

**Impact on pollution emissions of the flow measurement uncertainties in  
real drive emission meters**

**Felipe Jaloretto da Silva  
Danilo Gomes Dellaroza  
Igor Faust Ostapiuk**

*Palestra apresentada SIMPÓSIO  
INTERNACIONAL DE ENGENHARIA  
AUTOMOTIVA, 31., 2024, São Paulo. 29  
slides.*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.  
**PRODIBIDO A REPRODUÇÃO**

XXXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva



**SIMEA**  
**2024**

*31st International Symposium of Automotive Engineering*

# A MOBILIDADE **VERDE**

E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

*- Green Mobility and Energy Transition in Brazil -*

**21 E 22 DE AGOSTO**

**21<sup>ST</sup> AND 22<sup>ND</sup> AUGUST**

XXXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva



**SIMEA**  
**2024**

*31st International Symposium of Automotive Engineering*

# Impacto da Incerteza de Medição de Vazão nas Emissões de Poluentes em Ensaios em Condições Reais de Uso

**dea** 40 ANOS  
DE EVOLUÇÃO

# Impacto da Incerteza de Medição de Vazão nas Emissões de Poluentes em Ensaios em Condições Reais de Uso

## Estudo de Incertezas para Veículos Pesados

Felipe Jaloretto da Silva

Danilo Gomes Dellarozza

Igor Faust Ostapiuk



Fonte: Autor

# AGENDA

1 – Introdução e Motivação

2 – Metodologia

3 – Resultados

4 - Conclusão

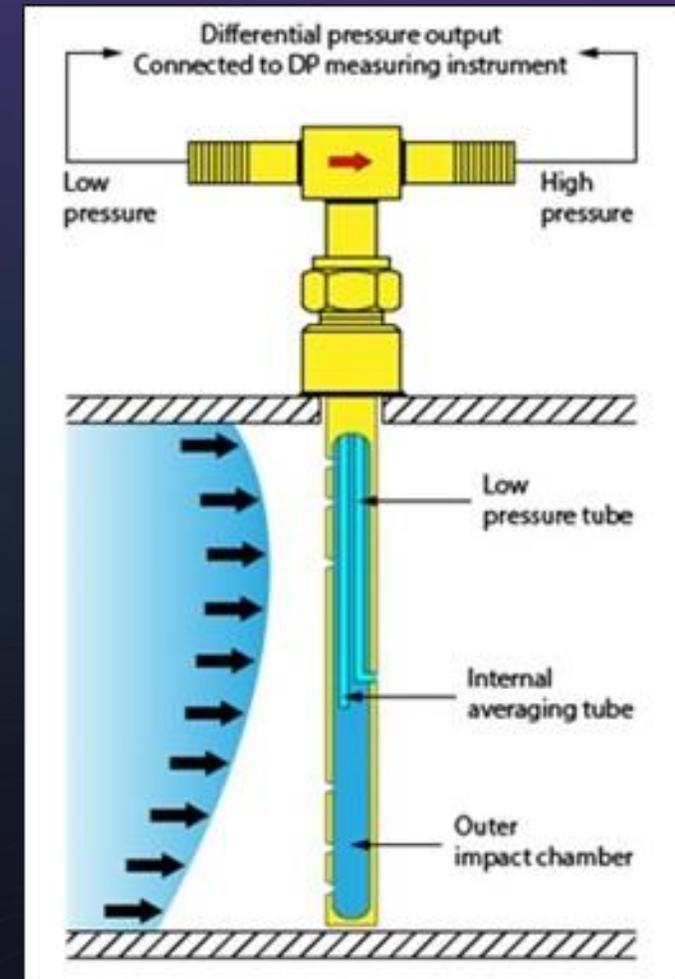
# 1. Introdução e Motivação

# 1. Introdução e Motivação

- Regulamentações cada vez mais restritas às montadoras em termos ambientais
- 2023 - Ensaio de Emissões em Condições Reais de Uso mandatório para novas homologações de veículos pesados no Brasil
- Equipamento de Ensaio – PEMS (*Portable Emission Measurement System*)

# 1. Introdução e Motivação

- Medição de Vazão de Escapamento através do Tubo de Pitot
- Vazão Variável, alta temperatura e baixa densidade do fluido dificultam a medição de pressão
- O Tubo de Pitot de média é um método adequado para esta aplicação?
- Qual o impacto da Incerteza da Medição de Vazão no Cálculo de Emissões no ensaio de Emissões em Condições de Uso?



