

CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA ENSAIOS DE EMISSÕES DE MOTORES PESADOS DO CICLO DIESEL

Tadeu Cavalcante Cordeiro de Melo¹, Marcos Fernando Mendes de Brito¹,
Márcia Figueiredo Moreira¹, Guilherme Bastos Machado¹, Dennis Rampel²,
Luiz Carlos Daemme²

¹ CENPES, Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A.

² INSTITUTOS LACTEC

tcm@petrobras.com.br; marcosfernando@petrobras.com.br;
mfigueiredo@petrobras.com.br; machadogb@petrobras.com.br;
dennis@lactec.org.br; luiz.carlos@lactec.org.br

RESUMO

A incerteza de medição é um assunto importante e desafiador para os laboratórios de testes de motores. As medições nas salas de testes de motores estão sob a influência de vários parâmetros e tipos de equipamentos que podem impactar nos resultados dos ensaios. Muitas variáveis de interesse são calculadas a partir da combinação de mais de uma grandeza, aumentando dessa forma o valor da incerteza final. Os motores pesados do ciclo diesel da fase CONAMA P7 são homologados quanto a emissões, pela execução de ensaios em banco de provas de motor de acordo com os ciclos estacionário (ESC) e transiente (ETC). O conhecimento da incerteza de medição é importante para assegurar que o motor testado esteja dentro dos limites de emissões. Não existem muitos artigos publicados sobre metodologias para cálculo de incertezas relacionadas a emissões de poluentes de motores pesados a diesel. Esse artigo apresenta uma metodologia de cálculo e também resultados de incertezas de medição de poluentes legislados para um motor a diesel da fase CONAMA P7.

ABSTRACT

Uncertainty of measurement is an important and challenging matter for engine test laboratories, especially regarding tailpipe emissions. The measurements in engine test cells are under the influence of several parameters and types of equipment, which may impact the test results. Many variables of interest are derived from the combination of more than one quantity, increasing the uncertainties of the final reported value. Heavy duty diesel engines are homologated for emissions using engine test dynamometers according to predefined cycles and restricted emission limits. Uncertainty of measurement knowledge is important to assure that the diesel engine is within these emission limits. For the CONAMA P7 engines, the homologation tests include emission measurement according to stationary cycles (ESC) and also transient tests (ETC). There are not many published papers about methods to calculate uncertainty of measurement related to diesel engine emissions. This paper presents methods to calculate the uncertainty of measurement of legislated pollutants for diesel engines (CO, NO_x, THC and particulate matter).

INTRODUÇÃO

Em janeiro 2012, teve início no país a fase CONAMA P7 do PROCONVE para motores pesados do ciclo diesel, com uma redução significativa de NOx e material particulado (MP). Além da inclusão da realização de ensaios de emissões em banco de provas com um ciclo transiente (ETC - *European Transient Cycle*), os motores da fase P7 devem continuar sendo testados também no ciclo estacionário (ESC- *European Stationary Cycle*), ambos os ciclos estão descritos na norma ABNT NBR 15634 [1] e foram baseados na legislação europeia EURO V.

Os resultados finais dos gases e do material particulado para cada ciclo são expressos em g/kWh, após vários cálculos matemáticos baseados na medição de sofisticados equipamentos de aquisição de dados, analisadores de gases e outros sensores, que adicionam complexidade ao processo de medição experimental. Dessa forma, para que seja feita uma análise mais precisa da influência das propriedades do óleo diesel ou de parâmetros do motor nas emissões de poluentes, é muito importante se estimar de forma adequada as incertezas envolvidas nessa cadeia de medições.

De forma geral são encontrados artigos que mencionam apenas o cálculo de incerteza de medição do tipo A, que está associada a repetições de ensaios (desejável no mínimo três). Entretanto para se conhecer o valor verdadeiro de uma grandeza é necessário também o cálculo da incerteza do tipo B, que está associada a calibração e resolução dos equipamentos/sensores/instrumentos, combinações matemáticas de variáveis, etc., e como é feita a propagação dessas incertezas.

Apesar da importância do tema, não existem muitos artigos publicados sobre metodologias para cálculo de incertezas relacionadas a emissões de poluentes de motores pesados a diesel, em especial dos motores CONAMA P7 (EURO V), entretanto foram encontrados alguns artigos com procedimentos de cálculo de incerteza de medição de ensaios de emissões em dinamômetro de chassi.

MELO & DIAS [2] calcularam a incerteza final de medição de ensaio de emissões para veículos leves em dinamômetro de chassi, incluindo CO, CO₂, HC, NOx e aldeídos. Os valores finais relativos para as incertezas foram de 8% para o CO, 5% para o CO₂, 20% para o THC, 6% para o NOx e 18% para os aldeídos. Comparando com a incerteza do tipo B, os valores do tipo A foram menores para CO₂ e THC, equivalentes para CO e NOx e mais elevados para os aldeídos. O artigo propõe alguns cuidados operacionais no sentido de reduzir as incertezas de medição.

BIELACZYC *et al.* [3] também estudaram os cálculos de incerteza de medição para testes de emissões em dinamômetro de chassi, mas com o uso de diferentes veículos europeus (Euro 2, Euro 3, Euro 4 e Euro 5). Os valores de incerteza relativa para as emissões foram menores que 13% (THC), 11% (CO) e 24% (NOx) para os veículos Euro 2, Euro 3 e Euro 4 e de aproximadamente 33% (THC), 42% (CO) e 53% (NOx) para o veículo Euro 5. De forma geral, as incertezas de medição mais que dobraram nos veículos Euro 5, utilizando os equipamentos usuais, o que pode ter ocorrido em função dos baixos níveis de emissões destes veículos.

MELO & CARVALHO [4] propuseram uma metodologia de cálculo das incertezas de medição para os valores de autonomia (km/L) dos veículos nacionais medidos segundo a legislação brasileira [5, 6]. Como a economia de combustível é calculada com base nos valores de emissões de escapamento de HC, CO e CO₂, as incertezas de medição destes gases também foram estimadas. Os valores finais de incertezas foram de 32% para HC, 29% para CO, 5% no caso do CO₂ e 1,3% para a autonomia de combustível (km/L).

MOHANTA *et al.* [7] também estudaram o cálculo de incerteza de medição em dinamômetro de chassis e fizeram o cálculo para as emissões gasosas e de material particulado. O artigo concluiu que as medições de emissões contínuas apresentaram valores de incertezas de medição inferiores aos valores estimados para a medição das amostras diluídas em sacos de amostragem.

