

MEASUREMENT UNCERTAINTY: A ACADEMIC SMALL EXPERIMENT

PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS: UM EXPERIMENTO ACADÊMICO SIMPLES

A. C. A. ANDRADE, H. F. A. F. REIS, A. M. O. SIQUEIRA, M. F. MADUREIRA, N. A. GOUVÊA, L. F. GONZAGA, T. L. MENEZES e B. H. F. FREIRE¹

¹Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Química
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9334-0394>
E-mail: antonio.siqueira@ufv.br

RESUMO: *Por definição, as incertezas são uma estimativa da confiabilidade de uma medida. São intrínsecas a qualquer processo de medição e têm sua origem tanto em falhas procedimentais como na própria limitação dos instrumentos utilizados para as aferições. A compreensão de como elas se propagam é fundamental para o planejamento de experimentos, uma vez que ao minimizá-las obtêm-se dados mais confiáveis. O presente estudo, realizado em disciplina inicial de laboratório de Engenharia Química, traz uma discussão conceitual sobre incertezas e ilustra a sua determinação em um experimento simples, que envolve a determinação de propriedades físicas, como a massa específica, a densidade relativa e o peso específico de um detergente comercial. A metodologia utilizada para a análise de incertezas foi baseada nos estudos de Kline e McClintock, e o software Engineer Equation Solver (EES) foi utilizado para os cálculos. Os resultados obtidos foram comparados com os da literatura e os erros durante o experimento foram discutidos, juntamente com a propagação de incertezas advinda dos instrumentos utilizados.*

PALAVRAS-CHAVE: Incerteza de medição; Propriedades de fluidos; Propagação de incertezas; Ensino de Engenharia Química.

1. INTRODUÇÃO

Em um experimento, independente da forma em que uma medida é realizada, os dados obtidos não possuem precisão e exatidão absoluta, porém alguns dados são mais exatos que outros. Para saber qual é a qualidade de uma medição é necessário que o conceito de erro e incerteza seja introduzido (TAYLOR, 2012; GUM, 2008; DONATELLI e KONRATH, 2005).

A garantia de uma boa aferição de dados em um experimento é dada por dois parâmetros, sendo eles: o erro, que é quão distante o valor medido está do valor real e a incerteza, que exprime o quanto variam as medições feitas por uma mesma pessoa através de um mesmo método num mesmo intervalo de tempo.

Os erros podem ser caracterizados como sendo o desvio de um valor medido por um instrumento do valor real ou teórico, também conhecido como valor referencial. Assim, podemos definir o erro, e , como a diferença entre o valor medido e o valor referencial, conforme a Equação 1:

$$e = [\text{valor medido}] - [\text{valor referencial}] \quad (1)$$

Podem ser causados por diversos fatores que influenciam na medição. As fontes mais comuns de erros podem ser o aparelho de medição, o ambiente, o operador e o processo de medição (NETO, 2012).

De acordo com Cabral (2004) “incerteza” é, por definição, uma estimativa que quantifica a confiabilidade do resultado obtido. A incerteza é um conceito muito mais aplicável que o erro, uma vez que para esta não é necessário o conhecimento do valor verdadeiro. Existem dois tipos de incertezas e que são calculadas por métodos distintos: métodos que envolvem análise estatística de uma série de observações e o método que não envolve observações repetidas (realizado quando é difícil refazer o experimento). A incerteza vem englobar fatores que influíram na medição, de modo a ser uma indicação da qualidade dos resultados de medição (NETO, 2012; DONATELLI e KONRATH, 2005). Ou ainda, como definido em VIM (2012): a “incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. As outras componentes, as quais podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.”

De La Cruz et al. (2010) colocam que a “incerteza de medição é definida como sendo o parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas. O mensurando é a grandeza que se pretende medir. Já o termo grandeza é definido como a propriedade de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância, que se pode expressar quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência.”

