



A Metrologia e o Lucro Social

Rodrigo Costa-Felix
Laboratório de Ultrassom do Inmetro

- Sem metrologia, a vida é inviável em todos os seus aspectos sociais e econômicos
- Segundo Lord Kelvin (1824-1907), cientista britânico nascido na Irlanda:

“Quando você pode medir e expressar em números, você sabe algo sobre o assunto; mas quando você não consegue expressar em números, seu conhecimento é escasso e insatisfatório.”

“When you can measure what you are speaking about and express it in numbers you know something about it; but when you cannot express it in numbers your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind.”

MEDIÇÃO É A ESSÊNCIA DO LUCRO SOCIAL

Grandezas

- **Grandezas de base**

Grandeza de base		Símbolo da dimensão
Nome	Símbolo	
comprimento	L, l, x, r, etc	L
massa	m	M
tempo	t	T
corrente elétrica	I, i	I
temperatura termodinâmica	T	Θ
quantidade de substância	n	N
intensidade luminosa	I_v	J

Grandezas derivadas (Q): $\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta \rightarrow$ expoentes são números inteiros pequenos

Unidades do SI

- Sistema Internacional de Unidades (SI)

Grandeza de base	Unidade de base	
	Nome	Símbolo
comprimento	metro	m
massa	quilograma	kg
tempo	segundo	s
corrente elétrica	ampere	A
temperatura termodinâmica	kelvin	K
quantidade de substância	mol	mol
intensidade luminosa	candela	cd

Unidades do SI

- Múltiplos e submúltiplos

Fator	Prefixo	
	Nome	Símbolo
10^{24}	yotta	Y
10^{21}	zetta	Z
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	quilo	k
10^2	hecto	h
10^1	deca	da

Fator	Prefixo	
	Nome	Símbolo
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z
10^{-24}	yocto	y

Definindo a METROLOGIA



- **Metrologia**: ciência da medição e suas aplicações.
 - A metrologia engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação
- Quem estuda os princípios físicos da natureza pratica **metrologia**
- Quem desenvolve um método ou procedimento de medição pratica **metrologia**
- Quem realiza uma medição pratica **metrologia**
- Quem usa os resultados de uma medição pratica **metrologia**
- Quem toma decisões legais com base em um resultado de medição pratica **metrologia**
 - Autuação ou “multa” por excesso de velocidade de um veículo ou de carga de um caminhão, por exemplo

Vocabulário Internacional de Metrologia



- **1ª Edição Luso-Brasileira**
 - Equivale ao JCGM 200:2012
 - http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf
- **Baseada na 2ª Edição Brasileira (2009)**
- **Portaria Inmetro nº 232 de 08/Mai/2012**
 - http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/vim_2012.pdf
- **Autores**
 - **Brasil:** Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)
 - **Portugal:** Instituto Português da Qualidade (IPQ)



