



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA  
Núcleo de Qualidade Metrológica

Proc. 1104/532/00660

# **CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA E AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS NO LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE REACÇÃO AO FOGO (LERF-LNEC)**

## **Ensaio do elemento isolado em combustão**

Estudo realizado por solicitação do Departamento  
de Edifícios do LNEC

Lisboa • Março de 2008

**I&D** INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

**RELATÓRIO 57/08 – CIC/NQM**



## **Caracterização Metrológica e Avaliação de Incertezas no Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo (LERF-LNEC): Ensaio do Elemento Isolado em Combustão**

### **Resumo**

Este relatório apresenta a caracterização metrológica e a avaliação de incertezas de medição do Ensaio do Elemento Isolado em Combustão realizada no Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LERF-LNEC). O presente documento contém uma descrição do ensaio em estudo, apresenta os fundamentos de medição das grandezas mensuráveis e descreve o processo de avaliação de incertezas de medição baseado na metodologia de Monte Carlo.

## **Metrological Characterization and Uncertainty Evaluation in the Fire Reaction Testing Laboratory (LERF-LNEC): Single Burning Item Test**

### **Abstract**

This report presents the metrological characterization and the measurement uncertainty evaluation related with the Single Burning Item Test carried out by the Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LERF-LNEC). The current document includes a description of the studied test, the measurement fundamentals of the measured quantities and describes the measurement uncertainty evaluation based on the Monte Carlo method.

## **Caractérisation Métrologique et Évaluation des Incertitudes dans le Laboratoire d'Essais de Réaction au Feu (LERF-LNEC): Essai d'un Objet Isolé en Feu**

### **Résumé**

Ce rapport présente la caractérisation métrologique et l'évaluation des incertitudes de mesurage de l'Essai d'un Objet Isolé en Feu réalisé par le Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo du Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LERF-LNEC). Le présent document contient une description de l'essai en étude, présente les fondements de mesurage des grandeurs mesurables et décrit le procès d'évaluation des incertitudes de mesurage basé dans la méthode de Monte Carlo.





# ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DO ELEMENTO ISOLADO EM COMBUSTÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Introdução.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Metodologia de ensaio.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.1 Calorimetria por consumo de oxigénio.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.2 Atenuação luminosa pela presença de fumo.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Montagem experimental.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.1 Infra-estrutura laboratorial.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.2 Instrumentação.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 Ensaio preliminares.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4.1 Analisador de gases.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4.2 Caudalímetro mássico.....</b>	<b>15</b>
<b>2.4.3 Sistema óptico para a medição de fumo.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.4 Combustão de propano.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.5 Combustão de heptano.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.6 Perfil de velocidade.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5 Procedimento de ensaio.....</b>	<b>20</b>
<b>3 FUNDAMENTOS DE MEDIÇÃO.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Taxa de libertação de calor.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.1 Fracção molar de oxigénio e dióxido de carbono.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.2 Factor de redução do oxigénio.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.3 Caudal volumétrico.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.3.1 Factor <math>\beta</math>.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.3.2 Caudal volumétrico na conduta.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.4 Modelo matemático associado à taxa de libertação de calor.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Taxa de libertação de fumo.....</b>	<b>31</b>

<b>4 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Introdução.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Componentes de incerteza.....</b>	<b>39</b>
4.2.1 Humidade relativa.....	39
4.2.2 Pressão atmosférica.....	39
4.2.3 Temperatura dos gases na conduta de extracção.....	40
4.2.4 Temperatura ambiente.....	41
4.2.5 Libertação de calor por unidade de massa de oxigénio consumido.....	41
4.2.6 Massa volúmica do oxigénio.....	41
4.2.7 Fracção molar de oxigénio.....	42
4.2.8 Fracção molar de dióxido de carbono.....	44
4.2.9 Pressão diferencial.....	46
4.2.10 Velocidade do escoamento de gases na conduta.....	47
4.2.11 Diâmetro da conduta.....	48
4.2.12 Comprimento do trajecto do feixe óptico na presença de fumo.....	48
4.2.13 Transmitância.....	49
4.2.14 Factor $\beta$ .....	51
4.2.15 Tempo de duração do ensaio.....	52
4.2.16 Libertação de calor do propano por unidade de massa de oxigénio consumido.....	53
4.2.17 Poder calorífico inferior do propano.....	54
4.2.18 Caudal mássico de propano.....	55
4.2.19 Libertação de calor do heptano por unidade de massa de oxigénio consumido.....	56
4.2.20 Poder calorífico inferior do heptano.....	56
4.2.21 Massa de heptano.....	57
<b>4.3 Avaliação de incertezas pelo Método de Monte Carlo.....</b>	<b>57</b>
<b>4.4 Resultados obtidos.....</b>	<b>59</b>
4.4.1 Taxa de libertação de calor no ensaio de combustão de propano.....	59
4.4.2 Libertação total de calor no ensaio de combustão de heptano.....	61

4.4.3 Factor de correcção global.....	63
4.4.4 Taxa de libertação de calor total.....	65
4.4.5 Taxa de produção de fumo total.....	68
4.4.6 Taxa de desenvolvimento de fogo.....	70
4.4.7 Libertação total de calor.....	73
4.4.8 Taxa de desenvolvimento de fumo.....	75
4.4.9 Libertação total de fumo.....	78
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
ANEXO 1 – ABORDAGEM TERMODINÂMICA DO FENÓMENO DA COMBUSTÃO.....	91



## 1 INTRODUÇÃO

No Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) coexistem diversos laboratórios que desenvolvem uma significativa actividade experimental incorporando, nos ensaios desenvolvidos, a medição de grandezas mensuráveis e, conseqüentemente, requisitos de qualidade para a expressão dos resultados dessa medição (as suas estimativas e as respectivas incertezas associadas).

Estes ensaios têm, frequentemente, um elevado grau de complexidade quer pela diversidade de grandezas envolvidas quer pela natureza das relações funcionais que se estabelecem entre estas grandezas.

O Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM), inserido no Centro de Instrumentação Científica, é um sector do LNEC com competências apropriadas para promover estudos de caracterização metrológica quer relacionados com a calibração de instrumentação científica quer com o desempenho de sistemas de medição.

No que respeita aos ensaios desenvolvidos por outros sectores do LNEC, a colaboração entre o NQM e esses sectores pode traduzir-se na concretização de estudos de caracterização metrológica onde se insere, com particular destaque, a avaliação das incertezas de medição associadas às grandezas de saída. Este estudo, relacionado com os ensaios desenvolvidos pelo Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo (LERF-LNEC), foi realizado por solicitação do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Departamento de Edifícios.

Atendendo a que este laboratório se encontra integrado no Sistema de Gestão da Qualidade do LNEC, este estudo permite, também, cumprir um requisito normativo importante que decorre da aplicação da norma de referência NP EN ISO/IEC 17025 [1], que indica o conjunto de requisitos gerais de competência que os laboratórios de calibração e de ensaio devem cumprir.

Em particular, a declaração da incerteza de medição constitui um dos requisitos normativos aplicáveis aos ensaios laboratoriais, correspondendo a um elemento de quantificação da qualidade das medições realizadas. Faz-se notar que este parâmetro adquire uma importância particular ao permitir a comparação entre medições obtidas em ensaios laboratoriais realizados por outras entidades.

No contexto da actividade desenvolvida pelo LERF-LNEC, é necessário conhecer as incertezas de medição associadas aos resultados dos diversos ensaios, uma vez que estes

resultados determinam a classificação e homologação de propriedades de materiais de construção, de acordo com valores normativos estipulados a nível europeu [2], contribuindo desta forma para a melhoria da segurança contra a deflagração e propagação de incêndios em edifícios.

Neste documento efectua-se a caracterização metrológica e a avaliação das incertezas de medição associadas à realização do **Ensaio do Elemento Isolado em Combustão**<sup>1</sup> fundamentada na actividade laboratorial desenvolvida no LERF-LNEC aplicando-se o método de Monte Carlo (MMC). A adopção desta metodologia para a avaliação de incertezas no contexto do ensaio SBI é inovadora, sendo apropriada devido às características de não-linearidade da modelação matemática envolvida.

No que respeita ao seu conteúdo, refira-se que, no capítulo 2 se efectua uma descrição do ensaio SBI no que concerne à metodologia de ensaio, à montagem experimental, aos ensaios preliminares e ao procedimento de ensaio.

No capítulo 3 apresentam-se os fundamentos associados às duas grandezas mensuráveis mais relevantes do ensaio SBI: a taxa de libertação de calor e a taxa de produção de fumo.

No capítulo 4 encontram-se descritas as duas fases da avaliação de incertezas realizada: a fase de formulação, na qual são apresentadas as componentes de incerteza das diversas grandezas de entrada envolvidas no ensaio em estudo; e a fase de cálculo, onde é exposto sumariamente o processo de cálculo numérico de incertezas de acordo com o MMC. Por último, referem-se os resultados obtidos para as diversas mensurandas de interesse.

Finalmente, no capítulo 5, apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos, procedendo-se em seguida à sua discussão e à elaboração das respectivas conclusões obtidas com a realização deste estudo.

---

<sup>1</sup> A designação de “ensaio SBI” decorre da terminologia inglesa – *Single Burning Item test* – sendo adoptada neste documento.

## 2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DO ELEMENTO ISOLADO EM COMBUSTÃO

### 2.1 Introdução

O ensaio SBI tem por objectivo a medição de um conjunto de grandezas que possibilitam a avaliação e classificação de um determinado material de construção (excluem-se os materiais de revestimentos de pisos), enquanto elemento contributivo para a deflagração e propagação de incêndios em edifícios, quando exposto a condições térmicas adversas mediante a aplicação de um elemento em combustão.

Neste ensaio, a amostra representativa do material a ensaiar é constituída por duas abas posicionadas verticalmente e formando um ângulo recto entre si, possibilitando a exposição a chamas provenientes de um queimador principal localizado na região inferior da junção das duas abas. O desempenho da amostra é avaliado por um período de tempo de 20 minutos, mediante a medição, por via indirecta, de grandezas associadas à libertação de calor e produção de fumo, sendo também realizadas observações complementares da propagação lateral de chamas e de produção de gotas ou partículas resultantes do processo de combustão.

