



VALIDAÇÃO DO MÉTODO GUM USANDO O MÉTODO GUM-S1 PARA AVALIAR A INCERTEZA ASSOCIADA A INDICADORES DE DESEMPENHO AMBIENTAL

Carlos Eduardo P. Mendes da Silva¹, Ricardo de Araújo Kalid², Karla Patrícia Esquerre³

¹ Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, carlosmendez@gmail.com

² Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, kalid@ufba.br

³ Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, karla.esquerre@gmail.com

Resumo: Os indicadores de desempenho ambiental têm sido construídos e utilizados como um instrumento de medição do desempenho ambiental com diversas finalidades no meio industrial, dentre elas a tomada de decisão. No entanto, poucos trabalhos encontrados na literatura abordam a questão da qualidade dos dados utilizados para construção e qualificação desses indicadores. Um dos fatores negligenciado é a incerteza associada aos indicadores de desempenho ambiental. O objetivo principal deste artigo é comparar os resultados das incertezas associada ao indicador de desempenho ambiental avaliados pelos métodos GUM e GUM-S1. Os resultados obtidos entre os métodos GUM e GUM-S1 foram comparados em termos de incerteza padrão e incerteza expandida. Os resultados mostraram que o modelo matemático da grandeza de saída utilizada é fracamente não linear, podendo ser utilizado o método GUM para avaliação da incerteza.

Palavras chave: Indicador de desempenho ambiental, incerteza de medição, Suplemento 1 GUM, Simulação Monte Carlo.

1. INTRODUÇÃO

Os indicadores podem ser utilizados para expressar informações sobre o desempenho ambiental das organizações. O resultado dessa medida indireta, nada mais é do que uma aproximação ou uma estimativa do valor verdadeiro do indicador tornando-se necessário avaliar o grau de dúvida associado, ou seja, a incerteza de medição; contudo esse é fator que é geralmente negligenciado; na literatura foram encontrados apenas 4 trabalhos que tratam da incerteza em indicadores ambientais [1- 5].

Um método amplamente aceito pelos organismos de acreditação para avaliar a incerteza de medição é o *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição* (GUM) [5]. O GUM estabelece regras gerais que podem ser adotadas pelos metrologistas, desde o chão de fábrica até a pesquisa fundamental, para avaliar a incerteza da medição do mensurando através de medidas diretas e indiretas.

Devido às limitações do método proposto pelo GUM, um método suplementar ao mesmo, baseado na lei da propagação de funções de densidade de probabilidade (PDF) através do método de Monte Carlo (GUM-S1), foi desenvolvido de modo a fornecer uma maior aplicabilidade

na avaliação da incerteza de medição. Essa lei considera uma base probabilística para a avaliação da incerteza de medição por meio do uso direto de PDFs atribuídas às grandezas de entrada do modelo matemático do mensurando ao invés do uso de suas estimativas e suas respectivas incertezas padrão.

O método numérico recomendado pelo GUM-S1 para propagação de PDFs é o método Monte Carlo (MMC). O MMC fornece uma abordagem geral para aproximar a função de distribuição para a grandeza de saída. Segundo Grossi [8], o MMC consiste em simular um experimento com a finalidade de estimar propriedades estocásticas de uma população, a partir de uma nova amostragem aleatória dos componentes dessa população. O MMC, também chamado de amostragem estocástica, possui aplicações práticas bastante amplas, sendo também utilizado para validação de resultados fornecidos pela metodologia de análise de incertezas proposta pelo método GUM, podendo incluir ainda os casos onde tal metodologia não pode ser aplicada [7].

Avaliação da PDF da grandeza de saída requer o cálculo de integrais multidimensionais, que normalmente é realizado numericamente. A ideia básica deste método é aplicar o valor aleatório da PDF conjunta das grandezas de entrada e propagar esse valor através do modelo matemático para produzir o valor aleatório da distribuição da variável de saída. Repetindo este procedimento muitas vezes, uma PDF empírica da grandeza de saída é obtida, e será usada para determinar a estimativa, a incerteza padrão, os intervalos de abrangência do mensurando, e outras informações estatísticas adicionais como: mediana, moda, momentos centrais de ordem mais elevadas (assimetria e curtose).