De La Cruz et al. (2010), destacam ainda que, em geral, “o resultado de uma medição é somente uma aproximação ou estimativa do valor do mensurando e, assim, só é completo quando acompanhado pela declaração da incerteza dessa estimativa”. Assim, quando mede-se algo, deve-se expressar, juntamente com o valor medido, o valor da incerteza associada àquela medida, de acordo com a Equação 2:

$$(\text{valor medido} \pm \text{incerteza}) [\text{unidade de medida}] \quad (2)$$

A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando, sendo uma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade (DE LA CRUZ et al., 2010). Obviamente, sem o conhecimento da incerteza associada a uma medida, os resultados obtidos não podem ser comparados, sejam entre os próprios resultados da medição, ou com valores de referência fornecidos em uma especificação ou em uma norma (DE LA CRUZ et al., 2010).

Experimentos na área de Engenharia são extremamente importantes para que se possa coletar dados que complementem análises e projetos. Porém, sabe-se que tais experimentos

podem ter êxito ou não, e por isso é necessário validar os dados através da análise de incertezas.

O estudo teve com objetivo principal contribuir com a literatura disponível na área de propagação de incertezas para análise de dados experimentais, de maneira simples, clara e objetiva, respondendo a três perguntas básicas, a saber: 1) como estimar e descrever a incerteza em uma determinada variável? b) como calcular a propagação destas incertezas no resultado final? e, finalmente c) como apresentar os resultados de modo a dar, de forma concisa, uma medida da confiabilidade dos resultados

2. PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

Durante a realização de um experimento, erros sempre irão ocorrer, sejam eles sistemáticos ou aleatórios, sendo então o objetivo da análise de incertezas estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais.

O procedimento possui as seguintes etapas:

- a) Estimar o intervalo de incerteza para cada quantidade medida;
- b) Estabelecer o limite de confiança em cada medição;
- c) Analisar a propagação de incerteza nos resultados calculados a partir dos dados experimentais.

A metodologia que engloba as etapas citadas para a determinação da incerteza é denominada Metodologia de Kline e McClintock (GUM, 2008; FOX e MCDONALD, 2006; MILLS e CHANG, 2004; DONATELLI e KONRATH, 2005; HOLMAN, 1994), e é definida da seguinte maneira. Na maior parte dos experimentos, a medição de uma grandeza qualquer R de interesse é feita de maneira indireta, sendo esta grandeza pode ser obtida a partir de medições de n grandezas primárias, tal que $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

O cálculo de R (grandeza de saída), é realizado a partir de uma função conhecida, envolvendo estas grandezas primárias, que são também denominadas grandezas de entrada, como esclarecem Toginho Filho e Andrello (2009). A incerteza final, relacionada a R , será dada pela Equação 3.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Esta expressão para a incerteza padrão da grandeza de saída, também chamada de incerteza padrão combinada, é utilizada quando as grandezas de entrada são medidas repetidas vezes, gerando valores médios das grandezas x_1, x_2, \dots, x_n e desvios padrão das médias w_1, \dots, w_n . Portanto, w_R representa a incerteza no resultado e w_1, \dots, w_n representam as incertezas das variáveis independentes. Dessa forma, é possível obter a incerteza do resultado de um experimento de forma simples e com um método confiável. A equação 3 foi obtida a partir de um desenvolvimento em série de Taylor, quando se considera insignificante a influência dos termos de ordem superior (GUM, 2008).

Este trabalho apresenta a importância da análise de incerteza experimental e demonstra a sua determinação, através de um experimento simples realizado no programa de uma disciplina inicial de laboratório de Engenharia Química, para estudantes do 6º período do curso. O experimento utilizado como exemplo foi a determinação de propriedades intensivas: massa

específica, ρ , densidade relativa, SG, e peso específico, γ , de um detergente comercial a partir de técnicas experimentais simples (SIQUEIRA e SATO, 2016). Essas propriedades são definidas conforme as equações (4), (5) e (6), respectivamente:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}, 4^{\circ}C}} \quad (5)$$

$$\gamma = \rho g \quad (6)$$

Onde m é a massa da substância, V é o volume e g a aceleração da gravidade local.