MISHRA *et al.* [8] estudaram a incerteza de medição das emissões gasosas e de material particulado feitas por um sistema de diluição parcial e outro de diluição total. O artigo concluiu que as incertezas de medição calculadas pelo método RSS (Root Sum Square) tiveram valores próximos aos valores de incerteza simulados pelo método de Monte-Carlo.

No que diz respeito às incertezas de medição de ensaios de emissões em banco de provas de motores, há poucos trabalhos publicados. SWANSON *et al.* [9] estudaram as incertezas de medição de emissões de material particulado (MP) em motor diesel, avaliando os fatores de influência na acurácia e precisão de pesagem do MP. A incerteza total, para o melhor caso e casos típicos, ficou entre 1 e 5 µg. Esta incerteza foi utilizada para calcular a incerteza total das emissões específicas, que também dependem das incertezas de vazão, razão de diluição, entre outras.

MELO *et al.* [10] investigaram a combustão, desempenho e emissões de um motor flex variando o teor de etanol hidratado em misturas com a gasolina nacional, sendo as emissões específicas em g/kWh calculadas segundo a norma CFR 2009 [11]. MELO *et al.* [12] utilizou os mesmos dados experimentais de MELO *et al.* [7] para investigar as incertezas das emissões específicas (g/kWh) de diferentes poluentes. As incertezas de CO, CO₂, NO_x e THC foram da ordem de 6% para todos os combustíveis e condições de operação do motor. As incertezas dos aldeídos e do etanol não queimado variaram de 6 a 14%. Para todos os poluentes estudados, as incertezas de medição do tipo B foram maiores que as do tipo A.

MELO [13] calculou a incerteza tipo A de um motor CONAMA P7 e encontrou 2,6% para o material particulado e 5,9% para o NO_x. MELO *et al.* [14] publicaram valores de incerteza das emissões do ciclo ESC de um motor diesel da fase CONAMA P5, sendo 1,4% para o NO_x (tipo A= 0,3%) e 11,9% para o MP (tipo A=1%). Também concluiu que os valores de incerteza do tipo B foram maiores do que os do tipo A.

Dando continuidade nas avaliações de incertezas de medição das emissões em banco de provas de motores, este artigo apresenta uma metodologia de cálculo e análise de incertezas dos resultados de emissões (CO, NO_x, THC e MP) obtidos em um motor diesel da fase CONAMA P7 (Euro 5), testado de acordo com os ciclos ESC e ETC, segundo a norma ABNT NBR 15634 [1].

1. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

1.1. Combustíveis e Motor de teste

A avaliação foi realizada com um óleo diesel comercial S10 (10 ppm de enxofre) com 7% v/v de biodiesel (B7), de acordo com a especificação estabelecida na Resolução ANP n° 69 de 2014 (especificação do óleo diesel S10) e com a Lei n° 13033 de 2014 (teor de biodiesel).

Foi utilizado um motor CONAMA P7 com capacidade volumétrica menor que 9 litros, potência menor que 300 kW e torque máximo menor que 1500 Nm e equipado com sistema SCR, injeção common-rail e turbo com intercooler.

1.2. Instrumentação

Foi utilizado um dinamômetro APA AVL CP10088 de 440 kW controlado e monitorado por sistema de automação AVL PUMA OPEN. Para a medição de CO, NOx e HC foi usado um sistema HORIBA MEXA 7500DEGR. As medições de CO e NOx foram feitas em base seca, enquanto que a medição de HC foi feita em base úmida. Para a amostragem de material particulado, foi usado um sistema de mini-diluição dos gases de exaustão modelo AVL Smart Sampler SPC 472. Para a pesagem dos filtros de material particulado foi usada uma balança de microgramas Sartorius modelo CPA2P-F instalada em uma câmara de pesagem com temperatura e umidade controladas, conforme mostrado na figura 1.



Figura 1 – Câmara de condicionamento/pesagem de filtros com a balança

1.3. Procedimento dos testes de medição de emissões

Os ensaios de emissões foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 15634 [1], para os ciclos ESC e ETC e o resultado final foi expresso em g/kWh.

Para permitir o cálculo das incertezas do tipo A das emissões gasosas e de material particulado foram realizadas cinco repetições de cada um dos ciclos de ensaio, com o mesmo combustível e motor.

2. TEORIA DE CÁLCULO DAS INCERTEZAS

A teoria básica de cálculo da incerteza de medição e algumas definições usadas na área automotiva podem encontradas nos trabalhos anteriores de MELO *et al.* [2,4,12] e no guia para expressão da incerteza ISO GUM [15]. Para facilitar o entendimento desse artigo essas teorias são resumidas nas seções seguintes.

2.1 – Conceitos Básicos

A incerteza do tipo A (UA) está relacionada a repetição dos ensaios devido à aleatoriedade estatística das incertezas presentes nas medições individuais.

A incerteza do tipo B (UB) está relacionada a fontes de incerteza tais como instrumentos de medição, métodos de calibração, certificados de calibração, materiais de referência, resolução dos instrumentos, curva de linearização, etc.

Para se combinar diferentes incertezas (U_{B1} , U_{B2} , ..., U_{Bn}) e se calcular uma incerteza combinada (U_C), por exemplo, pode ser usada a equação (1) [2,15]:

$$U_C = \sqrt{U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + \dots + U_{Bn}^2} \quad (1)$$

A incerteza expandida (U_E) seria o valor final da incerteza de medição que fornece uma abrangência (fator k) para certo nível de confiança. Neste trabalho, utilizou-se um nível de confiança de 95% e um fator $k=2$, e incerteza expandida (U_E) foi calculada pela multiplicação da incerteza combinada (U_C) por k ($k=2$).

Como nos ensaios de emissões existem muitas equações é necessário se fazer a propagação das incertezas. A equação geral para cálculo da propagação de incertezas (U_Z) de uma função $Z=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ é dada pela equação (15):

$$U_Z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1}\right)^2 U_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2}\right)^2 U_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n}\right)^2 U_{x_n}^2} \quad (2)$$

A seguir são apresentadas algumas equações de cálculo de incerteza para operações matemáticas simples presentes nos cálculos de emissões.