Para comparação dos resultados de incerteza do mensurando avaliados pelo método GUM e GUM-S1, o Suplemento 1 do GUM recomenda um procedimento baseado no número de algarismos significativos que será utilizado na expressão da incerteza expandida de medição. O objetivo é validar o método GUM adequado dentro de uma tolerância numérica estipulada, tomando como referência o método GUM-S1.

O presente trabalho tem como objetivo comparar os resultados das incertezas associada ao indicador de desempenho ambiental avaliados pelos métodos GUM e GUM-S1. Como ilustração, será aplicada a um indicador de

geração de efluente por produção de petroquímico em uma planta industrial.

2. OBJETIVOS

Comparar a avaliação da incerteza padrão e expandida associada ao indicador de desempenho ambiental de uma planta industrial, através dos métodos GUM e GUM-S1.

3. METODOLOGIA

Para comparação de resultados de incerteza avaliados pelos métodos GUM e GUM-S1, o Suplemento 1 do GUM [9] recomenda um procedimento baseado no número de algarismos significativos expressos na avaliação da incerteza.

Neste trabalho, o procedimento de comparação é baseado na determinação se os intervalos de abrangência, ou a incerteza padrão obtidos pelos métodos GUM e GUM-S1 concordam dentro de uma tolerância numérica estipulada. Esta tolerância numérica é determinada em termos dos limites de intervalos de abrangência e corresponde àquele dada pela avaliação da incerteza padrão obtida pelo método GUM-S1, que é observado em termos de algarismos significativos.

O valor da tolerância numérica δ é definido pela expressão $\delta = c \times 10^l$, onde c e l são números inteiros; δ é o valor da incerteza padrão com dois algarismos significativos; c sempre será a metade da unidade referente ao último dígito do valor da incerteza padrão; e l é o número de casas decimais quando a incerteza é apresentada com dois algarismos significativos. O GUM-S1 recomenda o uso de um ou dois algarismos decimais significativo.

$$\delta = \frac{1}{2} 10^l \quad (1)$$

O Suplemento 1 do GUM propõe que a validação do GUM seja realizada em relação ao intervalo de abrangência do mensurando. Uma contribuição deste trabalho é validar o uso do método GUM em termos de incerteza padrão, visto que o GUM defende o uso da incerteza padrão como parâmetro para expressar quantitativamente a incerteza do resultado de uma medição. Assim, os métodos GUM e GUM-S1 poderão ser comparados entre as diferenças da incerteza padrão ($d(u)$) de ambos os métodos, em relação ao δ , Equação (2).

$$d(u) = |u_c(I) - u(I)| \quad (2)$$

Se $d(u)$ for menor que δ , a aplicação do método GUM para avaliação da incerteza padrão associada ao indicador (I) é válida.

A comparação dos intervalos de abrangência obtidos pelos métodos GUM e GUM-S1 realizada através das Equações (3) e (4):

$$d_{inf} = |y - U - y_{inf}|, \quad (3)$$

$$d_{sup} = |y + U - y_{sup}|, \quad (4)$$

onde, y e U é a estimativa da média e sua incerteza expandida obtida pelo método GUM, para uma determinada probabilidade de abrangência; y_{inf} é o limite inferior e, y_{sup} o limite superior obtido pelo método GUM-S1.

Se as diferenças entre os limites inferiores d_{inf} e limites superiores d_{sup} gerar números menores que o valor de δ , os resultados das incertezas são compatíveis para aquele dado número de algarismos significativos e para aquela probabilidade de abrangência, portanto a aplicação do método GUM é válida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo matemático do indicador de geração de efluente é definido pela Equação (5), onde o numerador representa o volume de efluente (VE) e o denominador produção de petroquímicos (P).

$$IGE = \frac{VE}{P} \quad (5)$$

O método GUM-S1 precisa do conhecimento das PDFs das grandezas de entrada do (IGE). Por causa da falta de conhecimento das PDFs das variáveis desse estudo de caso, no que tange à PDF dos dados fornecidos pela empresa, foi realizada uma análise de sensibilidade variando as PDFs (Gaussiana (G), Triangular (T) e Uniforme (U)) para cada um dos seus componentes (VE e P) de forma a permitir ter-se o conhecimento do impacto dessas PDFs na estimativa e incerteza do IGE .

