

## Estimativa de incerteza de medição num sistema de calibração de medidores de vazão automatizado

## Estimation of measurement uncertainty in an automated flowmeter calibration system

Idrissa Deme<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Estado do Rio de Janeiro -UERJ; <sup>2</sup> Instituição

E-mail: deme.idrissa@posgraduacao.uerj.br

**Resumo:** O propósito deste trabalho é a estimativa e análise da incerteza de medição na calibração de medidores de vazão de líquidos por um método primário, que aqui é o gravimétrico. O sistema de calibração usado neste trabalho é a bancada de calibração de medidores de vazão de líquidos do Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia que dá rastreabilidade aos medidores de vazão de líquido no Brasil. A bancada de calibração que era totalmente operada manualmente passou por um processo de automatização de alguns de seus componentes. As medições foram realizadas em cinco faixas para um medidor mássico e a estimativa da incerteza seguiu os procedimentos do guia para estimativa de incerteza do ISO (Iso-Gum). Os resultados foram comparados entre si e com resultados de outros experimentos e mostraram as performances dos medidores em função da tecnologia usada na medição e a consistência do sistema de calibração.

**Palavras-chave:** Calibração, incerteza de medição, Medição de vazão, método gravimétrico.

**Abstract:** The aim of this work is to estimate and analyze the measurement uncertainty in the calibration of liquid flow meters by the gravimetric method, which is a primary method. The calibration system used in this work is the calibration system for liquid flow meters of the National Institute of Metrology Quality and Technology -INMETRO that gives traceability to liquid flow meters in Brazil. The system that was fully operated manually went through an automation process in some of the components. The measurements were made in five ranges for a mass meter and the uncertainty expression followed the procedures of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Iso-Gum). The results were compared with each other and showed the performance of the meters according to the technology used in the measurement and the consistency of the calibration system.

**Keywords:** Calibration, measurement uncertainty, Flow measurement, gravimetric method.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de se medir a vazão de fluidos surgiu desde a antiguidade com a canalização da água para consumo doméstico. Porém, foi a partir do século XX que a necessidade de se medir a vazão dos fluidos em geral adquiriu proporção e sofisticação realmente elevadas [1]. De fato, ficou muito comum em procedimentos industriais a necessidade de medição e de controle da quantidade de líquidos e gases em decorrência do uso de processos contínuos [2]. A vazão se tornou assim uma das grandezas mais medidas nos processos industriais, juntamente com as grandezas temperatura e pressão [3]. As aplicações são muitas, indo desde as mais simples, tal como a medição de vazão de água em estações de tratamento e residências, até medição em aplicações médicas, gases industriais e combustíveis [4]. Suas múltiplas aplicações exigem que os valores medidos sejam confiáveis. Por isso, normas nacionais e internacionais, como a ISO-4185 [5] apontam a necessidade da calibração dos diversos tipos de medidores que vem surgindo devido às necessidades do mercado e à evolução tecnológica, para assegurar a confiabilidade e a qualidade das medições.

A calibração é o teste mais importante para um medidor de vazão e é realizada em todas as fases de desenvolvimento e produção do medidor, bem como no decurso da sua utilização. A calibração de medidores de vazão de líquidos permite assegurar a confiabilidade desses instrumentos de medição, por meio da comparação do valor medido com um padrão rastreado ao Sistema Internacional de Unidades (SI) [6]. Com base no resultado de uma calibração avalia-se o quanto um instrumento responde às exigências de exatidão e faixa de operação para ser utilizado no propósito pretendido. Os instrumentos calibrados permitem também ao fabricante ou o processador produzir mercadorias de qualidade, já que as medições são confiáveis e os limites de incertezas e erros são conhecidos [6]. Existem basicamente dois métodos de medição para a calibração de medidores de vazão de líquidos: o volumétrico e o gravimétrico.

A Divisão de Metrologia em Dinâmica de Fluidos (Dinam/Inmetro) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), que assegura a confiabilidade e a rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI), dispõe de uma bancada para calibração de medidores de vazão de água usando o método gravimétrico de calibração que é o método primário mais confiável. Este dispositivo que era operado manualmente passou por um processo de automatização nos procedimentos de aquisição de dados, controle e acionamento de suas bombas e balanças [7].