Para funções envolvendo soma ou subtração, por exemplo, $Z= x_1+x_n$ ou $Z= x_1 - x_n$, a incerteza de Z (U_Z), pode ser obtida pela equação (3).

$$U_Z = \sqrt{U_{x_1}^2 + U_{x_2}^2 + \dots + U_{x_n}^2} \quad (3)$$

Para funções com divisão ou multiplicação com simplificações algébricas: se $Z=x_1 \cdot x_2$ ou $Z= x_1/x_2$, a incerteza de Z (U_Z) é obtida pela equação (4).

$$U_Z = Z \sqrt{\left(\frac{U_{x_1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{x_2}}{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_{x_n}}{x_n}\right)^2} \quad (4)$$

As incertezas dos sensores e certificados de calibração de instrumentos devem ser divididas pelo fator de abrangência (k) relatado no certificado. Se o fator k não está disponível, então a incerteza pode ser dividida por $\sqrt{3}$, assumindo-se dessa forma uma distribuição retangular. Para instrumentos com indicadores digitais a incerteza pode ser calculada dividindo-se a menor escala por $\sqrt{3}$ (distribuição retangular) e para indicadores analógicos dividindo-se a menor escala por $\sqrt{6}$ (distribuição triangular). Para sensores sem indicadores locais, a resolução reportada no manual deve ser dividida por $\sqrt{3}$.

Com relação a calibração dos sensores de pressão e temperatura, eles são usualmente calibrados em laboratórios específicos. A tensão ou resistência dos certificados de calibração são simuladas por um equipamento eletrônico em um canal do computador de aquisição de dados. Neste caso a incerteza total inclui as incertezas da calibração do sensor, do certificado de calibração do equipamento de simulação e do seu indicador de leitura. Todas estas incertezas devem ser combinadas conforme equação (1).

Com relação a repetitividade da curva de calibração (U_{RA}) dos analisadores, por exemplo, o software de automação pode calcular médias e desvios-padrão (U_i) para a leitura de cada ponto de calibração. A incerteza da curva de calibração (U_{RA}) pode ser calculada pela equação (5).

$$U_{RA} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \times U_1^2 + (n_2 - 1) \times U_2^2 + \dots + (n_k - 1) \times U_k^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_p - p}} \quad (5)$$

onde U_{RA} é o desvio-padrão combinado devido à repetitividade da curva de calibração, U_i é o desvio-padrão do ponto "i", n_i é o número de leituras em cada ponto e p é o número de pontos da curva de calibração.

Para cálculo da incerteza de regressão linear da curva de calibração (U_{RL}), o software de automação ajusta a curva de calibração às leituras experimentais pela técnica de regressão linear. A incerteza é expressa pela equação (6):

$$U_{RL} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}{n - f}} \quad (6)$$

Onde, U_n é a diferença entre o valor físico da variável e o valor dado pela curva de calibração, após a aplicação da regressão linear, n é o número de pontos de calibração e f é o número de graus de liberdade.

2.2 - Metodologia de cálculo de incerteza dos Ensaios de Emissões

Conforme mencionado anteriormente, este trabalho foi realizado a partir da análise de medições gasosas e de material particulado nos ciclos ESC e ETC. As emissões de CO, NOx, THC e NMHC são medidas em concentração volumétrica e convertidas em vazão mássica para cada poluente em cada um dos 13 modos

operacionais do motor (ESC) e de forma contínua para o ciclo ETC. Para cada poluente, o resultado final é reportado em g/kWh a partir da média ponderada do fluxo mássico de emissões utilizando fatores específicos de ponderação para cada um dos 13 pontos (ESC) e através da integral desse fluxo para o ciclo ETC [1]. As emissões de material particulado são coletadas em um filtro especial, que é pesado e o resultado final também é expresso em g/kWh. Neste caso, a coleta do material particulado é feita pelo sistema *Smart Sample* (AVL SPC 472), que leva em conta o fator de ponderação de cada um dos 13 pontos operacionais do ensaio (ESC) e de forma contínua para o ciclo ETC.

As equações principais utilizadas para calcular as emissões em g/kWh são apresentadas nesta seção. As equações (7) a (9) expressam o cálculo das emissões em vazão mássica (g/h), a partir das medições de concentração volumétrica, respectivamente para CO (CO_{mass}), NOx (NOx_{mass}) e THC (THC_{mass}).

Essas concentrações necessitam ser convertidas para base úmida se as medições forem realizadas em base seca. Neste trabalho, as conversões foram realizadas para CO e NOx, segundo a norma NBR 15634 [1]. No Apêndice A estão descritas as expressões de cálculo de fator de conversão (K_W), e sua incerteza (U_{BK_W}). O cálculo da vazão mássica das emissões é realizado para cada um dos 13 modos de operação do motor (ESC) e integralizando os pontos, no caso do ciclo ETC, conforme equações 7 a 9.

$$CO_{mass} = 0,000966 \times CO_{conc} \times G_{EXHW} \quad (7)$$

$$NOx_{mass} = 0,001587 \times NOx_{conc} \times K_{HD} \times G_{EXHW} \quad (8)$$

$$THC_{mass} = 0,000479 \times THC_{conc} \times G_{EXHW} \quad (9)$$

Nas equações (7) a (9), G_{EXHW} é a vazão mássica dos gases de exaustão em base úmida, dada pela soma das vazões mássicas de ar em base úmida (G_{AIRW}) e de combustível (G_{FUEL}), conforme equação (10).

$$G_{EXHW} = G_{AIRW} + G_{FUEL} \quad (10)$$

K_{HD} é um fator de correção de umidade utilizado somente para as emissões de NOx. O cálculo de K_{HD} é apresentado no Apêndice A.

Depois do cálculo das vazões mássicas das emissões para cada ponto de operação, as emissões específicas em g/kWh (\overline{NOx} , \overline{CO} e \overline{THC}) são calculadas de acordo com as equações (11) a (13).

$$\overline{NOx} = \frac{\sum(NOx_{mass} \times WF_i)}{\sum(Pw(n)_i \times WF_i)} \quad (11)$$

$$\overline{CO} = \frac{\sum(CO_{mass} \times WF_i)}{\sum(Pw(n)_i \times WF_i)} \quad (12)$$

$$\overline{THC} = \frac{\sum(THC_{mass} \times WF_i)}{\sum(Pw(n)_i \times WF_i)} \quad (13)$$

onde WF_i e $Pw(n)_i$ são, respectivamente, os fatores de ponderação e as potências no eixo do motor em cada um dos 13 modos operacionais para o ciclo ESC e potência integralizada e fator de ponderação igual a 1 para o ciclo ETC.

As emissões de material particulado (MP) em g/kWh (\overline{PT}) são calculadas pela equação (14).

$$\overline{PT} = \frac{PT_{mass}}{\sum(P(n)_i \times WF_i)} \quad (14)$$

onde PT_{mass} é a vazão mássica de MP calculada pela equação (15).

$$PT_{mass} = \frac{M_f}{M_{SAM}} \times \frac{\overline{G_{EDFW}}}{1000} \quad (15)$$

M_f é a massa de material particulado coletada no filtro, M_{SAM} é a massa de gás de exaustão diluída que passa através do filtro e $\overline{G_{EDFW}}$ é a média ponderada do fluxo mássico de gás de exaustão diluído em base úmida (ESC), sendo que para o ciclo ETC é usado o valor integralizado do fluxo mássico de gás de exaustão diluído em base úmida. (Apêndice A)

A Figura 2 ilustra as principais variáveis para cálculo das incertezas de medição do tipo B para os poluentes HC, CO, NOx e Material Particulado (MP).