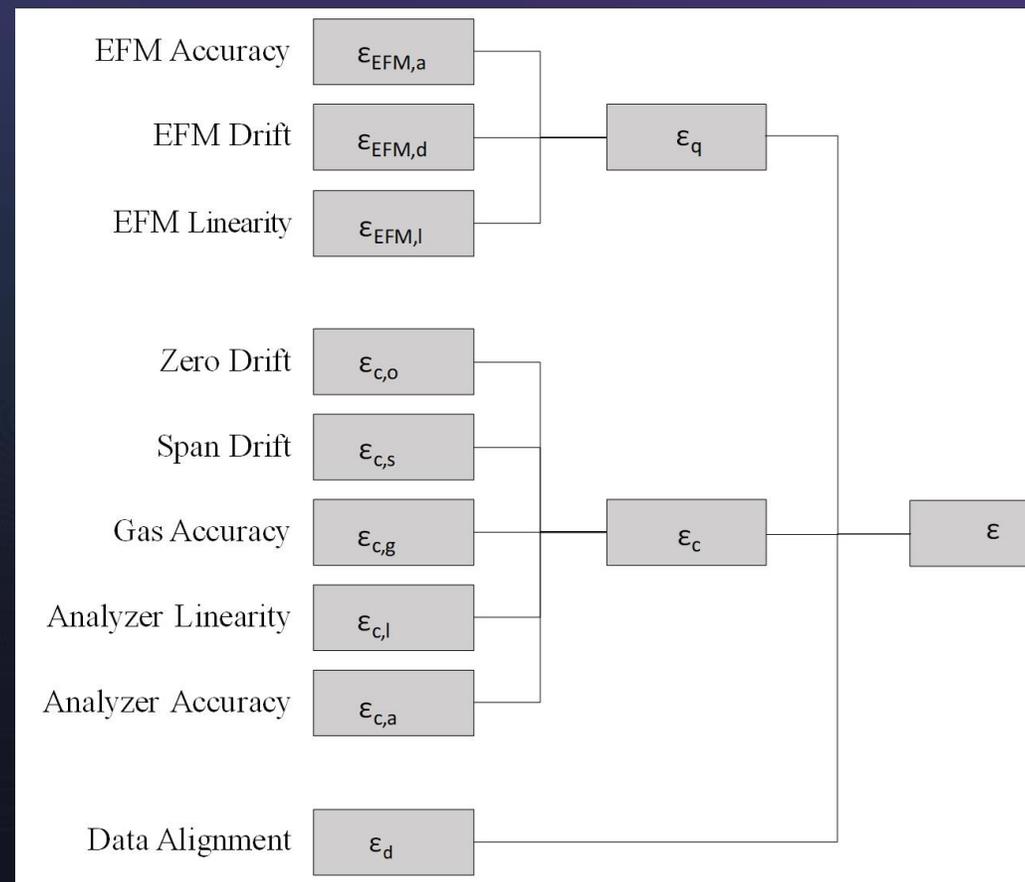
Fonte:

<https://instrulearning.com/flow/pitot-tube-flow-meter/>

# 2. Metodologia

## 2. Metodologia

- Baseada em estudos anteriores da União Europeia
- As incertezas não relacionadas a vazão foram mantidas
- Estrutura de cálculo atualizada



Fonte: GIECHASKIEL, B. et al (2020) [4]

## 2. Metodologia

- Cálculo da Massa das Emissões Gasosas:

$$m = u_{gas} \times \sum_{i=1}^{i=n} c_{gas,i} \times q_{mew,i} \times \frac{1}{f}$$

$m$  = Massa (g)

$u_{gas}$  = Relação entre a densidade do gás analisado e a densidade do gás de escapamento (Constante definida por norma)

$c_{gas}$  = Concentração Instantânea do Gás (ppm)

$q_{mew}$  = Vazão Instantânea de Escapamento (kg/s)