O objetivo deste trabalho é apresentar um processo de estimativa da incerteza de medição na calibração de um medidor de vazão mássico tipo Coriolis feita com a bancada gravimétrica automatizada do Instituto Nacional em Metrologia Qualidade e Tecnologia (Inmetro). Esta estimativa é feita seguindo os passos descritos pelo Guia para avaliação de incerteza de medição da ISO (ISO-GUM) [8].

A metodologia adotada, os principais resultados obtidos e as conclusões são apresentados nas linhas a seguir.

## 2. METODOLOGIA

O método de calibração usado é método gravimétrico que consiste basicamente na comparação da massa totalizada pelo medidor com a massa totalizada pela bancada, através das suas balanças, que serve de padrão primário de calibração. O medidor usado neste trabalho é um medidor mássico de vazão de líquido.

A estimativa da incerteza de medição segue os passos do guia para avaliação de incerteza de medição da ISO (ISO-GUM) com a determinação do mesurando, das grandezas de entrada, do diagrama de causa-efeito (diagrama de Ishikawa), das fontes de incerteza e a avaliação de suas incertezas padrões, da contribuição de cada fonte, assim como a apresentação da incerteza combinada, do grau de liberdade efetiva, do fator de abrangência, e a estimativa da incerteza expandida junto com a expressão do resultado.

As medições foram realizadas em cinco faixas de vazão indo do mais baixo ao máximo do medidor usado, correspondendo às faixas de vazão de 20 kg/min, 60 kg/min, 80 kg/min, 100 kg/min e 120 kg/min. Para cada faixa foram realizadas seis (6) medições dando um total de trinta (30) medições.

O mensurando é o fator de calibração  $F_m$ , um número adimensional que representa a razão da massa totalizada na balança da bancada gravimétrica e do da massa totalizado pelo medidor. O modelo matemático é o seguinte:

- Forma geral da equação para determinação do mensurando ( $F_m$ )

$$F_m = \frac{(M_c - M_v) \cdot \left( \frac{1 - \frac{\rho_{ab}}{\rho_b}}{1 - \frac{\rho_{ar}}{\rho_L}} \right)}{M_m} + \delta F_m \quad (2.1)$$

- Forma detalhada da equação para determinação do mensurando ( $F_m$ )

$$F_m = \frac{(M_c - M_v) \cdot \left( \frac{1 - \frac{\rho_{AB}}{\rho_B}}{1 - \frac{\left( \frac{k_1 \cdot P_a - k_2 \cdot \varphi \cdot \exp(k_3 \cdot T_a)}{k_4 + T_a} \right) + \delta \rho_a}{a_5 \cdot \left( 1 - \frac{(T_L + a_1)^2 \cdot (T_L + a_2)}{a_3 \cdot (T_L + a_4)} \right) + \delta \rho_L} \right)}{M_i} + \delta F_m \quad (2.2)$$

Onde:

$M_c$ : Massa do recipiente cheio medido na balança (kg).

$M_v$ : Massa do recipiente vazio medido na balança (kg).

$\rho_{AB}$ : Massa específica do ar no momento da calibração da balança ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )

$\rho_B$ : Massa específica dos pesos padrão que calibraram a balança ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )

$M_i$ : Massa indicada pelo medidor (kg)

$\rho_L$ : massa específica do líquido na temperatura  $T_L$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_L$ : temperatura do líquido ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $T = T_L + \delta T_L$ ;  $\delta T_L$ : variação de  $T_L$  durante uma série

$a_1 = 3,983035$   $^{\circ}\text{C}$ ;  $a_2 = 301,797$   $^{\circ}\text{C}$ ;  $a_3 = 522528,9$   $^{\circ}\text{C}$ ;  $a_4 = 69,34881$   $^{\circ}\text{C}$ ;  $a_5 = 999,97495$   $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

$\delta\rho_L$ : erro devido a diferença entre o tipo de líquido da equação padrão e o líquido de trabalho

$\rho_{ar}$ : massa específica do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$k_1: 0,34848$ ;  $k_2: 0,009024$ ;  $k_3: 0,0612$ ;  $k_4: 273,15$

$P_a$ : pressão barométrica em hPa

$\varphi$ : umidade relativa do ar em %

$T_a$ : temperatura do ar em  $^{\circ}\text{C}$

$\delta\rho_{ar}$ : ajuste de  $\rho_a$  na equação (4.4) para caçulo da massa específica do ar.