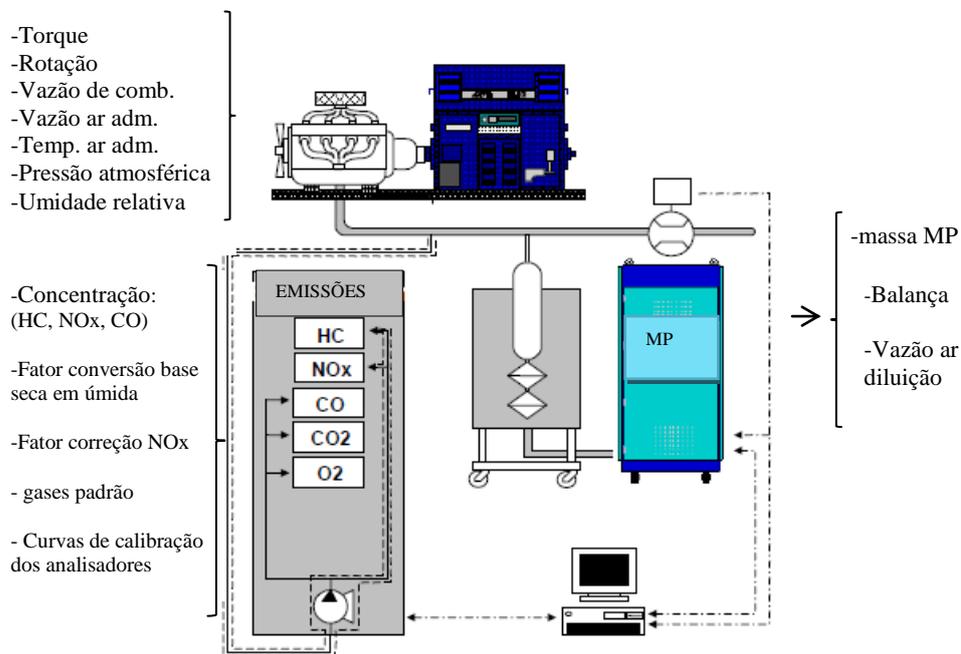


Figura 2 – Banco de Provas e principais variáveis de cálculo das incertezas do tipo B

Conforme mostrado previamente, os valores de emissões de cada poluente são calculados utilizando-se diferentes equações e variáveis. Neste contexto, os principais desafios e contribuições deste artigo residem nos cálculos das

expressões matemáticas, para cada poluente, que auxiliem os técnicos dos laboratórios a estimar as incertezas de medição, como mostrado a seguir.

Vazão mássica dos gases de exaustão: Para estimar as incertezas do tipo B da vazão mássica dos gases de exaustão, ($U_B G_{EXHW}$) foi utilizada a equação (16).

$$U_B G_{EXHW} = \sqrt{(U_B G_{AIRW})^2 + (U_B G_{FUEL})^2} \quad (16)$$

Onde, $U_B G_{AIRW}$ e $U_B G_{FUEL}$ são, respectivamente, as vazões mássicas de ar úmido e combustível, cujas incertezas de medição estão no Apêndice A.

Fator de correção de umidade (K_{HD}): Para estimar a incerteza do tipo B do fator de correção de umidade ($U_B K_{HD}$), utilizou-se a equação (17).

$$U_B K_{HD} = \frac{1}{1 + C + D} \times \sqrt{(U_B C)^2 + (U_B D)^2} \quad (17)$$

onde C e D são variáveis auxiliares, cujas incertezas, $U_B C$ e $U_B D$, são dadas pelas equações (18) e (19).

$$U_B C = \sqrt{((H_A - 10,71) \times U_B A)^2 + (A \times U_B H_A)^2} \quad (18)$$

$$U_B D = \sqrt{((T_A - 25) \times U_B B)^2 + (B \times U_B T_A)^2} \quad (19)$$

$U_B H_A$ e $U_B T_A$ são, respectivamente, as incertezas da umidade absoluta do ar de admissão em g/kg e da temperatura do ar de admissão. A expressão para cálculo de $U_B H_A$ e o valor de $U_B T_A$ são apresentados no Apêndice A, bem como as incertezas $U_B A$ e $U_B B$. As variáveis auxiliares A e B, dependem da vazão mássica de combustível (G_{FUEL}), da vazão mássica de ar de admissão seco (G_{AIRD}) e de sua incerteza ($U_B G_{AIRD}$).

Potência do motor (P_w): A incerteza do tipo B da potência de eixo do motor ($U_B P_w$) foi calculada de acordo com a equação (20).

$$U_B P_w = P_w \sqrt{\left(\frac{U_B TOR}{TOR}\right)^2 + \left(\frac{U_B SPEED}{SPEED}\right)^2} \quad (20)$$

Onde, $U_B TOR$ e $U_B SPEED$ são, respectivamente, as incertezas do tipo B para o torque e velocidade de rotação do motor, dadas no Apêndice A.

Emissões específicas: Para a estimativa das incertezas do tipo B das vazões mássicas das emissões em g/h, as equações (21) a (23) foram desenvolvidas, respectivamente, para NOx ($U_B NO_{xmass}$), CO ($U_B CO_{mass}$) e THC ($U_B HC_{mass}$).

$$U_B \text{NOx}_{\text{mass}} = \text{NOx}_{\text{mass}} \sqrt{\left(\frac{U_B \text{NOx}_{\text{conc}}}{\text{NOx}_{\text{conc}}}\right)^2 + \left(\frac{U_B K_{\text{HD}}}{K_{\text{HD}}}\right)^2 + \left(\frac{U_B G_{\text{EXHW}}}{G_{\text{EXHW}}}\right)^2} \quad (21)$$

$$U_B \text{CO}_{\text{mass}} = \text{CO}_{\text{mass}} \sqrt{\left(\frac{U_B \text{CO}_{\text{conc}}}{\text{CO}_{\text{conc}}}\right)^2 + \left(\frac{U_B G_{\text{EXHW}}}{G_{\text{EXHW}}}\right)^2} \quad (22)$$

$$U_B \text{THC}_{\text{mass}} = \text{HC}_{\text{mass}} \times \sqrt{\left(\frac{U_B \text{THC}_{\text{conc}}}{\text{THC}_{\text{conc}}}\right)^2 + \left(\frac{U_B G_{\text{EXHW}}}{G_{\text{EXHW}}}\right)^2} \quad (23)$$

onde $U_B \text{NOx}_{\text{conc}}$, $U_B \text{CO}_{\text{conc}}$ e $U_B \text{HC}_{\text{conc}}$ são, respectivamente, as incertezas do tipo B das medições de concentrações volumétricas de NOx, CO e THC, cujas expressões de incertezas estão desenvolvidas no Apêndice A.