$f$  = Frequência de Aquisição

$n$  = Número de Medições

## 2. Metodologia

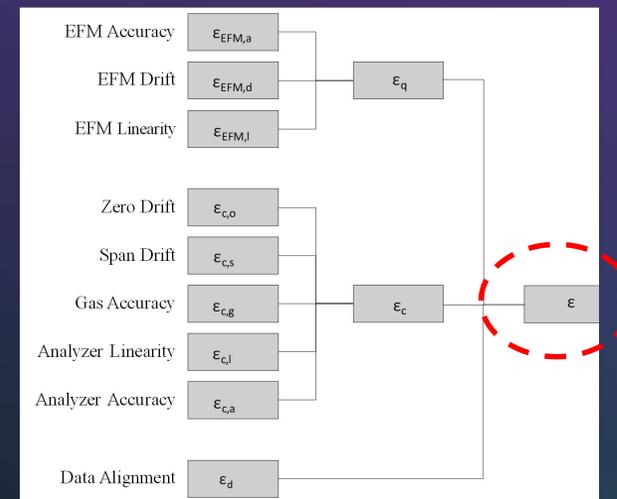
### ■ Incerteza Global das Emissões Gasosas

$$e = \sqrt{e_q^2 + e_c^2 + e_d^2}$$

$e_q$  = Incerteza da Medição de Vazão

$e_c$  = Incerteza da Medição de Concentração

$e_d$  = Incerteza Padrão no Alinhamento de Dados (Vazão e Concentração) – definido como 1,5% de acordo com a literatura



## 2. Metodologia

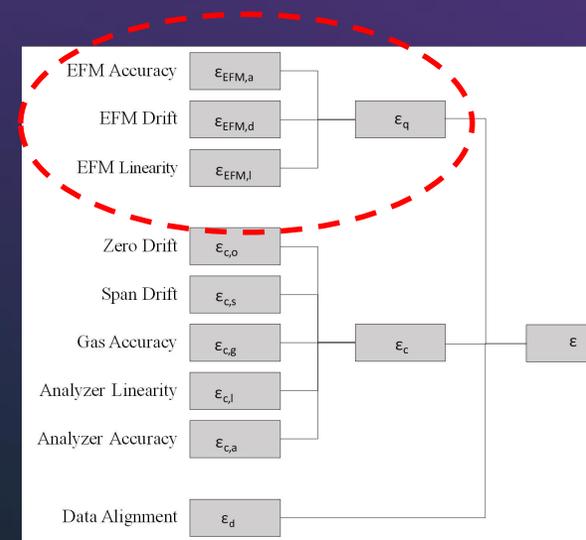
### ■ Incerteza da Medição de Vazão

$$e_q = \sqrt{e_{q,a}^2 + e_{q,d}^2 + e_{q,l}^2}$$

$e_{q,a}$  = Incerteza da Exatidão

$e_{q,d}$  = Deriva do medidor ao longo do teste = 1% (Limite de norma)

$e_{q,l}$  = Erro máximo de linearidade = 2% (Limite de norma)



$$m = u_{gas} \times \sum_{i=1}^{i=n} c_{gas,i} \times q_{mew,i} \times \frac{1}{f}$$

$$e = \sqrt{e_q^2 + e_c^2 + e_d^2}$$

## 2. Metodologia

### ■ Incerteza da Medição de Concentração

$$e_c = \sqrt{e_{c,0}^2 + e_{c,s}^2 + e_{c,g}^2 + e_{c,l}^2 + e_{c,a}^2}$$

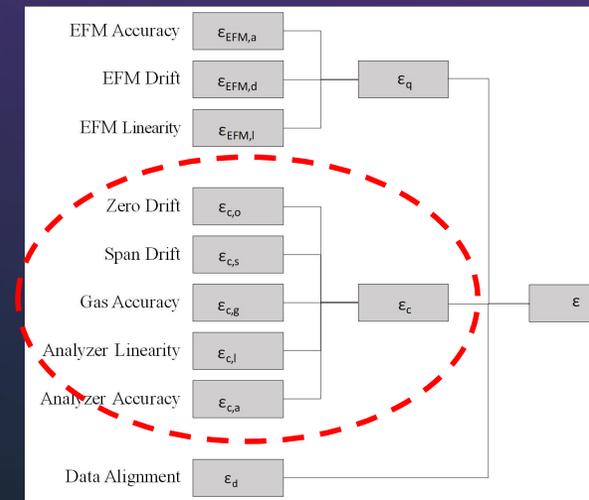
$e_{c,0}$  = Incerteza na leitura do zero = 0 (literatura)

$e_{c,s}$  = Incerteza na leitura de Span = 2% (Limite de norma)