$\delta F_m$ : variação aleatória de  $F_m$

### 3. PASSO A PASSO DA ESTIMATIVA DE INCERTEZA

#### - *Grandezas de entrada*

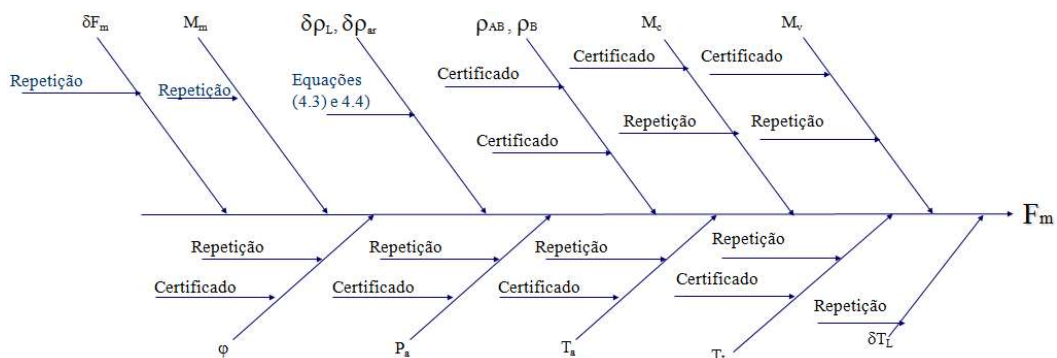
A tabela 1 apresenta as diferentes grandezas de entrada, assim como o processo para estimação do valores associados.

**Tabela 1:** grandezas de entrada

Grandeza	Estimação dos valores
Mc : (kg)	$\overline{M}_c = \frac{1}{n} \sum_1^n M_{ci}$ n = número de medições
Mv: (kg)	$\overline{M}_v = \frac{1}{n} \sum_1^n M_{vi}$ n = número de medições
T <sub>L</sub> :( °C)	$\overline{T}_L = \frac{1}{n} \sum_1^n T_{Li}$ n = número de medições
T <sub>a</sub> : (°C)	$\overline{T}_a = \frac{1}{n} \sum_1^n T_{ai}$ n = número de medições
P <sub>a</sub> : (Pa)	$\overline{P}_a = \frac{1}{n} \sum_1^n P_{ai}$ n = número de medições
φ: (%)	$\overline{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_1^n \varphi_i$ n = número de medições
ρ <sub>AB</sub> :(kg/m <sup>3</sup> )	1,096
ρ <sub>B</sub> : (kg/m <sup>3</sup> )	8000
ρ <sub>L</sub> :( kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_L(T_L) = a_5 \cdot \left[ 1 - \frac{(T_L + a_1)^2 \cdot (T_L + a_2)}{a_3 \cdot (T_L + a_4)} \right] + \delta\rho_L$ equação de Tanaka [9]
ρ <sub>ar</sub> : (g/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ar} = \frac{k_1 \cdot P_a - k_2 \cdot \varphi \cdot \exp(k_3 \cdot T_a)}{k_4 + T_a} + \Delta\rho_{2007} + \delta\rho_{ar}$ [10]
M <sub>m</sub> (kg)	$\overline{M}_m = \frac{1}{n} \sum_1^n M_{mi}$ n = número de medições
δF <sub>m</sub> :	0

- Diagrama de Ishikawa

A figura 1, mostra as grandezas que influenciam sobre o mensurando F<sub>m</sub> e seus tipos de incertezas.



**Figura 1:** diagrama causa-efeito de Ishikawa

- Coeficientes de sensibilidade  $c_i = \frac{\partial F_m}{\partial x_i}$

Os coeficientes de sensibilidades e seus modos de cálculos são apresentados aqui na tabela 2.