A partir desses cálculos foi realizado um estudo/análise de propagação de incertezas na aferição dessas propriedades. Os cálculos são apresentados ao longo do trabalho, juntamente com a resolução da análise por meio do software *Engineering Equation Solver*.

O Software proprietário *Engineering Equation Solver* (EES), devido a sua versatilidade, tem sido bastante utilizado para a solução de problemas de Engenharia, no ambiente acadêmico e industrial. O EES tem se destacado na resolução de problemas de várias áreas da Engenharia, sendo principalmente, destinado a solução de equações algébricas e equações diferenciais, construção de gráficos, de tabelas e Banco de Dados, etc. A grande vantagem do EES frente a softwares proprietários mais robustos, está relacionada a grande facilidade de entendimento e de uso (programação); a velocidade na resolução dos problemas estabelecidos; a baixa capacidade computacional requerida e a seu baixo custo (CERANTO et al., 2012).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Na realização do experimento foram utilizados béqueres de 50 e 100 mL, provetas de 100 mL, de diferentes marcas e modelos, termômetro da marca HG Brasil (*Incerteza* = 0,5°C), balança semi-analítica, digital (*Incerteza* = 0,1g; Capacidade máxima = 4.100g, balança 1), balança semi-analítica, digital, Shimadzu BL3200H (*Incerteza* = 0,01g; Capacidade máxima = 3.200g, balança 2), detergente comercial e água destilada.

3.2. Procedimento Experimental

3.2.1. Calibração da Proveta: A balança foi zerada e suas informações (marca, modelo, capacidade e incertezas anotadas. Após isso uma proveta de 100 mL foi pesada e este valor passou a ser chamado de m_{proveta} . Este procedimento foi realizado em triplicata. Depois se adicionou água destilada na proveta até a marca de 25 mL. Com auxílio de um termômetro, de incerteza conhecida, mediu-se a temperatura (T) da água. A proveta com água foi pesada e sua massa anotada, sendo chamada de $m_{\text{proveta+água}}$. Vale ressaltar que nos experimentos as massas foram determinadas, ora usando a balança 1, ora a balança 2, visto que ambas apresentam

incertezas distintas e o objetivo foi justamente avaliar o efeito da incerteza de uma leitura/instrumento no resultado de uma determinada grandeza.

3.2.2. Determinação das propriedades do detergente: Lavou-se a proveta por 3 vezes com o líquido de densidade desconhecida, o detergente. Adicionou-se 25mL de solução à proveta e a mesma foi pesada, sendo chamada de $m_{\text{proveta} + \text{det}}$. Após isso, a temperatura da solução foi medida. O processo foi realizado em triplicata e a partir dos dados obtidos a massa específica do fluido foi determinada utilizando-se a seguinte equação:

$$\rho = \frac{m_{\text{proveta}+\text{det}} - m_{\text{proveta}}}{m_{\text{proveta}+\text{água}} - m_{\text{proveta}}} \rho_{\text{água}} \quad (7)$$

Uma vez, determinada a massa específica e a incerteza propagada em seu cálculo, as propriedades, densidade relativa e peso específico foram, então, determinadas utilizando-se as equações (5) e (6). As incertezas propagadas na determinação destas propriedades também foram determinadas, considerando que:

- ✓ A massa específica do detergente, depende dos valores associados a massa da proveta vazia (m_{proveta}), da massa da proveta com detergente ($m_{\text{proveta} + \text{det}}$), da massa da proveta com água ($m_{\text{proveta}+\text{água}}$) e da massa específica da água a temperatura do experimento ($\rho_{\text{água}}$). A incerteza na medida da massa específica do detergente, por sua vez, depende, também daquelas incertezas associadas a cada grandeza mencionada.
- ✓ A densidade relativa do detergente e a sua incerteza associada, dependem somente dos valores e das incertezas relativos a massa específica do detergente, visto que a massa específica da água, a temperatura de referência de 4 °C, pode ser assumida como um valor exato, sem incerteza associada, extraído de tabelas de propriedades físicas (PERRY et al., 2008; WELTY et al., 2008; FOX e MCDONALD, 2006; INCROPERA; et al., 2008; BIRD, STEWART e LIGHTFOOT, 2004).
- ✓ Finalmente, o peso específico do detergente e a sua incerteza associada, dependem apenas dos valores e das incertezas relativos a massa específica do detergente, visto que a aceleração local da gravidade é assumida como uma constante, com valor exato, sem incerteza associada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização do experimento foram analisados os dados coletados e os resultados obtidos de três grupos diferentes, sendo que todos utilizaram o detergente como solução. Os dados coletados por cada grupo podem ser observados nas Tabelas 1, 2 e 3. As diferenças observadas nas massas das provetas e nas temperaturas para cada grupo são explicadas pelo uso de diferentes equipamentos disponíveis no laboratório no qual a aula prática foi realizada.

