

# MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DE GRANDEZAS NA PESQUISA DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Renan Luigi Nicola <sup>1</sup>; Clayton Zabeu <sup>2</sup>; Celso Argachoy <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *O projeto trata do estudo de um novo conceito de motores de combustão interna funcionando com etanol, com o objetivo de aproveitar todo o potencial deste combustível oxigenado, tanto em termos de rendimento térmico, tanto em vista que o etanol anidro tem velocidade de chama laminar cerca de 50% maior do que a da gasolina, e também seu potencial de redução das emissões limitadas pelas legislações e ainda CO<sub>2</sub>. Serão testadas diferentes misturas de combustíveis, e arranjos de injeção. Além de testes em bancos de prova, o projeto também utiliza modelos e ferramentas de simulação que auxiliam na compreensão dos resultados de testes do motor. O programa de iniciação científica será desenvolvido no contexto do projeto FAPESP 2013/50239-3 no qual o IMT participa em conjunto com o ITA, EPUSP e UNICAMP, patrocinado ainda pela PSA Peugeot Citroen.*

## Introdução

A grande maioria das pesquisas, ensaios e medições se tratam de estudos com dedicação profunda e detalhada, com objetivo de investigar, buscar, descobrir, obter novos conhecimentos e resultados pelo trabalho desenvolvido. Ao relatar o resultado de medição de uma grandeza física, deve-se sempre fornecer alguma indicação quantitativa da qualidade com a qual o resultado foi obtido, possibilitando que aqueles que irão avalia-lo, possam verificar a sua confiabilidade.

Assim se faz o uso da incerteza para expressar e avaliar o valor associado a grandeza medida. Desta forma devemos calcular e avaliar a propagação de incertezas de medições de grandezas que é aplicada ao banco de provas utilizado no estudo de um novo conceito de motores de combustão interna funcionando com etanol, onde são testadas diferentes misturas de combustíveis.

## Material e Métodos

Inicialmente, será feito o estudo do funcionamento detalhado das propriedades e do comportamento de um motor de combustão interna em suas condições de trabalho.

A respeito do cálculo da incerteza associada as medições, ela será concentrada em obter a incerteza da velocidade angular, torque, potência e consumo específico, e para isso é necessário primeiramente, entender o que são incertezas, em seguida, como elas se propagam, mapear onde estão as potenciais fontes de incertezas e então compreender o funcionamento de cada uma dessas potenciais fontes de incertezas, para que se possa dar início aos cálculos estatísticos e por fim obter resultados consistentes e conclusivo dos dados experimentais, e determinar as faixas de confiabilidade das grandezas.