**Tabela 2:** Coeficientes de sensibilidade

Grandeza	Coeficientes de sensibilidade medidor mássico
Mc : (kg)	$\frac{\rho_L (\rho_B - \rho_{AB})}{M_m \cdot \rho_B (\rho_L - \rho_{ar})}$
Mv: (kg)	$\frac{-\rho_L (\rho_B - \rho_{AB})}{M_m \cdot \rho_B (\rho_L - \rho_{ar})}$
T <sub>L</sub> : (°C)	$-\frac{\partial \rho_L}{\partial T} \frac{F_m \rho_{ar}}{\rho_L - \rho_{ar}}$
δT <sub>L</sub> : (°C)	$-\frac{\partial \rho_L}{\partial (\delta T)} \frac{F_m \rho_{ar}}{\rho_L - \rho_{ar}}$
T <sub>a</sub> : (°C)	$\frac{\partial \rho_L}{\partial (T_a)} \frac{F_m}{\rho_L - \rho_{ar}}$
P <sub>a</sub> : (kPa)	$\frac{\partial \rho_L}{\partial (P_a)} \frac{F_m}{\rho_L - \rho_{ar}}$
φ: (%)	$\frac{\partial \rho_L}{\partial (\varphi)} \frac{F_m}{\rho_L - \rho_{ar}}$
ρ <sub>AB</sub> : (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{-(M_c - M_v) \rho_L}{V_m \rho_B (\rho_L - \rho_{ar})}$
ρ <sub>B</sub> : (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{-(M_c - M_v) \rho_L \rho_{AB}}{V_m (\rho_B)^2 (\rho_L - \rho_{ar})}$
δρ <sub>L</sub> : (kg/m <sup>3</sup> )	$-\frac{F_m \rho_{ar}}{\rho_L (\rho_L - \rho_{ar})}$
δρ <sub>ar</sub> : (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{F_m}{(\rho_L - \rho_{ar})}$
V <sub>m</sub> : (L) Ou M <sub>m</sub> : (kg)	$\frac{(M_c - M_v) \rho_L (\rho_B - \rho_{AB})}{(M_m)^2 \cdot \rho_B (\rho_L - \rho_{ar})}$
δF <sub>m</sub> :	1

A contribuição uc(i) de cada fonte foi avaliada fazendo o produto da incerteza padrão associada a ela com o coeficiente de sensibilidade correspondente. Portanto, a partir do produto dos elementos das tabelas 1 e 2.

- Incerteza combinada

$$u_c(F_m) = \sqrt{u_c^2(M_c) + u_c^2(M_v) + u_c^2(T_L) + u_c^2(\delta T_L) + u_c^2(T_a) + u_c^2(P_a) + u_c^2(\varphi) + u_c^2(\rho_{AB}) + u_c^2(\rho_B) + u_c^2(\delta \rho_L) + u_c^2(\delta \rho_{ar}) + u_c^2(M_m)} \quad (3.1)$$

- Grau de liberdade efetiva

Foi calculado pela fórmula de Welch-Satterthwaite como recomendado pelo ISO-GUM.

$$v_{eff} = \frac{u_c^2(F_m)}{\frac{u_c^4(M_c)}{v(M_c)} + \frac{u_c^4(M_v)}{v(M_v)} + \frac{u_c^4(T_L)}{v(T_L)} + \frac{u_c^4(\delta T_L)}{v(\delta T_L)} + \frac{u_c^4(T_a)}{v(T_a)} + \frac{u_c^4(P_a)}{v(P_a)} + \frac{u_c^4(\varphi)}{v(\varphi)} + \frac{u_c^4(\rho_{AB})}{v(\rho_{AB})} + \frac{u_c^4(\rho_B)}{v(\rho_B)} + \frac{u_c^4(\delta \rho_L)}{v(\delta \rho_L)} + \frac{u_c^4(\delta \rho_{ar})}{v(\delta \rho_{ar})} + \frac{u_c^4(M_m)}{v(M_m)}} \quad (3.2)$$

-Fator de abrangência, incerteza expandida e expressão do resultado

O fator de abrangência k foi avaliada para uma probabilidade de 95,45% usando a função INVT(1-0,9545;veff) do Excel.