Conceitos em metrologia

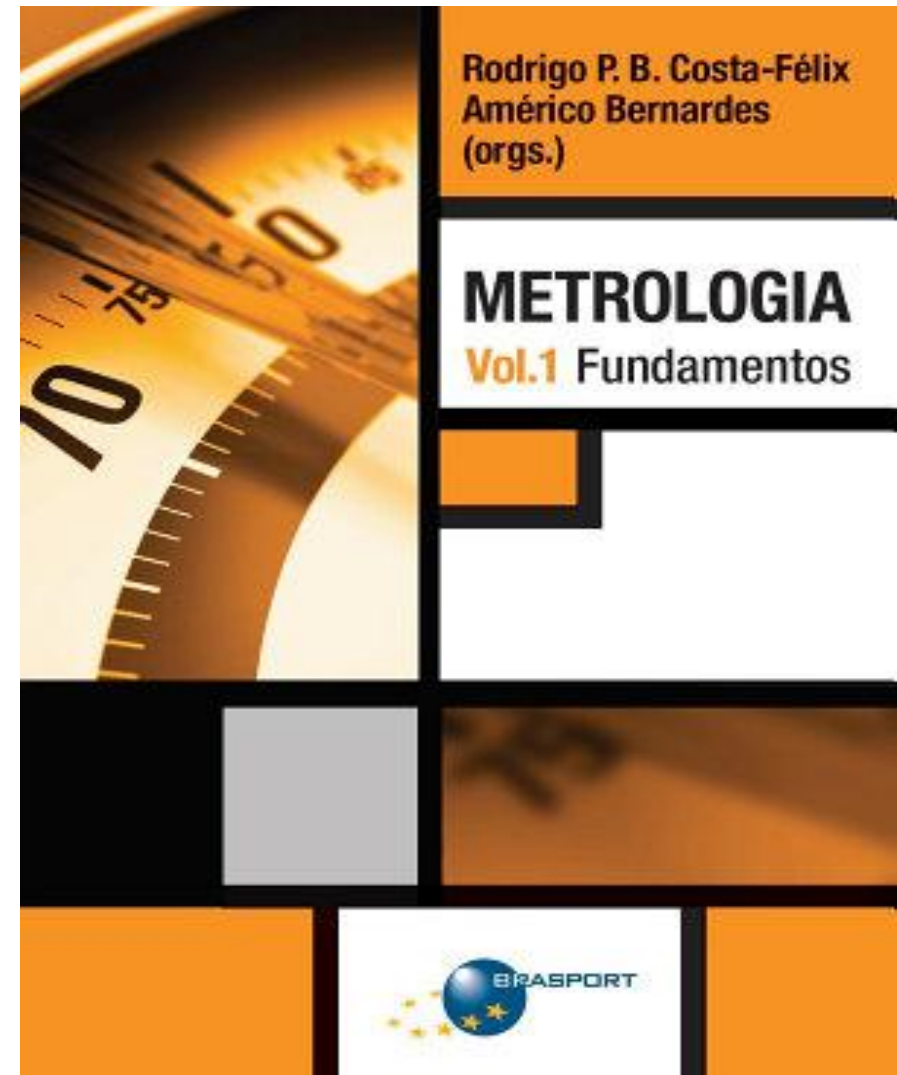


- **Metrologia Vol.1: Fundamentos**

- **COSTA-FELIX, R.P.B.; BERNARDES, A.T. (Org.). Metrologia Vol. 1: Fundamentos. 1a. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2017. 350 p.**

- ISBN 978-85-7452-834-2 (impresso)
- ISBN 978-85-7452-835-9 (e-book)

- **Disponível no Google Play, na Amazon, na Saraiva etc.**
- **15 capítulos sobre diversos temas relacionados à metrologia (VIM, SIM, incerteza de medição, metrologia legal, história da metrologia, AC, PI etc.)**



Lucro social



- **OFICINA DE LUCRO SOCIAL.** Ferramenta de transparência e gestão no setor público.
 - **OZANAN, BALLERINI e COSTA-FELIX.** 1a. ed. Rio de Janeiro: Amazon, 2021. 134 p.
 - ISBN 979-8-51-051755-2 (impresso)
 - ASIN B095XNTXRL (eBook Kindle)
- Disponível na Amazon



Definindo a METROLOGIA



- **Metrologia**: ciência da medição e suas aplicações.
 - A metrologia engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação.

As únicas certezas que se pode ter ao fazer uma medição é que o resultado trará um erro e terá uma incerteza associada

- O trabalho do metrologista é (tentar) quantificar o erro, (tentar) estimar a incerteza da medição e (tentar) fazê-los compatíveis com o uso pretendido do resultado da medição



INCERTEZA DE MEDIÇÃO

e

ERRO DE MEDIÇÃO



- **Incerteza de medição**: parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.
 - A incerteza é gerada por (possíveis) variações dos resultados das medições realizadas
- **Erro de medição**: diferença entre o valor medido dum grandeza e um valor de referência
 - O erro está relacionado com o resultado final da medição (média de várias medições, por exemplo)
- **Valor de referência**: valor dum grandeza utilizado como base para comparação com valores de grandezas da mesma natureza
 - O valor de referência pode ser um valor verdadeiro dum mensurando, sendo nesse caso desconhecido
 - Caso seja um valor convencional, ele é conhecido

- Falta de conhecimento completo do mensurando
 - Modelo matemático incompleto
 - Influência das condições climáticas (ambientais) desconhecida ou imprevisível
- Instrumento de medição não apropriado (resolução, estabilidade, linearidade etc)
 - O instrumento de medição deve ser selecionado em função do uso pretendido
 - Necessária calibração do instrumento
- Pouca habilidade ou escasso treinamento do técnico executor
- Diversos outros fatores podem influenciar a dispersão dos resultados de medição e, em consequência, a estimativa da incerteza de medição

Incerteza – Influência do instrumento

- **Tarefa**: medir o comprimento de um lápis



- Possíveis instrumentos de medição

Palmo



Régua



Paquímetro



Incerteza – Influência do instrumento

- Características principais de cada instrumento

Palmo

Fácil de usar

Gratuito

Disponível a todo instante

Pouca resolução



Régua

Simples de usar

Barato

Boa resolução (1 mm)