No contexto normativo, o ensaio SBI é baseado na norma EN 13823:2002 [3] enquanto que a classificação do material ensaiado é efectuada de acordo com os critérios estabelecidos pela norma EN 13 501-1:2004 [2]. Em concreto, destacam-se como grandezas de classificação do ensaio SBI:

- a taxa de desenvolvimento de fogo, *FIGRA*, expressa em  $W \cdot s^{-1}$ , que quantifica a máxima variação temporal da potência térmica libertada pela combustão da amostra num dado instante da realização do ensaio, traduzindo a “aceleração” máxima da libertação de energia térmica;
- a libertação total de calor, *THR*, expressa em MJ, indica a energia térmica acumulada durante a ocorrência do fenómeno da combustão;
- a taxa de desenvolvimento de fumo, *SMOGRA*, expressa em  $m^2 \cdot s^{-2}$ , que quantifica a máxima variação temporal do fumo libertado pela combustão da amostra num dado instante da realização do ensaio, traduzindo desta forma a “aceleração” máxima da libertação de fumo;
- a libertação total de fumo, *TSP*, expressa em  $m^2$ , que corresponde ao fumo acumulado durante a realização do ensaio SBI.

## **2.2 Metodologia de ensaio**

### **2.2.1 Calorimetria por consumo de oxigénio**

No ensaio SBI, a determinação experimental das grandezas associadas à libertação de calor fundamenta-se na metodologia de calorimetria por consumo de oxigénio.

Este método experimental surgiu nos EUA, durante a década de 70, tendo por objectivo a determinação do calor libertado durante um processo de combustão, substituindo as técnicas experimentais precedentes baseadas, essencialmente, na medição do aumento de temperatura do ar que era forçado a passar sobre um determinado objecto em combustão. As técnicas utilizadas até então, traduziam-se num nível reduzido de exactidão, visto que nem toda a energia radiante resultante do processo de combustão contribuía para o referido aumento de temperatura do ar (apesar de serem utilizados numerosos sensores térmicos visando detectar esta energia adicional perdida) [4].

Neste contexto, uma nova metodologia desenvolvida por Parker centra-se no facto de que, num processo de combustão, assiste-se não só à libertação de calor mas também à redução do oxigénio consumido. Desta forma, esta metodologia propõe a determinação do calor libertado com base na medição do oxigénio presente na mistura gasosa resultante do processo de combustão [4]. Os estudos de Parker que a sustentam, incluíram a realização de cálculos termodinâmicos referentes à combustão completa de diversos materiais poliméricos, presentes na maioria dos produtos utilizados no sector da construção civil, tendo constatado que apesar da libertação de calor por unidade de massa variar significativamente entre os materiais estudados, a quantidade de calor libertado por unidade de volume de oxigénio consumido permanecia aproximadamente constante, próximo do valor de  $16,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Esta nova metodologia para medição da libertação de calor, à qual se atribuiu a designação de calorimetria por consumo de oxigénio, foi vista inicialmente com algum cepticismo resultante do desconhecimento de resultados da aplicação desta técnica em condições diferentes das estudadas por Parker. Em 1980, a publicação dos estudos desenvolvidos por Huggett permitiu alargar e validar o âmbito da sua aplicação noutras condições experimentais próximas da realidade.

No seu trabalho, Huggett efectua uma análise detalhada da proporcionalidade existente entre o consumo de oxigénio e o calor libertado tendo em conta as condições reais de incêndio, isto é, contabilizando a hipótese de ocorrência de combustão incompleta e a



consequente formação de outros produtos de combustão, avaliando assim os seus efeitos na hipótese previamente estabelecida por Parker.

Salienta-se que, Huggett constatou que o trabalho desenvolvido por Parker constituía uma redescoberta e extensão dos estudos de Thornton o qual determinara, em 1917, que o calor libertado por unidade de volume de oxigénio consumido durante a combustão completa de um elevado número de líquidos e gases orgânicos permanecia aproximadamente constante.

Na tabela seguinte podem-se observar alguns dos resultados obtidos por Huggett relativamente à libertação de calor por unidade de massa de oxigénio consumido para diferentes materiais combustíveis estudados [4].

**Tabela 1:** Libertação de calor por unidade de massa de oxigénio consumido.

<b>Combustão completa</b>	
Compostos orgânicos	12,72 MJ·kg <sup>-1</sup> ± 3 %
Materiais poliméricos sintéticos	13,03 MJ·kg <sup>-1</sup> ± 4 %
Combustíveis naturais (algodão, madeira, etc.)	13,21 MJ·kg <sup>-1</sup> ± 5,3 %
Celulose	13,59 MJ·kg <sup>-1</sup>
<b>Combustão incompleta</b>	
Celulose (considerando a formação de monóxido de carbono de 10 % relativamente à quantidade de dióxido de carbono produzido)	13,37 MJ·kg <sup>-1</sup>
Celulose (considerando a formação de partículas de carbono)	13,91 MJ·kg <sup>-1</sup>
Celulose (considerando o efeito de outras reacções parciais de oxidação)	10,76 MJ·kg <sup>-1</sup> a 13,9 MJ·kg <sup>-1</sup>

Deve-se salientar que os estudos de Huggett correspondem a casos limite pelo que, numa situação real, o seu efeito não deverá ser tão acentuado. Face aos resultados obtidos, Huggett concluiu que a hipótese de libertação de calor por unidade de massa de oxigénio consumido era suficientemente exacta para a maioria das aplicações de ensaio ao fogo, originando a recomendação do valor da constante e da sua variabilidade a adoptar para combustíveis orgânicos convencionais: **13,1 MJ·kg<sup>-1</sup> ± 5 %** [4]. A publicação do trabalho de Huggett coincide com o início do reconhecimento da taxa de libertação de calor, *HRR*, como a variável representativa do crescimento e propagação de fogo.

A técnica de calorimetria por consumo de oxigénio foi pela primeira vez incorporada por Babrauskas e Twiley num equipamento designado por calorímetro cónico, sendo posteriormente incorporada em diversas normas internacionais relacionadas com a actividade experimental de reacção ao fogo, nomeadamente o ensaio SBI.

Mediante o conhecimento da evolução temporal da taxa de libertação de calor ao longo da realização do ensaio SBI, é possível determinar a grandeza *FIGRA*, que em conjunto com a grandeza *THR*, determinam a classificação de um dado material. De acordo com a norma do ensaio SBI, a evolução temporal da taxa de libertação de calor é estimada através do cálculo das seguintes médias aritméticas (a frequência de medição das diversas grandezas de entrada do ensaio é de 1/3 Hz):

$$HRR_{\text{médio}}(300 \text{ s}) = 0, \quad (1)$$

$$HRR_{\text{médio}}(303 \text{ s}) = \overline{HRR}(300 \text{ s} \dots 306 \text{ s}), \quad (2)$$

$$HRR_{\text{médio}}(306 \text{ s}) = \overline{HRR}(300 \text{ s} \dots 312 \text{ s}), \quad (3)$$

$$HRR_{\text{médio}}(309 \text{ s}) = \overline{HRR}(300 \text{ s} \dots 318 \text{ s}), \quad (4)$$

$$HRR_{\text{médio}}(312 \text{ s}) = \overline{HRR}(300 \text{ s} \dots 324 \text{ s}), \quad (5)$$

$$HRR_{\text{médio}}(t \geq 315 \text{ s}) = HRR_{30\text{s}}(t) = \frac{0,5HRR(t-15 \text{ s}) + HRR(t-12 \text{ s}) + \dots + HRR(t+12 \text{ s}) + 0,5HRR(t+15 \text{ s})}{10}. \quad (6)$$

Com base nesta grandeza define-se a grandeza *FIGRA*:

$$FIGRA = \begin{cases} 0 & 0 \text{ s} \leq t \leq 300 \text{ s} \\ 1000 \times \max\left(\frac{HRR_{\text{médio}}(t)}{t-300}\right) & 300 \text{ s} < t \leq 1500 \text{ s} \wedge HRR_{\text{médio}}(t) > 3 \text{ kW} \wedge THR(t) > 0,2 \text{ MJ} \end{cases} \quad (7)$$

Por sua vez, a grandeza *THR* está relacionada com a taxa de libertação de calor através da expressão:

$$THR(t) = \frac{3}{1000} \sum_{300\text{s}}^t [\max(HRR(t), 0)]. \quad (8)$$

Em particular, a classificação pretende caracterizar apenas os momentos iniciais de deflagração e propagação de chama na amostra, nomeadamente, o período de tempo compreendido entre 300 s e 900 s, pelo que a energia térmica acumulada resultante da combustão durante este período de tempo é dada por:

$$THR_{600\text{s}} = THR(300 \text{ s} \leq t \leq 900 \text{ s}) = \frac{3}{1000} \sum_{300\text{s}}^{900\text{s}} [\max(HRR(t), 0)]. \quad (9)$$

### 2.2.2 Atenuação luminosa pela presença de fumo

O fenómeno da combustão origina, para além da libertação de uma determinada quantidade de energia térmica, um conjunto de produtos de combustão que, dependendo do tipo de combustível, do modo de combustão e das condições de ventilação, podem apresentar-se sob a forma de partículas sólidas ou gotículas de condensação suspensas no ar, constituindo assim um aerossol com a designação comum de fumo.

Do conjunto de metodologias utilizadas na sua caracterização destaca-se a medição da atenuação luminosa, determinada pela medição da intensidade de luz transmitida. Efectivamente, a intensidade de luz que atravessa um meio contendo fumo é atenuada devido a um conjunto de interacções com as partículas e gotículas suspensas de que resultam a absorção e a dispersão da luz.

A atenuação da luz num aerossol como o fumo é descrita pela lei de Bouguer ou de Lambert-Beer [5, 6], expressa por

$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot L), \quad (10)$$

em que  $I$  é a intensidade luminosa transmitida,  $I_0$  é a intensidade luminosa incidente na ausência de fumo,  $\alpha$  é o coeficiente de absorção neperiano e  $L$  é o comprimento do trajecto percorrido pela luz na presença de fumo. Adicionalmente, considera-se que o coeficiente de absorção neperiano é dado por

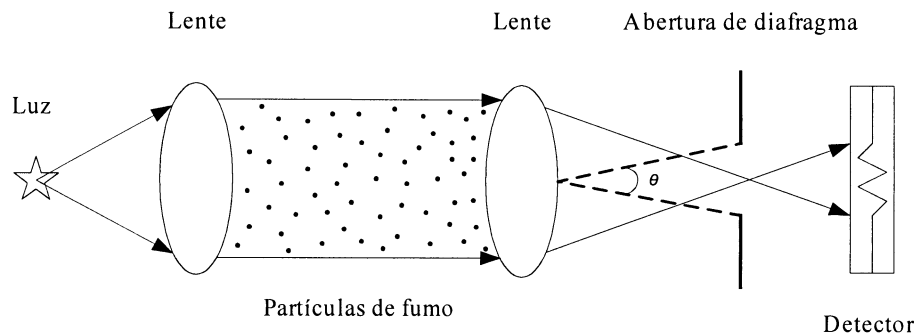
$$\alpha = \alpha_m \rho, \quad (11)$$

onde  $\alpha_m$  corresponde ao coeficiente de absorção neperiano mássico (dependente, essencialmente, da distribuição dimensional das partículas e gotículas que constituem o fumo e das suas correspondentes propriedades ópticas) e  $\rho$  exprime a concentração mássica de fumo num dado volume [5, 6].