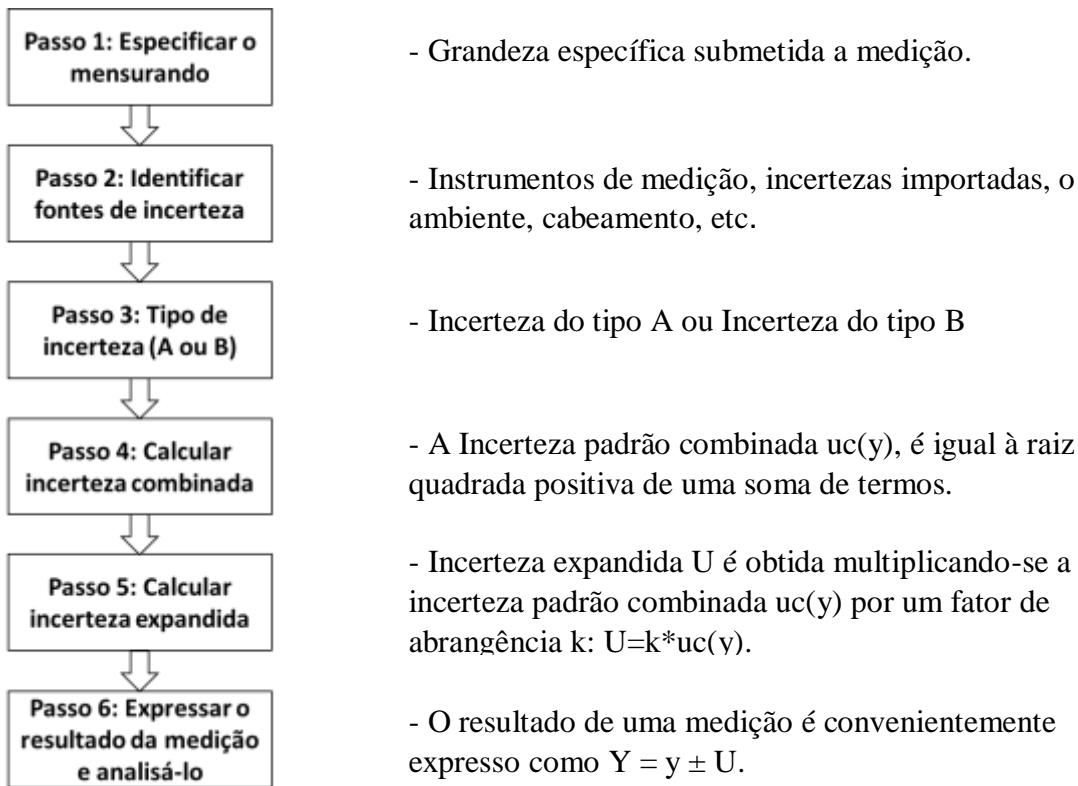


Figura 1 - Fluxograma

Dessa forma alguns conceitos estatísticos foram estudados e aplicados para obtenção dos resultados apresentados a seguir. Conceitos como: Distribuição de Probabilidades, Intervalos de confiança, Testes de hipóteses, entre outros, com apoio de ferramentas como Microsoft Excel e Minitab para a apresentação de gráficos e realização de cálculos.

Para que tudo isso seja possível é necessário avaliar e estudar os equipamentos de medição envolvidos, como o Encoder, Flange de Torque, Termopar, Transdutor de Pressão, Medidor de Vazão (Coriolis), Sonda Lambda, entre outros, onde cada um é responsável por efetuar as diferentes medições e consequente obtenção dos dados.

## Resultados e Discussão

### Intervalo de confiança

Os intervalos de confiança (IC) são usados para indicar a confiabilidade de uma estimativa calculada a partir de observações. Por exemplo, o intervalo de confiança pode ser usado para descrever o quanto confiáveis são os resultados de uma pesquisa (uma pesquisa com intervalo de confiança menor é mais confiável que uma pesquisa com intervalo de confiança maior). O intervalo de confiança com nível de confiança de 95% é o mais comum e significa que o resultado está dentro do intervalo de 95 dos 100 estudos hipoteticamente realizados.

Primeiramente precisaremos conhecer qual será a forma de distribuição dos dados a serem analisado.

É possível provar através de uma distribuição de frequências que os dados captados pelos testes seguem uma distribuição normal. A distribuição de frequências se trata de uma tabela onde os dados são divididos em classes pré-estabelecidas, anotando-se a frequência de

cada classe. Então uma tabela de frequência é um arranjo tabular dos dados com a frequência correspondente.

Indiscutivelmente, o modelo mais largamente utilizado para a distribuição de uma variável aleatória é a distribuição normal, pois se considerarmos que cada medida seja proveniente de uma réplica de um experimento aleatório, a distribuição normal poderá ser usada para tirar conclusões aproximadas em torno da média.