Uso amador



Paquímetro

Utilização complexa

Caro

Ótima resolução (10 μm)

Uso profissional

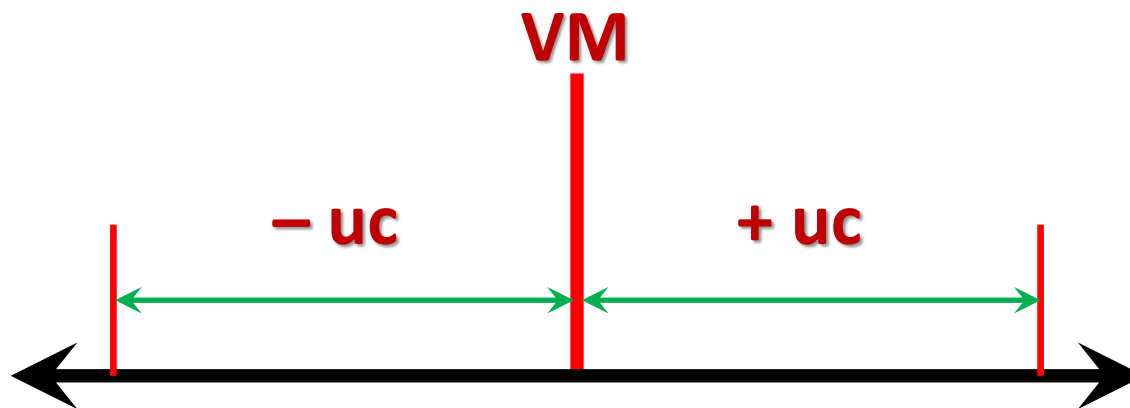


QUAL É O MELHOR INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO?

DEPENDE DO USO PRETENDIDO DO RESULTADO DA MEDIÇÃO

Representado a incerteza de uma medição

- Dispersão em torno de um resultado
 - Medições repetidas → resultado da medição é um valor médio
 - Quanto maior o número de repetições, mas “preciso” será o resultado e mais “caro” será o procedimento
 - A dispersão pode ser calculada por “desvio padrão da média”
 - Valor da Medição (valor medido) → VM
 - Incerteza combinada → uc



Incerteza expandida (U)

- Aumenta a probabilidade do valor verdadeiro estar compreendido entre $(VM \pm U)$
 - Probabilidade de abrangência $\rightarrow p$
 - Fator de abrangência $\rightarrow k$
 - $U = k \cdot uc$

VALORES TÍPICOS DE k

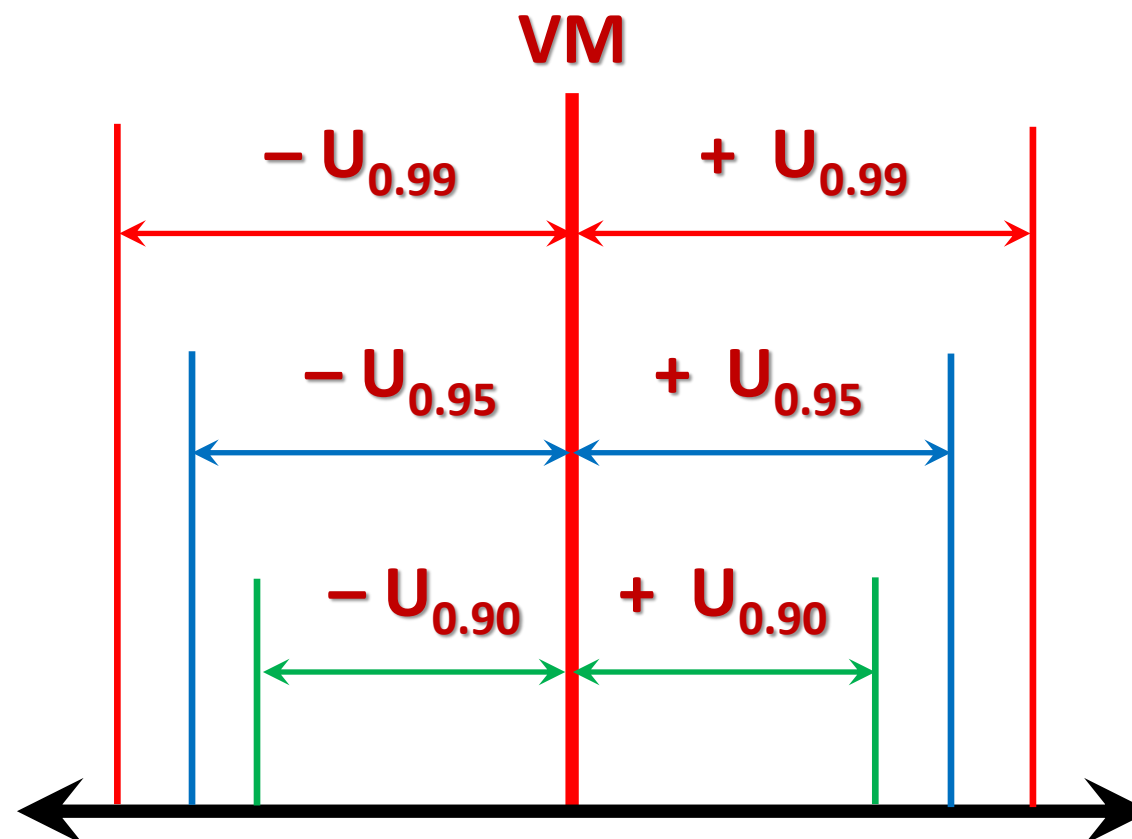
(distribuição normal bicaudal)