A incerteza expandida para essas condições é:

$$U = k \cdot u_c \quad (3.3)$$

O resultado do Fm e expresso em forma de número adimensional por representar o quociente da massa totalizada na balança com a massa totalizada no medidor, ou seja, é a razão de grandezas de mesma natureza.

#### 4. RESULTADOS

Os principais resultados alcançado são apresentado abaixo. A tabela 3 apresenta os valores de Fm, da incerteza expandida e da incerteza combinada em função da faixa de vazão e a tabela 4 mostra as fontes de incerteza e a determinação da incerteza padrão associada a cada uma. A tabela mostra os fatores de influência e suas respectivas contribuições em percentual na incerteza combinada para cada faixa de vazão. A contribuição  $u_c(i)$  de cada fonte foi avaliada fazendo o produto da incerteza padrão associada a ela com o coeficiente de sensibilidade correspondente.

**Tabela 3:** Valores de Fm e das incertezas por faixa

Faixa de Vazão (kg/min)	20	60	80	100	120
F <sub>m</sub>	0,97749	0,99204	0,99375	0,99436	0,99490
U	0,0018	0,00030	0,00021	0,00016	0,00016
u	0,00068	0,00012	0,00009	0,00007	0,00007
k (95,45% de abrangência)	2,649	2,429	2,284	2,320	2,255
$\gamma_{eff}$	5	8	11	10	12
U%	0,16	0,030	0,021	0,016	0,016
Nº de corridas.	6	6	6	6	6

**Tabela 4:** fontes de incertezas e suas estimativas

Grandeza	Avaliação da fonte de incerteza	Estimativa
$M_c$ : (kg)	- Certificado balança (tipo B): - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = 87$ )	$u = U/k = 0,002$ $-s_{\overline{M}_c} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{M}_c - M_{ci})^2}{n(n-1)}}$
$M_v$ : (kg)	- Certificado da balança (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = 87$ )	- $u = U/k = U: 0,002$ $-s_{\overline{M}_v} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{M}_v - M_{vi})^2}{n(n-1)}}$
$T_L$ : (°C)	- Certificado do pt100 (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 0,005$ $-s_{\overline{T}_L} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{T}_L - T_{Li})^2}{n(n-1)}}$
$\delta T_L$ : (°C)	- Repetição (tipo A) (Distribuição retangular $\nu = \infty$ )	$(T_{Lmax} - T_{Lmin})/2 \cdot \sqrt{3}$
$T_a$ : (°C)	- Certificado da estação meteorológica (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 0,15$ $-s_{\overline{T}_a} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{T}_a - T_{ai})^2}{n(n-1)}}$ ...
$P_a$ : (kPa)	- Certificado da estação meteorológico (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 1$ $-s_{\overline{P}_a} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{P}_a - P_{ai})^2}{n(n-1)}}$ ...
$\varphi$ : (%)	- Certificado da estação meteorológica (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 0,981246$ $-s_{\overline{\varphi}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{\varphi} - \varphi_i)^2}{n(n-1)}}$ , ...
$\rho_{AB}$ : (kg/m <sup>3</sup> )	- Certificado (tipo B) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	$u = U/k = 0,014$
$\rho_B$ : (kg/m <sup>3</sup> )	- Certificado -pesos (tipo B) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	$u = U/k = 0,115$