$e_{c,g}$  = Incerteza do gás de referência = 2% (Limite de norma)

$e_{c,l}$  = Erro simples máximo do Analisador de gás = 1% (Limite de norma)

$e_{c,a}$  = Precisão do Analisador = 2% (Limite de norma)



$$m = u_{gas} \times \sum_{i=1}^{i=n} c_{gas,i} \times q_{mew,i} \times \frac{1}{f}$$

$$e = \sqrt{e_q^2 + e_c^2 + e_d^2}$$

## 2. Metodologia

### ▪ Incerteza Padrão:



$$m = u_{gas} \times \sum_{i=1}^{i=n} c_{gas,i} \times q_{mew,i} \times \frac{1}{f}$$

$$e = \sqrt{e_q^2 + e_c^2 + e_d^2}$$

## 2. Metodologia

- Incerteza da Exatidão, obtida em calibração, trata-se da repetibilidade do medidor
  - Capacidade de repetir a grandeza medida em três repetições em condições semelhantes
- O desvio padrão experimental da média expressa essa incerteza
  - Calculado a partir de 3 repetições da mesma vazão:  $S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$

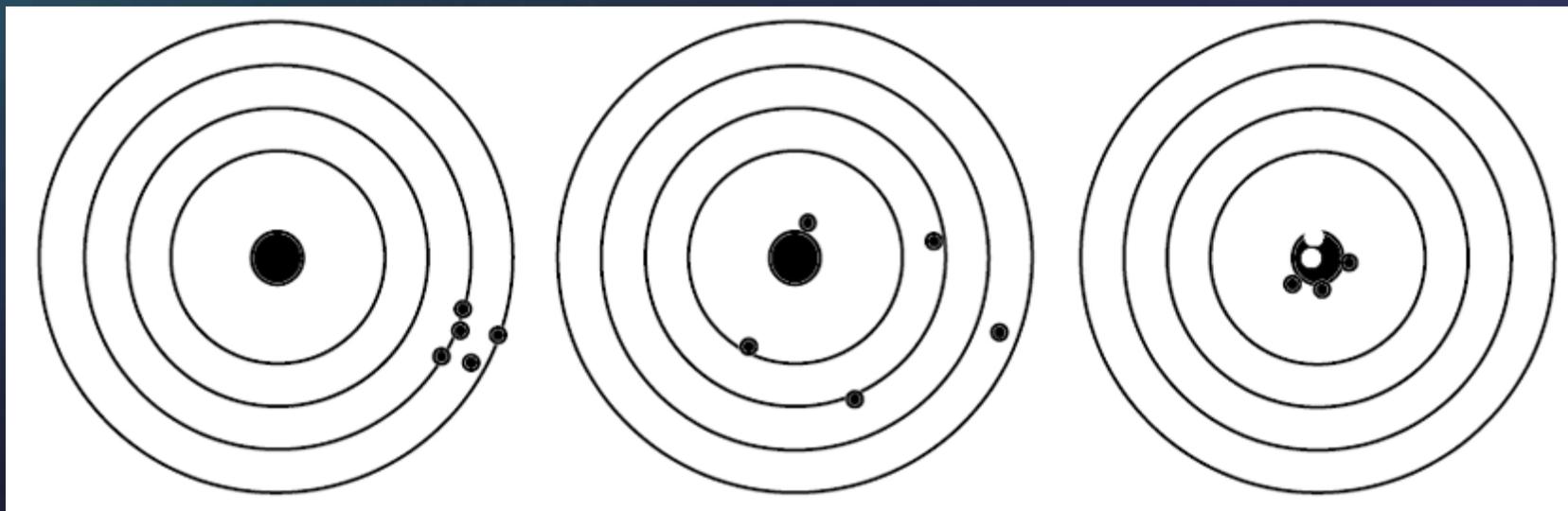
$S_{\bar{x}}$  = Desvio Padrão Experimental da Média

$S_x$  = Desvio Padrão

$n$  = Número de Repetições

## 2. Metodologia

- Porque a repetibilidade?



