

8. EXPRESSÃO DA MELHOR CAPACIDADE DE MEDIÇÃO DO LPTF

Internacionalmente consagrada, a incerteza associada à medição constitui-se no parâmetro crítico para se determinar a chamada “Melhor Capacidade de Medição” (CMC) de um NMI.

Neste capítulo, será dada continuidade à caracterização das incertezas de medição de TF do LPTF com o objetivo de se estabelecer a tabela final da CMC do LPTF a ser divulgada no site do BIPM. As incertezas aqui apresentadas estão associadas aos sistemas descritos no capítulo 7, juntamente com seu cálculo, e seguindo as recomendações descritas nos itens 5.3.3 e 6.3.

A tabela de CMC segue o padrão apresentado na seção 5.3.3, figura 71.

Em termos de serviços de calibração da DSHO para fins de preenchimento da CMC, serão dois serviços relativos a tempo e três relativos à frequência, ilustrados na figura 144.

Os dois serviços relativos a tempo serão descritos na seção 8.1 e os três relativos à frequência serão descritos na seção 8.2.

Para cada um desses itens, serão preenchidos os valores máximo e mínimo para a ‘faixa ou nível do mensurando’ e especificações de parâmetros que influenciam na medição, conforme ilustrado pela figura 145. Associadas a esses itens, serão declaradas as incertezas de medição conforme ilustração da figura 146.

8.1. **CMC Time Scale Difference**

O primeiro item corresponde à calibração de oscilador local (“*local clock*”) por comparação de seu pulso 1 PPS com o 1 PPS do padrão UTC(ONRJ) por comparação direta com o UTC(ONRJ). Neste caso, os valores máximo e

mínimo para diferenças de tempo são -1 e +1 s em virtude de se comparar um pulso por segundo.

Calibration or Measurement Service		
Quantity	Instrument or Artifact	Instrument Type or Method
Time scale difference	Local clock	Direct comparison against UTC(ONRJ)
Time scale difference	Local clock	Comparison against UTC
Frequency	Local frequency standard	Comparison against ONRJ standard
Frequency	General frequency source	Comparison against ONRJ standard
Frequency	Frequency counter	Comparison against ONRJ standard

Figura 144 – Serviços da DSHO na CMC.

Measurand Level or Range			Measurement Conditions/Independent Variable	
Minimum value	Maximum value	Units	Parameter	Specifications
-1	1	s	Averaging Time	1h
-1	1	s	Averaging Time	5 days
1 5 10	1 5 10	MHz	Averaging Time	1h
0.1	10	MHz	Averaging Time	1h

Figura 145 – Exemplo de extrato da declaração das faixas e parâmetros que influenciam na medição.

Expanded Uncertainty				
Value	Units	Coverage Factor	Level of Confidence	Is the expanded uncertainty a relative one?
1	ns	2	95%	No
21	ns	2	95%	No
2,E-13	Hz/Hz	2	95%	Yes

Figura 146 – Exemplo de extrato da declaração das incertezas de medição.

8.1.1. Relógio local e comparação direta com UTC(ONRJ)

Para este item, a incerteza de medição é composta da incerteza de medição associada ao método de comparação do oscilador local versus o UTC(ONRJ) Considerando os dois sistemas de comparação de 1 PPS utilizados na calibração, tem-se as seguintes incertezas de medição:

a) para o sistema AUTOMED2:

Da seção 7.3.2.h, figura 143, obtém-se a incerteza expandida de medição do sistema AUTOMED:

$$194 \text{ ps}$$

b) para o sistema de medição ETAB:

Da seção 7.1, figura 83, obtém-se a incerteza expandida de medição do sistema ETAB:

$$11,3 \text{ ps}$$

Considerando-se os cabos de interconexão de comprimentos variados (0,5 m, 1 m, 2 m e 25 m) que foram caracterizados em termos de retardo e respectiva incerteza de medição, obteve-se um máximo de 1 ns para cabos longos (25 m), conforme extrato de planilha ilustrado pela figura 81.

Assim, combinando estas fontes de incerteza de medição, tem-se as seguintes incertezas:

i. para o sistema AUTOMED2:

$$u_1 = \sqrt{(194 \text{ ps})^2 + (1 \text{ ns})^2} \cong 1 \text{ ns} \quad (8.1)$$

ii. para o sistema de medição ETAB:

$$u_2 = \sqrt{(11,3 \text{ ps})^2 + (1 \text{ ns})^2} \cong 1 \text{ ns} \quad (8.2)$$

Assim, declara-se para este serviço o valor de 1 ns como a melhor capacidade de medição.