Tabela 1. Dados coletados pelo Grupo 1.

Grupo 1					
Repetição	m_{proveta} [g]	$T_{\text{água}}$ [°C]	$m_{\text{proveta+água}}$ [g]	T_{det} [°C]	$m_{\text{proveta+det}}$ [g]
1	151,58±0,01	27,0±0,5	176,3±0,1	25,0±0,5	175,9±0,1
2	151,58±0,01	27,0±0,5	176,3±0,1	25,0±0,5	176,0±0,1
3	151,59±0,01	27,0±0,5	176,3±0,1	25,0±0,5	175,9±0,1
Média	151,58±0,01	27,0±0,5	176,3±0,1	25,0±0,5	175,9±0,1

Tabela 2. Dados coletados pelo Grupo 2.

Grupo 2					
Repetição	m_{proveta} [g]	$T_{\text{água}}$ [°C]	$m_{\text{proveta+água}}$ [g]	T_{det} [°C]	$m_{\text{proveta+det}}$ [g]
1	235,68±0,01	28,0±0,5	257,65±0,01	26,0±0,5	262,56±0,01
2	235,67±0,01	28,0±0,5	257,64±0,01	26,0±0,5	262,55±0,01
3	235,69±0,01	28,0±0,5	257,63±0,01	26,0±0,5	262,55±0,01
Média	235,68±0,01	28,0±0,5	257,64±0,01	26,0±0,5	262,55±0,01

Tabela 3. Dados coletados pelo Grupo 3.

Grupo 3					
Repetição	m_{proveta} [g]	$T_{\text{água}}$ [°C]	$m_{\text{proveta+água}}$ [g]	T_{det} [°C]	$m_{\text{proveta+det}}$ [g]
1	72,96±0,01	28,0±0,5	97,18±0,01	25,0±0,5	98,6±0,1
2	72,95±0,01	28,0±0,5	97,18±0,01	25,0±0,5	98,6±0,1
3	72,95±0,01	28,0±0,5	97,18±0,01	25,0±0,5	98,6±0,1
Média	72,95±0,01	28,0±0,5	97,18±0,01	25,0±0,5	98,6±0,1

Como já mencionado, pode-se observar que para um mesmo grupo, as medidas de massas foram realizadas, usando ora uma balança ora outra. A partir dos dados apresentados foi possível o cálculo da massa específica, densidade relativa e peso específico do detergente com a utilização das Equações 4, 5 e 6, respectivamente. Os resultados obtidos por cada grupo foram organizados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados experimentais calculados pelos Grupos 1, 2 e 3.

Grupos	ρ [kg/m ³]	SG []	γ [N/m ³]
1	980,4±5,7 ou 980,4±0,58%	0,9804±0,0057	9.618±57
2	1.219±1 ou 1.219±0,08%	1,219±0,001	11.958±7
3	1.055±4 ou 1.055±0,38%	1,055±0,004	10.346±41

Os valores das incertezas relativas apresentadas na Tabela 4 foram calculadas, com base na equação 3, utilizando o programa EES. A critério de comparação foram analisados os dados disponíveis sobre a massa específica de um detergente de referência da marca comercial, conhecida no mercado nacional, fornecida pelo fabricante, em condições normais de temperatura e pressão, para os quais o valor é de 1.020 kg/m³.

