probabilidade de abrangência** de 95,45%. Essas condições são atendidas na maior parte dos casos encontrados em processos de calibração.

6.1.7. Declaração da incerteza de medição nos certificados de calibração

a) Nos certificados de calibração o resultado completo da medição, consistindo da estimativa y do mensurando e da incerteza expandida associada 8, deve ser fornecido na forma ($y \pm U$).

   Além disso deve ser adicionada uma nota explicativa, para a qual, no caso geral, é recomendado o seguinte conteúdo:

   A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k = 2, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95%.

b) No caso em que se adotar valores diferentes de k, uma nota adicional deve conter o seguinte:

   A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = XX$, o qual para uma distribuição-t com $\nu_{eff} = YY$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

c) Recomenda-se que o valor numérico da incerteza de medição seja fornecido com no máximo dois algarismos significativos. O valor numérico do resultado da medição, na declaração final, deve ser arredondado para o último algarismo significativo do valor da incerteza expandida, atribuída ao resultado da medição. Entretanto, se o arredondamento diminui o valor numérico da incerteza de medição em mais de 5%, recomenda-se que o arredondamento seja feito para cima.

6.1.8. Procedimento passo-a-passo para o cálculo da incerteza de medição

Os passos seguintes constituem um guia para o cálculo da incerteza de medição:

a) Expressar em termos matemáticos a dependência do mensurando (grandeza de saída) Y com as grandezas de entrada X_i. No caso de uma comparação direta de dois padrões a equação pode ser muito simples, por exemplo $Y = X_1 + X_2$.
b) Identificar e aplicar todas as correções significativas.
c) Relacionar todas as fontes de incerteza na forma de uma análise de incertezas de acordo com 6.1.5.
d) Calcular a incerteza padrão para as várias quantidades medidas repetitivamente.
e) Para valores únicos, isto é, resultantes de medições anteriores ou declarados por fabricantes, utilizar a incerteza fornecida.
f) Calcular para cada grandeza de entrada X_i a contribuição $u_i(y)$ para a incerteza associada com a estimativa de saída resultante da estimativa de entrada x_i de acordo com as equações (6.8) e (6.9) e somar seus quadrados como descrito na equação (6.7) para obter o quadrado da incerteza padrão $u(y)$ do mensurando. Se considerarmos que as grandezas de entrada são correlacionadas, aplicar processo constante do Anexo D da EA-4/02.
g) Calcular a incerteza expandida U por meio da multiplicação da incertza padrão $u(y)$ associada à grandeza de saída por um fator de abrangência k escolhido de acordo com 6.1.6.
h) Relatar o resultado da medição no certificado de calibração incluindo a stimativa y do mensurando, a incerteza expandida associada U e o fator de abrangência k de acordo com 6.1.7.

6.1.9.
Fontes de incerteza de medição

A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento completo do valor do mensurando. O conhecimento completo requer uma infinita quantidade de informações. Fenômenos que contribuem para a incerteza e desta maneira para o fato de que o resultado de uma medição não possa ser caracterizado por um único valor, são denominados de fontes de incertezas. Na prática, há muitas possíveis fontes de incerteza em uma medição, incluindo:

(a) definição incompleta do mensurando;

(b) realização imperfeita da definição do mensurando;

(c) amostragem não representativa - a amostra medida pode não representar o mensurando definido;

(d) conhecimento inadequado de efeitos das condições ambientais ou medições imperfeitas destas;

(e) tendências pessoais na leitura de instrumentos analógicos;

(f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;

(g) valores inexatos dos padrões de medição e dos materiais de referência;

(h) valores inexatos de constantes e outros parâmetros obtidos de fontes externas e utilizados no algoritmo de redução de dados;

(i) aproximações e suposições incorporadas ao método e ao procedimento de medição;

(j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Estas fontes não são necessariamente independentes. Algumas das fontes de (a) a (i) podem contribuir para (j).

6.1.10. Fatores de abrangência derivados dos graus efetivos de liberdade

Para estimar o valor de um fator de abrangência *k* correspondente a uma probabilidade de abrangência especificada, é necessário que seja levada em conta a contabilidade da incerteza padrão $u(y)$ da estimativa de saída *Y*. Isto implica considerar o quão bem $u(y)$ estima o desvio padrão associado ao resultado da medição. Para uma estimativa do desvio padrão de uma distribuição normal, os graus de liberdade desta estimativa, que depende do tamanho da amostra na qual ela está baseada, é uma medida da contabilidade. Analogamente, uma medida adequada da contabilidade da incerteza padrão associada a uma estimativa de saída é seu grau de liberdade efetivo ν_{eff}, que é aproximado por uma combinação apropriada dos graus de liberdade efetivos das diferentes contribuições da incerteza $ui(y)$.