Fonte: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2509403>

# 3. Resultados

# 3. Resultados

- Resultados considerando Incerteza Expandida da Exatidão = 7,5%
  - De acordo com o proposto em GIECHASKIEL, B. et al (2020) [4]

$\varepsilon_c$	$\varepsilon_q$	$\varepsilon_d$	$\varepsilon$	$\nu_{eff}$	k	E <sup>1</sup>	Contribuição <sup>2</sup> (%)		
(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(-)	(%)	$\varepsilon_c$	$\varepsilon_q$	$\varepsilon_d$
<b>3,6</b>	<b>4,0</b>	<b>1,5</b>	<b>5,6</b>	$\infty$	<b>2,0</b>	<b>11,2</b>	<b>42</b>	<b>51</b>	<b>7</b>

1) Incerteza Expandida

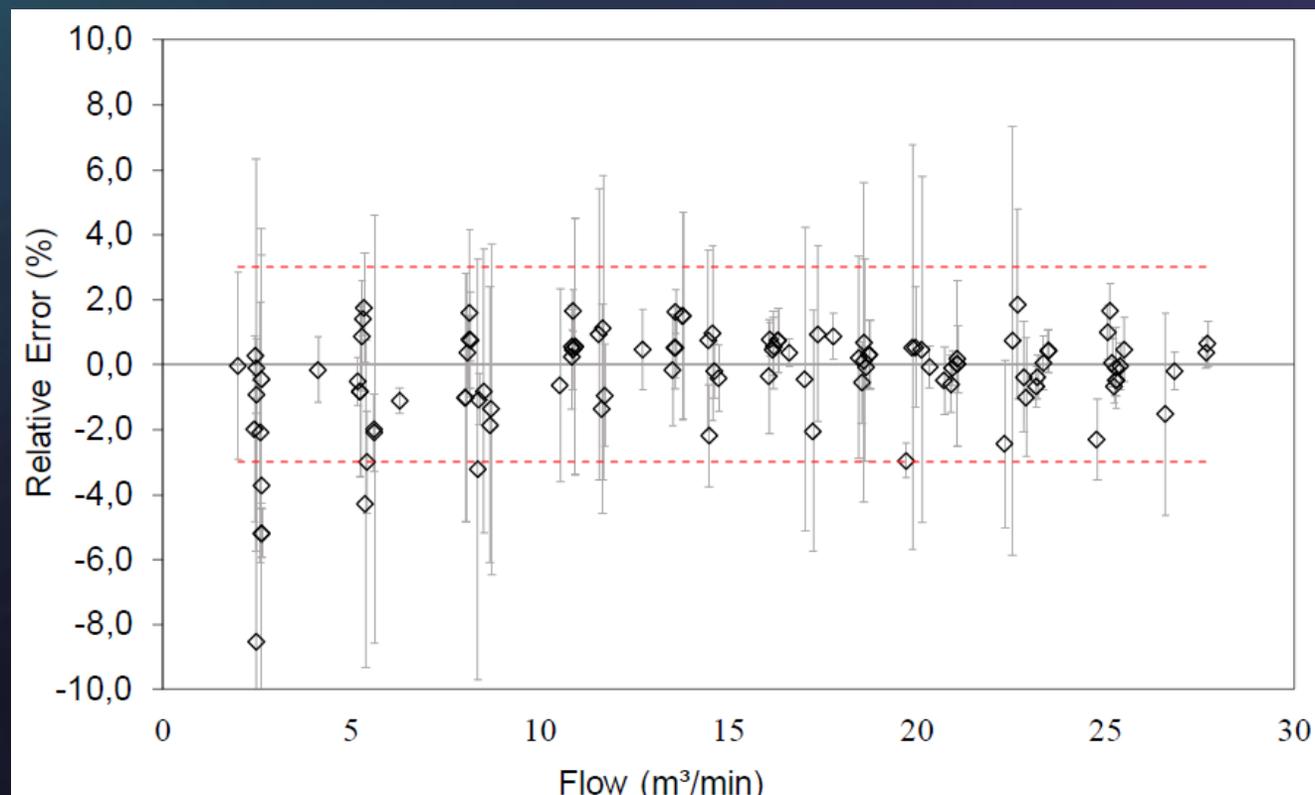
2) Contribuição de cada componente da incerteza