Com base na lei citada anteriormente, desenvolveu-se um sistema óptico visando a medição do coeficiente de absorção neperiano, o qual permite caracterizar o fumo existente num meio. Este sistema é constituído pelos seguintes elementos (ver figura 1):

- lâmpada de incandescência, que constitui uma fonte de luz policromática;
- sistema de lentes, que estabelece a colimação de feixe na região de medição de fumo (inclui sistema de limpeza com ar pressurizado);
- diafragma;

- detector fotoelétrico, com uma resposta espectral equivalente à do olho humano.



**Figura 1:** Representação esquemática do sistema óptico para a medição de fumo.

A colocação de uma abertura de diafragma tem por objectivo minimizar o efeito da dispersão da luz que atinge o detector. De facto, num contexto experimental, a luz que atinge o detector fotoelétrico é constituída não somente pela luz que é transmitida pelo fumo mas, também, por luz resultante do fenómeno de dispersão luminosa associada à interacção estabelecida com as partículas que constituem o fumo. Para partículas e gotículas de dimensão reduzida, a luz sofre uma dispersão aproximadamente uniforme em todas as direcções pelo que a quantidade dessa luz que se propaga em direcção ao detector é apenas uma fracção limitada, tornando-se mais significativa com o aumento da dimensão das partículas. Esta condicionante determina que se promova uma definição apropriada do ângulo de abertura  $\theta$  (*vide* figura 1).

Note-se ainda que, a lei de Lambert-Beer é válida, apenas, para uma fonte de luz monocromática como, por exemplo, um laser. Na prática, o recurso a uma lâmpada de incandescência (luz policromática) é justificado pelo facto de apresentar uma estabilidade superior à do laser [6], assegurando-se um fornecimento de potência eléctrica estável que permita manter a temperatura do filamento aproximadamente constante ( $2900 \pm 100$ ) K. Dada a dispersão espectral desta fonte luminosa, a utilização do sistema de medição de fumo requer a realização periódica de calibração recorrendo à utilização de filtros ópticos com diferentes valores nominais distribuídos ao longo da escala compreendida entre zero (absorção total) e 100 % (transmissão total).

O ensaio SBI recorre a este tipo de sistema de medição de fumo visando determinar o coeficiente de absorção neperiano ao longo de todo o ensaio permitindo, em conjunto com a medição do caudal volumétrico na conduta de extracção, quantificar o fumo produzido pela combustão de uma dada amostra. Esta quantificação é realizada com base na determinação

da grandeza taxa de produção de fumo,  $SPR$ . O conhecimento da evolução temporal desta grandeza ao longo da realização do ensaio SBI garante, por sua vez, a determinação da grandeza  $SMOGRA$  que, com a grandeza  $TSP$ , possibilitam a classificação de um dado material. De acordo com a norma do ensaio SBI, a evolução temporal da taxa de produção de fumo é estimada através do cálculo das seguintes médias aritméticas (a frequência de medição das diversas grandezas de entrada do ensaio é de 1/3 Hz):

$$SPR_{\text{médio}}(300 \text{ s}) = 0, \quad (12)$$

$$SPR_{\text{médio}}(303 \text{ s}) = \overline{SPR}(300 \text{ s} \dots 306 \text{ s}), \quad (13)$$

$$SPR_{\text{médio}}(306 \text{ s}) = \overline{SPR}(300 \text{ s} \dots 312 \text{ s}), \quad (14)$$

...

$$SPR_{\text{médio}}(327 \text{ s}) = \overline{SPR}(300 \text{ s} \dots 354 \text{ s}), \quad (15)$$

$$SPR_{\text{médio}}(t \geq 330 \text{ s}) = SPR_{60\text{s}}(t) = \frac{0,5SPR(t-30 \text{ s}) + SPR(t-27 \text{ s}) + \dots + SPR(t+27 \text{ s}) + 0,5SPR(t+30 \text{ s})}{20},$$

(16)

Desta forma, a grandeza  $SMOGRA$  é definida por:

$$SMOGRA = \begin{cases} 0 & 0 \text{ s} \leq t \leq 300 \text{ s} \\ 1000 \times \max\left(\frac{SPR_{\text{médio}}(t)}{t-300}\right) & 300 \text{ s} < t \leq 1500 \text{ s} \quad \wedge \quad SPR_{\text{médio}}(t) > 0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad \wedge \quad TSP(t) > 6 \text{ m}^2 \cdot \end{cases}$$

(17)

Por sua vez, a grandeza  $TSP$  está relacionada com a taxa de produção de fumo pela expressão seguinte,

$$TSP(t) = 3 \sum_{300 \text{ s}}^t [\max(SP R(t), 0)]. \quad (18)$$

Refira-se que, a classificação pretende caracterizar apenas os momentos iniciais de libertação de fumo na amostra, nomeadamente, o período de tempo compreendido entre 300 s e 900 s, pelo que o fumo acumulado resultante da combustão durante este período de tempo é dado por:

$$TSP_{600 \text{ s}} = TSP(300 \text{ s} \leq t \leq 900 \text{ s}) = 3 \sum_{300 \text{ s}}^{900 \text{ s}} [\max(SP R(t), 0)]. \quad (19)$$

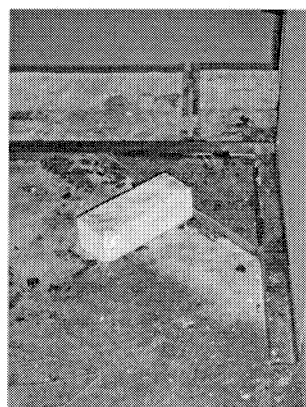
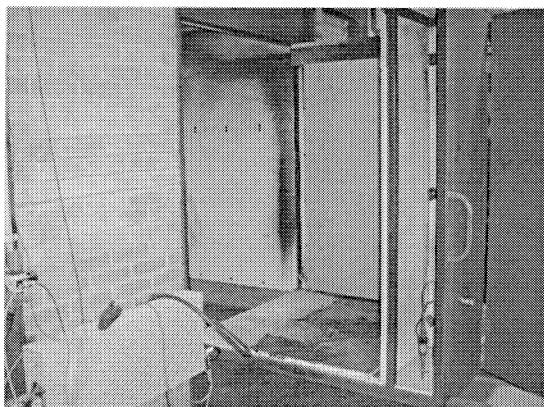
## 2.3 Montagem experimental

Nas secções que se seguem, descrevem-se os elementos fundamentais da montagem experimental relativa ao ensaio SBI, destacando-se os que se encontram relacionados com a infra-estrutura laboratorial e com a instrumentação que permite obter as grandezas mensuráveis.

### 2.3.1 Infra-estrutura laboratorial

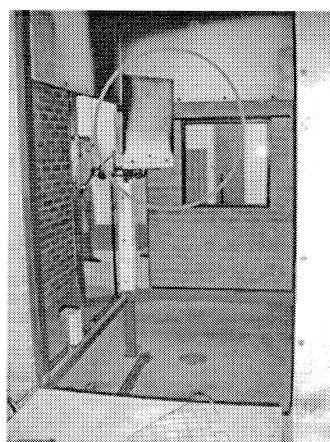
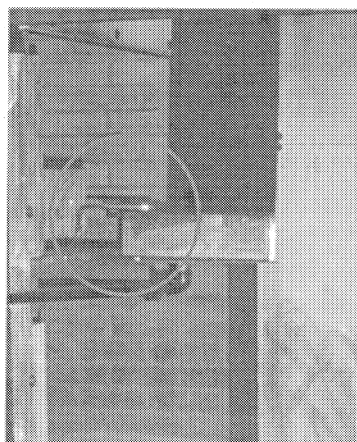
A realização do ensaio SBI decorre numa sala laboratorial especificamente criada para este efeito, e cujas características dimensionais são definidas pela norma de ensaio [3]. Dos elementos presentes nesta sala de ensaio destacam-se:

- a estrutura móvel para fixação e introdução das amostras na sala de ensaio, com queimador principal (*vide* figuras seguintes);



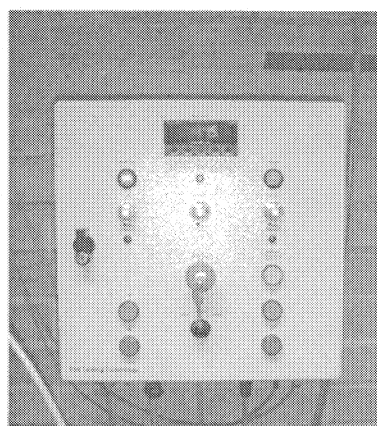
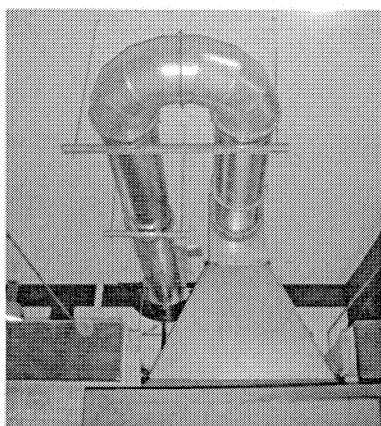
**Figuras 2 e 3:** Estrutura móvel e detalhe da região do queimador principal.

- a estrutura fixa de posicionamento da estrutura móvel, constituída pelo queimador auxiliar e pelo escudo térmico (*vide* figuras seguintes);



**Figuras 4 e 5:** Queimador auxiliar e vista frontal do escudo térmico.

- o sistema de extracção de gases e fumo (*vide* figura 6), que inclui a chaminé, a conduta de escoamento com guias de orientação e a estrutura de instalação de instrumentação (termopares; sensor bidireccional de pressão; sensor para recolha de amostras de gases; sistema óptico para a medição de fumo);
- o sistema de controlo do abastecimento de gás propano aos queimadores (*vide* figura 7).