No suplemento 1 do GUM a comparação com o método GUM é realizada utilizando a tolerância numérica (δ), em relação ao intervalo de abrangência do mensurando. Assim, se for essencial apresentar o resultado de medição do IGE através da sua incerteza padrão ($u(IGE)$) é necessário também verificar quais os métodos adequados para avaliação da incerteza de medição.

Para os resultados da incerteza padrão em torno de $u(IGE) = 0,029 \text{ m}^3/\text{t}$ usando o método GUM-S1, estes podem ser expressos considerando dois algarismos significativos, como $29 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{t}$, e assim $c = 29$ e $l = -3$, e para um algarismos significativos a incerteza padrão pode ser expressa como $u(IGE) = 0,03 \text{ m}^3/\text{t} = 3 \times 10^{-2}$, e assim $c = 3$ e $l = -2$. Logo, as tolerâncias numéricas são:

Para 1 algarismo significativo:

$$\delta_1 = \frac{1}{2} 10^{-2} = 0,005 \quad (5)$$

Para 2 algarismos significativos:

$$\delta_2 = \frac{1}{2} 10^{-3} = 0,0005 \quad (6)$$

A Tabela 1 apresenta os resultados dos métodos GUM e GUM-S1 comparados em termos das diferenças entre as incertezas padrão ($d(u)$) em relação à tolerância numérica estabelecida (δ_1 e δ_2) para cada possibilidade encontrada nas variações das PDFs das grandezas de entrada (VE e P).

Tabela 1. Comparação das incertezas padrão do IGE entre os métodos GUM e GUM-S1, para diferentes PDFs das grandezas de entrada.

Método	PDFs		u	$d(u)$	v	v
	VE	P	(m ³ /t)	(m ³ /t)	δ_1	δ_2
GUM-S1	G	U	0,0287	0,0000	sim	sim
GUM-S1	G	T	0,0287	0,0000	sim	sim
GUM-S1	G	G	0,0287	0,0000	sim	sim
GUM-S1	U	G	0,0287	0,0000	sim	sim
GUM-S1	U	T	0,0287	0,0000	sim	sim
GUM-S1	U	U	0,0287	0,0000	sim	sim
GUM-S1	T	U	0,0287	0,0000	sim	sim
GUM-S1	T	G	0,0287	0,0000	sim	sim
GUM-S1	T	T	0,0287	0,0000	sim	sim

v : O método GUM é válido ?

$\delta_1 = 0,005$ para 1 algarismo significativo.

$\delta_2 = 0,0005$ para 2 algarismos significativos.

Para tolerância numérica de um e dois algarismos significativos, a validação do método GUM é satisfatória em todas as possibilidades encontradas nas variações das PDFs do IGE.

Uma comparação entre os métodos GUM e GUM-S1 foi realizada também em relação ao intervalo de abrangência (I.A.(IGE)). Os resultados dos métodos GUM e GUM-S1 foram comparados de acordo com o critério recomendado no GUM-S1 para avaliação da compatibilidade das diferenças dos limites inferior d_{inf} e superior d_{sup} em relação a uma tolerância numérica estabelecida (δ_1 e δ_2).

Tabela 2. Comparação das incertezas expandida do IGE entre os métodos GUM e GUM-S1, para diferentes PDFs das grandezas de entrada.

