

## Validação Metrológica

Com o propósito de facilitar o entendimento do trabalho, o capítulo apresenta conceitos básicos de metrologia e definições relacionadas ao tem objeto da investigação.

### 6.1. Conceitos e definições aplicáveis a metrologia

Lord Kelvin, em 1883, fez a seguinte declaração: “O conhecimento amplo e satisfatório sobre um processo ou um fenômeno somente existirá quando for possível medi-lo e expressá-lo por meio de números”.

Todo padrão de qualidade, seja de equipamentos ou processos, precisa ser definido a partir de regras e normas estabelecidas por organismos competentes, credenciados ou reconhecidos pelo governo. Por esta razão a validação metrológica (ou comprovação metrológica) do equipamento de medição utilizado é tão importante. Para isso é necessário realizar um processo de medição das variáveis trabalhadas para que elas possam ser verificadas e com isso, validá-las e qualificá-las.

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 10012:2004, o **processo de medição** é definido pelo conjunto de operações para determinar o valor de uma grandeza. Neste contexto, equipamento de medição é entendido como qualquer instrumento de medição, programa de computador, padrão de medição, material de referência ou dispositivos auxiliares, ou uma combinação deles, necessários para executar um determinado processo de medição.

Ainda de acordo com a norma ABNT NBR ISO 10012:2004, **comprovação metrológica** é o conjunto de operações necessárias para assegurar que um equipamento de medição atende aos requisitos do seu uso pretendido. A comprovação metrológica normalmente inclui calibração ou verificação.

O **sistema de qualidade de um processo produtivo** é constituído pela rastreabilidade, que por sua vez é obtida por meio de calibração. Entretanto, não

basta apenas calibrar instrumentos, deve-se analisar o certificado recebido, principalmente os resultados relatados, com base em critérios pré-estabelecidos e, assim, validar a comprovação metrológica, avaliar a coerência do certificado de calibração, o instrumento, a adequação do sistema e a tolerância do processo.

De acordo com o VIM [XX], têm-se as seguintes definições:

- **Metrologia:** É a ciência da medição. Ela abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência ou da tecnologia.
- **Medição:** Conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza.
- **Mensurando:** Objeto da medição. Grandeza específica submetida à medição.
- **Exatidão:** Aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro.
- **Calibração:** Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.
- **Verificação:** Operação destinada a fazer com que um instrumento de medição tenha desempenho compatível com o seu uso.
- **Certificação:** é o modo pelo qual uma terceira parte dá garantia escrita de que um produto, processo ou serviço que está em conformidade com os requisitos especificados.
- **Acreditação:** é a atestação de terceira parte relacionada a um organismo de avaliação da conformidade, comunicando a demonstração formal da sua competência para realizar tarefas específicas de avaliação da conformidade.
- **Rastreabilidade:** Propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.

- **Processo de Medição:** é o conjunto de métodos e meios que são utilizados para efetuar uma medição. Além do mensurando e do sistema de medição, fazem parte do processo o operador, os procedimentos de medição utilizados e as condições em que as medições são efetuadas. Aplicando-se um sistema de medição sobre o mensurando, produz-se um número, a indicação.
- **Resultado da Medição:** é a faixa de valores dentro da qual deve estar o valor verdadeiro do mensurando. Ele é composto por duas parcelas, o resultado-base (RB) e a incerteza de medição (IM).
- **Incerteza de Medição:** Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando.

De acordo com o manual ISO-GUM [7], entende-se por incerteza (de medição) o parâmetro (como o desvio padrão, por exemplo), associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (grandeza específica a ser medida).

Ainda de acordo com o manual ISO-GUM [7], a incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados de séries de medições e podem ser caracterizados por desvios padrão experimentais. Os outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvios padrão, são avaliados por meio de distribuições de probabilidade supostas, baseadas na experiência ou em outras informações.

A incerteza padrão pode ser avaliada em dois tipos, o Tipo A e o Tipo B. Na incerteza do Tipo A, a metodologia utilizada para a avaliação da incerteza é através de análise estatística de séries de observações. Já na incerteza do Tipo B, a metodologia de avaliação de incerteza é realizada por outros tipos meios que não a análise estatística de séries de observações.

Entende-se portanto, que o resultado da medição é a melhor estimativa do valor do mensurando, e que todos os componentes da incerteza, incluindo aqueles resultantes de efeitos sistemáticos, como os componentes associados com correções e padrões de referência, contribuem para a dispersão.