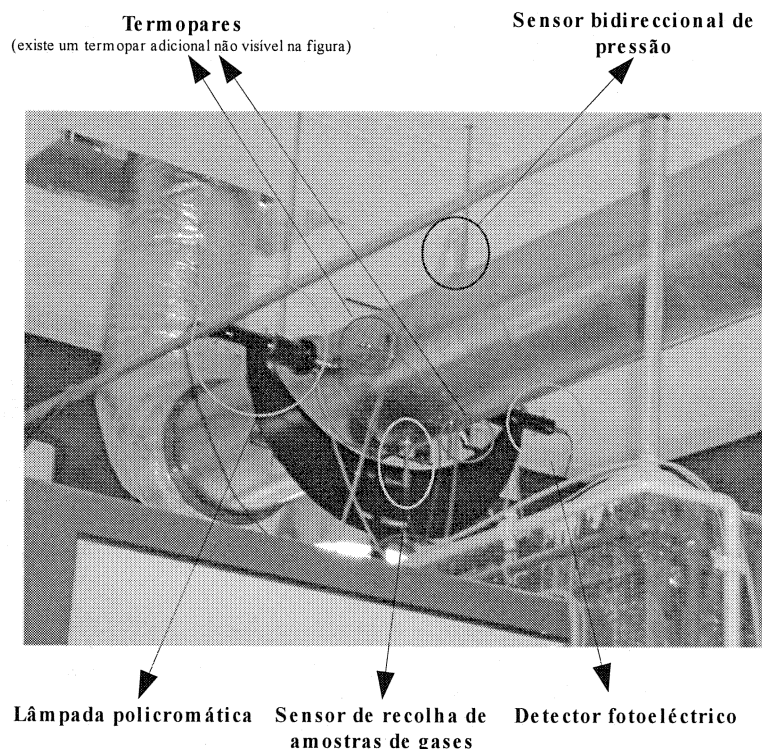


**Figuras 6 e 7:** Sistema de extracção de gases e fumo; painel de comando do sistema de controlo do abastecimento de gás propano.

### 2.3.2 Instrumentação

A diversidade de grandezas mensuráveis relacionadas com o ensaio SBI reflecte-se na instalação de um conjunto de instrumentos e sistemas de medição (*vide* figuras 8, 9 e 10), designadamente:

- três termopares do tipo K (*vide* norma EN 60584-1), para medição da temperatura dos gases na conduta de extracção;
- um transdutor de pressão diferencial *Setra*, modelo 267 MR *Multi-Range*, com ligação a um sensor bidireccional de pressão colocado na região central da conduta;
- um sistema óptico para a medição de fumo *Fire Testing Technology*, modelo construído de acordo com a norma DIN 50055, constituído por lâmpada policromática, lentes e detector fotoeléctrico;
- um analisador de gases (oxigénio e dióxido de carbono) *Servomex*, modelo 4200, ligado a um sensor de recolha de amostras de gases através de um circuito que inclui filtro, condensador e excicador contendo drierite;



**Figura 8:** Instrumentação instalada na conduta de extracção de gases e fumo.

- um transdutor de pressão *Druck*, modelo PTX 1400;
- um caudalímetro *Bronkhorst*, modelo F-11-2AC-A-55-V;
- um termopar do tipo K para medição da temperatura ambiente;
- um termohigrómetro digital *Rotronic*, modelo *HygroPalm 1*;
- um anemómetro de fio quente *RS*, modelo AM4204;
- uma balança digital *Sartorius*, modelo BL6100.

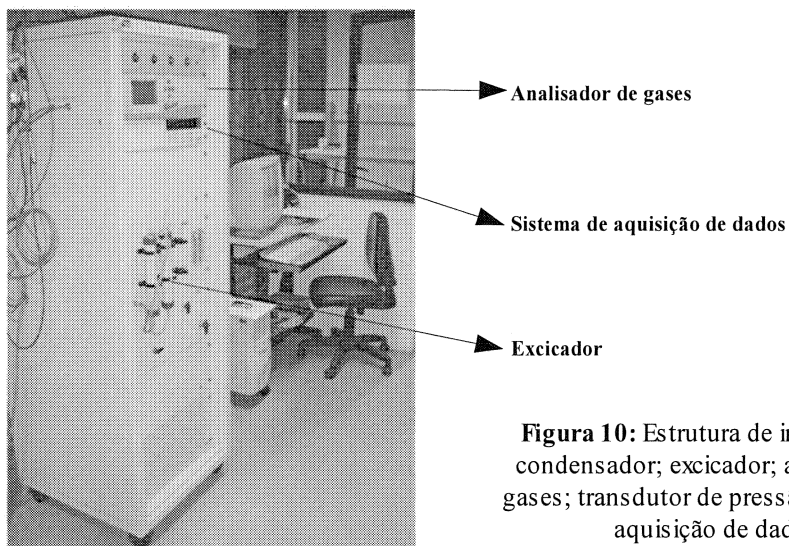


**Figura 9:** Termopar para medição da temperatura ambiente e termohigrómetro digital.

A aquisição e processamento de dados é suportada por:

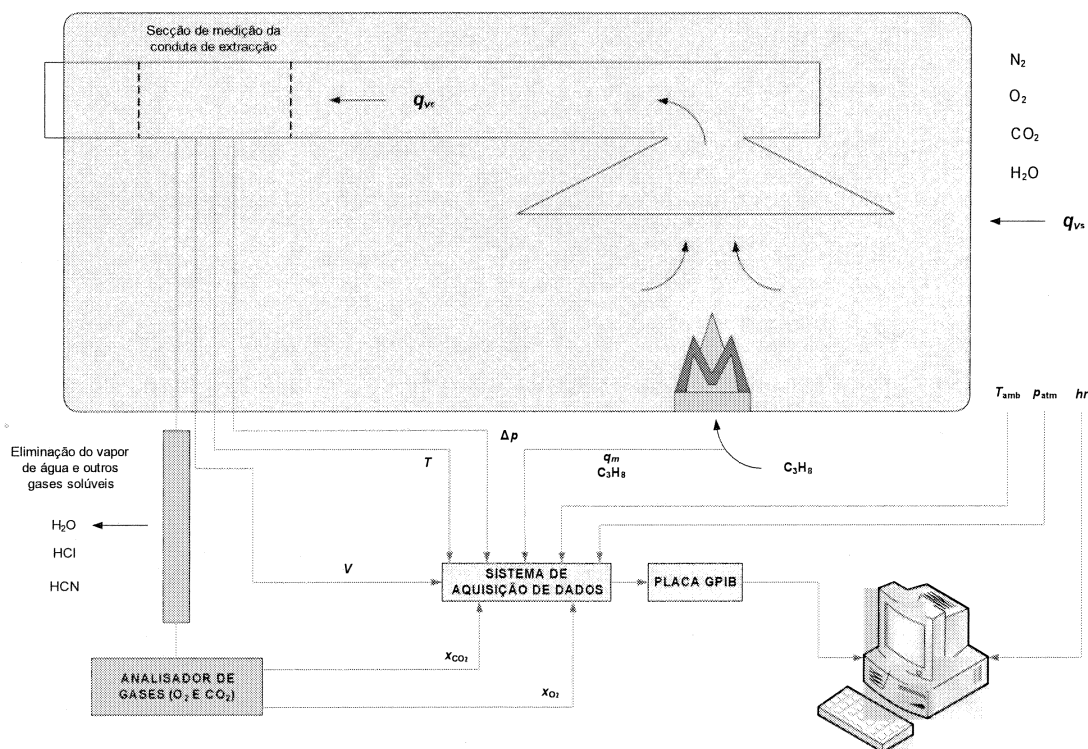
- um sistema de aquisição de dados *Agilent*, modelo 14970A;
- uma placa de interface PCI-GPIB;
- uma aplicação informática *Fire Testing Technology SBICalc*.





**Figura 10:** Estrutura de instalação do condensador; excitador; analisador de gases; transdutor de pressão; sistema de aquisição de dados.

Na figura seguinte pode-se observar uma representação esquemática dos fluxos de informação associados ao processo de medição desenvolvido no LERF-LNEC.



**Figura 11:** Fluxos de informação associados ao ensaio SBI no LERF-LNEC.

Note-se que toda a informação é transmitida ao sistema de aquisição de dados para subsequente processamento, com a excepção do higrómetro digital cujos valores de medição são introduzidos manualmente pelo operador na aplicação informática [7]. A determinação dos resultados finais resulta do processamento desenvolvido com recurso à aplicação informática *Fire Testing Technology SBICalc* [8].

## 2.4 Ensaios preliminares

A realização de um conjunto de ensaios preliminares visa o conhecimento de características fundamentais dos instrumentos de medição empregues no ensaio SBI, assegurando também o cumprimento das condições de repetibilidade do próprio ensaio. Em particular, os ensaios preliminares, descritos em seguida, permitem:

- realizar experimentalmente os pontos extremos da gama de medição de determinados instrumentos de medição;
- determinar características metrológicas como deriva, ruído, estabilidade, tempo de resposta e repetibilidade;
- efectuar comparações com valores teóricos ou valores tidos como referência.

### 2.4.1 Analisador de gases

O ensaio preliminar relativo ao analisador de gases consiste na realização experimental individual dos pontos extremos da gama de medição do teor de oxigénio e dióxido de carbono, assegurando-se a realização da medição e do controlo de grandezas de influência, nomeadamente, o caudal na conduta de extracção de gases e fumo. Dada a importância deste instrumento de medição, este ensaio é efectuado previamente à realização de qualquer ensaio SBI.

No que concerne à realização experimental do zero em ambas as gamas de medição (teor de oxigénio e dióxido de carbono), este processo consiste na alimentação do analisador com azoto de elevado grau de pureza (99,999 %) durante um determinado período de tempo.

A realização experimental do outro ponto extremo da gama de medição implica, no caso da medição do teor de oxigénio, a alimentação do analisador com ar seco atmosférico proveniente da conduta de extracção na ausência de combustão, e para o caso da medição do teor de dióxido de carbono, a alimentação do analisador com uma mistura gasosa contendo uma concentração de dióxido de carbono certificada. Deste modo, o ajustamento relativo aos pontos extremos da gama de medição traduz-se matematicamente como

$$x = x_{\text{zero}} + \frac{x_{\text{referência}} - x_{\text{zero}}}{V_{\text{referência}} - V_{\text{zero}}} (V - V_{\text{zero}}), \quad (20)$$

onde  $x$  representa a fracção molar de oxigénio ou dióxido de carbono,  $x_{\text{zero}}$  e  $V_{\text{zero}}$  correspondem, respectivamente, à fracção molar de oxigénio ou dióxido de carbono e à tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados na realização experimental do

zero da cadeia de medição,  $x_{\text{referência}}$  e  $V_{\text{referência}}$  correspondem, respectivamente, à fracção molar de oxigénio ou dióxido de carbono e à tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados na situação experimental de realização do ponto extremo da gama de medição e  $V$  é a tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados.