Método	PDFs		d_{inf}	d_{sup}	v	v
	VE	P	(m ³ /t)	(m ³ /t)	δ_1	δ_2
GUM-S1	G	U	0,0011	0,0012	sim	não
GUM-S1	G	T	0,0014	0,0011	sim	não
GUM-S1	G	G	0,0000	0,0000	sim	sim
GUM-S1	U	G	0,0036	0,0040	sim	não
GUM-S1	U	T	0,0039	0,0037	sim	não
GUM-S1	U	U	0,0040	0,0038	sim	não
GUM-S1	T	U	0,0001	0,0010	sim	não
GUM-S1	T	G	0,0007	0,0002	sim	não
GUM-S1	T	T	0,0000	0,0000	sim	sim

v : O método GUM é válido ?

$\delta_1 = 0,005$ para 1 algarismo significativo.

$\delta_2 = 0,0005$ para 2 algarismos significativos.

Para tolerância numérica de dois algarismos significativos a validação do método GUM é confirmada apenas na combinação das PDFs das grandezas de entrada (Gaussiana) e (Triangular), logo, para todas as outras possibilidades encontradas nas variações das PDFs das grandezas de entrada o método adequado para avaliar a incerteza é o GUM-S1. Considerando que os dados utilizados neste estudo de caso são dados de campo, foi adotado um algarismo significativo na incerteza padrão, assim, a validação para o uso do método GUM é satisfatória em todas as possibilidades encontradas nas variações das PDFs.

Nesse estudo de caso, as diferenças dos limites inferior d_{inf} e superior d_{sup} são menores quando é adotado uma PDF próxima a curva normal como o caso da PDF triangular, e maiores quando atribuída uma PDF uniforme para as

grandezas de entrada do IGE. Para uma melhor compreensão das diferenças existentes entre os intervalos de abrangência pelos métodos GUM e o GUM-S1 variando as PDFs do VE e P mencionada anteriormente observem as Figuras (1) e (2).

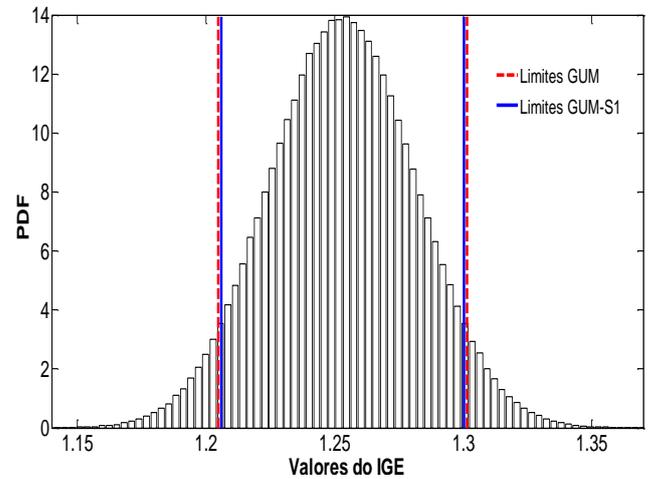


Fig. 1. PDF gerada pelo MMC para o mensurando e PDFs gaussianas para todas as grandezas de entrada.

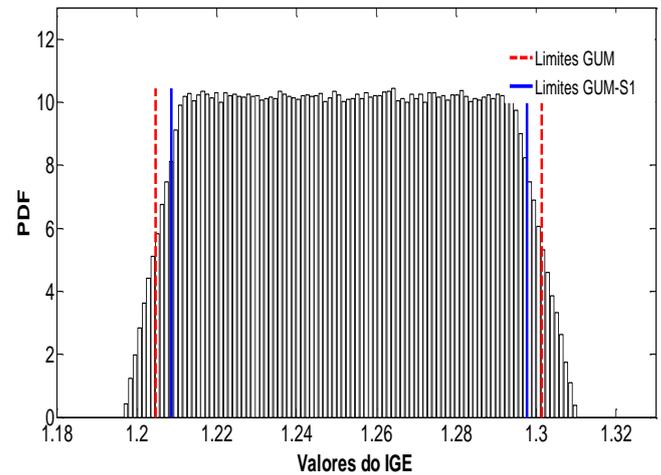


Fig. 2. PDF gerada pelo MMC para o mensurando e PDFs uniformes para todas as grandezas de entrada