O procedimento para o cálculo de um fator de abrangência apropriado *k*, quando as condições do teorema central do limite são satisfeitas, compreende os três seguintes passos:

(a) Obter uma incerteza padrão associada à estimativa de saída.

(b) Estimar os graus de liberdade efetivos ν_{eff} da incerteza padrão $u(y)$ associada à estimativa de saída Y a partir da fórmula de Welch-Satterhwaite

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \qquad (6.11)$$

onde os $ui(y)$ (i=1,2,...,N), definidos na equação (6.8), são as contribuições para a incerteza padrão associada à estimativa de saída *y* resultante da incerteza padrão associada à estimativa de entrada *xi* que se admite sejam mutuamente independentes estatisticamente, e *ni* são os graus de liberdade efetivos da contribuição da incerteza padrão $ui(y)$.

Para uma incerteza padrão $u(q)$ obtida de uma avaliação do Tipo A como discutida na subseção 3.1, os graus de liberdade são dados por $ni = n$-1 e mais problemático associar graus de liberdade com uma incerteza padrão *u*(*xi*) obtida pela avaliação do Tipo B. Entretanto, é uma prática comum efetuar tais avaliações de maneira a assegurar que qualquer sub-estimativa seja evitada. Se, por exemplo, os limites inferior e superior *a*– e *a*+ são estabelecidos, eles são usualmente escolhidos de tal forma que a probabilidade da grandeza em questão cair fora desses limites é de fato extremamente pequena. Sob a hipótese de que esta prática seja seguida, os graus de liberdade da incerteza padrão *u*(*xi*) obtidos de uma avaliação do Tipo B podem ser tomados como sendo *ni* → ∞.

(c) Obter o fator de abrangência N através da tabela 5. Esta tabela é baseada na distribuição-t avaliada para uma probabilidade de abrangência de 95,45%. Se ν_{eff} não for inteiro, o que é usualmente o caso, truncar ν_{eff} para o próximo menor inteiro.

Tabela 5 – Fatores de Abrangência *k* para diferentes graus de liberdade ν_{eff}.

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,0

6.2. Estabilidade de freqüência e variância de Allan

Na estatística clássica, a Variância ou o Desvio Padrão (raiz quadrada da variância) é usada para medir dispersão de valores. A variância é uma medida de dispersão de um conjunto de dados em relação à média (valor médio) do conjunto.

No entanto, a variância trabalha com dados estacionários, onde os resultados devem ser independentes do tempo. Isto assume que o ruído é “branco” (*white*), o que significa que sua potência é uniformemente distribuída ao longo da banda de freqüência da medição.

Devido a características físicas intrínsecas dos osciladores, medidas de freqüência de um oscilador são dados não-estacionários, pois contêm componentes de ruído dependentes do tempo e que entram na determinação do valor do desvio de freqüência (NIST, 2006-2007).

Para dados estacionários, a média e a variância convergem para valores particulares com o aumento do número de medições.

Para dados não-estacionários, a média e a variância não convergem nunca para qualquer valor particular. Ao invés disto, tem-se uma média móvel que varia a cada vez que se acrescenta o dado de uma nova medição, sem haver convergência para qualquer valor.

Por esta razão, não se utiliza a estatística clássica para se caracterizar a estabilidade de freqüência de um oscilador.

Para estimar-se a estabilidade de freqüência, no domínio do tempo, a estatística utilizada é a **Variância de Allan (AVAR)** ou, sob a forma de sua raiz quadrada, denominada de **Desvio de Allan (ADEV)** (*two-sample deviation* ou *square-root of the Allan variance*).

A equação para o **Desvio de Allan** (ADEV) é:

$$\sigma_y(\tau)=\sqrt{\frac{1}{2(m-1)}\sum_{i=1}^{m-1}(\bar{y}_{i+1}-\bar{y}_i)^2} \qquad (6.12)$$

Sendo m o número de valores do conjunto de dados yi e os dados amostrados em intervalos de tempo iguais de τ segundos.

Por recomendação do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), o desvio de Allan é usado pelos fabricantes de equipamentos geradores de freqüência como o padrão de especificação para caracterizar a estabilidade de freqüência (NIST, 2006-2007).