$$p = 0,90 \rightarrow k = 1,64$$

$$p = 0,95 \rightarrow k = 1,96$$

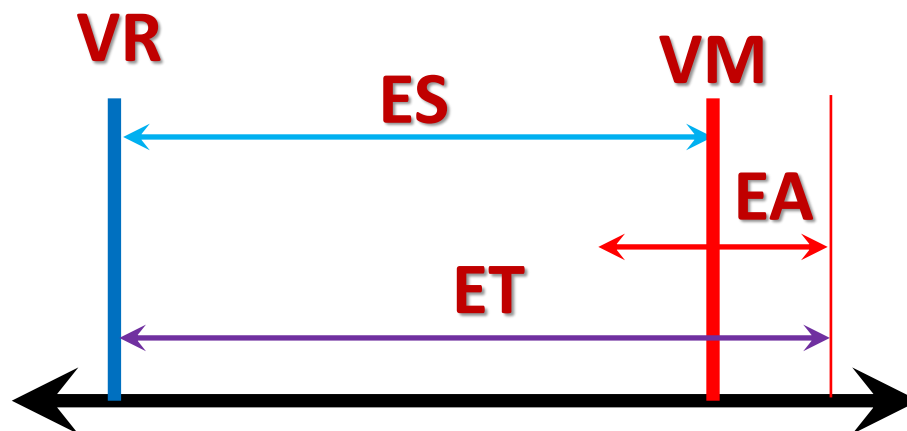
$$p = 0,99 \rightarrow k = 2,58$$

Probabilidade de abrangência (p)



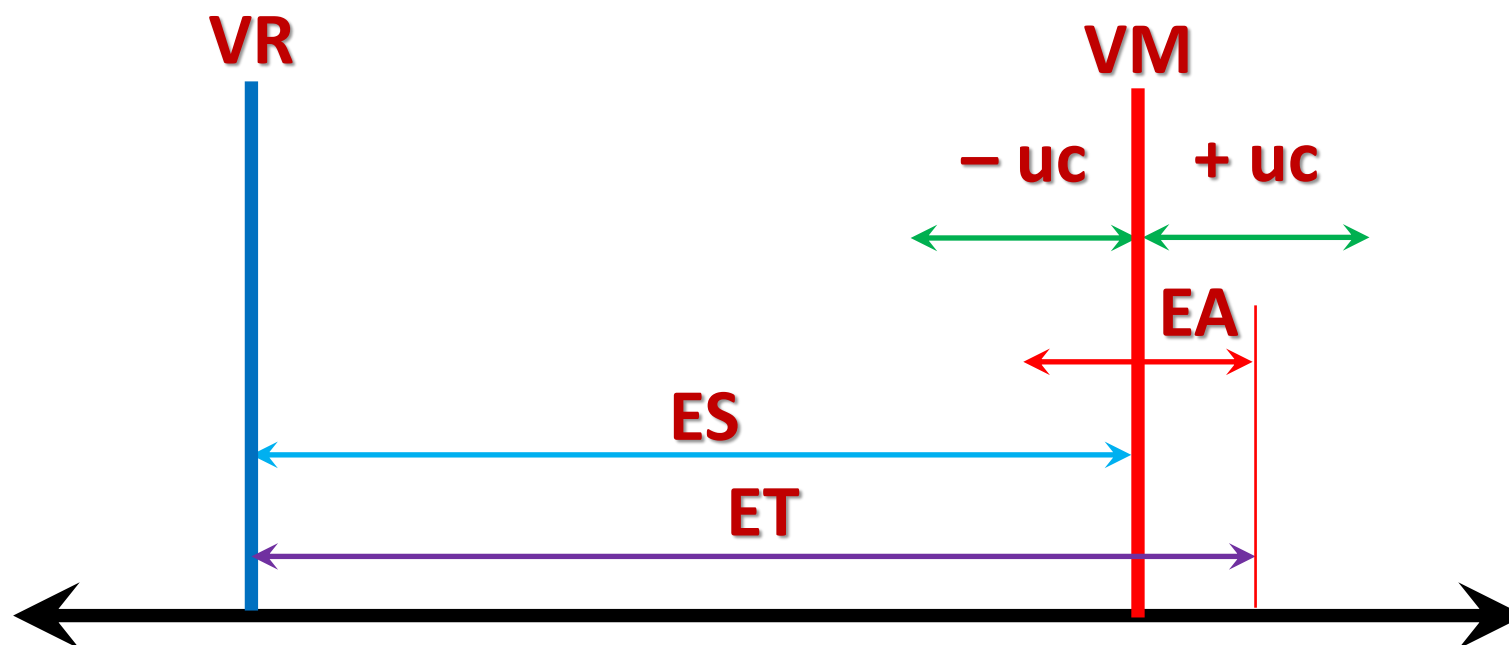
Erro (tendência)