A distribuição é normal quando o gráfico tem a forma de "sino". Ou seja, é uma distribuição Unimodal (1 moda), simétrica em relação à média e tende a zero quando se afasta da média. Para achar a área sob a curva normal devemos conhecer dois valores numéricos, a média  $\mu$  e o desvio padrão  $\sigma$ . Algumas áreas importantes são:

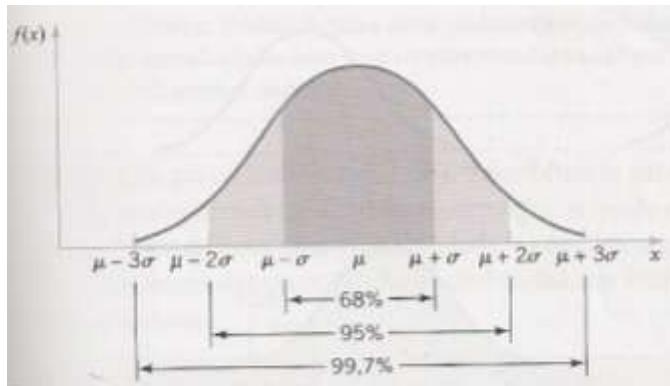


Figura 2 - Probabilidades associadas à distribuição normal

Para cada valor de  $\mu$  e  $\sigma$  temos uma curva de distribuição de probabilidade. Porém, para se calcular áreas específicas, faz-se uso de uma distribuição particular: a "distribuição normal padronizada". Para obter tal distribuição, isto é, quando se tem uma variável  $X$  com distribuição normal com média  $\mu$  diferente de 0 (zero) e/ou desvio padrão  $\sigma$  diferente de 1 (um), denotamos  $N(\mu, \sigma)$  à curva Normal, e devemos reduzi-la a uma variável  $Z$ .

Para o caso em questão, conhecemos a média e o desvio padrão das grandezas a serem analisadas, e tentaremos controlar o erro de amostragem colocando o nível de confiança ( $p$ ) para 95%, aumentando a chance desse intervalo conter a verdadeira média dos dados, dessa forma devemos somar e subtrair dois desvios padrão da média ( $2\sigma$ ).

Para então poder definir o intervalo de confiança é preciso encontrar o valor de  $Z$  correspondente a probabilidade descrita acima na tabela de distribuição normal. O  $Z$  que a tabela fornece é  $Z = 1,96$ .

Previamente é importante declarar que todos os cálculos e gráficos gerados neste trabalho, pertencem a uma série de dados que foram coletados em ensaios do motor no banco de provas, utilizando como combustível para impulsivar estes testes E100, ou seja, etanol puro.

Dessa forma se calcula o intervalo de confiança da seguinte maneira:

$$IC_{95\%}(x) \Rightarrow (\mu - Z\sigma < \mu < \mu + Z\sigma) = 1 - \alpha$$

Rotação se restringe a condições de 1750 e 2750 rpm, aquisitadas pelo encoder a uma taxa de 1 medições por segundo.

Tabela 1 - Dados de Rotação

Rotação (rpm)	Média	Desvio Padrão
1750	1749,5	3,5433

2750	2756	4,4774
------	------	--------

Portanto, para 1750 rpm e 2750 rpm:

$$IC_{95\%}(n, 1750\text{ rpm}) = n(1742,6, 1756,5)$$

$$IC_{95\%}(n, 2750\text{ rpm}) = n(2747,2, 2764,8)$$

O torque nos ensaios se restringe a condições de 9, 15, 25 e 65 Nm, aquisitados pela flange de torque, que coleta os dados a uma taxa de 1 medições por segundo.

Tabela 2 - Dados de Torque

Torque (Nm)	Média	Desvio Padrão
9	9,93	0,189
15	16,8	0,17
25	26,7	0,197
25	25,9	0,166
65	69	0,463

Portanto, para 9Nm, 15Nm, 25Nm, 25Nm, 65Nm:

$$IC_{95\%}(T, 9\text{ Nm}) = T(9,56, 10,3)$$

$$IC_{95\%}(T, 15\text{ Nm}) = T(16,4, 17,1)$$

$$IC_{95\%}(T, 25\text{ Nm}) = T(26,3, 27,1)$$

$$IC_{95\%}(T, 25\text{ Nm}) = T(25,6, 26,3)$$

$$IC_{95\%}(T, 65\text{ Nm}) = T(68,1, 69,9)$$

A Potência é justamente calculada pela relação de rotação e torque ( $P=T*n$ ).