Para estimativa das incertezas do tipo B das emissões específicas ponderadas, em g/kWh, foram desenvolvidas as equações (24) a (26), respectivamente para NOx ($U_B \overline{\text{NOx}}$), CO ($U_B \overline{\text{CO}}$) e THC ($U_B \overline{\text{HC}}$). Sendo que no caso do ciclo ETC se aplicam essas equações considerando a ponderação ($WF=1$).

$$U_B \overline{\text{NOx}} = \overline{\text{NOx}} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sum (U_B \text{NOx}_{\text{mass}} \times WF_i)^2}}{\sum (\text{NOx}_{\text{mass}} \times WF_i)}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sum (U_B P(n)_i \times WF_i)^2}}{\sum (P(n)_i \times WF_i)}\right)^2} \quad (24)$$

$$U_B \overline{\text{CO}} = \overline{\text{CO}} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sum (U_B \text{CO}_{\text{mass}} \times WF_i)^2}}{\sum (\text{CO}_{\text{mass}} \times WF_i)}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sum (U_B P(n)_i \times WF_i)^2}}{\sum (P(n)_i \times WF_i)}\right)^2} \quad (25)$$

$$U_B \overline{\text{HC}} = \overline{\text{HC}} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sum (U_B \text{HC}_{\text{mass}} \times WF_i)^2}}{\sum (\text{HC}_{\text{mass}} \times WF_i)}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sum (U_B P(n)_i \times WF_i)^2}}{\sum (P(n)_i \times WF_i)}\right)^2} \quad (26)$$

No que diz respeito ao material particulado, a equação (27) foi desenvolvida para estimar a incerteza do tipo B da vazão mássica do poluente em g/h ($U_B \text{PT}_{\text{mass}}$).

$$U_B \text{PT}_{\text{mass}} = \text{PT}_{\text{mass}} \times \sqrt{\left(\frac{U_B M_f}{M_f}\right)^2 + \left(\frac{U_B M_{\text{SAM}}}{M_{\text{SAM}}}\right)^2 + \left(\frac{U_B G_{\text{EDFW}}}{G_{\text{EDFW}}}\right)^2} \quad (27)$$

onde $U_B M_f$, $U_B M_{SAM}$, e $U_B \overline{G_{EDFW}}$ são, respectivamente, as incertezas da massa de material particulado coletada no filtro, da massa de gás de exaustão diluído que passa através do filtro e da média ponderada da vazão mássica de gás de exaustão diluído, em base úmida, que passa pelo filtro, sendo que para o ciclo ETC são utilizados os valores integralizados dessas variáveis. Os valores e expressões destas incertezas são apresentados no Apêndice A.

A fim de estimar a incerteza final do tipo B das emissões específicas ponderadas de material particulado em g/kWh ($U_B \overline{PT}$), utilizou-se a equação (28). Como mencionado anteriormente, no caso do ciclo ETC, considera-se o fator de ponderação igual a 1 e o valor integralizado das variáveis ao longo do ciclo.

$$U_B \overline{PT} = \overline{PT} \times \sqrt{\left(\frac{U_B PT_{mass}}{PT_{mass}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sum (WF_i \times U_B P(n)_i)^2}}{\sum P(n)_i \times WF_i}\right)^2} \quad (28)$$

2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada um dos ciclos ESC e ETC foi calculada a incerteza do tipo A (U_A) pela divisão do valor do desvio padrão dos resultados de 5 ensaios de emissões (pela raiz quadrada de 5 (pois foram feitas 5 repetições)). Para se calcular a incerteza do tipo B das emissões específicas (g/kWh), desenvolveu-se uma planilha eletrônica com o uso das equações apresentadas anteriormente e também no Apêndice A. Na tabela 1 são apresentados os valores para algumas variáveis medidas.

Tabela 1 – Valores de Incerteza tipo B para algumas variáveis medidas

Variável	Unidade	Sigla	Tipo B (U_B)
Torque	Nm	TOR	0,12
Rotação do motor	rpm	SPEED	5,0
Fluxo de massa do combustível	kg/h	G_{FUEL}	0,12
Fluxo de massa de ar úmido	kg/h	G_{AIRW}	12
Temperatura do ar de admissão	°C	T_A	0,2
Pressão Atmosférica	mmHg	P_B	1,5
Umidade Relativa do ar de admissão	%	R_A	0,5
Concentração de NOx	ppm	NOx_{conc}	1,76
Concentração de CO (faixa baixa)	ppm	COL_{conc}	1,45
Concentração de THC ou NMHC	ppm	THC_{conc} ou $NMHC_{conc}$	1,96
Massa de material particulado	g	M_f, M_{SAM}	9,65x 10E-06

A incerteza expandida das medições (U_E) foi calculada a partir da combinação das incertezas dos tipos A e B (incerteza combinada – U_C), multiplicada pelo fator de abrangência (k) considerado igual a 2, conforme explicação prévia.

Na tabela 2 são mostradas em g/kWh, a média das emissões de NOx, CO, THC e material particulado (MP) e os valores das incertezas tipo A(U_A), B(U_B), Combinada (U_C) e Expandida (U_E) para o ciclo ESC.

Tabela 2 - Médias e incertezas de medição no ciclo ESC do motor CONAMA P7

Poluente	Média	U_A	U_B	U_C	U_E
	(g/kWh)				
NOx	1,530	0,0117	0,0121	0,0167	0,0336
CO	0,055	0,0002	0,0024	0,0024	0,0048
THC	0,006	0,0012	0,0017	0,0021	0,0042
MP	0,010	0,0006	0,0008	0,0010	0,0020

Obs: Limites (g/kWh), CONAMA P7(ESC): NOx=2,0; CO=1,5; THC=0,46 e MP=0,02 [16]

Na Tabela 3 são apresentadas as incertezas relativas U_A (%), U_B (%) e U_E (%) em relação aos valores médios das emissões dos poluentes. Também são mostradas as razões das incertezas do tipo B em relação às do tipo A (U_B/U_A).