No caso do equipamento de aquisição de dados utilizado, o fabricante enviou um arquivo de calibração, **Anexo 2**, que deve sempre ser adicionado ao

software do equipamento no início de cada medição. Não foi enviado junto com o equipamento um certificado, fazendo-se necessária a calibração por comparação laboratorial para a credibilidade dos dados aquisitados.

Portanto, para tal calibração, foram necessárias medições das indicações para que essas pudessem ser analisadas e classificadas de acordo com as normas metrológicas. Este caso pode ser considerado como de incerteza do Tipo B.

## 6.2. Comparação laboratorial

Para se assegurar a confiabilidade das medidas, as medições realizadas são comparadas com medições realizadas por equipamentos diferentes, nas mesmas condições. Para isso, um dos equipamentos (*Correvit*) deve ser calibrado, para que os dados obtidos pelo outro equipamento (MQ200-PRO) possam ser comparados a ele e com isso validados.

Para se realizar a comparação laboratorial, os valores medidos (mensurandos, dados pela aceleração lateral e a velocidade longitudinal) pelos dois equipamentos foram comparados e a diferença entre esses valores foi calculada. Foram calculados também a média e o desvio padrão e os resultados obtidos pela comparação foram analisados de acordo com os valores padrões definidos pelas normas que os regem.

Estando os resultados obtidos dentro dos valores padrões esperados, é possível dizer que o equipamento está validado, ou seja, que seus valores de medições são confiáveis para os devidos fins. Esses valores padrões estão determinados na norma SAE J1491 de 1995.

Também estão definidas na mesma norma a exatidão e a resolução que o equipamento a ser validado deve ter. Para a unidade de tempo, a exatidão deve ser de  $\pm 0,1$  segundos e a resolução de 0,1 segundos. Para a unidade de velocidade, a exatidão deve ser de  $\pm 0,8$  km/h e a resolução de 0,4 km/h. A

**Tabela 1** indica os valores de exatidão e resolução de cada equipamento, de acordo com os dados dos fabricantes.

Tabela 1 – Exatidão e Resolução do equipamento *Correvit*.

Velocidade	Exatidão	Resolução
<i>Correvit</i>	$\pm 0,13$ km/h	0,1km/h

Para realizar esta análise, será utilizada a metodologia de avaliação da incerteza do Tipo B e avaliada a variância estimada ( $u^2$ ). De acordo com o manual ISO-GUM [7], uma incerteza padrão do Tipo B é obtida a partir de uma suposta função de densidade de probabilidade, baseada no grau de credibilidade que um evento vá ocorrer.

Os dados medidos pelos dois equipamentos foram amostrados com diferentes frequências de amostragem, e por isso, fez-se necessário realizar uma interpolação dos dados, para assim poder compará-los. Foram feitos três ensaios com diferentes velocidades. Para cada ensaio a velocidade foi mantida o mais constante possível. As velocidades testadas foram de 40 km/h, 50 km/h e 60 km/h. Devido às condições da pista, não foi possível realizar ensaios com velocidades acima de 60 km/h.

Os valores mostrados abaixo representam o ensaio realizado na velocidade de 50 km/h, no circuito fechado de 5,8 km de comprimento. A

**Tabela 2** indica os valores de velocidade medidos pelos dois equipamentos e a

Tabela 3 indica os valores de aceleração lateral. Devido ao número de amostras ser muito grande, apenas uma pequena amostra das medições realizadas está representada, mas os valores de desvio padrão ( $u$ ) e variância ( $u^2$ ) refletem a totalidade dos dados levantados no curso de toda a trajetória da pista.

Tabela 2 – Valores típicos de velocidade medidos pelos dois equipamentos utilizados

Tempo	MQ200	Correvit	Erro
	Velocidade	Velocidade	Vm-Vc
1.000	43.650	43.665	-0.015
2.000	45.200	45.312	-0.112
3.000	48.195	48.476	-0.281
4.000	50.170	50.182	-0.012
5.000	51.515	51.488	0.027
6.000	51.665	51.962	-0.297
7.000	52.000	52.063	-0.063
8.000	52.190	52.109	0.081
9.000	52.030	52.118	-0.088
10.000	51.960	51.961	-0.001
11.000	51.600	51.696	-0.096
12.000	51.480	51.296	0.184
13.000	51.570	51.488	0.082
14.000	51.120	51.157	-0.037
15.000	50.770	50.842	-0.072
16.000	50.820	50.430	0.390
17.000	50.120	50.457	-0.337
18.000	50.190	50.399	-0.209
19.000	50.035	49.881	0.154
20.000	49.950	49.835	0.115
21.000	49.920	50.232	-0.312
22.000	49.970	50.169	-0.199
23.000	50.290	50.183	0.107
24.000	50.820	51.411	-0.591
25.000	52.010	51.907	0.103
26.000	52.180	52.370	-0.190
27.000	52.800	52.553	0.247
28.000	52.900	52.652	0.248
29.000	52.760	52.781	-0.021
30.000	52.500	52.110	0.390
31.000	51.560	51.510	0.050
32.000	50.950	50.800	0.150
33.000	50.430	50.292	0.138
34.000	50.650	50.456	0.194
35.000	50.480	50.634	-0.154
36.000	50.990	51.024	-0.034
37.000	51.210	51.434	-0.224
38.000	51.710	52.093	-0.383
39.000	52.200	52.312	-0.112
40.000	52.630	52.562	0.068