Atendendo à influência que a medição do teor de oxigénio tem no ensaio SBI, a norma de ensaio exige a determinação experimental da deriva e do ruído associados ao analisador com uma periodicidade semestral. Este ensaio é iniciado fornecendo azoto de elevado grau de pureza como a alimentação do analisador até ser atingido o equilíbrio, a partir do qual o analisador passa a receber ar atmosférico proveniente da conduta de extracção (percorrida por um caudal de ar semelhante ao registado durante a realização convencional de um ensaio SBI). Atingida uma nova situação de equilíbrio, o analisador é ajustado para o valor de referência do teor de oxigénio presente no ar seco, seguindo-se o registo dos valores medidos por este durante um período de tempo de 30 minutos.

Segundo a norma do ensaio SBI, a deriva é obtida pelo método dos mínimos quadrados, correspondendo à diferença absoluta entre os valores inicial e final da recta resultante da regressão linear. Por sua vez, o ruído é definido como a média quadrática dos valores de teor de oxigénio lidos no analisador durante o período de registo. O critério de aceitação mencionado na referida norma indica que a soma da deriva com o ruído não deve ser superior a 0,01 %.

#### **2.4.2 Caudalímetro mássico**

De acordo com a norma do ensaio SBI, o caudalímetro mássico utilizado para a medição do caudal mássico de propano que percorre o sistema de abastecimento dos queimadores, deve ser sujeito a um ensaio com periodicidade semestral cujo objectivo é a comparação dos valores lidos neste instrumento de medição com os valores obtidos, em simultâneo, usando um instrumento de pesagem.

A simultaneidade estabelecida entre o caudalímetro e a balança resulta da colocação do reservatório do gás propano sobre esta, efectuando-se a ignição do queimador principal e o ajuste do caudal mássico de gás para o valor típico de ensaio. Os registos inicial e final do peso do reservatório e do período de tempo de combustão, permitem estimar o caudal mássico de propano utilizado neste ensaio preliminar, bem como, a sua comparação com o valor lido no caudalímetro. De acordo com a norma, a diferença entre os dois valores deve ser inferior a  $6 \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Deve-se ainda referir que, o caudalímetro mássico é sujeito à realização experimental do zero da sua gama de medição antes do início de qualquer ensaio SBI.

### **2.4.3 Sistema óptico para a medição de fumo**

O sistema óptico para medição de fumo é sujeito semestralmente à realização de dois ensaios visando: a determinação experimental da deriva e do ruído; a comparação dos valores lidos pelo sistema com os valores de referência, determinados de um conjunto de filtros ópticos.

A determinação experimental da deriva e do ruído consiste na medição da transmitância durante um período de 30 minutos, garantindo-se a passagem de um caudal de ar “normalizado” (equivalente ao observado durante um ensaio) na conduta de extracção. Tal como no caso do analisador de gases, a deriva é obtida com base no método dos mínimos quadrados, sendo esta grandeza definida como a diferença absoluta entre os valores inicial e final da recta resultante da regressão linear. Por sua vez, o ruído é avaliado mediante o cálculo da média quadrática dos valores de transmitância registados. De acordo com a norma do ensaio SBI, a variação máxima permitida corresponde a 0,5 % dos valores iniciais de deriva e de ruído.

A colocação de filtros ópticos no circuito óptico do sistema, e o conseqüente registo dos valores de transmitância durante um período mínimo de um minuto, permitem estabelecer uma comparação entre o valor médio lido pelo sistema e o valor de transmitância de referência. Segundo a norma, a diferença entre ambos deve estar compreendida num intervalo de  $\pm 5\%$ . Neste ensaio de comparação, recorre-se a um conjunto de seis filtros ópticos com diferentes absorvâncias e transmitâncias no circuito óptico, sendo complementado com o ajuste do zero da gama de medição pela introdução de um corpo opaco, e com o ajuste do valor extremo da gama de medição (100 % de transmitância) através da ausência de colocação de qualquer corpo ou filtro no circuito óptico.

Salienta-se que, a realização experimental do ajustamento dos valores extremos da gama de medição da cadeia de medição é efectuada no início de cada ensaio, permitindo definir

$$\tau = \tau_{\text{zero}} + \frac{\tau_{100\%} - \tau_{\text{zero}}}{V_{100\%} - V_{\text{zero}}} (V - V_{\text{zero}}), \quad (21)$$

onde  $\tau$  representa a transmitância,  $\tau_{\text{zero}}$  e  $V_{\text{zero}}$  correspondem, respectivamente, à transmitância e à tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados na realização

experimental do zero da cadeia de medição,  $\tau_{100\%}$  e  $V_{100\%}$  correspondem, respectivamente, à fracção molar de oxigénio ou dióxido de carbono e à tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados na situação experimental de realização da condição de 100 % de transmitância, e  $V$  é a tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados.

#### **2.4.4 Combustão de propano**

Neste ensaio preliminar promove-se a combustão de propano (com um grau de pureza mínimo de 95 %), em patamares sucessivos de caudal mássico bem definidos, visando a comparação entre os valores experimentais obtidos e os valores teóricos expectáveis, assim como a avaliação do tempo de atraso e resposta de instrumentos de medição como o analisador de gases, o tempo de resposta dos termopares na condução de extracção e, ainda, o tempo de mudança entre queimadores. Da comparação entre os valores teóricos e experimentais resulta um factor de correcção que é incluído posteriormente no modelo matemático que determina a taxa de libertação de calor. A norma do ensaio SBI refere uma periodicidade mínima mensal ou a realização de 30 ensaios, dependendo do que ocorrer em primeiro lugar.

Este ensaio periódico decorre de forma idêntica a um ensaio SBI corrente mas na ausência de qualquer amostra e impondo inicialmente as seguintes condições de combustão no queimador auxiliar:

- caudal mássico nulo, durante dois minutos;
- caudal mássico de  $(647 \pm 50) \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ , durante um período de três minutos.

Após a realização das duas etapas nas condições apresentadas, é efectuada a mudança para o queimador principal, definindo-se um novo conjunto de etapas com uma duração individual de três minutos:

- caudal mássico de  $(647 \pm 50) \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- caudal mássico de  $(2000 \pm 100) \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- caudal mássico de  $(647 \pm 50) \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- caudal mássico nulo.

O registo das grandezas caudal mássico, temperatura média dos gases na condução de extracção e fracção molar de oxigénio e dióxido de carbono numa base temporal, permite

avaliar o comportamento dinâmico do analisador de gases e dos termopares instalados na conduta, e verificar o cumprimento dos critérios estabelecidos na norma do ensaio SBI.

Atendendo aos tempos de atraso determinados para o analisador de gases, é efectuada a sincronização dos dados experimentais das fracções molares de oxigénio e dióxido de carbono com os restantes dados experimentais, sendo possível o cálculo do factor de correcção,  $k_{t, \text{propano}}$ , através da expressão

$$k_{t, \text{propano}} = k'_t \frac{\sum HRR_i^{\text{teórico}}}{\sum HRR_i^{\text{experimental}}}, \quad (22)$$

onde  $k'_t$  é o factor de correcção global utilizado na determinação da taxa de libertação de calor pela via experimental,  $HRR_i^{\text{experimental}}$ , na etapa  $i$  do ensaio com um caudal mássico nominal de  $(647 \pm 50) \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $HRR_i^{\text{teórico}}$  corresponde à taxa de libertação de calor teórica dada por

$$HRR_i^{\text{teórico}} = q_{m_i} \left| \Delta h_c^1 \right|_{\text{propano}}, \quad (23)$$

em que  $q_{m_i}$  é o caudal mássico de propano da etapa  $i$  e  $\left| \Delta h_c^1 \right|_{\text{propano}}$  é a entalpia mássica de combustão inferior do propano. Salienta-se que, no cálculo de  $HRR_i^{\text{experimental}}$ , o valor adoptado para a constante de libertação de calor por unidade de volume de oxigénio consumido não corresponde ao valor indicado por Huggett mas ao valor da constante associada ao propano. Por outro lado verifica-se que, o factor  $k'_t$  acaba por não ter influência no resultado obtido visto que também está presente em  $HRR_i^{\text{experimental}}$ , sendo assim possível a sua eliminação da expressão (22).

#### **2.4.5 Combustão de heptano**

À semelhança do ensaio de combustão de propano, a norma do ensaio prevê a realização de um ensaio de combustão de heptano, com uma periodicidade mínima anual de uma quantidade definida de heptano (com um grau de pureza mínimo de 99 %) e o respectivo valor teórico. Desta comparação resulta a determinação de um factor de correcção,  $k_{t, \text{heptano}}$ , o qual será posteriormente incluído no modelo matemático que conduz ao cálculo da taxa de libertação de calor num ensaio SBI.

Este ensaio decorre de forma idêntica a um ensaio corrente mas com a particularidade de utilização de um recipiente contendo uma determinada massa de água a uma temperatura controlada, ao qual se adiciona uma massa conhecida de heptano promovendo-se, então, a sua ignição após um curto período de tempo de estabilização. O ensaio é considerado finalizado cinco minutos após o fim do processo de combustão, sendo efectuada a determinação do factor de correcção  $k_{t, \text{heptano}}$  através de

$$k_{t, \text{heptano}} = k'_t \frac{|\Delta h_c|_{\text{heptano}} m_{\text{heptano}}}{THR}, \quad (24)$$

onde  $k'_t$  é o factor de correcção global utilizado na determinação da libertação total de calor  $THR$  durante o ensaio,  $|\Delta h_c|_{\text{heptano}}$  é a entalpia mássica de combustão inferior do heptano e  $m_{\text{heptano}}$  é a massa de heptano utilizada como combustível. No cálculo de  $THR$ , o valor adoptado para constante de libertação de calor por unidade de volume de oxigénio consumido não corresponde ao valor indicado por Huggett mas o valor da constante do heptano. Quanto ao factor  $k'_t$ , considera-se novamente que a sua influência no resultado obtido é nula em virtude de estar presente em  $THR$  e, conseqüentemente, ser possível a sua eliminação da expressão (24).