k: fator de abrangência

$\nu_{eff}$ : graus de liberdade

# 3. Resultados

- Curva de calibração típica de medidores EFM



Observação: as barras indicam incerteza expandida

# 3. Resultados

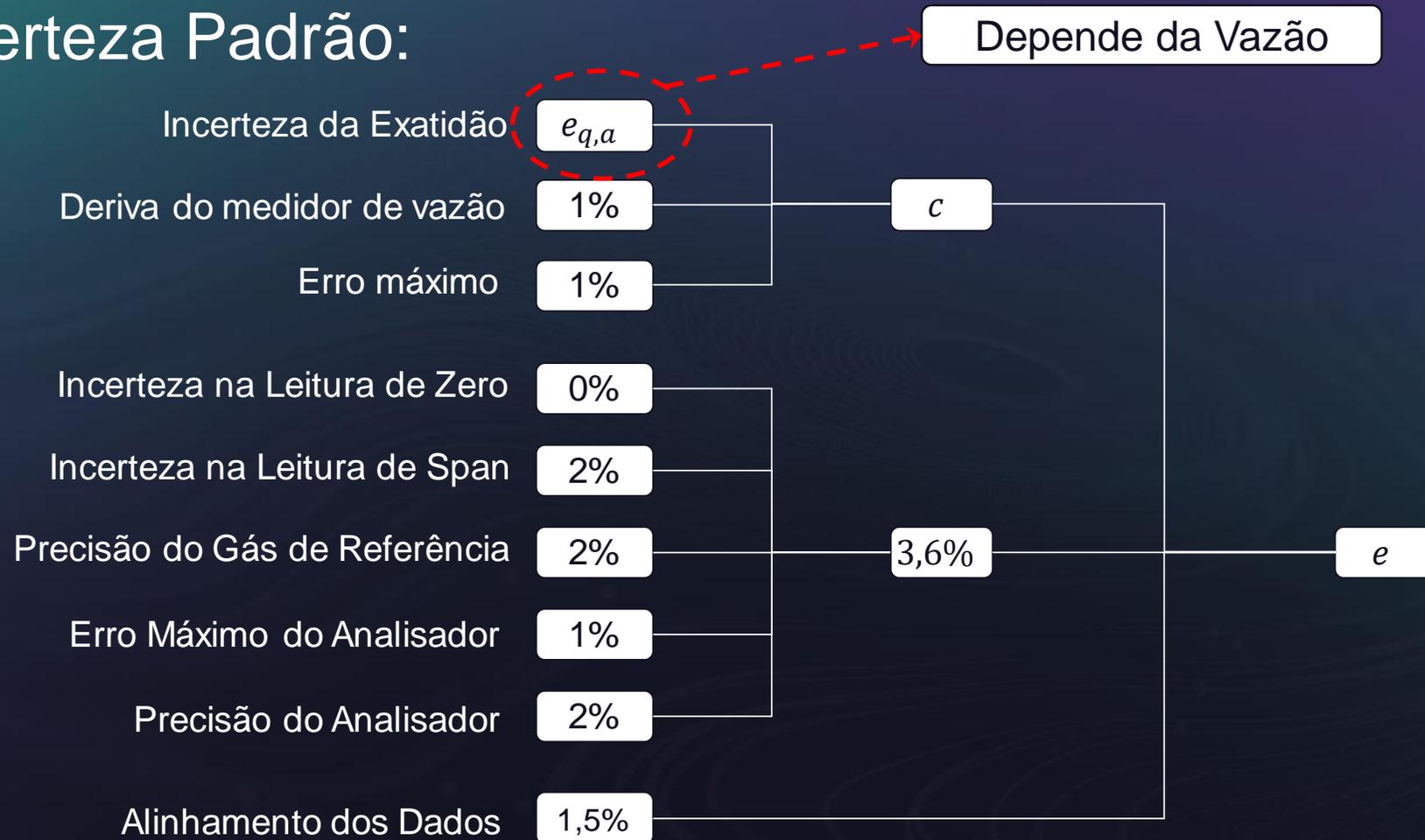
- Resultados típicos de uma calibração de EFM

Vazão EFM (m <sup>3</sup> /min)	Vazão Referência (m <sup>3</sup> /min)	Erro (%)	$S_{\bar{x}}$ (%)	E <sup>1</sup> (%)	k (-)	$\nu_{eff}$ (-)
2,6	2,6	-0,44	0,809	3,82	4,53	2
5,4	5,6	-2,99	0,411	1,57	3,31	4
8,5	8,6	-0,82	0,937	4,38	4,53	2
11,6	11,5	0,94	0,963	4,49	4,53	2
14,5	14,4	0,74	0,567	2,79	4,53	3
17,0	17,1	-0,46	1,003	4,67	4,53	2
19,9	19,8	0,54	1,357	6,24	4,53	2
22,7	22,3	1,86	0,600	2,92	4,53	3
25,1	24,7	1,65	0,246	0,83	2,43	8