- Diferença entre o valor medido (VM) e o valor de referência (VR)
 - O valor de referência pode ser um valor verdadeiro convencional (VVC) ou um valor verdadeiro (VV)
 - O VV é desconhecido (por definição)
 - Há erro aleatório (EA) e erro sistemático (ES) tal que Erro Total (ET) = ES + EA



Representado a incerteza e o erro

- Resultado completo de uma medição



Fundamentos da estatística → média

- Valor esperado ou medida de tendência central de uma variável aleatória

Média Aritmética

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i) = \frac{(x_1 + x_2 + \cdots + x_n)}{n}$$

Média Geométrica

$$\bar{x}_G = \left[\prod_{i=1}^n (x_i) \right]^{\frac{1}{n}} = (x_1 \times x_2 \times \cdots \times x_n)^{\frac{1}{n}}$$

Média Ponderada

$$\bar{x}_P = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i x_i)}{\sum_{i=1}^n (w_i)} = \frac{(w_1 x_1 + w_1 x_2 + \cdots + w_n x_n)}{(w_1 + w_2 + \cdots + w_n)}$$

Média Harmônica

$$\bar{x}_H = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_i} \right)} = \frac{n}{\left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \cdots + \frac{1}{x_n} \right)}$$

Fundamentos da estatística → desvio padrão

- Desvio padrão da população

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

- Desvio padrão amostral

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\begin{aligned} n = 30 &\rightarrow \sigma \cong 0,97 \times s \\ n = 50 &\rightarrow \sigma \cong 0,98 \times s \\ n = 100 &\rightarrow \sigma \cong 0,99 \times s \end{aligned}$$

- Desvio padrão de variável aleatória contínua

$$\sigma = \sqrt{\int_{\mathbb{R}} (x - \mu)^2 p(x) dx}; \quad \mu = \int_{\mathbb{R}} x p(x) dx$$

- **Avaliação de conformidade**: atividade para determinar se os requisitos especificados relativos a um produto, processo, sistema, pessoa ou organismo (de AC) são satisfeitos
 - BIPM JCGM 106:2012 – Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment
- Os requisitos especificados podem ser
 - O “peso” (deslocamento) mínimo de um veleiro de competição em determinada classe
 - A carga máxima que um caminhão pode suportar por eixo para garantir a segurança do tráfego rodoviário
 - A quantidade (mínima e máxima) de glicose no sangue para o paciente ser considerado saudável
 - A quantidade de álcool no sangue para ser imputada responsabilidade criminal ao motorista
 - A velocidade mínima para um avião decolar em segurança em função do seu deslocamento (“peso”)
 - A velocidade máxima permitida em uma determinada rodovia para minimizar riscos de acidente

Tolerância (de projeto ou requisitos da qualidade)



- Nos regulamentos que envolvem aspectos metrológicos, os valores limites (máximos ou mínimos) da grandeza de interesse são chamados de “tolerância”
- A tolerância não é “erro máximo admissível”, este sendo uma característica do sistema de medição e depende do procedimento de medição e da realização da medição (capacitação do técnico executor, condições ambientais, calibração do sistema de medição etc.)

A AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DEVE LEVAR EM CONTA A TOLERÂNCIA DO REQUISITO REGULADO E DO RESULTADO DA MEDIÇÃO, PORTANTO DO VALOR DA GRANDEZA MEDIDA E DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA AO RESULTADO DA MEDIÇÃO

Risco do Consumidor e Risco do Produtor



- **Risco (específico) do Consumidor** é a probabilidade de itens não conformes serem aceitos durante os ensaios de avaliação da conformidade
 - Risco à saúde, ao meio ambiente, à segurança e à qualidade de vida da população etc.
 - Também chamado de “falso positivo” na área da saúde
- **Risco (específico) do Produtor** é a probabilidade de itens em conformidade serem rejeitados durante o teste
 - Prejuízo financeiro direto, retrabalho, desperdício de material etc.
 - Conhecido como “falso negativo” na área da saúde
 - O “produtor” pode ser entendido como **Agente do Estado** responsável por uma regulação específica ou por fiscalização metrológica dos requisitos

Tabela de contingência de risco

- Matriz de probabilidade para tomada de decisão

		CONFORME	NÃO CONFORME	
ACEITO	REJEITADO	Probabilidade de ser <u>aprovado</u> no ensaio de AC	Probabilidade de ser <u>aprovado</u> no ensaio de AC	Risco do Consumidor (falso positivo)
		Probabilidade de ser <u>reprovado</u> no ensaio de AC	Probabilidade de ser <u>reprovado</u> no ensaio de AC	
		Risco do Produtor (falso negativo)		

“Essencialmente, todos os modelos estão errados, mas alguns podem ser úteis”



George Box

- **Mesmo assim (ou por isso mesmo), vamos estudar um modelo de análise de risco em AC**
 - Usando estatística
 - Usando a incerteza de medição
 - Calculando os riscos do consumidor e do produtor (ou do agente regulador)

Limites de tolerância e de aceitação

- Limites de aceitação são parte fundamental para adotar critérios de tomada de decisão em avaliação da conformidade

A → limite de aceitação (superior ou inferior, “U” ou “L”)

T → limite de tolerância (superior ou inferior, “U” ou “L”)

U → incerteza expandida ($k \times u_c$)