Na variância clássica, subtrai-se o valor médio de cada valor obtido, enquanto na variância de Allan, subtrai-se de cada valor obtido o valor imediatamente anterior. Tendo em vista que estabilidade reflete as flutuações de freqüência e não o deslocamento de freqüência (*frequency offset*), na variância de Allan os pontos de dados sucessivos são subtraídos para remover a parte de ruído dependente do tempo.

A tabela 6 exemplifica um cálculo de estabilidade utilizando-se variância de Allan.

A primeira coluna indica valores de fase obtidos de medições realizadas a cada 1 s.

O fato de se ter valores crescentes de fase é uma indicação de que o dispositivo sob medição apresenta um desvio de freqüência em relação à freqüência de referência, causando o desvio de fase.

Tabela 6 – Exemplo de cálculo de estabilidade usando variância de Allan

Medidas de Fase (ns), obtidas a cada 1 s	**Δt Desvio de Fase (ns)**	**yi Desvio de Freqüência Relativo = Δt / (1 s)**	**(yi+1 - yi)**	**(yi+1 - yi)^2**
2426,42	(-----)	(-----)	(-----)	(-----)
2428,44	2,020	2,020E-09	(-----)	(-----)
2430,49	2,050	2,050E-09	3,00E-11	9E-22
2432,51	2,020	2,020E-09	-3,00E-11	9E-22
2434,51	2,000	2,000E-09	-2,00E-11	4E-22
2436,52	2,010	2,010E-09	1,00E-11	1E-22
2438,52	2,000	2,000E-09	-1,00E-11	1E-22
2440,51	1,990	1,990E-09	-1,00E-11	1E-22
2442,51	2,000	2,000E-09	1,00E-11	1E-22
2444,52	2,010	2,010E-09	1,00E-11	1E-22

Subtraindo-se os valores de fase consecutivos, se obtém os desvios de fase da segunda coluna e os quais, dividindo-se por 1 s (intervalo de tempo entre cada medição), fornecem o desvio de freqüência relativo (grandeza adimensional).

A partir deste conjunto de dados de desvio de freqüência relativo (dados y_i da terceira coluna) podemos avaliar a estabilidade de freqüência do dispositivo, usando a variância de Allan. A soma dos valores da última coluna totaliza 2,7 x 10^{-21}.

Utilizando-se o intervalo de tempo de 1 s (τ = 1 s = 10^0 s) entre cada medição, obtém-se o desvio de Allan:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{2{,}7x10^{-21}}{2(9-1)}} = 1{,}30x10^{-11} \qquad (6.13)$$

A título de exemplo, este valor está marcado como sendo o ‘primeiro ponto de dado’ na curva de Allan ilustrada pela figura 72. Para o mesmo conjunto de dados, pode-se fazer processo análogo para τ = 2 s, τ = 3 s e, assim por diante, utilizando-se conjunto adjacentes de valores e atribuindo-lhes médias como novos pontos consecutivos para o cálculo de variância de Allan. Assim, obtém-se um gráfico análogo ao da figura 72.

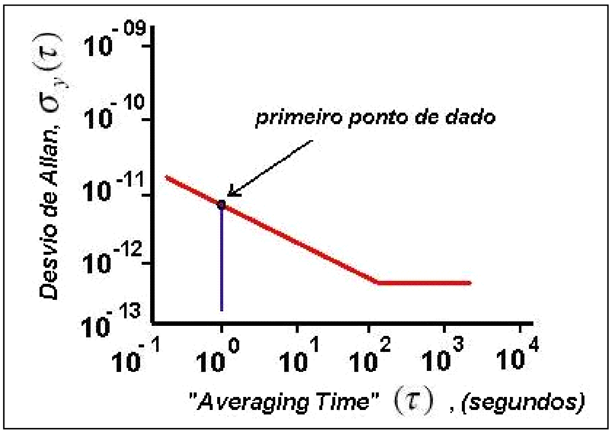


Figura 72 – Estabilidade de freqüência e desvio de Allan

A figura 73 apresenta um exemplo típico de curva de estabilidade de freqüência e Desvio de Allan. Observe-se que embora este gráfico indique *Allan Variance*, o eixo vertical corresponde ao desvio de Allan.

6.3.
Propagação da incerteza de medição de TF

Na avaliação da incerteza de medição de TF, ao se calcular uma incerteza combinada, deve-se sempre manter a coerência quanto aos intervalos de medição utilizados para a determinação de cada incerteza parcial.