Tabela 3 – Incertezas relativas do motor CONAMA P7 para o ciclo ESC

Poluente	U_A (%)	U_B (%)	U_B/U_A	U_E (%)
NOx	0,8	0,8	1,0	2,2
CO	0,5	4,4	9,8	8,8
THC	18,2	27,3	1,5	65,6
MP	6,2	7,7	1,2	19,7

Com base nos dados das tabelas 2 e 3 pode-se comentar que:

- A incerteza expandida do NOx foi a menor entre todos os poluentes (2,2%);
- Todos os poluentes apresentaram valores de incerteza do tipo B iguais ou mais elevados do que as do tipo A de forma similar ao encontrado nos trabalhos de MELO *et al.* [11,14];
- A incerteza expandida do THC foi a mais elevada de todas (acima de 60%) devido à dificuldade de medição de valores reduzidos (a emissão do motor em estudo ficou em cerca de 1,3% do limite CONAMA P7);
- Os valores de incerteza expandida encontrados para o MP (19,7%) e para o NOx (2,2%) são da mesma ordem dos valores encontrados por MELO *et al.* [14] para o ciclo ESC em um motor CONAMA P5, respectivamente de 11,9 % e 1,4%.

Na tabela 4 são apresentados os valores médios dos resultados de emissões bem como os valores das incertezas calculadas para o ciclo do tipo ETC.

Tabela 4 – Médias e incertezas de medição no ciclo ETC do motor CONAMA P7

Poluente	Média	U_A	U_B	U_C	U_E
	(g/kWh)				
NOx	1,506	0,0206	0,0683	0,0713	0,1426
CO	0,085	0,0004	0,0104	0,0104	0,0208
NMHC	0,006	0,0005	0,0071	0,0071	0,0141
MP	0,017	0,0003	0,0018	0,0018	0,0035

Obs: Limites (g/kWh), CONAMA P7(ETC): NOx=2,0; CO=4,0; NMHC=0,55 e MP=0,03

Na Tabela 5 são apresentadas as incertezas relativas U_A (%), U_B (%) e U_E (%) dos valores médios das emissões dos poluentes no ciclo ETC. Também são mostradas as razões das incertezas do tipo B em relação às do tipo A (U_B/U_A).

Tabela 5 – Incertezas relativas do motor CONAMA P7 para o ciclo ETC

Poluente	U_A (%)	U_B (%)	U_B/U_A	U_E (%)
NOx	1,4	4,5	3,3	9,5
CO	0,5	12,2	23,2	24,5
NMHC	8,0	110,0	13,8	220,5
MP	1,6	10,5	6,6	21,2

Com base nos dados das tabelas 4 e 5 pode-se comentar que:

- A incerteza expandida do NOx (9,5%) foi a menor entre todos os poluentes, porém bem acima do valor de 2,2% encontrada para o ciclo ESC;
- Todos os poluentes apresentaram valores de incerteza do tipo B mais elevados do que as do tipo A, mesma tendência encontrada para o ciclo ESC;
- A incerteza expandida do NMHC foi a mais elevada de todas e devido a dificuldade de medição de valores muito pequenos (emissão muito abaixo do limite do CONAMA);
- Os valores de incerteza expandida encontrados para o Material Particulado (21,2%) são muito próximos aos valores encontrados para o ciclo ESC (19,7%).

Com base nos resultados de emissões do motor CONAMA P7 para os ciclos ESC e ETC (tabelas 2 e 4) podem ser feitos os seguintes comentários comuns:

- O motor atendeu aos limites do CONAMA P7 para todos os poluentes;
- As emissões de THC, NMHC e CO foram significativamente inferiores aos limites do CONAMA. No caso do ciclo ESC, a média da emissão de THC foi cerca de 2% do limite do CONAMA e para o CO o valor foi de 3,7%. No caso do ciclo ETC as emissões de NMHC foram cerca de 1 % do limite do CONAMA e para o CO o valor foi de 2% do limite.

CONCLUSÕES

Esse artigo apresentou metodologias e resultados de cálculos de incertezas de medição para as emissões de CO, THC, NMHC, NOx e MP, nos ciclos ESC e ETC, utilizando um motor do ciclo Diesel da fase CONAMA P7.

Com relação aos resultados de emissões, para ambos os ciclos (ESC e ETC), o motor atendeu aos limites do CONAMA P7 para todos os poluentes, cabendo a observação de que os valores de THC, NMHC e CO foram muito baixos ficando entre 1 e 2% dos limites do PROCONVE. Também foi verificado que todos os poluentes apresentaram valores de incertezas do tipo B iguais ou mais elevados do que os do tipo A, coerente com o observado em MELO *et al.* [11,14].

Com relação ao ciclo ESC foi observado que: a incerteza expandida do NOx foi a menor entre todos os poluentes (2,2%); a incerteza expandida do THC foi a mais elevada de todas (acima de 60%) devido à dificuldade de medição de valores muito pequenos (emissão muito inferior ao limite do CONAMA P7); os valores de incerteza expandida encontrados para o material particulado (19,7%) e para o NOx (2,2%) foram da ordem de grandeza dos valores encontrados por MELO *et al.* [14] para o ciclo ESC, utilizando um motor CONAMA P5, respectivamente de 11,9% e 1,4%.

Com relação ao ciclo ETC foi observado que: a incerteza expandida do NOx (9,5%) foi a menor entre todos os poluentes, porém bem acima do valor inferior a 2% encontrada para o ciclo ESC; a incerteza expandida do NMHC foi a mais elevada de todas devido à dificuldade de medição de valores muito pequenos (emissão muito abaixo do limite CONAMA P7); os valores de incerteza expandida encontrados para o material particulado (21,2%) foram muito próximos aos valores encontrados para o ciclo ESC (19,7%).

Os valores mais elevados de incertezas encontrados nas medições de material particulado (cerca de 20%) podem dificultar o conhecimento das influências de outros fatores, tais como a qualidade do combustível e parâmetros de projeto e calibração do motor, no valor final de material particulado emitido.

As metodologias apresentadas podem ser aplicadas em outros laboratórios da área e contribuir para estudos e publicações de novos cálculos de incertezas de medição, auxiliando futuras discussões técnicas referentes a esse tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABNT NBR 15634 - VEÍCULOS RODOVIÁRIOS AUTOMOTORES-ANÁLISE E DETERMINAÇÃO DOS GASES DE ESCAPAMENTO SEGUNDO OS CICLOS ETC, ESC E ELR, 2008.

[2] MELO, T.C.C., DIAS, A.L.F., 2004, "Experimental Methods for Reducing Uncertainty of Measurement on Vehicle Emission Testing", SAE 2004 Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, 2004-01-1961, Toulouse, France, June.

[3] BIELACZYC, P., SZCZOTKA, A. Analysis of Uncertainty of the Emission Measurement of Gaseous Pollutants on Chassis Dynamometer. SAE Technical Paper 2007-01-1324 ; 2007.

