

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

LEONARDO SANTIAGO BENITEZ PEREIRA

CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTO SDR

Florianópolis, 2022

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Setup para as medições com o Rohde & Schwarz HMS-X	7
Figura 2 – Setup para as medições com o SDR RSP1	7
Figura 3 – Antena e posicionamento utilizados em todas as medições	7

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	OBJETIVOS	4
3	DESENVOLVIMENTO	5
3.1	Revisão de Literatura	5
3.1.1	Calibração	5
3.1.2	Ajuste	5
3.1.3	Erro	5
3.1.4	Incerteza	6
3.2	Metodologia	6
3.3	Apresentação dos Resultados	8
3.3.1	Conjunto de medições 1	8
3.3.2	Conjunto de medições 2	9
4	CONCLUSÕES	11
	REFERÊNCIAS	12
	APÊNDICES	13
	APÊNDICE A – CÓDIGO DE AJUSTE	14

1 INTRODUÇÃO

Um dos equipamentos mais importantes para a análise de Compatibilidade Eletromagnética é o analisador de espectro, capaz de - entre outros - medir a densidade de potência espectral (*power spectral density* - PSD) de um sinal (SCHLICHTING, 2021). Tal equipamento possui alto custo, porém pode ser substituído por rádios definidos por software (*software defined radio* - SDR) (DEBASTIANI, 2021).

Este relatório descreve o processo de calibração e ajuste dos valores de amplitude de um SDR RSP1, onde considerou-se como "valor real" as medições realizadas com o analisador de espectro Rohde & Schwarz HMS-X. O trabalho foi realizado como parte da disciplina de Tópicos Avançados em Compatibilidade Eletromagnética do curso de Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

2 OBJETIVOS

Objetivos gerais:

- Realizar a calibração e ajuste de um SDR RSP1.

Objetivos específicos:

- Realizar medições com os equipamentos SDR RSP1 e R&S HMS-X na faixa de 10MHz a 200MHz;
- Determinar o erro sistemático do SDR RSP1 em relação ao R&S HMS-X para as frequências medidas;
- Identificar se o erro é dependente da frequência;
- Determinar o fator de ajuste necessário para corrigir o erro sistemático do SDR RSP1;
- Determinar a incerteza das medições realizadas com o equipamento SDR RSP1.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Revisão de Literatura

3.1.1 Calibração

Estabelece o erro de medição e a incerteza de medição associada de um instrumento, ao compará-lo a um padrão (CAMPOS, 2015).

Segundo Inmetro (2015), uma calibração pode ser expressa por meio de uma declaração, uma função de calibração, um diagrama de calibração, uma curva de calibração ou uma tabela de calibração.

Vidotto, Veiras e Sorichetti (2022) aponta que o processo de calibração de SDRs pode ser feito tanto para recepção quanto emissão, sendo que ambos podem ser realizados pela comparação com um equipamento de referência.

3.1.2 Ajuste

Operação destinada a levar um instrumento de medição a um funcionamento adequado à sua utilização (CABRAL, 2014). Após o ajuste físico ou manutenção de um instrumento ou sistema de medição, tal instrumento ou sistema de medição deve ser calibrado novamente (CAMPOS, 2015).

Diversos tipos de ajuste de um sistema de medição incluem o ajuste de zero, o ajuste de defasagem (às vezes chamado ajuste de "*offset*") e o ajuste de amplitude (às vezes chamada ajuste de ganho) (INMETRO, 2015).

Inmetro (2015) ressalta a importância de não confundir a calibração com o ajuste de um sistema de medição, frequentemente denominado de maneira imprópria de "auto-calibração": O processo de ajuste elimina, total o parcialmente, o erro, mas a medição ainda possui incerteza.

3.1.3 Erro

Estabelece o quanto o resultado da medição de um instrumento se desviou do valor nominal (CAMPOS, 2015).

Segundo Inmetro (2015), o conceito de erro de medição pode ser utilizado quando:

1. existe um único valor de referência, o que ocorre se uma calibração for realizada por meio de um padrão de medição com um valor medido cuja incerteza de medição é desprezável, ou se um valor convencional for fornecido; nestes casos, o erro de medição é conhecido;

2. se suponha que um mensurando é representado por um único valor verdadeiro ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezável; neste caso, o erro de medição é desconhecido.

3.1.4 Incerteza

Indica a faixa em que o "valor real" (valor verdadeiro convencional) pode estar (CAMPOS, 2015). É necessariamente um valor real não-negativo, representado pelo símbolo u , e caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando (INMETRO, 2015).