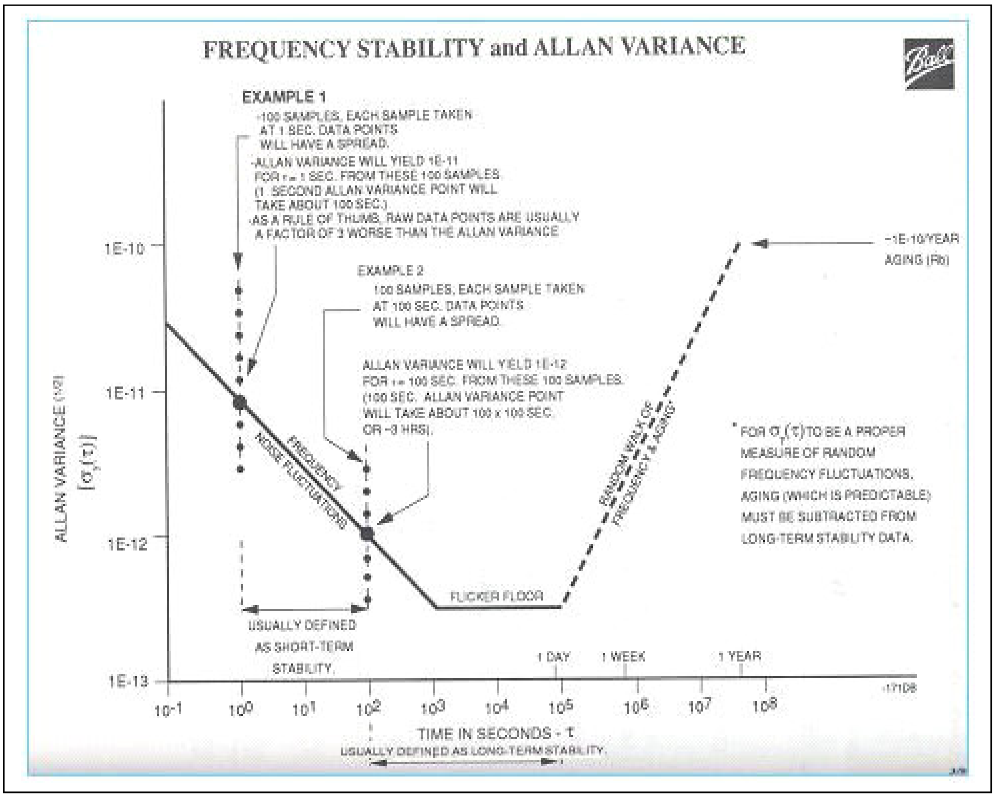


Figura 73 – Desvio de Allan: curva típica de estabilidade de freqüência (Ball-Efratom, 1993).

No que se refere à propagação da incerteza de medição, o CCTF publicou duas importantes diretrizes reproduzidas nas caixas de texto abaixo (Anexo 5 e Anexo 6 do Relatório do CCTF do WGMRA[8]):

CCTF **ANEXO 5 WGMRA Diretriz (*Guideline* 2*)***
(Rev. 20021205)

- A estimativa de incertezas para as entradas de TF da CMC -

No campo da metrologia de tempo e freqüência, o desempenho do sistema de medição de um NMI é estimado por procedimentos diários de manutenção do tempo tais como comparações internacionais de tempo usando GPS CV, TWSTFT, comparações de relógios atômicos individuais etc. O CCTF WGMRA decidiu aceitar a definição de Melhor Capacidade de Medição (MCM; ou BMC=*Best Measurement Capability*) para as entradas da CMC como o nível de incerteza do sistema de medição do NMI. Portanto, cada NMI pode avaliar a

[8] Disponível no *site* http://www.bipm.org/cc/CCTF/Allowed/16/cctf04-07.pdf

incerteza de seu sistema de medição para um dispositivo ideal sob teste. Contudo, o certificado de calibração emitido pelos NMI deve indicar a incerteza dos resultados de calibração incluindo a influência do dispositivo sob teste.

CCTF **ANEXO 6 WGMRA Diretriz (*Guideline* 3)**

(Rev. 20021210)

- A extrapolação da incerteza para as entradas de TF da CMC -

Os resultados de uma Comparação Chave (Key Comparison KC) fornecerão o desvio e sua incerteza para cada laboratório participante. Esta incerteza se refletirá na correspondente entrada da CMC e deve ser considerada como seu menor valor de incerteza: a Melhor Capacidade de Medição.O CCTF declarou o UTC-UTC(k) conforme publicado na Circular-T do BIPM como a única KC na área de TF.

A Circular-T do BIPM fornece o desvio para cada laboratório participante, na forma UTC-UTC(k), com uma dada incerteza combinada para intervalos de 5 dias.