[4] MELO, T.C.C., CARVALHO, R. N.. Fuel Economy – Method for Calculating Uncertainty of Measurement of Light-Duty Vehicles. SAE Technical Paper 2008-36-0224 ; 2008

[5] ABNT/NBR 6601 - Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono no gás de escapamento, 2005.

[6] ABNT/NBR 12026 - Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de aldeídos e cetonas contidos no gás de escapamento, por cromatografia líquida – método DNPH.

[7] MOHANTA, L., IYER, S., MISHRA, P., AND KLINIKOWSKI, D., "Uncertainties in Measurements of Emissions in Chassis Dynamometer Tests," SAE Technical Paper 2014-01-1584, 2014, doi:10.4271/2014-01-1584.

[8] MISHRA, P., IYER, S., AND KLINIKOWSKI, D., "Uncertainties in Emissions Measurements in a Partial Flow Sampling System," SAE Technical Paper 2015-26-0096, 2015, doi: 10.4271/2015-26-0096.

[9] SWANSON, J., KITTELSON, D., DIKKEN, D. Uncertainties in Filter Mass Measurements Made to Determine Compliance with the 2007 Diesel PM Standard. SAE Technical Paper 2009-01-1516 ; 2009

[10] MELO, T. C. C., MACHADO, G. B., OLIVEIRA, E. J., et al., 2011. "Different Hydrous Ethanol-Gasoline Blends - FTIR Emissions of a Flex-Fuel Engine and Chemical Properties of the Fuels", SAE Technical Paper 2011-36-008

[11] CFR, 2009. CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Subpart E - Gaseous Exhaust Test Procedures, V. 40. Sect. 91.401, OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER, 2009.

[12] MELO, T. C. C., BRITO, M.F.M.,MACHADO, G. B., PAIVA, C.E.F. ,2012, Procedure for Uncertainty of Measurement Determination of Spark Ignition Engine Emission Tests, SAE 2012-36-0488, São Paulo, SP, Brasil

[13] MELO, T.C.C - Overview & Discussion – Uncertainty of Measurement of Diesel Engine Emissions- 1st CONTROL, MEASUREMENT AND CALIBRATION CONGRESS, Automaker, Curitiba, Brazil, 2013.

[14] MELO, T. C. C., BRITO, M.F.M.,MACHADO, G. B., MOREIRA, M.F., FLEISCHMAN, R. “Calculation of Uncertainty of Measurement for Diesel Engine ESC Test Emissions”, SAE Technical Paper 2013-36-0236, São Paulo, SP, Brasil

[15] ABNT and INMETRO – ISO GUM – Guide to the expression of uncertainty of measurement

[16] CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, Resolução CONAMA número 403 de 11 de Novembro de 2008, Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE – para veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências.

APPENDICE A: EXPRESSÕES DE CÁLCULO DAS INCERTEZAS DO TIPO B

Vazão mássica em base úmida

$$G_{EXHW} = G_{AIRW} + G_{FUEL} \quad (29)$$

$$U_B G_{EXHW} = \sqrt{(U_B G_{AIRW})^2 + (U_B G_{FUEL})^2} \quad (30)$$

Pressão de Saturação

$$PS = 0,6048346 + 0,0459058 \times T_{AC} + 0,0012444 \times T_{AC}^2 + 0,00003522481 \times T_{AC}^3 + 0,00000009322061 \times T_{AC}^4 + 0,000000004181281 \times T_{AC}^5 \quad (31)$$

$$U_B PS = (0,0459058 + 0,0012444 \times T_{AC} + 0,00003522481 \times T_{AC}^2 + 0,00000009322061 \times T_{AC}^3 + 0,000000004181281 \times T_{AC}^4) \times U_B T_{AC} \quad (32)$$

Pressão de Vapor

$$P_{VAP} = \frac{R_A \times PS}{100} \quad (33)$$

$$U_B P_{VAP} = P_{VAP} \times \sqrt{\left(\frac{U_B R_A}{R_A}\right)^2 + \left(\frac{U_B PS}{PS}\right)^2} \quad (34)$$

Humidade Absoluta

$$H_A = \frac{621,1 \times P_{VAP}}{P_B - P_{VAP}} \quad (35)$$

$$U_B H_A = \frac{621,1}{(P_B - P_{VAP})^2} \times \sqrt{(P_B \times U_B P_{VAP})^2 + (P_{VAP} \times U_B P_B)^2} \quad (36)$$

Vazão mássica do ar de admissão (base seca)

$$G_{AIRD} = \frac{G_{AIRW}}{1 + \frac{H_A}{1000}} \quad (37)$$

$$U_B G_{AIRD} = \frac{1000}{(H_A + 1000)^2} \times \sqrt{((H_A + 1000) \times U_B G_{AIRW})^2 + (G_{AIRW} \times U_B H_A)^2} \quad (38)$$

Potência líquida do motor

$$P_W = \frac{TOR \times SPEED}{9549,3} \quad (39)$$

$$U_B P_W = POT \times \sqrt{\left(\frac{U_B TOR}{TOR}\right)^2 + \left(\frac{U_B SPEED}{SPEED}\right)^2} \quad (40)$$

Conversão base seca (Dry) para base úmida (wet)

$$\text{concentration (wet base)} = K_W \times \text{concentration (dry base)} \quad (41)$$

$$U_B \text{concentration (wet base)} =$$

$$\text{concentration (wet base)} \times \sqrt{\left(\frac{U_B K_W}{K_W}\right)^2 + \left(\frac{U_B \text{concentration (dry base)}}{\text{concentration (dry base)}}\right)^2} \quad (42)$$

Fator Específico para o combustível – F_{FH}

$$F_{FH} = \frac{1,969}{\left(1 + \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRW}}\right)} \quad (43)$$

$$U_B F_{FH} = \frac{1,969}{(G_{FUEL} + G_{AIRW})^2} \sqrt{(G_{AIRW} \times U_B G_{FUEL})^2 + (G_{FUEL} \times U_B G_{AIRW})^2} \quad (44)$$

Fator de correção – K_{W2}

$$K_W = \left(1 - F_{FH} \times \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRD}}\right) - K_{W2} \quad (45)$$

$$U_B K_W = \frac{1}{G_{AIRD}^2} \sqrt{(G_{FUEL} \times F_{FH} \times U_B G_{AIRD})^2 + (G_{AIRD} \times F_{FH} \times U_B G_{FUEL})^2 + (G_{AIRD} \times G_{FUEL} \times U_B F_{FH})^2 + (G_{AIRD}^2 \times U_B K_{W2})^2} \quad (46)$$

$$K_{W2} = \frac{1,608 \times H_D}{1000 + 1,608 \times H_D} \quad (47)$$

$$U_B K_{W2} = \frac{1000 \times 1,608}{(1000 + 1,608 \times H_D)^2} \times U_B H_D \quad (48)$$