1) Incerteza Expandida  
k: fator de abrangência  
 $\nu_{eff}$ : graus de liberdade

## 2. Metodologia

### ■ Incerteza Padrão:



$$e = \sqrt{e_q^2 + e_c^2 + e_d^2}$$

# 3. Resultados

- Os erros do medidor EFM não são corrigidos pelo PEMS quando em uso
- Proposto considerar a incerteza como sendo o Erro Máximo Permitido (no artigo, definido como  $MPE_N$ ):

$$MPE_N = \text{Erro [\%]} + \text{Incerteza Expandida [\%]}$$

# 3. Resultados

- Resultados considerando o  $MPE_N$  calculado com a incerteza expandida de cada vazão calibrada

Vazão EFM	$\varepsilon_q$	$\varepsilon$	$\nu_{eff}$	k	E <sup>1</sup>	Contribuição <sup>2</sup> (%)		
(m <sup>3</sup> /min)	(%)	(%)	(-)	(-)	(%)	$\varepsilon_c$	$\varepsilon_q$	$\varepsilon_d$
2,6	2,837	4,83	$\infty$	2,0	9,65	56	35	10
5,4	2,992	4,92	$\infty$	2,0	9,84	54	37	9
8,5	3,315	5,12	$\infty$	2,0	10,24	50	42	9
11,6	3,440	5,20	$\infty$	2,0	10,41	48	44	8
14,5	2,481	4,63	$\infty$	2,0	9,25	61	29	11
17,0	3,280	5,10	$\infty$	2,0	10,20	50	41	9
19,9	4,162	5,71	$\infty$	2,0	11,41	40	53	7
22,7	3,105	4,99	$\infty$	2,0	9,98	52	39	9
25,1	2,014	4,39	$\infty$	2,0	8,79	67	21	12

1) Incerteza Expandida

2) Contribuição de cada componente da incerteza

k: fator de abrangência

$\nu_{eff}$ : graus de liberdade

$$e = \sqrt{e_q^2 + e_c^2 + e_d^2}$$

# 3. Resultados

- A massa de CO<sub>2</sub> foi calculada com base em testes reais, em 3 diferentes rotas de teste (RDE):

Rotas	EFM	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	$E_{EFM_{Accuracy}}^1$	$E_{MPE_N}^2$
	(kg/s)	(ppm)	(g)	(g)	(g)
1	0.135	46023	2119.6	237.2	211.3
2	0.176	56317	1936.4	216.7	195.3
3	0.219	52450	12962.0	1450.6	1311.1

1) Incerteza Expandida calculada considerando a Incerteza Expandida da Exatidão = 7,5%

2) Incerteza Expandida calculada considerando a Incerteza Expandida da Exatidão = MPE<sub>N</sub>

$$m = u_{gas} \times \sum_{i=1}^{i=n} c_{gas,i} \times q_{mew,i} \times \frac{1}{f}$$

$$e = \sqrt{e_q^2 + e_c^2 + e_d^2}$$

# 4. Conclusões

## 4. Conclusões

- O cálculo do impacto da incerteza de calibração nas emissões finais converge para valores próximos ao que a literatura indica (7,5 %)
- O princípio de medição utilizado no EFM (Pitot de média) parece adequado para a medição de vazão nos testes de emissões em condições reais de uso

## 4. Conclusões

- A aplicação do  $MPE_N$  permite trazer conhecimento de quais componentes mais impactam na incerteza final:
  - No caso estudado a maior contribuição, que era da vazão, passou a ser do analisador de gases
- Melhor identificação de pontos de melhoria futura a partir das contribuições das incertezas

## Autores e contato:

### Felipe Jaloretto da Silva

IPT – Instituto de Pesq. Tecnológicas

felipej@ipt.br

+55 (11) 97352-3293



### Danilo Gomes Dellaroza

Volvo do Brasil

danilo.dellaroza@volvo.com

+55 (41) 99978-6185



### Igor Faust Ostapiuk

Volvo do Brasil

igor.ostapiuk.2@volvo.com

+55 (41) 99627-4033



**Obrigado!**