$\delta\rho_L$ : (kg/m <sup>3</sup> )	- Equação de Tanaka (tipo B) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 0,012$
$\delta\rho_{ar}$ :(kg/m <sup>3</sup> )	- Equação para determinação da massa específica do ar (tipo B) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 1,15 \cdot 10^{-5}$
$V_m$ :( L) Ou $M_m$ :(kg)	- Repetição (tipo A) (Grau de liberdade n-1)	- $S_{\overline{M_m}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{M_m} - M_{mi})^2}{n(n-1)}}$
$\delta F_m$ :	- Repetição de $F_m$ (tipo A) (Grau de liberdade n-1)	- $S_{\overline{\delta F_m}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{F_m} - F_{mi})^2}{n(n-1)}}$
Grandeza	Avaliação da fonte de incerteza	Estimativa medidor mássico
$M_c$ : (kg)	- Certificado balança (tipo B): - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = 87$ )	$u = U/k = 0,002$ - $S_{\overline{M_c}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{M_c} - M_{ci})^2}{n(n-1)}}$
$M_v$ : (kg)	- Certificado da balança (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = 87$ )	- $u = U/k = U: 0,002$ - $S_{\overline{M_v}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{M_v} - M_{vi})^2}{n(n-1)}}$
$T_L$ : ( °C)	- Certificado do pt100 (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 0,005$ - $S_{\overline{T_L}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{T_L} - T_{Li})^2}{n(n-1)}}$
$\delta T_L$ : ( °C)	- Repetição (tipo A) (Distribuição retangular $\nu = \infty$ )	$(T_{Lmax} - T_{Lmin})/2 \cdot \sqrt{3}$
$T_a$ : (°C)	- Certificado da estação meteorológica (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 0,15$ - $S_{\overline{T_a}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{T_a} - T_{ai})^2}{n(n-1)}}$ ...
$P_a$ : (kPa)	- Certificado da estação meteorológico (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 1$ - $S_{\overline{P_a}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{P_a} - P_{ai})^2}{n(n-1)}}$ ...
$\varphi$ : (%)	- Certificado da estação meteorológica (tipo B) - Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 0,981246$ - $S_{\overline{\varphi}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{\varphi} - \varphi_i)^2}{n(n-1)}}$ , ...
$\rho_{AB}$ : (kg/m <sup>3</sup> )	- Certificado (tipo B) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	$u = U/k = 0,014$
$\rho_B$ : (kg/m <sup>3</sup> )	- Certificado -pesos (tipo B) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	$u = U/k = 0,115$
$\delta\rho_L$ : (kg/m <sup>3</sup> )	- Equação de Tanaka (tipo B) (Grau de liberdade $\nu = \infty$ )	- $u = U/k = 0,012$

$\delta\rho_{ar}:(\text{kg}/\text{m}^3)$	- Equação para determinação da massa específica do ar (tipo B) (Grau de liberdade $v = \infty$ )	- $u = U/k = 1,15 \cdot 10^{-5}$
$V_m:(\text{L})$ Ou $M_m:(\text{kg})$	- Repetição (tipo A) (Grau de liberdade $n-1$ )	- $S_{M_m} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{M_m} - M_{mi})^2}{n(n-1)}}$
$\delta F_m:$	- Repetição de $F_m$ (tipo A) (Grau de liberdade $n-1$ )	- $S_{\delta F_m} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\overline{F_m} - F_{mi})^2}{n(n-1)}}$

**Tabela 5:** Fatores de influencias e suas contribuições

Variáveis de entrada $i$	Vazão (kg/min)				
	20	60	80	100	120
	$100 \cdot c_i \cdot u_i/u$				
$\delta F_m$	74,00%	43,73%	35,64%	34,72%	32,42%
$M_c$	8,70%	15,50%	17,20%	15,25%	16,66%
$M_v$	8,70%	15,50%	17,20%	15,25%	16,66%
$T_a$	3,55%	13,04%	15,65%	19,36%	18,66%
$\delta\rho_{ar}$	1,27%	4,59%	5,50%	6,92%	6,73%
$m_{ini}$	1,52%	2,74%	3,05%	2,71%	2,96%
$m_{fim}$	1,52%	2,74%	3,05%	2,71%	2,96%
$\rho_{ab}$	0,20%	0,71%	0,86%	1,08%	1,05%
$\varphi$	0,14%	0,54%	0,64%	0,76%	0,72%
$T_{Lm}$	0,14%	0,50%	0,61%	0,78%	0,77%
$\delta T_{Lm}$	0,25%	0,29%	0,47%	0,30%	0,27%
$P_a$	0,029%	0,11%	0,13%	0,16%	0,16%
$\delta\rho_l$	0,0015%	0,0055%	0,0066%	0,0082%	0,0080%
$\rho_b$	0,00021%	0,00078%	0,00094%	0,0012%	0,0011%
<b>Total</b>	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