Correção da umidade do NOx

$$A = 0,309 \times \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRD}} - 0,0266 \quad (49)$$

$$U_B A = \frac{0,309 \times G_{FUEL}}{G_{AIRD}} \times \sqrt{\left(\frac{U_B G_{FUEL}}{G_{FUEL}}\right)^2 + \left(\frac{U_B G_{AIRD}}{G_{AIRD}}\right)^2} \quad (50)$$

$$B = -0,209 \times \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRD}} + 0,00954 \quad (51)$$

$$U_B B = \frac{0,209 \times G_{FUEL}}{G_{AIRD}} \times \sqrt{\left(\frac{U_B G_{FUEL}}{G_{FUEL}}\right)^2 + \left(\frac{U_B G_{AIRD}}{G_{AIRD}}\right)^2} \quad (52)$$

$$K_{HD} = \frac{1}{1 + A \times (H_A - 10,71) + B \times (T_A - 25)} \quad (53)$$

$$C = A \times (H_A - 10,71) \quad (54)$$

$$D = B \times (T_A - 25) \quad (55)$$

$$U_B C = \sqrt{((H_A - 10,71) \times U_B A)^2 + (A \times U_B H_A)^2} \quad (56)$$

$$U_B D = \sqrt{((T_A - 25) \times U_B B)^2 + (B \times U_B T_A)^2} \quad (57)$$

$$U_B K_{HD} = \frac{1}{1 + C + D} \times \sqrt{(U_B C)^2 + (U_B D)^2} \quad (58)$$

Emissões gasosas e cálculo da vazão mássica

$$NOx_{mass} = 0,001587 \times NOx_{conc} \times K_{HD} \times G_{EXHW} \quad (59)$$

$$U_B NOx_{mass} = NOx_{mass} \times \sqrt{\left(\frac{U_B NOx_{conc}}{NOx_{conc}}\right)^2 + \left(\frac{U_B K_{HD}}{K_{HD}}\right)^2 + \left(\frac{U_B G_{EXHW}}{G_{EXHW}}\right)^2} \quad (60)$$

$$CO_{mass} = 0,000966 \times CO_{conc} \times G_{EXHW} \quad (61)$$

$$U_B CO_{mass} = CO_{mass} \times \sqrt{\left(\frac{U_B CO_{conc}}{CO_{conc}}\right)^2 + \left(\frac{U_B G_{EXHW}}{G_{EXHW}}\right)^2} \quad (62)$$

$$HC_{mass} = 0,000479 \times HC_{conc} \times G_{EXHW} \quad (63)$$

$$U_B THC_{mass} = THC_{mass} \times \sqrt{\left(\frac{U_B THC_{conc}}{THC_{conc}}\right)^2 + \left(\frac{U_B G_{EXHW}}{G_{EXHW}}\right)^2} \quad (64)$$

Emissões específicas (g/kWh) – Médias ponderadas

$$\overline{NOx} = \frac{\sum(NOx_{mass} \times WF_i)}{\sum(P(n)_i \times WF_i)} \quad (65)$$

$$U_B \overline{NOx} = \overline{NOx} \times \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sum(U_B NOx_{mass} \times WF_i)^2}}{\sum(NOx_{mass} \times WF_i)}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sum(U_B P(n)_i \times WF_i)^2}}{\sum(P(n)_i \times WF_i)}\right)^2} \quad (66)$$

$$\overline{CO} = \frac{\sum(CO_{mass} \times WF_i)}{\sum(P(n)_i \times WF_i)} \quad (67)$$

$$U_B \overline{CO} = \overline{CO} \times \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sum(U_B CO_{mass} \times WF_i)^2}}{\sum(CO_{mass} \times WF_i)}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sum(U_B P(n)_i \times WF_i)^2}}{\sum(P(n)_i \times WF_i)}\right)^2} \quad (68)$$

$$\overline{HC} = \frac{\sum(HC_{mass} \times WF_i)}{\sum(P(n)_i \times WF_i)} \quad (69)$$

$$U_B \overline{HC} = \overline{HC} \times \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sum(U_B HC_{mass} \times WF_i)^2}}{\sum(HC_{mass} \times WF_i)}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sum(U_B P(n)_i \times WF_i)^2}}{\sum(P(n)_i \times WF_i)}\right)^2} \quad (70)$$

Material Particulado – Cálculo da vazão mássica

$$q_i = \frac{G_{TOTW,i}}{(G_{TOTW,i} - G_{DILW,i})} \quad (71)$$

$$U_B q_i = \frac{1}{(G_{TOTW,i} - G_{DILW,i})^2} \times \sqrt{(G_{TOTW,i} \times U_B G_{DILW,i})^2 + (G_{DILW,i} \times U_B G_{TOTW,i})^2} \quad (72)$$

$$G_{EDFW_i} = G_{EXHW,i} \times q_i \quad (73)$$

$$U_B G_{EDFW_i} = G_{EDFW_i} \times \sqrt{\left(\frac{U_B G_{EXHW,i}}{G_{EXHW,i}}\right)^2 + \left(\frac{U_B q_i}{q_i}\right)^2} \quad (74)$$

$$M_{SAM} = \sum_{i=1}^{i=n} M_{SAM,i} \quad (75)$$

$$U_B M_{SAM} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (U_B M_{SAM,i})^2} \quad (76)$$

$$\overline{G_{EDFW}} = \sum_{i=1}^{i=n} G_{EDFW,i} \times WF_i \quad (77)$$

$$U_B \overline{G_{EDFW}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (WF_i \times U_B G_{EDFW,i})^2} \quad (78)$$

$$PT_{mass} = \frac{M_f}{M_{SAM}} \times \frac{\overline{G_{EDFW}}}{1000} \quad (79)$$

$$U_B PT_{mass} = PT_{mass} \times \sqrt{\left(\frac{U_B M_f}{M_f}\right)^2 + \left(\frac{U_B M_{SAM}}{M_{SAM}}\right)^2 + \left(\frac{U_B \overline{G_{EDFW}}}{\overline{G_{EDFW}}}\right)^2} \quad (80)$$

$$\overline{PT} = \frac{PT_{mass}}{\sum(P(n)_i \times WF_i)} \quad (81)$$

$$U_B \overline{PT} = \overline{PT} \times \sqrt{\left(\frac{U_B PT_{mass}}{PT_{mass}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sum(WF_i \times U_B P(n)_i)^2}}{\sum(P(n)_i \times WF_i)}\right)^2} \quad (82)$$