#### 2.4.6 Perfil de velocidade

A determinação experimental do perfil de velocidade numa secção da conduta de extracção de gases e fumo é efectuada periodicamente (pelo menos anualmente) com recurso a um anemómetro de fio quente. O ensaio envolve a estimativa de um factor de correcção,  $k_{t,v}$ , o qual é posteriormente incluído no modelo matemático utilizado para o cálculo da taxa de libertação de calor do ensaio SBI.

Neste ensaio, o caudal de ar na conduta de extracção é ajustado para um valor típico, promovendo-se a medição da velocidade do escoamento em diversos pontos da secção da conduta de acordo com as indicações da norma do ensaio. A amostragem visando a determinação da velocidade do ar ocorre em quatro posições distintas situadas a cinco distâncias diferentes do centro da conduta e quatro medições de velocidade no centro da conduta.

Atendendo aos valores médios de velocidade obtidos para um raio  $i$  da conduta,  $v_i$ , e para o centro da conduta,  $v_c$ , a estimativa do factor de correcção do perfil de velocidade é dada por:

$$k_{t,v} = \frac{1}{5} \frac{\sum_{i=1}^5 v_i}{v_c}. \quad (25)$$

## 2.5 Procedimento de ensaio

A realização do ensaio SBI impõe a preparação e condicionamento ambiental apropriados das amostras de materiais submetidos a ensaio, procedendo-se em regra ao ensaio sucessivo de três amostras representativas do material em causa.

O ensaio é iniciado com a regulação do caudal na conduta de extracção para um valor compreendido num intervalo de tolerância normativo, que deverá ser sempre cumprido em todos os ensaios realizados (incluindo os ensaios preliminares anteriormente mencionados). Para além desta grandeza de influência, a realização do ensaio pressupõe o registo das temperaturas do ar na conduta de extracção e da temperatura ambiente durante um período mínimo de 300 segundos, bem como, a medição das grandezas pressão atmosférica e humidade relativa do meio envolvente. Adicionalmente, devem ser asseguradas as condições de estabilidade térmica exigidas pela norma de ensaio, para ser iniciada a contagem do tempo sendo definidos, nessa sequência temporal de realização do ensaio, os seguintes acontecimentos:

- $t = 0$  s, início do ensaio e conseqüente recolha de dados experimentais (caudal mássico de gás propano, pressão diferencial no sensor bidireccional de pressão, transmitância, fracção molar de oxigénio e dióxido de carbono, temperatura ambiente e temperatura dos gases na conduta de extracção) com uma frequência de amostragem igual a 1/3 Hz;
- $t = 120$  s, início da combustão de propano no queimador auxiliar e ajustamento do caudal mássico de propano fornecido (se necessário);
- $t = 150$  s, finalização do processo de ajustamento do caudal mássico de propano fornecido;



- $t = 210$  s , início do período de avaliação da taxa de libertação de calor e da taxa de produção de fumo associadas ao queimador;
- $t = 270$  s , conclusão do período de avaliação referido no ponto anterior;
- $t = 300$  s , transição da combustão para o queimador principal e início da avaliação do desempenho da amostra em ensaio, incluindo a observação da propagação lateral de chamas e formação de partículas ou gotas associadas ao processo de combustão;
- $t = 1500$  s , conclusão do período de avaliação do desempenho da amostra;
- $t = 1560$  s , finalização da combustão no queimador e de aquisição de dados experimentais;
- registo da transmitância e da fracção molar de oxigénio e dióxido de carbono, um minuto após o fim da combustão na amostra.

De acordo com a norma do ensaio, este poderá cessar antecipadamente caso uma das seguintes situações ocorra:

- a taxa de libertação de calor da amostra exceda, em qualquer instante do ensaio, um valor superior a 350 kW ou um valor médio de 280 kW num período de 30 s;
- a temperatura dos gases na conduta de extracção seja superior a 400 °C em qualquer instante do ensaio ou se observe um valor médio de 300 °C num período de 30 s;
- a queda de resíduos de combustão na região do queimador origine uma perturbação substancial da chama do queimador ou conduza à sua extinção.



### 3 FUNDAMENTOS DE MEDIÇÃO

#### 3.1 Taxa de libertação de calor

A grandeza taxa de libertação de calor,  $HRR$ , cf. referido anteriormente, é medida por via indirecta a partir de um conjunto de grandezas de entrada mensuráveis durante a realização do ensaio SBI.

Este facto justifica a apresentação, nesta secção, da formulação matemática associada à relação funcional estabelecida entre as grandezas de entrada e a grandeza de saída,  $HRR$ . Salienta-se que a dedução matemática apresentada tem como principal referência bibliográfica o estudo elaborado por Parker [9], descritivo dos modelos matemáticos adoptados na técnica de calorimetria por consumo de oxigénio.

Enumeram-se, de seguida, os pressupostos aplicados na obtenção do modelo matemático da grandeza taxa de libertação de calor:

- a totalidade dos gases resultantes do processo de combustão é recolhida para a condução de extracção, adicionando-se uma quantidade arbitrária de ar presente na sala de ensaio que possui como componentes o azoto, o oxigénio, o vapor de água e o dióxido de carbono;
- o fenómeno de combustão incompleta e a consequente formação de monóxido de carbono como produto de combustão, traduzem-se num efeito que é considerado desprezável atendendo às condições de ventilação presentes na sala de ensaio;
- a temperatura associada à realização do processo de combustão não atinge um valor significativamente elevado para a ocorrência do fenómeno de dissociação dos produtos de combustão primários;
- as propriedades termodinâmicas dos elementos químicos da reacção de combustão estão associadas a condições de referência, ou seja, a uma temperatura de 20 °C e a uma pressão de 101 325 Pa (1013,25 mbar);
- os únicos componentes gasosos, da mistura presente na condução de extracção que atingem o analisador de gás são o azoto, o oxigénio e o dióxido de carbono, considerando-se que o vapor de água, assim como o conjunto de gases solúveis em água (por exemplo, o ácido clorídrico ou o ácido nítrico), são eliminados da amostra recolhida pelos meios experimentais adequados.

Adoptando a sala de ensaio de realização do ensaio SBI como um sistema aberto, define-se  $q_{V_s}$  como o caudal volumétrico de entrada no referido sistema, enquanto que,  $q_{V_c}$  corresponde ao caudal volumétrico na conduta de extracção (*vide* fig. 11, pg. 19). No caudal de ar de entrada do sistema em estudo podemos citar os seguintes caudais molares:  $q_{n_{N_2}}^0$ ,  $q_{n_{O_2}}^0$ ,  $q_{n_{CO_2}}^0$  e  $q_{n_{H_2O}}^0$ . Deste modo, o caudal volumétrico de entrada pode ser expresso como

$$q_{V_s} = \left( q_{n_{N_2}}^0 + q_{n_{O_2}}^0 + q_{n_{CO_2}}^0 + q_{n_{H_2O}}^0 \right) \frac{M_{ar}}{\rho_{ar}}, \quad (26)$$

onde  $M_{ar}$  e  $\rho_{ar}$  correspondem, respectivamente, à massa molar e à massa volúmica do ar húmido.

As fracções molares dos componentes gasosos do ar no sistema em estudo, são dadas por

$$x_{N_2}^0 = \frac{q_{n_{N_2}}^0}{q_{n_{N_2}}^0 + q_{n_{O_2}}^0 + q_{n_{CO_2}}^0 + q_{n_{H_2O}}^0}, \quad (27)$$

$$x_{O_2}^0 = \frac{q_{n_{O_2}}^0}{q_{n_{N_2}}^0 + q_{n_{O_2}}^0 + q_{n_{CO_2}}^0 + q_{n_{H_2O}}^0}, \quad (28)$$

$$x_{CO_2}^0 = \frac{q_{n_{CO_2}}^0}{q_{n_{N_2}}^0 + q_{n_{O_2}}^0 + q_{n_{CO_2}}^0 + q_{n_{H_2O}}^0}, \quad (29)$$

$$x_{H_2O}^0 = \frac{q_{n_{H_2O}}^0}{q_{n_{N_2}}^0 + q_{n_{O_2}}^0 + q_{n_{CO_2}}^0 + q_{n_{H_2O}}^0}, \quad (30)$$

o que, pela definição da fracção molar, se traduz em

$$x_{N_2}^0 + x_{O_2}^0 + x_{CO_2}^0 + x_{H_2O}^0 = 1. \quad (31)$$

Para o caso da conduta de extracção, admite-se a existência dos seguintes caudais molares:  $q_{n_{N_2}}^0$ ,  $q_{n_{O_2}}^0$ ,  $q_{n_{CO_2}}^0$  e  $q_{n_{H_2O}}^0$ . Deste modo, atendendo ao processo de eliminação do vapor de água e dos gases solúveis em água presentes na amostra gasosa recolhida da conduta de extracção, as fracções molares de oxigénio e dióxido de carbono no analisador de gases são dadas, respectivamente, por

$$x_{O_2} = \frac{q_{n_{O_2}}}{q_{n_{N_2}}^0 + q_{n_{O_2}} + q_{n_{CO_2}}}, \quad (32)$$

$$x_{CO_2} = \frac{q_{n_{CO_2}}}{q_{n_{N_2}}^0 + q_{n_{O_2}} + q_{n_{CO_2}}}. \quad (33)$$

De acordo com os fundamentos da calorimetria por consumo de oxigénio [4, 9], a quantidade de calor libertada por unidade de massa de oxigénio consumido,  $E$ , durante um processo de combustão permanece constante independentemente do material combustível, pelo que a taxa de libertação de calor será dada por

$$HRR = E (q_{n_{O_2}}^0 - q_{n_{O_2}}) M_{O_2}, \quad (34)$$

em que  $M_{O_2}$  corresponde à massa molar do oxigénio. Atendendo que o processo de combustão conduz a uma diminuição da quantidade de oxigénio existente no ar, podemos traduzir matematicamente este fenómeno através de um factor de redução do oxigénio,  $\phi$ , dado pela expressão

$$\phi = \frac{q_{n_{O_2}}^0 - q_{n_{O_2}}}{q_{n_{O_2}}^0}, \quad (35)$$

o que permite que a expressão (34) possa ser escrita como

$$HRR = E \phi q_{n_{O_2}}^0 M_{O_2}. \quad (36)$$

A combinação das expressões (26) e (28) permite expressar o caudal molar de oxigénio do sistema em estudo como

$$q_{n_{O_2}}^0 = \frac{\rho_{ar}}{M_{ar}} x_{O_2}^0 q_{V_s}, \quad (37)$$

que substituindo na expressão (36) origina

$$HRR = E \rho_{ar} \frac{M_{O_2}}{M_{ar}} x_{O_2}^0 \phi q_{V_s}, \quad (38)$$

ou seja

$$HRR = E \rho_{O_2} x_{O_2}^0 \phi q_{V_s}. \quad (39)$$

De acordo com a norma de ensaio SBI, considera-se a libertação de calor associada à unidade de volume de oxigénio consumido,  $E'$ , pelo que a expressão anterior é escrita como

$$HRR = E' x_{O_2}^0 \phi q_{V_s}. \quad (40)$$

### 3.1.1 Fracção molar de oxigénio e dióxido de carbono

Atendendo às fracções molares de oxigénio e dióxido de carbono medidas na fase inicial de ensaio SBI, respectivamente,  $x_{O_2}^{\text{inicial}}$  e  $x_{CO_2}^{\text{inicial}}$ , usando o analisador de gases e considerando que o vapor de água e os gases solúveis em água são eliminados previamente da amostra que atinge o analisador, pode-se exprimir as seguintes relações:

$$x_{O_2}^{\text{inicial}} = \frac{q_{n_{O_2}}^0}{q_{n_{N_2}}^0 + q_{n_{O_2}}^0 + q_{n_{CO_2}}^0}, \quad (41)$$

$$x_{CO_2}^{\text{inicial}} = \frac{q_{n_{CO_2}}^0}{q_{n_{N_2}}^0 + q_{n_{O_2}}^0 + q_{n_{CO_2}}^0}. \quad (42)$$