Os erros relativos, de cada grupo, à massa específica do detergente, foram calculados de acordo com a Equação 1 e se encontram na Tabela 5.

Tabela 5. Erros Relativos Percentuais das massas específicas encontradas.

Grupos	Erro Relativo (%)
1	3,8
2	19,5
3	3,4

Dessa forma percebe-se que os Grupos 1 e 3 tiveram um menor erro relativo e apresentaram valores de massa específica, bem mais próximos àquela informada pelo fabricante do detergente.

No entanto, cabe-se destacar que o efeito das variações de temperatura e pressão em relação às fornecidas pelo site do fabricante para o detergente pesquisado, foram desconsideradas, visto que os dados do fabricante, são informadas para um único valor de temperatura. Dentro desta ótica, os resultados encontrados, indicam que erros encontrados por esses grupos podem ser considerados satisfatórios. Estas diferenças entre os valores encontrados e o valor obtido no site do fabricante estão também relacionadas as incertezas observadas nos experimentos. A Tabela 6, obtida pela análise de propagação de incertezas no EES mostra as principais “fontes” de incerteza nas medidas realizadas.

Tabela 6. Fontes de incerteza (%) nas determinações da massa específica.

Grupo	$\partial RO_{DET} / \partial M_{PROV}$	$\partial RO_{DET} / \partial M_{PROVDET}$	$\partial RO_{DET} / \partial M_{PROVH2O}$
1	0,00	50,82	49,18
2	1,96	39,26	58,76
3	0,00	98,89	1,11

Os resultados apresentados na Tabela 6 mostram, para este caso específico que a maior fonte de incerteza na determinação da massa específica, para o Grupo 3, foi relacionada a medida da massa da proveta mais a do detergente, ou seja, $m_{\text{proveta+det}}$, o que “impactou” em cerca de 99% da incerteza propagada. Tal resultado era esperado, pois a massa $m_{\text{proveta+det}}$ foi medida com incerteza de $\pm 0,1$ g, enquanto as demais foram medidas com a outra balança, com incerteza dez vezes menor, ou seja, $\pm 0,01$ g (conforme registrado na Tabela 1). O mesmo raciocínio pode ser computado para os demais experimentos dos Grupos 1 e 2. Especificamente para os resultados - Grupo 2, observa-se, portanto, que o valor da incerteza propagada na medida da massa específica, advém de 2 fontes principais, sendo 39,26% pela medida da proveta com detergente e 58,76 % pela medida da massa da proveta com água. Estes resultados são facilmente obtidos, pelo EES, e são apresentados em uma guia específica da ferramenta, como mostram a Figuras 1, 2 e 3 e esta mesma metodologia poder adotada para outros experimentos em laboratório.

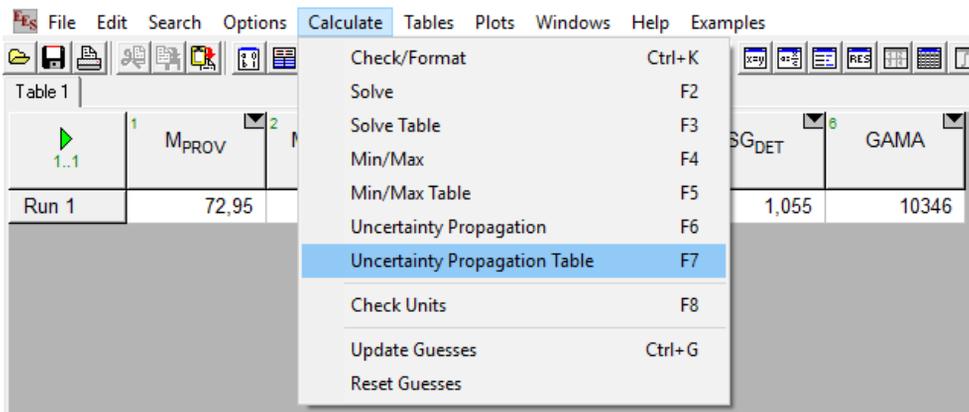


Figura 1. Função interna do EES para análise da propagação de incertezas.