A incerteza atinge valores menores à medida que a vazão aumenta como mostra a tabela 3. Porém, nas faixas mais altas, a incerteza tem valores próximos entre si. Como a repetitividade não varia consideravelmente nas vazões mais altas, observa-se uma tendência de estabilidade na vazão, o que é esperado. Este caso seria equivalente à situação de um reservatório de nível constante. Observa-se pela Tabela 5 que a repetitividade (indicada pela variação aleatória de  $F_m$ ,  $\delta F_m$ ) é o principal fator de influência em todas as faixas. As massas totalizadas na balança ( $M_c$ ,  $M_v$ ) são fatores importantes, mas são ultrapassados pela temperatura ambiente ( $T_a$ ) a partir da faixa de 60 kg/min e pela temperatura ambiente ( $T_a$ ) e a variação da temperatura do líquido no medidor ( $\delta T_L$ ) nas faixas de 80 kg/min e 100 kg/min onde a contribuição de  $\delta F_m$  se encontra nos menores patamares. A faixa de menor vazão (20 kg/min) é a que apresenta uma maior incerteza relativa devido a dificuldades de controles dos parâmetros nesta faixa pelo fato do escoamento ser menos desenvolvido. A diminuição da contribuição de  $\delta F_m$  acaba por enfatizar as contribuições da temperatura ambiente e da variação da massa específica avaliada assim como da variação da temperatura do líquido na incerteza. Assim, fatores que não dependem do sistema de teste como a temperatura ambiente começam a ter uma contribuição importante na incerteza, mostrando assim a importância do controle dos efeitos ambientais para o funcionamento otimizado do medidor de vazão. Essas influências que não eram destacadas com a calibração manual destaca uma linha de investigação para trabalhos futuros.

## 5. CONCLUSÃO

Este estudo possibilitou a apresentação de um método que possibilita a estimação das diferentes fontes de incerteza num sistema de medição dinâmico e suas contribuições na incerteza da medição. Possibilitou também destacar as condições de funcionamento ideal do medidor de vazão pela comparação dos valores de incerteza em diferentes faixas de vazão. Os resultados obtidos estão em conformidade e com os valores obtidos com o Sistema manual e outros sistemas na literatura. As influências de fatores ambientais que não dependem diretamente do sistema e que não eram destacadas com a calibração manual foram evidenciadas e abrem uma linha de investigação importante para trabalhos futuros.

## 6. REFERÊNCIAS

1. DELMÉ, G. J. MANUAL DE MEDIÇÃO DE VAZÃO. 3ª. ed. São Paulo: EDGARD BLÜCHER , 2003.
2. CASSIOLATO, C.; ALVES, E. O. A. Medição de Vazão. Controle & Instrumentação, São Paulo, n. 138, 2008.
3. FRENZEL, F. et al. Industrial Flow Measurement Basics and Practice. Ladenburg: ABB Automation Products GmbH, 2011.
4. FIGUEIREDO DE ANDRADE, P. M.; ROCHA, P.; FERREIRA, L. E. A. Medição de vazão para sistemas de medição de petróleo e gás natural. Revista Analytica, n. 23, Junho/Julho 2006
5. ISO - INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION. ISO 4185: Measurement of liquid flow in closed conduits weighing method. 1. ed. Berlin, 1980.
6. ALDER, K. The Measure of All Things: The Seven-Year Odyssey and Hidden Error That Transformed the World. New York: the free presss, 2002.
7. DEME, I. Automatização e controle da bancada de calibração de medidores de vazão de líquidos do Inmetro. 2017. 153f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Metrologia e Qualidade – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, 2017.
8. (JCGM), J. C. F. G. I. M. Avaliação de dados de Medição - Guia para a expressão de incerteza de medição (ISO- GUM). 1ª edição brasileira. ed. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), 2012.
9. TANAKA, M. et al. Recommended table for density of water between 0 °C and 40°. Metrologia, Paris, v. 38, p. 301-309, Janeiro 2001.
10. GIACOMO, P. Equation for the determination of the density of moist air (1981). Metrologia, Paris, v. 18, n. 1, p. 33 -40, Janeiro 1982.