Tabela 3 - Dados de Potência

Potência (kW)	Média	Desvio Padrão
1,65	1,82	0,0348
2,75	3,07	0,0323
4,58	4,9	0,0379
7,2	7,48	0,0497
18,7	19,9	0,153

Portanto, para 1750rpm e 9Nm, 1750rpm e 15Nm, 1750rpm e 25Nm, 2750rpm e 25Nm e por fim 2750rpm e 65Nm:

$$IC_{95\%}(P, 1750\text{ rpm} e 9\text{ Nm}) = P(1,75, 1,88)$$

$$IC_{95\%}(P, 1750\text{ rpm} e 15\text{ Nm}) = P(3,01, 3,13)$$

$$IC_{95\%}(P, 1750\text{ rpm} e 25\text{ Nm}) = P(4,82, 4,97)$$

$$IC_{95\%}(P, 2750\text{ rpm} e 25\text{ Nm}) = P(7,39, 7,58)$$

$$IC_{95\%}(P, 2750\text{ rpm} e 65\text{ Nm}) = P(19,6, 20,2)$$

Para o consumo específico de combustível que depende do consumo instantâneo de combustível e da potência em unidade de energia, temos:

Tabela 4 - Dados do Consumo específico de combustível

CE (g/kWh)	Média	Desvio Padrão
622	676	13,5
481	518	5,63
406	438	3,55
425	458	2,39
335	361	3,18

Portanto, para 1750rpm e 9Nm, 1750rpm e 15Nm, 1750rpm e 25Nm, 2750rpm e 25Nm e por fim 2750rpm e 65Nm:

$$IC_{95\%} (CE, 1750\text{rpm} \text{ e } 9\text{Nm}) = CE(650, 703)$$

$$IC_{95\%} (CE, 1750 \text{ rpm} \text{ e } 15\text{Nm}) = CE(507, 529)$$

$$IC_{95\%} (CE, 1750\text{rpm} \text{ e } 25\text{Nm}) = CE(431, 445)$$

$$IC_{95\%} (CE, 2750\text{rpm} \text{ e } 25\text{Nm}) = CE(453, 462)$$

$$IC_{95\%} (P, 2750 \text{ rpm} \text{ e } 65\text{Nm}) = P(354, 367)$$

### Incerteza de medição

A palavra “incerteza” no literal significa dúvida, e no caso do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento associado ao valor da grandeza a ser medida.

Ao ser realizada a medição de uma grandeza física a incerteza de medição declara dúvida acerca da confiabilidade e da qualidade do resultado daquela medição feita por um equipamento. Assim, é a medida utilizada para se avaliar a qualidade de uma medição e quanto maior for a incerteza, menor será a confiabilidade do resultado.

Incerteza de medição pode ser definida também como o parâmetro associado ao resultado da medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem ser atribuídos ao mensurando.

Como qualquer medida experimental, essa contém erros, que vêm da exatidão ou precisão do instrumento, ou até mesmo da flutuação estatística dos dados (desvio padrão). Quando se faz medições a fim de chegar indiretamente a outras grandezas, essas incertezas precisam ser levadas em conta.

A incerteza é um conceito chave para análise de resultados, pois em qualquer série de medições podemos ter variação de resultados em que não conseguimos controlar, por isso a medição sempre está sujeita a inconstância. Os resultados que não apresentam a indicação da incerteza associada aquele valor, não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência.

Mediante esse conceito é importante destacar a diferença entre incerteza e erro. A incerteza é um conceito com muito mais aplicabilidade que o conceito de erro, pois o erro depende de sabermos o valor verdadeiro daquilo que estamos medindo. Diferentemente da

incerteza que depende de um conjunto de medidas e que deve ser calculada sempre, até mesmo quando não temos nenhuma ideia do valor verdadeiro da medição.