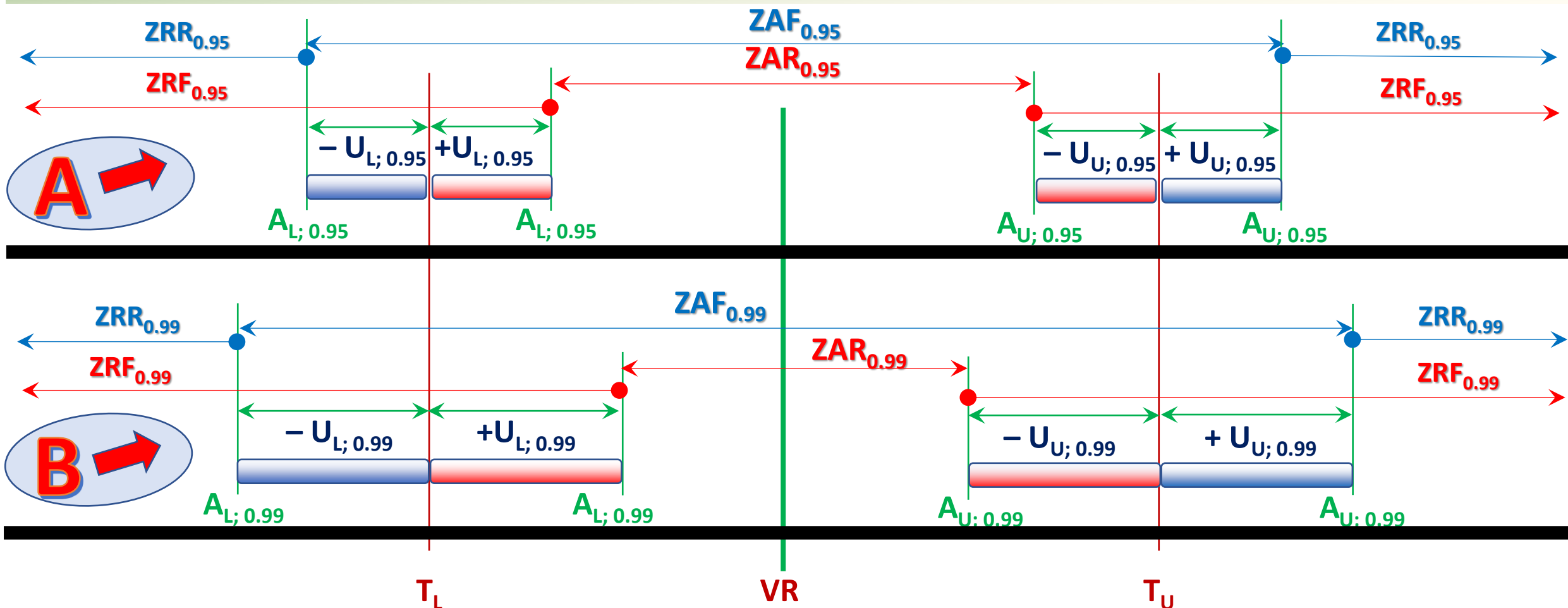


Os riscos do consumidor e do produtor variam!

Isso é culpa da incerteza ... e da confiança!!

- A probabilidade de abrangência define os limites de aceitação (restritos ou folgados)

$U_{0.95} \rightarrow$ incerteza expandida (95% de probabilidade); $U_{0.99} \rightarrow$ incerteza expandida (99% de probabilidade)

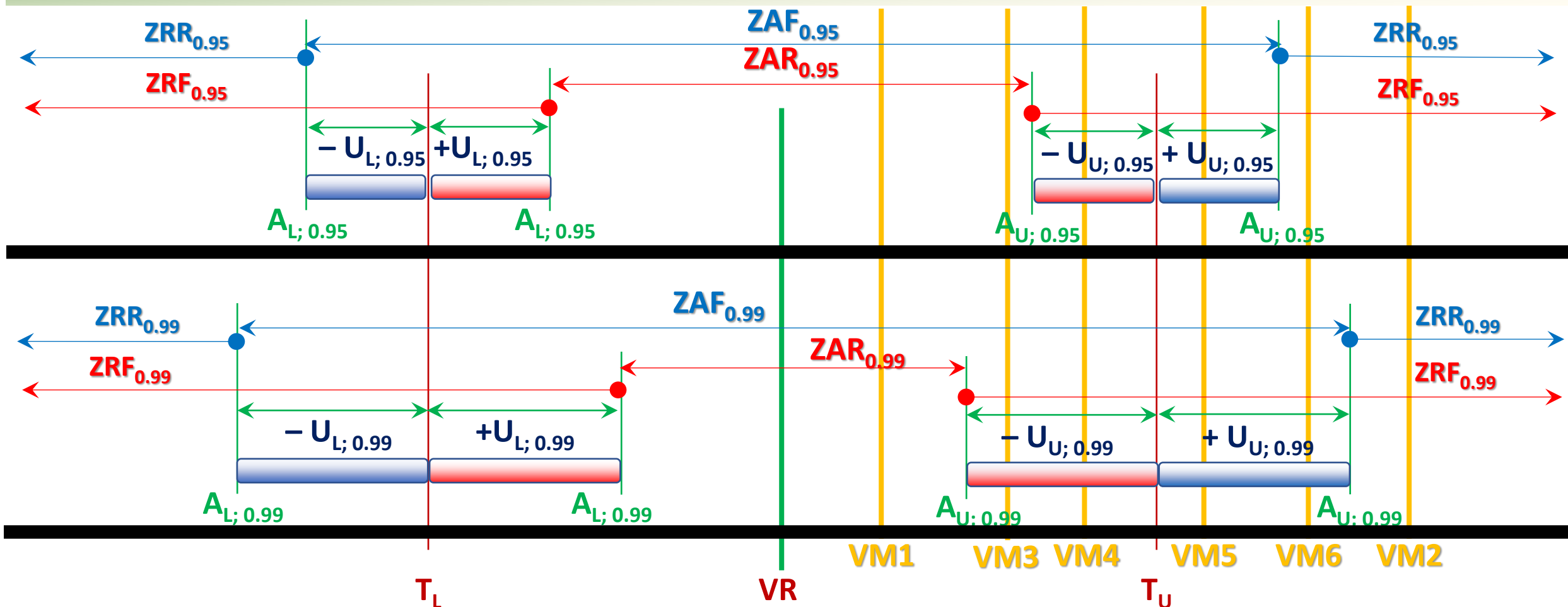


Os riscos do consumidor e do produtor variam!

Isso é culpa da incerteza ... e da confiança!!