Estas expressões podem ser combinadas com as expressões (28), (29) e (30), permitindo obter, respectivamente, a fracção molar de oxigénio e de dióxido de carbono existentes no sistema em estudo através de:

$$x_{O_2}^0 = x_{O_2}^{\text{inicial}} (1 - x_{H_2O}^0), \quad (43)$$

$$x_{CO_2}^0 = x_{CO_2}^{\text{inicial}} (1 - x_{H_2O}^0). \quad (44)$$

De acordo com a norma de ensaio SBI [3], a fracção molar da água no ar do sistema em estudo é dada por

$$x_{H_2O}^0 = \frac{hr}{(100 p_{\text{atm}})} \exp \left[ 23,2 - \frac{3816}{(T_{\text{inicial}} - 46)} \right], \quad (45)$$

onde  $hr$  representa o valor da humidade relativa do ar húmido,  $T_{\text{inicial}}$  é a temperatura inicial do ar no interior da conduta de extracção, expressa em kelvin, e  $p_{\text{atm}}$  é a pressão atmosférica em pascal.

### 3.1.2 Factor de redução do oxigénio

A expressão (35) apresentada anteriormente, não possibilita a determinação experimental do factor de redução ao longo da realização do ensaio SBI. Deste modo, para alcançar este objectivo recorre-se às expressões (32) e (33) para obter

$$q_{n_{O_2}} = \frac{x_{O_2}^0 q_{n_{N_2}}^0}{1 - x_{O_2} - x_{CO_2}}. \quad (46)$$

Passando a escrever a expressão (35) como

$$\phi = 1 - \frac{1 - x_{O_2}^0 - x_{CO_2}^0 - x_{H_2O}^0}{x_{O_2}^0} \frac{q_{n_{O_2}}}{q_{n_{N_2}}^0}, \quad (47)$$

e introduzindo nela a expressão (46) obtemos

$$\phi = \frac{x_{O_2}^0 - \frac{x_{O_2} (1 - x_{CO_2}^0 - x_{H_2O}^0)}{(1 - x_{CO_2})}}{x_{O_2}^0 \left( 1 - \frac{x_{O_2}}{1 - x_{CO_2}} \right)}. \quad (48)$$

Introduzindo (43) e (44) na expressão anterior, obtém-se o factor de redução de oxigénio:

$$\phi = \frac{x_{O_2}^{\text{inicial}} (1 - x_{CO_2}) - x_{O_2} (1 - x_{CO_2}^{\text{inicial}})}{x_{O_2}^{\text{inicial}} (1 - x_{O_2} - x_{CO_2})}. \quad (49)$$

### 3.1.3 Caudal volumétrico

O caudal volumétrico do sistema,  $q_{V_s}$ , é medido por via indirecta com base na expressão

$$q_{V_c} = (1 - \phi) q_{V_s} + \alpha \phi q_{V_s}, \quad (50)$$

ou seja,

$$q_{V_s} = \frac{q_{V_c}}{1 + (\alpha - 1)\phi}, \quad (51)$$

onde  $q_{V_c}$  corresponde ao caudal volumétrico na conduta de extracção,  $\alpha$  representa o factor de expansão e  $\phi$  é o factor de redução de oxigénio.

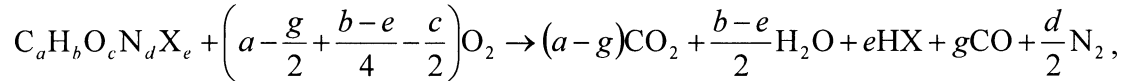
#### 3.1.3.1 Factor $\alpha$

Numa reacção química de combustão, a quantidade de matéria de produtos de combustão não é idêntica à quantidade de matéria de oxigénio que é consumida durante o processo reactivo. Efectivamente, verifica-se a ocorrência de uma expansão, definindo-se o factor  $\alpha$  com base na expressão

$$\alpha = x_{N_2}^0 + x_{H_2O}^0 + x_{CO_2}^0 + \beta x_{O_2}^0 = 1 - x_{O_2}^0 + \beta x_{O_2}^0 = 1 + x_{O_2}^0 (\beta - 1), \quad (52)$$

onde o factor  $\beta$  é definido como o rácio entre a quantidade de matéria de produtos de combustão formados e a quantidade de matéria de oxigénio consumido, e  $x_{O_2}^0$  é dado por (43).

Considerando a forma generalizada de uma reacção de combustão,



o factor  $\beta$  é dado por

$$\beta = \frac{4a + 2b + 2e + 2d}{4a + b - e - 2c - 2g}. \quad (53)$$

### 3.1.3.2 Caudal volumétrico na conduta

Na realização do ensaio SBI, a medição do caudal volumétrico na conduta de extracção é efectuada com um sensor bidireccional de pressão. A adopção desta técnica de medição justifica-se pela robustez deste tipo de sensores face à presença de partículas sólidas presentes no escoamento. Esta circunstância torna menos adequada a utilização do tubo de Pitot, uma vez que a elevada probabilidade de obstrução do orifício de tomada de pressão constitui uma perturbação significativa da medição. Refira-se, contudo, que o princípio de funcionamento é idêntico em ambos os casos, pelo que a descrição apresentada em seguida é a aplicada a um tubo de Pitot, sendo especificados, na parte final, os aspectos característicos do sensor bidireccional de pressão.

Assim, considerando-se a instalação de um tubo de Pitot no centro da secção circular da conduta de extracção de gases e admitindo que esta possui uma área circular  $A$ , com diâmetro  $d$ , o caudal volumétrico é, por definição,

$$q_{v_c} = v A = v \pi d^2 / 4, \quad (54)$$

sendo  $v$  a velocidade do escoamento.

No caso de um escoamento ideal e incompressível (a massa volúmica do escoamento,  $\rho$ , é considerada constante), a velocidade medida pelo tubo de Pitot é dada por

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (55)$$



Atendendo à especificidade do escoamento de gases na conduta de extracção durante a existência de combustão, desconhece-se a massa volúmica da mistura gasosa presente na conduta, pelo que se recorre, por analogia, à massa volúmica do ar como melhor estimativa possível desta grandeza.

De acordo com [10], a massa volúmica do ar húmido,  $\rho_{ar}$ , pode ser estimada de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho_{ar} = \frac{0,34848 p_{atm} - 0,009024 hr \exp[0,0612(T_{amb} - 273,15)]}{T_{amb}}, \quad (56)$$

em que a pressão atmosférica é expressa em hPa, a humidade relativa é um valor percentual e  $T_{amb}$  corresponde à temperatura ambiente em kelvin. Note-se que a utilização desta expressão pressupõe o cumprimento dos seguintes requisitos:  $900 \text{ hPa} \leq p_{atm} \leq 1100 \text{ hPa}$ ;  $hr \leq 80\%$ ;  $283,15 \text{ K} \leq T_{amb} \leq 303,15 \text{ K}$ .

Uma vez que o escoamento é considerado incompressível, adopta-se um valor constante de massa volúmica do ar relativo à temperatura de referência,  $T_0 = 298,15 \text{ K}$ , sendo necessário introduzir um factor de correcção em resultado do facto da temperatura dos gases na conduta,  $T$ , ser superior ao valor de referência indicado. A expressão (54) é assim escrita como

$$q_{v_c} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{ar}(T_0)} \frac{T_0}{T}} A. \quad (57)$$

Como o escoamento na conduta encontra-se num regime turbulento, o perfil de velocidade não é uniforme, existindo desvios entre a sua velocidade média e a velocidade no centro. Para contabilizar este efeito, introduz-se o factor de correcção,  $k_{1,v}$ , visando corrigir a não-uniformidade da velocidade na secção da conduta, cf. mencionado em 2.4.6.

De acordo com as indicações normativas do ensaio SBI, este factor constitui uma parcela de um factor de correcção global do ensaio,  $k_t$  que inclui as correcções,  $k_{t,propano}$  e  $k_{t,heptano}$ , resultantes da combustão de substâncias com composições químicas conhecidas, designadamente o propano e o heptano, em ensaios SBI com especificidades próprias descritos em 2.4.4 e 2.4.5, respectivamente.

O factor de correcção global do ensaio é assim dado por

$$k_t = \frac{k_{t,v} + k_{t,\text{propano}} + k_{t,\text{heptano}}}{3}, \quad (58)$$

correspondendo o caudal volumétrico na conduta a

$$q_{V_c} = k_t \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{\text{ar}}(T_0)}} \frac{T_0}{T} A. \quad (59)$$

A medição do caudal na conduta é assegurada, de facto, por um sensor bidireccional de pressão. Assim, a expressão precedente deve ser modificada introduzindo um factor de correcção adicional,  $1/k_p$ , dado por

$$k_p = \frac{\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}}{v}. \quad (60)$$

As indicações normativas associadas ao ensaio SBI prevêm um valor constante para este factor, baseado no estudo efectuado por McCaffrey e Heskestad [11]. Deve-se mencionar, porém, que o sensor estudado nesse caso possui uma configuração geométrica diferente da do sensor utilizado no ensaio SBI e, como tal, necessita de uma validação.