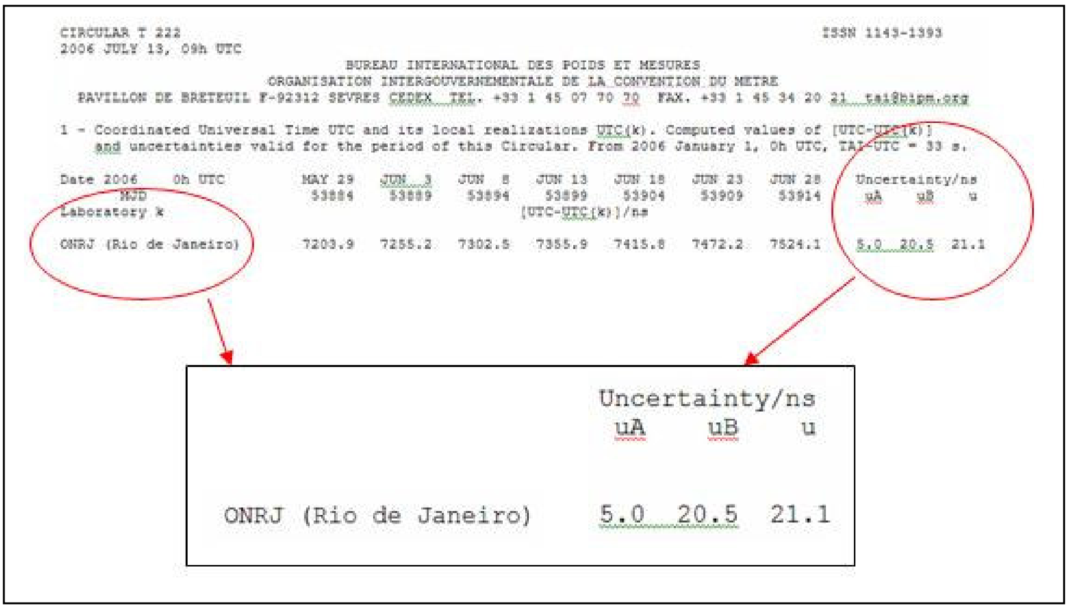
A partir daí, o correspondente desvio e sua incerteza para freqüência e tempo para intervalos de 5 dias podem ser determinados.

Calibrações em um NMI podem ser realizadas e especificadas para intervalos e tempos médios *tau* (τ) menores que 5 dias. Nesses casos, é necessário extrapolar-se os resultados de 5 dias da KC a fim de expressar a incerteza para cada entrada da CMC para intervalos de *tau* (τ) inferiores a 5 dias. Esta extrapolação deve levar em consideração as propriedades (TDEV, ADEV, MDEV, deslizamento, envelhecimento) do Padrão de Referência usado na calibração e obtidas de estudos publicados e aceitos ou de especificações dos fabricantes e em conformidade com procedimento bem documentado. Somente nos casos em que se declara uma incerteza melhor que o resultado obtido por meio dessa extrapolação é que se faz necessária uma revisão pelo RMO.

Exemplo de medição de freqüência

A incerteza tipo A calculada pelo desvio de Allan (Allan *Deviation* - ADEV) depende do intervalo *tau* (τ). Pode-se obter a incerteza tipo A para intervalos *tau* (τ) menores que 5 dias, a partir da extrapolação do resultado da incerteza tipo A da KC 5 dias. Então, a incerteza total combinada é a raiz quadrada da soma dos quadrados da incerteza para τ igual a 5 dias e da incerteza obtida por extrapolação para o τ requerido.

Incertezas publicadas na Circular-T 222, 13 de julho de 2006, referentes aos valores de desvio UTC-UTC(k) do laboratório ONRJ estão apresentadas na figura 74.


CIRCULAR T 222 ISSN 1143-1393
2006 JULY 13, 09h UTC
BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX. +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)] and uncertainties valid for the period of this Circular. From 2006 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 33 s.

Date 2006 0h UTC	MAY 29	JUN 3	JUN 8	JUN 13	JUN 18	JUN 23	JUN 28	Uncertainty/ns		
MJD	53884	53889	53894	53899	53904	53909	53914	uA	uB	u
Laboratory k	[UTC-UTC(k)]/ns									
ONRJ (Rio de Janeiro)	7203.9	7255.2	7302.5	7355.9	7415.8	7472.2	7524.1	5.0	20.5	21.1

	Uncertainty/ns		
	uA	uB	u
ONRJ (Rio de Janeiro)	5.0	20.5	21.1

Figura 74 – Incertezas tipo A e tipo B declaradas na Circular-T para os valores de UTC-UTC(ONRJ)