- A probabilidade de abrangência define os limites de aceitação (restritos ou folgados)

$U_{0.95} \rightarrow$ incerteza expandida (95% de probabilidade); $U_{0.99} \rightarrow$ incerteza expandida (99% de probabilidade)



“Embora às vezes se afirme que as medições ‘não agregam valor’, isso só é verdade no caso de, *a priori*, haver 100% de certeza de que todos os componentes são produzidos dentro da especificação.”

Phillips, S.D.; Baldwin, J; Estler, W.T. Economics of measurement uncertainty and tolerances. In: Proceedings of the ASPE 2009 Summer Topical Meeting: The Economies of Precision Engineering, 2009

- **Exemplo**: um radar após um quebra mola bem “dimensionado” é desnecessário para medir se a velocidade está acima de um determinado limite



Um exemplo numérico

- **Grandeza:** velocidade de um veículo em uma via pública
- **Unidade:** km/h (aceita no SI embora não seja originária das grandezas de base)
- **Instrumento de medição:** medidor de velocidade de veículos automotores (ex.: radar)
- **Incerteza de medição:** [Caso 1: $u_c = 1\%$] [Caso 2: $u_c = 2\%$] [Caso 3: $u_c = 5\%$]
- **Risco do consumidor:** [Caso 1: $\overline{p_c} = 1\%$] [Caso 2: $\overline{p_c} = 0,1\%$]

Um exemplo numérico

- Tabela de probabilidade de conformidade e não conformidade

p_c	$\bar{p}_c$ ($1 - p_c$)	z (ou k) (single tailed)
0,80	0,20	0,84
0,90	0,10	1,28
0,95	0,05	1,64
0,99	0,01	2,33
0,999	0,001	3,09

- Risco do consumidor: $R_c = (1 - p_c) = \bar{p}_c$

Um exemplo numérico

- **Modelo matemático**

$$z = \frac{VM - T_U}{uc \cdot VM} \quad \longrightarrow \quad VM = \frac{T_U}{1 - uc \cdot z}$$

- $z \rightarrow$ estatística t-Student normalizada
- $VM \rightarrow$ valor medido (velocidade do veículo)
- $T_U \rightarrow$ limite de velocidade na via pública
- $uc \rightarrow$ incerteza de instrumento de medição empregado para medir VM

Um exemplo numérico

- Calculando a velocidade máxima permitida

- VM é a mínima velocidade medida para que se possa assegurar que menos 1 autuação em 100 ($\overline{p_c} = 0,01 = 1\%$) ou 1 autuação em 1000 ($\overline{p_c} = 0,001 = 0,1\%$) será aplicada erroneamente

CASO A: $T_U = 100$ km/h	$\overline{p_c} = 1\% \rightarrow z = 2,33$	$\overline{p_c} = 0,1\% \rightarrow z = 3,09$
uc = 1%	$VM = \frac{100}{1 - 0,01 \cdot 2,33}$	$VM = \frac{100}{1 - 0,01 \cdot 3,09}$
uc = 2%	$VM = \frac{100}{1 - 0,02 \cdot 2,33}$	$VM = \frac{100}{1 - 0,02 \cdot 3,09}$
uc = 5%	$VM = \frac{100}{1 - 0,05 \cdot 2,33}$	$VM = \frac{100}{1 - 0,05 \cdot 3,09}$

$$VM = \frac{T_U}{1 - uc \cdot z}$$

Um exemplo numérico

- Calculando a velocidade máxima permitida
 - VM é a mínima velocidade medida para que se possa assegurar que menos de 1 autuação em 100 ($\overline{p_c} = 0,01 = 1\%$) ou 1 autuação em 1000 ($\overline{p_c} = 0,001 = 0,1\%$) será aplicada erroneamente

CASO A: $T_U = 100$ km/h	$\overline{p_c} = 1\% \rightarrow z = 2,33$	$\overline{p_c} = 0,1\% \rightarrow z = 3,09$
uc = 1%	VM $\cong$ 102,4 km/h	VM $\cong$ 103,2 km/h
uc = 2%	VM $\cong$ 105,0 km/h	VM $\cong$ 106,6 km/h
uc = 5%	VM $\cong$ 113,2 km/h	VM $\cong$ 118,3 km/h

$$VM = \frac{T_U}{1 - uc \cdot z}$$

**“A VITÓRIA VEM DA LUTA
A LUTA VEM DA FORÇA
A FORÇA DA UNIÃO”**

Rodrigo Costa-Felix
rpfelix@inmetro.gov.br

(21) 2679-9720 / (21) 99636-8586



21 2679-9741



www.asmetro.org.br



Bibliografia complementar