8.1.2. Relógio local e comparação com UTC

O segundo item corresponde à calibração de um oscilador local (“*local clock*”) por comparação de seu pulso 1 PPS com o 1 PPS UTC. Neste caso, os valores máximo e mínimo para diferenças de tempo também são -1 e +1 s em virtude de se comparar um pulso por segundo. Para este item, a incerteza de medição é composta da incerteza de medição do UTC(ONRJ) *versus* UTC e da incerteza de medição associada ao método de comparação do oscilador local *versus* o UTC(ONRJ) e que correspondem às seguintes contribuições:

- a) incerteza do enlace de tempo ONRJ declarada na Circular-T e que corresponde à relação da tabela 7. A incerteza do enlace declarada na Circular-T 231 (16/04/2007) é:

$$u_{\text{enlaceONRJ}} = \sqrt{(\text{incert.TipoA} = 4,0 \text{ ns})^2 + (\text{incert.TipoB} = 20,0 \text{ ns})^2} \cong 20,4 \text{ ns} \quad (8.3)$$

Pode-se observar que a incerteza Tipo B é o fator determinante da incerteza desse enlace e, para os valores da tabela 7, é:

$$\leq 21 \text{ ns}$$

- b) a incerteza associada à calibração de oscilador local (“*local clock*”) por comparação direta de seu pulso 1 PPS com o 1 PPS do padrão UTC(ONRJ) apresentada na seção 8.1.1: 1 ns.

Assim, a incerteza total é:

$$u = \sqrt{(21 \text{ ns})^2 + (1 \text{ ns})^2} \cong 21 \text{ ns} \quad (8.4)$$

8.2. CMC Frequency

Considerando os serviços de calibração de frequência, os três itens seguintes completam a tabela da CMC.

8.2.1.**Oscilador padrão local com padrão de frequência do ONRJ**

O primeiro item de frequência corresponde à calibração de oscilador padrão local (“*local frequency standard*”) por comparação com o padrão de referência de frequência do ONRJ.

Considerando os dois melhores sistemas de calibração de frequência disponíveis no LPTF, tem-se as seguintes incertezas de medição:

a) para o sistema TSC5110A:

Da seção 7.3.2.e, figura 120, observa-se no gráfico desvio de Allan que a incerteza de medição de frequência para intervalo de 1h está entre os valores a seguir:

$$2,77E-16 < \sigma_{\tau} < 3,55E-16 \quad (8.5)$$

Será utilizado o pior caso: 3,55E-16

b) para o sistema AUTOMED2:

Da seção 7.3.2.h, figura 165, obtém-se a incerteza de medição de frequência para intervalo de 1h:

$$3,89E-14$$

Além destas incertezas, é preciso se considerar a incerteza associada à rastreabilidade ao UTC. Na figura 92, está indicado o desvio de Allan (junho a outubro 2006) do T130 para intervalo de 5 dias calculado a partir dos dados das Circulares-T do BIPM e cujo valor é:

$$1,1E-14$$

Seguindo-se recomendação do CCTF descrita na seção 6.3 e metodologia descrita na seção 7.3.2.a, extrapola-se este valor (com $\tau = 5$ dias) para o valor associado a $\tau = 1$ h:

$$\sigma_{\tau} = k\tau^{-1/2} \Rightarrow k = (\text{desvio de Allan para 5 dias}) / (5 \times 86400)^{-1/2} \quad (8.6)$$

Logo:

$$k = 7,25E-12 \quad (8.7)$$

Assim, desvio de Allan para $\tau = 1$ h = 3600 s:

$$\sigma_{\tau} = kx(3600)^{-1/2} = 1,21E - 13 \quad (8.8)$$

Então, a incerteza total combinada associada só à rastreabilidade ao UTC é a raiz quadrada da soma dos quadrados da incerteza para $\tau = 5$ dias e da incerteza obtida por extrapolação para $\tau = 1$ h:

$$u_T = \sqrt{(1,1E - 14)^2 + (1,21E - 13)^2} \cong 1,21E - 13 \text{ ns} \quad (8.9)$$

Combinando-se esta incerteza com as obtidas em (a) e (b), obtém-se:

- i. para o sistema TSC5110A:

$$u_{T_5110} = \sqrt{(3,55E - 16)^2 + (1,21E - 13)^2} \cong 1,21E - 13 \text{ ns} \quad (8.10)$$

- ii. para o sistema AUTOMED2:

$$u_{T_automed} = \sqrt{(3,89E - 14)^2 + (1,21E - 13)^2} \cong 1,21E - 13 \text{ ns} \quad (8.11)$$

Assim, declara-se para este serviço o valor de $2E-13$ como a melhor capacidade de medição.

8.2.2.

Gerador de frequência com padrão de frequência do ONRJ

O segundo item de frequência corresponde à calibração de um gerador qualquer de frequência (“*general frequency source*”) local por comparação com o padrão de referência de frequência do ONRJ.

Considerando-se os mesmos dois sistemas de calibração de frequência identificados no item 8.2.1, tem-se o mesmo valor de $2E-13$ como a melhor capacidade de medição para este serviço, em virtude de se estar calibrando somente nos mesmos valores de frequência nominal fornecidos pelo padrão de referência do ONRJ.