Há duas abordagens na estimativa da incerteza de medição u : tipo A e tipo B. A incerteza do tipo A é estimada a partir da distribuição estatística dos valores (CABRAL, 2014).

$$u_{\text{tipo-A}} = \text{desvio padrão} / \sqrt{N}$$

$$\text{desvio padrão} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

N = Número de amostras

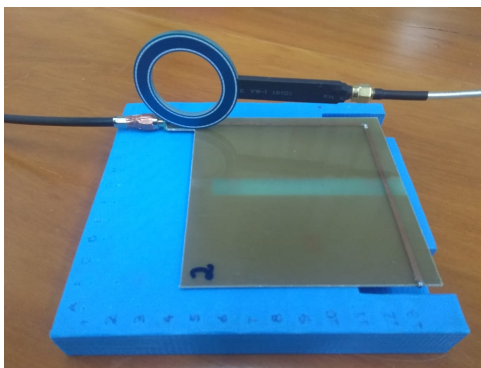
A incerteza do tipo B não é calculada de forma estatística, mas sim em especificações de fabricantes, em informações de publicações científicas, entre outros (CABRAL, 2014). Formas usuais de quantificar as incertezas do tipo B são: metade da menor divisão de escala (para equipamentos analógicos), resolução (para equipamentos digitais), valores publicados por autoridade competente, entre outros (INMETRO, 2015).

Incerezas-padrão, sejam elas do tipo A ou do tipo B, podem ser combinadas através de soma quadrática (CABRAL, 2014).

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots}$$

3.2 Metodologia

Montou-se um ambiente com o gerador de funções AFG3021B da Tektronix, uma placa de circuito impresso, uma antena de campo magnético, e um analisador de espectro (hora o SDR RSP1, hora o Rohde & Schwarz HMS-X). Para ambos os analisadores utilizou-se os mesmos cabos, porém foi necessário utilizar um adaptador miniSMA-para-SMA para o Rohde & Schwarz).

Figura 1 – Setup para as medições com o Rohde & Schwarz HMS-X**Figura 2 – Setup para as medições com o SDR RSP1****Figura 3 – Antena e posicionamento utilizados em todas as medições**

Seguindo as instruções fornecidas em (DEBASTIANI, 2021), o SDR RSP1 foi configurado da seguinte forma:

- Ganho 1;
- Taxa de amostragem 1MHz;
- Tempo de aquisição 0,2s;
- Ao configurar o equipamento para medir uma determinada frequência (por exemplo, 10MHz), ajustou-se a frequência central de medição para que *não* coincidissem

com a frequência desejada (por exemplo, ajustando-a para 10.2MHz), eliminando assim a influência do nível DC na medição do SDR;

- Ao realizar a medição considerou-se apenas o valor máximo de amplitude dentro da janela de aquisição.

O analisador de espectro Rohde & Schwarz HMS-X foi configurado da seguinte forma:

- *Receiver Mode* (medição de apenas uma frequência, em oposição ao *Sweep Mode*);
- Tempo de aquisição 0,2s;
- *Peak detector*;
- *Step* de 1MHz.

Objetivando mensurar o erro e a incerteza do tipo A, realizou-se dois conjuntos de medições:

1. Medições de 10MHz a 200MHz espaçadas 10MHz entre si, para mensurar o erro;
2. Medições de 10Mhz a 200Mhz espaçadas 50MHz entre si, repetindo cada medição 10 vezes, para mensurar a incerteza.

Após essas medições, determinou-se um fator de ajuste, nomeado alfa, que deve ser multiplicado com a medição do SDR para obter-se o valor real da medição. Da mesma forma, obteve-se o fator u que qualifica a incerteza padrão da medição.

3.3 Apresentação dos Resultados

3.3.1 Conjunto de medições 1

Gerou-se uma onda quadrada com amplitude de 8V e seguiu-se o procedimento apresentado na Metodologia. Como só existem as harmônicas pares, uma a cada duas medições era apenas o nível de ruído de fundo sendo medido. Calculou-se separadamente o fator de correção alfa para as amostras onde havia uma sinal presente (10Mhz, 30MHz, etc) e quando não havia um sinal presente (20MHz, 40MHz, etc).

Freq. (MHz)	Pico R&S (dBm)	Pico SDR (dBm)	Alfa sinal	Alfa fundo
10	-34.08	-29.93	1.14	
20	-71.75	-68.89		1.04
30	-42.25	-40.55	1.04	
40	-69.81	-68.70		1.02
50	-45.84	-45.74	1.00	
60	-69.73	-62.71		1.11
70	-56.76	-37.63	1.51	
80	-71.53	-64.51		1.11
90	-68.01	-57.81	1.18	
100	-71.84	-68.83		1.04
110	-71.73	-68.65	1.04	
120	-72.16	-65.54		1.10
130	-71.98	-59.61	1.21	
140	-72.23	-64.09		1.13
150	-72.87	-59.57	1.22	
160	-73.09	-68.63		1.07
170	-72.44	-68.93	1.05	
180	-71.22	-68.69		1.04
190	-70.87	-68.98	1.03	
200	-71.49	-69.13		1.03

Como as harmônicas de uma onda quadrada possuem valor decrescente com a frequência, é esperado que os valores medidos para as frequências com harmônica não-nula sejam decrescentes. Observa-se também que as medições dos equipamentos se torna mais próxima com o aumento da frequência, convergindo para um valor de aproximadamente -70dB de ruído de fundo.