Os valores de incerteza de medição calculados a seguir, foram desenvolvidos para serem replicados para qualquer outra condição imposta, seja ela, a utilização de diferentes misturas de combustível, arranjos de injeção, condição de rotação, torque e etc., sendo necessário apenas a alimentação dos dados alterados na fórmula padrão desenvolvida para cada grandeza.

As rotações dos testes, portanto dividem-se em duas faixas: 1750rpm e 2750rpm, variando as condições de torque e de combustíveis. A incerteza expandida (U), que é a incerteza padrão (u) multiplicada por um fator de abrangência (k) igual a 1,96, que será explicado na sequência, se dá então:

Tabela 5 - Incerteza de medição da Rotação

Incerteza de Medição para Rotação
$(1750 \pm 8,750)$ rpm
$(2750 \pm 13,75)$ rpm

Temos que as faixas de torque são: 9Nm, 15Nm, 25Nm e 65Nm, alterando a rotação para algumas. Segue então a tabela de incerteza expandida (U) do torque:

Tabela 6 - Incerteza de medição do Torque

Incerteza de Medição para Torque
$(9,0 \pm 0,68)$ Nm
$(15,0 \pm 0,72)$ Nm
$(25,0 \pm 0,8)$ Nm
$(25,0 \pm 0,8)$ Nm
$(65,0 \pm 1,12)$ Nm

Diferentemente da rotação e do torque que são medidos através de equipamentos dedicados a essas grandezas, a potência se trata de um dado que depende justamente destes dois valores:  $P=n*T$ , onde (n) rotação e (T) torque.

Para a potência então calculamos a incerteza padrão combinada (uc), onde este resultado é obtido por meio da propagação dos valores de incerteza padrão (u) da rotação e do torque

A Incerteza padrão combinada - uc, que é a incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido a partir dos valores de outras grandezas, é igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos.

Sabendo que a potência é calculada pela multiplicação do torque pela rotação, a fórmula para calcular a incerteza padrão combinada da potência fica:

$$u^2(P) = \left(\frac{\partial P}{\partial n}\right)^2 * u^2(n) + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)^2 * u^2(T)$$

Resolvendo esta equação encontramos a então a incerteza padrão combinada (uc) da potência.

A passagem de Incerteza padrão combinada para Incerteza expandida, faz-se pela aplicação do Fator de abrangência (K). Mais especificamente, U é interpretado como definindo um intervalo em torno do resultado de medição que abrange uma extensa fração p da

distribuição de probabilidade caracterizada por aquele resultado e sua incerteza-padrão combinada, sendo  $p$  a probabilidade de abrangência ou nível da confiança do intervalo.

$$U = K * u(P)$$

Como desejamos definir a incerteza do parâmetro com o mesmo nível de confiança de 95%, devemos assim multiplicar o valor do fator de abrangência correspondente a esta probabilidade pela incerteza padrão combinada encontrada.

Dessa forma, segundo a tabela abaixo retirada da norma ISO GUM 2008 Avaliação de dados de medição – Guia para a expressão de incerteza de medição, idealizada pelo inmetro,  $k$  correspondente a probabilidade descrita é igual a 1,96:

Tabela 7 - Fator de abrangência correspondente ao nível de confiança

Nível de confiança $p$ (por cento)	Fator de abrangência $k$
68,27	1
90	1,645
95	1,96
95,45	2
99	2,576
99,73	3

O consumo específico de combustível (CE) indica uma medida de eficiência de um motor para transformar combustível em energia mecânica e é expresso como a quantidade de combustível a consumir (em gramas), para obter uma certa potência em quilowatts (kW), durante uma hora (g / kWh).

O consumo específico representa o consumo mássico de combustível por unidade de trabalho de saída. É um indicador utilizado na observação do comportamento em diferentes regimes de funcionamento (rotação e carga) e na comparação de diferentes combustíveis.