Tabela 3 - Valores típicos de aceleração lateral medidos pelos dois equipamentos.

Tempo	MQD	Correxit	Erro
	Lateral G	Lateral G	Am-Ac
1.000	0.050	-0.105	0.155
2.000	0.040	-0.035	0.075
3.000	0.030	0.030	0.000
4.000	0.030	-0.024	0.054
5.000	0.030	-0.035	0.065
6.000	0.075	0.111	-0.036
7.000	0.030	0.024	0.006
8.000	0.000	-0.011	0.011
9.000	0.060	0.036	0.024
10.000	0.090	-0.031	0.121
11.000	0.020	0.100	-0.080
12.000	0.020	-0.152	0.172
13.000	-0.030	-0.094	0.064
14.000	0.000	-0.074	0.074
15.000	-0.050	-0.048	-0.002
16.000	-0.030	-0.114	0.084
17.000	-0.010	0.025	-0.035
18.000	0.090	0.103	-0.013
19.000	0.055	0.005	0.050
20.000	0.060	0.035	0.025
21.000	0.030	-0.013	0.043
22.000	0.110	0.027	0.083
23.000	-0.020	0.008	-0.028
24.000	-0.040	0.093	-0.133
25.000	0.010	0.058	-0.048
26.000	0.030	-0.003	0.033
27.000	0.030	0.001	0.029
28.000	0.000	-0.004	0.004
29.000	0.030	-0.030	0.060
30.000	0.030	-0.020	0.050
31.000	0.060	0.037	0.023
32.000	0.060	-0.009	0.069
33.000	0.050	-0.050	0.100
34.000	0.030	0.014	0.016
35.000	0.050	0.063	-0.013
36.000	0.030	0.036	-0.006
37.000	0.060	0.045	0.015
38.000	0.030	0.050	-0.020

Ainda em conformidade à norma SAE J1491 de 1995, o valor do coeficiente de variação ( $cv$ ) não pode passar de 6% do valor da velocidade de ensaio, que no caso acima foi de 50 km/h, dando assim um  $cv$  máximo de 3,0. A **Tabela 4** indica esses valores para o ensaio descrito e ilustrado acima. O coeficiente de variação ( $cv$ ) é dado pelo desvio padrão ( $u$ ) dividido pela média ( $\bar{m}$ ), como ilustra a eq. (3). Já a média ( $\bar{m}$ ) está ilustrada na eq. (1) e o desvio padrão está ilustrado na eq. (2). O  $m$  indica a variável que está sendo analisada, o  $n$  é o número de pontos analisados e  $i$  é o contador.

$$\bar{m} = \frac{\sum_i^n m_i}{n} \quad (1)$$

$$u = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\bar{m} - m_i)^2}{(n-1)}} \quad (2)$$

$$cv = \frac{u}{\bar{m}} \quad (3)$$

Tabela 4 - Cálculo do Coeficiente de Variação para 50 km/h.

Equipamento	Desvio Padrão	Média	Coeficiente de Variação
MQ200	1.423	50.954	0.028
Correvit	1.381	50.995	0.027

Equipamento	Variância	Média	Coeficiente de Variação
MQ200	0.005	0.006	0.843
Correvit	0.003	0.033	0.103

Como pode ser analisado na **Tabela 4**, tanto o coeficiente de variação da velocidade e o da aceleração lateral do equipamento a ser validado ficaram muito abaixo do valor máximo estabelecido pela norma, mostrando assim, de acordo com a norma, o equipamento MQ200-PRO tem uma ótima confiabilidade.

Porém, de acordo com a aplicação aqui desejada, os valores medidos de aceleração lateral não tiveram a qualidade necessária sem a filtragem. Isso ocorreu pois as medições são variáveis no tempo e passam por uma integração. Isso mostra um ponto crítico para medições que variam com o tempo, ou seja, medições não estacionárias.