3.3.2 Conjunto de medições 2

Gerou-se uma onda quadrada com amplitude de 10V e seguiu-se o procedimento apresentado na Metodologia.

Freq (MHz)	u-tipo-A SDR	u-tipo-A R&S	Fator de correção sinal médio
10	0.02	0.005	1.14
50	0.04	0.02	1.01
100	0.08	0.2	1.04
150	0.04	0.2	1.21
200	0.08	0.2	1.04

Pode-se observar que ambos os equipamentos apresentam a incerteza positivamente correlacionada com a frequência de amostragem.

Para as medições acima de 100 MHz o equipamento R&S apresentou uma incerteza maior. É possível que tal se deva pela forma como as medições foram

realizadas: enquanto as medições com o SDR foram realizadas com menos de um segundo de intervalo de tempo entre medições subsequentes (devido ao procedimento de medição haver sido implementado em software), as medições com o R&S foram realizadas manualmente e, portanto, houve um intervalo de alguns segundos entre uma medição e outra.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho comparou-se as medidas obtidas com os equipamentos R&S HMS-X e SDR RSP1, para a faixa de frequência de 10MHz à 200MHz. Obteve-se o erro sistemático do SDR RSP1 em relação ao R&S HMS-X, do qual determinou-se o fator de ajuste necessário para corrigir o erro. Obteve-se também a incerteza do tipo A do equipamento.

Como ambos - ajuste e incerteza - são dependentes da frequência, implementou-se um código na linguagem Python que, dado uma medição, realiza o ajuste e indica a incerteza (disponível no Apêndice A). Para tanto, o código utiliza a interpolação linear dos valores obtidos para o α e u .

REFERÊNCIAS

- CABRAL, P. *Erros e Incertezas nas Medições*. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- CAMPOS, C. A. B. de. *Processo de Medição e Calibração*. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- DEBASTIANI, I. G. *ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM ANALISADOR DE ESPECTRO DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO*. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 7.
- INMETRO. *Vocabulário Internacional de Metrologia*. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- SCHLICHTING, L. C. M. *Notas de aula, disciplina CEM22109*. 2021. Citado na página 3.
- VIDOTTO, M. I.; VEIRAS, F. E.; SORICHETTI, P. A. Software defined radio for vector network analysis: Configuration, characterization and calibration. *Measurement*, v. 189, p. 110468, 2022. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121013531>>. Citado na página 5.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO DE AJUSTE

```
1 import numpy as np
2 from typing import Tuple
3
4 adjust_table = [
5     {
6         'freq': 10,
7         'alpha': 1.14,
8         'u': 0.02,
9     },
10    {
11        'freq': 30,
12        'alpha': 1.04,
13    },
14    {
15        'freq': 50,
16        'alpha': 1.0,
17        'u': 0.04,
18    },
19    {
20        'freq': 70,
21        'alpha': 1.51,
22    },
23    {
24        'freq': 90,
25        'alpha': 1.18,
26    },
27    {
28        'freq': 100,
29        'u': 0.08,
30    },
31    {
32        'freq': 110,
33        'alpha': 1.04,
34    },
35    {
36        'freq': 130,
37        'alpha': 1.21,
38    },
39    {
40        'freq': 150,
41        'alpha': 1.22,
42        'u': 0.04,
43    },
44    {
```

```

45     'freq': 170,
46     'alpha': 1.05,
47 },
48 {
49     'freq': 190,
50     'alpha': 1.03,
51 },
52 {
53     'freq': 200,
54     'u': 0.08,
55 },
56 ]
57
58
59
60 def apply_adjust(frequency: float, measurement: float, adjust_table: list) -> Tuple
    [float, float]:
61     '''
62     The adjust_table is expected to be monotonically increasing in frequency
63     Return the tuple (alpha, uncertainty)
64     '''
65     assert frequency >= adjust_table[0]['freq'], 'The device was not calibrated for
        this frequency range'
66     assert frequency <= adjust_table[-1]['freq'], 'The device was not calibrated for
        this frequency range'
67     alpha = np.interp(
68         frequency,
69         [a['freq'] for a in adjust_table if 'alpha' in a],
70         [a['alpha'] for a in adjust_table if 'alpha' in a],
71     )
72     uncertainty = np.interp(
73         frequency,
74         [a['freq'] for a in adjust_table if 'u' in a],
75         [a['u'] for a in adjust_table if 'u' in a],
76     )
77     return (alpha, uncertainty)
78
79
80 frequency = 25
81 measurement = -70
82 alpha, uncertainty = apply_adjust(frequency, measurement, adjust_table)
83 print(f"At {frequency} MHz, we measured {measurement} V, which is adjusted to {
    measurement*alpha}+-{uncertainty} V\t\t(alpha={alpha})")

```