Dessa forma para se calcular o consumo específico de combustível dependemos dos dados de consumo de combustível em gramas por hora, obtido através do equipamento medidor de vazão – Coriolis e potência em unidade de energia (quilowatt).

$$CE \left( \frac{g}{kW \cdot h} \right) = \frac{Gf \left( \frac{g}{h} \right)}{P (kW)}$$

Onde:

CE = Consumo específico de Combustível;

Gf = Consumo de Combustível;

P = Potência em unidade de energia.

A Incerteza padrão combinada -  $uc$ , que é a Incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido a partir dos valores de outras grandezas, é igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos.

$$u^2(CE) = \left( \frac{\partial CE}{\partial Gf} \right)^2 * u^2(Gf) + \left( \frac{\partial CE}{\partial P} \right)^2 * u^2(P)$$

Resolvendo esta equação encontramos a então a incerteza padrão combinada (uc) do consumo específico de combustível.

A passagem de Incerteza padrão combinada para Incerteza expandida, faz-se pela aplicação do fator de abrangência (K) ( $U = K * u(CE)$ ). O nível de confiança requerido para definir o intervalo da incerteza é de 95%, ou seja, devemos multiplicar a incerteza padrão combinada pelo  $k = 1,96$ .

Portanto, a incerteza apresentada foi obtida através da multiplicação da incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência  $k = 1,96$ , proporcionado uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

Descrito então o processo de cálculo necessário para encontrar a incerteza de medição correspondente a cada grandeza, a seguinte tabela traz consigo em formato resumo o intervalo correspondente a cada incerteza para cada condição e equipamento, como também o intervalo de confiança dos dados adquiridos, desenvolvidos neste trabalho, possibilitando assim maior facilidade em comparar e interpretar os resultados.

Tabela 8 - Tabela resumo de todos os cálculos

	Condições	Intervalo de Confiança	Incerteza de Medição
Rotação (rpm) -	1750	(1742,6 , 1756,5)	$(1750,0 \pm 8,7)$
Encoder EN15	2750	(2747,2 , 2764,8)	$(2750,0 \pm 13,7)$
	9	(9,56 , 10,3)	$(9,0 \pm 0,7)$
Torque (Nm) -	15	(16,4 , 17,1)	$(15,0 \pm 0,7)$
Flange de torque	25	(26,3 , 27,1)	$(25,0 \pm 0,8)$
28321	25	(25,6 , 26,3)	$(25,0 \pm 0,8)$
	65	(68,1 , 69,9)	$(65,0 \pm 1,1)$
	1750 - 9	(1,75 , 1,88)	$(1,82 \pm 0,14)$
	1750 - 15	(3,01 , 3,13)	$(3,07 \pm 0,15)$
Potência (kW)	1750 - 25	(4,82 , 4,97)	$(4,89 \pm 0,16)$
	2750 - 25	(7,39 , 7,58)	$(7,48 \pm 0,24)$
	2750 - 65	(19,6 , 20,2)	$(19,90 \pm 0,36)$
Consumo	1750 - 9	(650 , 703)	$(676,4 \pm 51,9)$
específico de	1750 - 15	(507 , 529)	$(518,4 \pm 25,4)$
combustível	1750 - 25	(431 , 445)	$(438,4 \pm 14,2)$
(g/kWh) -	2750 - 25	(453 , 462)	$(457,8 \pm 14,9)$
Coriolis	2750 - 65	(354 , 367)	$(360,7 \pm 6,5)$

## Conclusão

Este trabalho de pesquisa de iniciação científica tinha como um dos seus principais objetivos, gerar maior embasamento a respeito das grandezas físicas avaliadas nos diversos testes, através de uma medida quantitativa que gera um intervalo possibilitando posterior avaliação da qualidade e confiança. Para isso os conceitos empregues para calcular esse intervalo utilizado para comparação entre valores de mesma grandeza ou de outras são a incerteza de medição e intervalo de confiança.

O projeto estuda as diferenças geradas no comportamento do motor quando se faz uso de diferentes misturas de combustível e de arranjos de injeção, dessa forma quando se desenvolve um método para o cálculo de incerteza de medição e intervalo de confiança, se torna possível replicá-los sem exceções para todas as condições de testes que o motor será imposto.