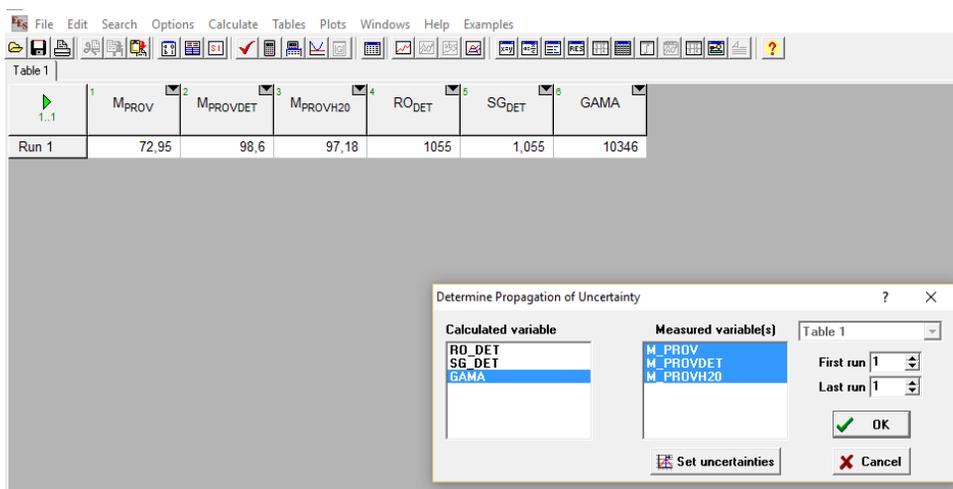


Figura 2. Determinação do peso específico e sua incerteza associada: Grupo 3.

Variable	Value	Partial Derivative	Contribution (%)
M_{PROV}	$72,95 \pm 0,01$	$\partial RO_{DET} / \partial M_{PROV} = 2,41$	0,00 %
$M_{PROVDET}$	$98,6 \pm 0,1$	$\partial RO_{DET} / \partial M_{PROVDET} = 41,12$	98,89 %
$M_{PROVH2O}$	$97,18 \pm 0,01$	$\partial RO_{DET} / \partial M_{PROVH2O} = -43,53$	1,11 %
RO_{DET}	$1055 \pm 4,135$		

Figura 3. Contribuições percentuais na determinação da massa específica: Grupo 3.

A utilização de software EES, neste trabalho, foi significativa, tendo em vista a sua facilidade de uso e ao fato de apresentar diretamente uma função de análise de propagação de incertezas, como mostram as Figuras 1, 2 e 3. Sem a utilização do EES, haveria a necessidade de se ter que proceder a derivação de cada termo individual para o cálculo da incerteza final. Desta forma, o EES pode ser entendido como uma ferramenta de apoio a tomada de decisão em Engenharia, que facilita e possibilita a melhoria do processo de ensino-aprendizagem.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, através de um experimento simples, foi utilizada a metodologia de Propagação da Incerteza de Medição, que é um procedimento onde se estima a propagação do desvio padrão de uma grandeza R a partir do desvio padrão de suas variáveis dependentes x_1 até x_n , segundo Kline e McClintock (TAYLOR, 2012; GUM, 2008; FOX e MCDONALD, 2006; MILLS e CHANG, 2004; DONATELLI e KONRATH, 2005; HOLMAN, 1994).

Em um laboratório de engenharia, a análise de incertezas e propagação de erros deve ser realizada de maneira minuciosa, uma vez que os resultados experimentais finais necessitam ser os mais significativos possíveis, afinal os estudantes, enquanto futuros profissionais, lidarão com projetos que exigirão cálculos tão exatos quanto possíveis. A falta de hábito de lidar com propagação de incertezas podem fazer com que o estudante adquira o hábito de relevar as limitações dos métodos instrumentais utilizados e gerando, assim, resultados que se desviam do conhecimento teórico, de forma a prejudicar projetos que estes estejam desenvolvendo.