5. CONCLUSÕES

Os resultados da avaliação da incerteza de medição do IGE por meios do método GUM-S1 foi apresentada e comparada ao método GUM. Sendo assim, a validação do método GUM usando o método GUM-S1 permitiu chegar às seguintes conclusões:

- Se avaliação da incerteza de medição do IGE for realizada baseada na incerteza padrão, considerando um e dois algarismos significativos, o uso do método GUM é válido para todas as possibilidades testadas na análise de sensibilidade das PDFs das grandezas de entrada.
- Caso seja necessário apresentar o resultado da medição do IGE em termos de intervalo de

abrangência, portanto avaliar a incerteza expandida, pode-se observar que, na análise de sensibilidade realizada nas variações das PDFs das grandezas de entrada considerando 1 algoritmo significativo na incerteza padrão, foi constatado que o modelo matemático do IGE é fracamente não linear, podendo ser utilizado o método GUM para avaliação da incerteza. Contudo, se for necessário expressar 2 algoritmos significativos, há diferenças entre os métodos GUM e GUM-S1, (exceto para os casos onde as PDFs atribuídas para as grandezas VE e P é gaussiana ou triangular) o que impede o uso do método clássico (GUM) e obriga ao uso do método de Monte Carlo para avaliar a incerteza expandida.

- No método GUM é assumido que a PDF do mensurando deve se aproximar de uma gaussiana visto que esta hipótese é necessária para estimar o intervalo de abrangência [6]. Nesse estudo observa-se que quando é atribuída uma PDF com uma curva de distribuição próxima a gaussiana, como é o caso da triangular para o componente principal do indicador de efluente (Figura (1)), as diferenças entre os intervalos GUM e GUM-S1 são pequenas e a abordagem pelo método GUM pode ser utilizada.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela ajuda financeira na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L., S. BARRAUD, J.-P. B., 2002, “Uncertainties, performance indicators and decision aid applied to stormwater facilities”, *Urban Water*, v. 4, pp. 163-179
- [2] PEROTTO, E., CANZIAN, R., MARCHESI, R., et al., 2008, “Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study”, *Journal of Cleaner Production*, v. 16, pp. 517 - 530.
- [3] MENDES, C., DE KALID, R. A., ESQUERRE, K. P. O., et al., 2010a, “A importância da incerteza para avaliação dos indicadores no sistema de gestão ambiental”. In: SHEWC2010 - X Safety, Health and Environmental World Congress, a.
- [4] MENDES, C., Avaliação da incerteza associada a indicadores de desempenho ambiental: Estudo de caso. 2011. 95p. Dissertação (mestrado em Engenharia Industrial). Programa de Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- [5] MENDES, C., DE SOUZA, L. S., KALID, R., et al., 2010b, “Assessment of the uncertainty associated with the energy indicator”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v.15, pp. 3156 - 3164.
- [6] BIPM, IEC, IFCC, et al., 2008b, “Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Joint Committee for Guides in Metrology”. Relatório técnico, Bureau International des Poids et Mesures, JCGM 100:2008, b. Primeira versão desse documento referente ao ano de 1995
- [7] Cox, M., Harris, P., 2005, “An outline of Supplement 1 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement on numerical methods for the propagation of distributions”, *Measurement Techniques*, v. 48, n. 4, pp. 336-345.
- [8] Grossi, P. A., 2008, “Metodologia para Avaliação de Incerteza na Medição de Propriedades Termofísicas pelo Método Flash Laser: Método de Monte Carlo aplicado a Modelos Dinâmicos de Saída Multivariável”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
- [9] BIPM, IEC, IFCC, et al., 2008c, “Evaluation of Measurement Data-Supplement 1 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement-Propagation of distributions using a Monte Carlo method”. Relatório técnico, Joint Committee for Guides in Metrology, Bureau International des Poids et Mesures, JCGM 200:2008, c.