8.2.3. Contador de frequência local com padrão do ONRJ

O terceiro item de frequência corresponde à calibração de um contador de frequência (“*frequency counter*”) versus um padrão de frequência do ONRJ.

Para calibração de contadores, são utilizados os geradores descritos no item 7.3.2.d e que cobrem a faixa de 0,000001 Hz a 2,5 GHz.

Estes operam com base de tempo externa fornecida pelo padrão de referência T130 (padrão de feixe de césio), cujo desvio de Allan para $\tau = 1$ h foi calculado em 8.2.1 e igual a $1,21E-13$. A incerteza de medição associada à resolução desses equipamentos está calculada em 7.3.2.d e varia na faixa de $5,7E-9$ a $9E-11$. Estes valores de incerteza são muito maiores que $1,21E-13$ e, portanto, a incerteza determinante no cálculo da incerteza combinada é a dos próprios geradores.

Para fins de preenchimento da CMC para este item, optou-se por selecionar alguns pontos que cobrissem toda a faixa e declarando a pior condição de incerteza.

Assim, determinou-se a tabela de melhor capacidade de medição (CMC) a ser submetida ao SIM e enviada ao BIPM e que se encontra apresentada na figura 147 a seguir.

Calibration or Measurement Service			Measurand Level or Range			Measurement Conditions Independent Variable		Expanded Uncertainty					Reference Standard used in calibration		List of Comparisons supporting this measurement/calibration service	SIM Time and Frequency Services Administration				Comment for the user
Quantity	Instrument or Artifact	Instrument Type or Method	Minimum value	Maximum value	Units	Parameter	Specifications	Value	Units	Coverage Factor	Level of Confidence	Is the expanded uncertainty a relative one?	Standard	Source of traceability		NMI Service Identification	Service Category	NMI	Internal Comment	
Time scale difference	Local clock	Direct comparison against UTC(ONRJ)	-1	1	s	Averaging Time	1h	1	ns	2	95%	No	ONRJ Standard	BIPM	BIPM Circular T & Time Section Annual Report	2421	1.1.1	ONRJ		
Time scale difference	Local clock	Comparison against UTC	-1	1	s	Averaging Time	5 days	21	ns	2	95%	No	ONRJ Standard	BIPM	BIPM Circular T & Time Section Annual Report	2421	1.1.2	ONRJ		
Frequency	Local frequency standard	Comparison against ONRJ standard	1 5 10	1 5 10	MHz	Averaging Time	1 h	2E-13	Hz/Hz	2	95%	Yes	ONRJ Standard	BIPM	BIPM Circular T & Time Section Annual Report	2423	2.1.1	ONRJ		
Frequency	General frequency source	Comparison against ONRJ standard	0.1 1 5 10	0.1 1 5 10	MHz	Averaging Time	1 h	2E-13	Hz/Hz	2	95%	Yes	ONRJ Standard	BIPM	BIPM Circular T & Time Section Annual Report	2423	2.2.1	ONRJ		
Frequency	Frequency counter	Comparison against ONRJ standard	200 200,0E+06 1,28E+09	<1,0E+05 =640,0E+06 <2,56E+09	Hz	Averaging Time	variable	6E-09 6E-10 4E-10	Hz/Hz	2	95%	Yes	ONRJ Standard	BIPM	BIPM Circular T & Time Section Annual Report	2424	2.3.1	ONRJ		

Figura 147 – Declaração CMC da DSHO (laboratório ONRJ).

Para uma melhor visualização dos serviços e incertezas de medição, a figura 148 seguinte apresenta um extrato de parte desta tabela.

Calibration or Measurement Service			Measurand Level or Range			Measurement Conditions: Independent Variable		Expanded Uncertainty				
Quantity	Instrument or Artifact	Instrument Type or Method	Minimum value	Maximum value	Units	Parameter	Specifications	Value	Units	Coverage Factor	Level of Confidence	Is the expanded uncertainty a relative one?
Time scale difference	Local clock	Direct comparison against UTC(ONRJ)	-1	1	s	Averaging Time	1 h	1	ns	2	95%	No
Time scale difference	Local clock	Comparison against UTC	-1	1	s	Averaging Time	5 days	21	ns	2	95%	No
Frequency	Local frequency standard	Comparison against ONRJ standard	1 5 10	1 5 10	MHz	Averaging Time	1 h	2E-13	Hz/Hz	2	95%	Yes
Frequency	General frequency source	Comparison against ONRJ standard	0.1 1 5 10	0.1 1 5 10	MHz	Averaging Time	1 h	2E-13	Hz/Hz	2	95%	Yes
Frequency	Frequency counter	Comparison against ONRJ standard	200 200,0E+06 1,28E+09	<1,0E+05 <640,0E+06 <2,56E+09	Hz	Averaging Time	variable	6E-09 6E-10 4E-10	Hz/Hz	2	95%	Yes

Figura 148 – Extrato da declaração CMC da DSHO (laboratório ONRJ) ilustrada pela figura 147.