A partir do presente trabalho foi possível perceber que mesmo que um experimento seja realizado de maneira cautelosa, a incerteza dos resultados obtidos deve ser considerada, e apresentada, uma vez que além dos erros de manuseio de todos os equipamentos e instrumentos possuem seu desvio de medição.

Por fim, pode-se concluir que o estudo da propagação de incerteza é uma ferramenta de apoio a tomada de decisão no campo da Engenharia, especificamente Engenharia Química, para a qualificação dos resultados experimentais obtidos em laboratório e a garantia de resultados satisfatórios e confiáveis, com a suas respectivas incertezas propagadas. O procedimento ora apresentado permite inferir as magnitudes das contribuições relativas de cada medida no resultado experimental.

REFERÊNCIAS

- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de transporte. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 839 p.
- CABRAL, P. **Erros e incertezas nas medições.** Disponível em: <<http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>>. Acesso em: 26 de Jun. 2016.
- CERANTO, F. A. A., et al. **Modelando sistemas térmicos com o engineering equation solver (ees): facilidade de programação e obtenção de resultados.** XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. São Carlos-S. 2012.
- DE LA CRUZ, M. H. C. et al . **Estimativa da incerteza de medição em análise cromatográfica: abordagem sobre a quantificação de carbamato de etila em cachaça.** Quím. Nova, São Paulo , v. 33, n. 7, p. 1578-1584, 2010 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422010000700027&lng=en&nrm=iso>. access on 02 Dec. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422010000700027>.
- DONATELLI, G. D. KONRATH, A. C. **Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição.** Revista de Ciência & Tecnologia, V. 13, n 25/26, p. 5-15. Jan./Dez. 2005.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- GUM. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição.** Rio de Janeiro: INMETRO, ABNT, 2008.
- HOLMAN, J. P. **Experimental methods for engineers.** New York: McGraw-Hill. 1994.
- INCROPERA, F. P.; DeWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- MILLS, A. F., CHANG, B. H. **Error Analysis of Experiments: A Manual for Engineering Students.** Los Angeles, California, 2004.
- NETO, J. C. S. **Metrologia e controle dimensional.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- PERRY, R. H., BENSLOW, L. R., BEIMESCH, W. E., et al. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 8ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2008.
- SIQUEIRA, A. M. O., SATO, A. G.; **Apostila de Laboratório de Engenharia Química I,** Viçosa: UFV, 2016, Disponível em: <<https://www2.cead.ufv.br/sistemas/pvanet/files/conteudo/4459/praticaN01elementosbasicosmecflu.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2016.
- TAYLOR, J. R. **Introdução à análise de erros: o estudo de incertezas em medições físicas.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 352 p.
- TOGINHO FILHO, D. O., ANDRELLO, A.C., **Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral,** Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, 2009.
- VIM. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012).** Duque de Caxias, RJ : INMETRO, 2012.
- WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E.; G. RORRER, G. **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer.** 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2008. xiii, 711 p

MEASUREMENT UNCERTAINTY: A ACADEMIC SMALL EXPERIMENT

PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS: UM EXPERIMENTO ACADÊMICO SIMPLES

A. C. A. ANDRADE, H. F. A. F. REIS, A. M. O. SIQUEIRA, M. F. MADUREIRA, N. A. GOUVÊA, L. F. GONZAGA, T. L. MENEZES e B. H. F. FREIRE¹

¹Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Química
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9334-0394>
E-mail: antonio.siqueira@ufv.br

ABSTRACT: Uncertainties are an estimate of the reliability of a measure. They are intrinsic to any measurement process and have their origin both in procedural flaws as the own limitations of the instruments used for the measurements. Understanding how they spread is critical to the design of experiments, once that to minimize them we obtain more reliable data. This study provides a conceptual discussion about uncertainty and illustrates the application of the methodology in a simple experiment related to Fluid Mechanics in a Chemical Engineering course. The methodology used for the analysis of uncertainties was Kline and McClintock. Engineer Equation Solver software (EES) was used for the calculations.

KEYWORDS: Measurement uncertainty; Fluid properties; Propagation of uncertainty; Chemical Engineering.