Usando como base os dados de uma condição de teste, em cima dela foi desenvolvido os métodos de como deveria ser gerado as equações para o cálculo dos intervalos de validação

e comparação dos dados de Rotação, Torque, Potência e Consumo específico de combustível. A análise breve dos resultados deste trabalho, demonstra que os métodos de cálculos desenvolvidos e aplicados possibilitaram fundamentos ao projeto de pesquisa, e entendimento se os aperfeiçoamentos até então obtidos constavam de dados confiáveis e que poderiam ser publicados e apresentados suportados por métodos elaborados para o projeto em específico.

Logo, este trabalho traz para a projeto de pesquisa FAPESP 2013/50239- 3 que participam o IMT, ITA, EPUSP e UNICAMP, patrocinado pela PSA Peugeot Citroën, resultados conclusivos a respeito de uma grandeza com base nas incertezas associadas a cada instrumento de medição e a propagação de erros de grandeza de cada um, com uma probabilidade X de que a média dos dados estará dentro de uma faixa de valores confiáveis, e os equipamentos de medições com qualidade no que diz respeito a repetição de medidas, para que não haja discrepâncias extravagantes entre testes devido à má leitura feita pelo equipamento.

## Referências Bibliográficas

ARA, Amilton Braio; MUSSETTI, Ana Villares; SCHNEIDERMAN, Boris. Introdução à estatística. São Paulo, SP: IMT/Edgard Blücher, 2003. 152 p. ISBN 8521203209.

CARLOS, José. Análise de um sistema de medição. Disponível em:  
<<http://www.gepeq.dep.ufscar.br/arquivos/MSA%20-%20Apostila%20-%202018112013.pdf>>  
Acesso em: 01 de junho de 2017

COSTA NETO, Pedro Luiz de Oliveira. Estatística. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 264 p.  
EFÍSICA, Ifusp. Propagação de incertezas. Disponível em:  
<<http://efisica.if.usp.br/mecanica/universitario/incertezas/propagacao/>> Acesso em: 03 de março de 2017

IFUSP. Roteiro de cálculo de incertezas análise de experimentos virtuais. Disponível em:  
<[http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/guias/roteiro\\_incerezas\\_2015.pdf](http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/guias/roteiro_incerezas_2015.pdf)> Acesso em: 02 de março de 2017

IMT. Tabelas estatísticas e formulário. Disponível em:  
<<http://moodle.maua.br/pluginfile.php/244/course/section/5813/Formulario.pdf>> Acesso em: 5 de abril de 2017

ISO GUM JCGM 100:2008. Avaliação de dados de medição – Guia para expressão de incerteza de medição. International Organization for Standardization, 2008

LIMA, Junior. Medições e propagação da incerteza. Disponível em:  
<[http://www.if.ufrgs.br/fis1258/index\\_arquivos/TXT\\_06.pdf](http://www.if.ufrgs.br/fis1258/index_arquivos/TXT_06.pdf)> Acesso em: 23 de fevereiro de 2017

LIMA, Junior. Os conceitos de erro e incerteza. Disponível em:  
<[http://www.if.ufrgs.br/fis1258/index\\_arquivos/TXT\\_02.pdf](http://www.if.ufrgs.br/fis1258/index_arquivos/TXT_02.pdf)> Acesso em: 23 de fevereiro de 2017

MONTGOMERY, Douglas C; RUNGER, George C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013. 521 p. ISBN 9788521619024.

PORTAL ACTION. Incerteza de Medição. Disponível em:  
<<http://www.portalaction.com.br/incerteza-de-medicao>> Acesso em: 23 de fevereiro de 2017

PORTAL ACTION. Intervalo de Confiança. Disponível em:  
<<http://www.portalaction.com.br/inferencia/intervalo-de-confianca>> Acesso em: 25 de abril de 2017