Em síntese, o caudal volumétrico na conduta de extracção é dado pela expressão:

$$q_{V_c} = \frac{k_t}{k_p} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{\text{ar}}(T_0)}} \frac{T_0}{T} A, \quad (61)$$

ou, alternativamente,

$$q_{V_c} = c A \frac{k_t}{k_p} \sqrt{\frac{\Delta p}{T}} \quad (62)$$

com

$$c = \sqrt{\frac{2 T_0}{\rho_{\text{ar}}(T_0)}}. \quad (63)$$

### 3.1.4 Modelo matemático associado à taxa de libertação de calor

A utilização do modelo matemático expresso em (40) permite a determinação da taxa de libertação de calor total,  $HRR_{\text{total}}$ , no ensaio SBI existindo portanto, a necessidade de distinguir entre a energia que é libertada pela actuação do queimador principal e a que é efectivamente originada pela combustão da amostra submetida a ensaio. Este facto constitui

a principal motivação para a utilização isolada de um queimador auxiliar na fase inicial do ensaio SBI, de forma a ser possível quantificar a taxa de libertação de calor,  $HRR_{\text{queimador}}$ , atribuída à combustão no queimador principal na fase subsequente do ensaio. Segundo a norma, esta grandeza corresponde a:

$$HRR_{\text{queimador}} = \overline{HRR}_{\text{total}} (210 \text{ s} \dots 270 \text{ s}), \quad (64)$$

considerando a duração do ensaio compreendida entre 210 s e 270 s.

Desta forma, a taxa de calor que é efectivamente libertada pela combustão da amostra ensaiada é dada por

$$HRR(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 300 \text{ s} \\ \max\{0, HRR_{\text{total}}(t) - HRR_{\text{queimador}}\} & 300 \text{ s} \leq t \leq 312 \text{ s}, \\ HRR_{\text{total}}(t) - HRR_{\text{queimador}} & t \geq 312 \text{ s} \end{cases} \quad (65)$$

sendo habitualmente expressa em kW, podendo-se definir como a potência térmica libertada num dado instante,  $t$ , da realização do ensaio SBI.

### 3.2 Taxa de libertação de fumo

No seguimento da exposição apresentada na secção anterior, a grandeza taxa de libertação de fumo,  $SPR$ , é definida de forma análoga à da grandeza taxa de libertação de calor, adoptando-se o mesmo conjunto de aproximações, designadamente, no que concerne ao caudal volumétrico na conduta de extracção.

No ensaio SBI, a medição da grandeza  $SPR$  é baseada no fenómeno de atenuação luminosa na presença de fumo (*vide* secção 2.2.2), o qual é caracterizado pela grandeza coeficiente de absorção neperiano,  $\alpha$ , definida como

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (66)$$

em que  $L$  é o comprimento do trajecto percorrido pelo feixe óptico na presença de fumo,  $I_0$  corresponde à intensidade luminosa inicial e  $I$  é a intensidade luminosa no restante período de realização do ensaio. Introduzindo na expressão anterior a grandeza transmitância,  $\tau$ , definida como o quociente entre  $I$  e  $I_0$ , temos alternativamente

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{\tau}\right). \quad (67)$$

No ensaio SBI, assume-se que existe uma relação de proporcionalidade directa entre a intensidade luminosa que atinge o detector fotoeléctrico e a tensão eléctrica,  $V$ , nos seus terminais. Desta forma, o coeficiente de absorção neperiano é definido por

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{V_0}{V}\right). \quad (68)$$

De acordo com a norma do ensaio SBI, a taxa de libertação de fumo,  $SPR$ , é dada por

$$SPR = q_{v_c} \frac{T}{T_0} \alpha, \quad (69)$$

ou seja,

$$SPR = \frac{q_{v_c}}{L} \frac{T}{T_0} \ln\left(\frac{1}{\tau}\right), \quad (70)$$

onde o factor  $T/T_0$  permite corrigir a diferença de temperatura existente entre os gases presentes na conduta de extracção,  $T$ , e a temperatura de referência do ar,  $T_0$ , no meio envolvente em estudo e  $q_{v_c}$  é o caudal volumétrico na conduta de extracção dado pela expressão (61).

A utilização da expressão (70) permite a determinação da taxa de libertação de fumo total,  $SPR_{total}$ , no ensaio SBI existindo, portanto, a necessidade de distinguir o fumo que é libertado pela actuação do queimador principal e o que é efectivamente originado pela combustão da amostra submetida a ensaio. Esta particularidade é contabilizada na utilização isolada de um queimador auxiliar na fase inicial do ensaio SBI de forma a ser possível quantificar a taxa de libertação de fumo,  $SPR_{queimador}$ , atribuída à combustão no queimador principal na fase subsequente do ensaio. Segundo a norma, esta grandeza corresponde a

$$SPR_{queimador} = \overline{SPR}_{total} (210 \text{ s} \dots 270 \text{ s}), \quad (71)$$

considerando a duração do ensaio compreendida entre 210 s e 270 s.

Desta forma, a taxa de fumo que é efectivamente libertada pela combustão da amostra submetida a ensaio é dada por

$$SPR(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 300 \text{ s} \\ \max\{0, SPR_{\text{total}}(t) - SPR_{\text{queimador}}\} & 300 \text{ s} \leq t \leq 312 \text{ s} \\ SPR_{\text{total}}(t) - SPR_{\text{queimador}} & t \geq 312 \text{ s} \end{cases} \quad (72)$$

sendo habitualmente expressa em  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .



## 4 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

### 4.1 Introdução

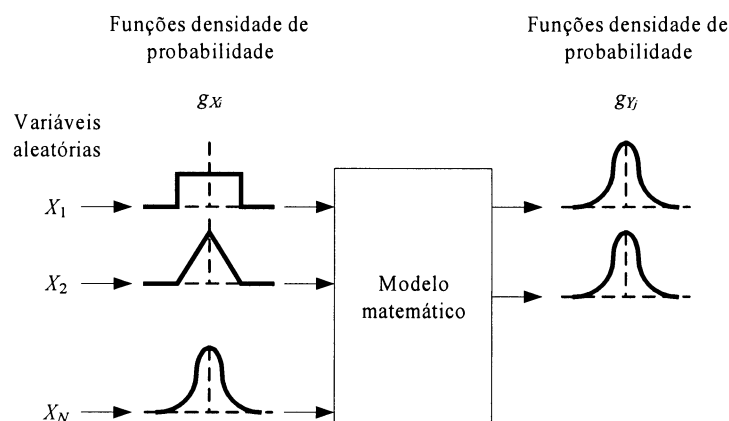
Um processo de avaliação da incerteza de medição associada a uma determinada grandeza pode ser dividida em duas fases:

- a fase de formulação, onde se promove a identificação e a caracterização probabilística das diversas grandezas de entrada associadas ao modelo matemático da medição;
- a fase de cálculo, a qual traduz-se na quantificação da incerteza de medição associada à estimativa da grandeza de saída, com base nas distribuições de probabilidade das grandezas de entrada definidas na fase anterior.

A fase de cálculo baseia-se predominantemente na metodologia GUM [12, 13] a qual, apesar de fundamentada numa abordagem probabilística do conceito de medição, apenas conduz a soluções exactas quando aplicada a sistemas de medição lineares ou de não-linearidade reduzida. A utilização desta metodologia implica, necessariamente, a adopção de funções de distribuição de probabilidade simétricas e centradas para as diversas grandezas de entrada, o que poderá eventualmente constituir um afastamento do comportamento probabilístico da realidade. Esta metodologia impõe, ainda, que uma função de probabilidade da grandeza de saída seja normal.

Face aos pressupostos e limitações próprias da metodologia GUM e ao desenvolvimento das capacidades computacionais possibilitou a aplicação de uma metodologia alternativa de avaliação de incertezas suportada no método de Monte Carlo (MMC) [14].

Este método consiste, genericamente, na simulação numérica de fenómenos de natureza estocástica, permitindo a obtenção de informação probabilística relacionada com uma dada grandeza de saída, mediante o conhecimento da informação probabilística das grandezas de entrada e da respectiva relação funcional. Este processo de simulação traduz-se na convolução das distribuições de probabilidade das grandezas de entrada, de acordo com o modelo matemático em estudo, obtendo-se como resultado a função de distribuição de probabilidade da grandeza de saída (*vide* a figura seguinte).



**Figura 12:** Conversão da informação de entrada em informação de saída através do modelo matemático representativo da medição [14].

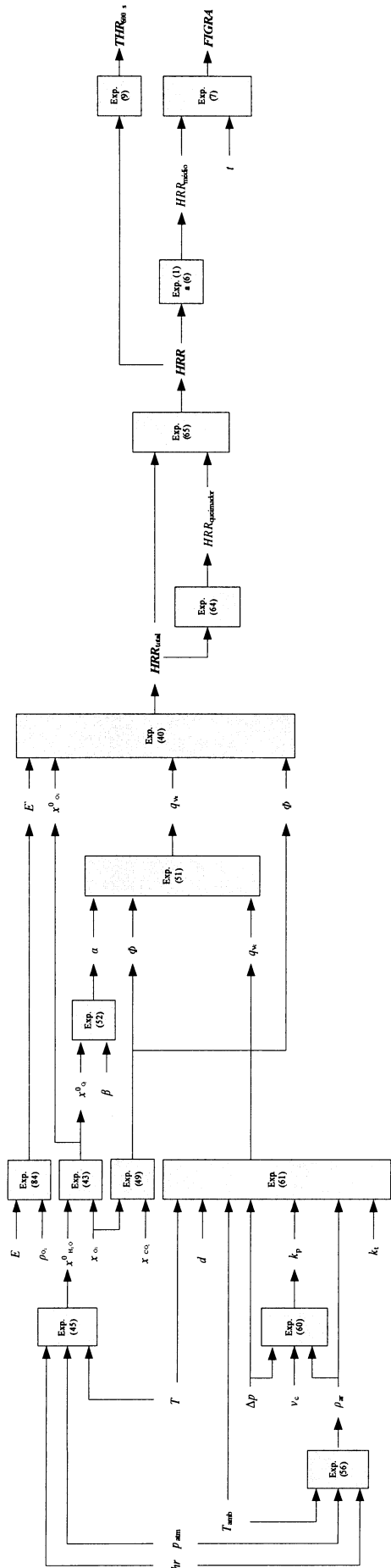
Desta forma, a metodologia MMC não possui as limitações da metodologia GUM, motivo pelo qual é adoptada preferencialmente na fase de cálculo da avaliação de incertezas do ensaio SBI, tendo em conta a não-linearidade e o grau de complexidade dos modelos matemáticos envolvidos.

No contexto do ensaio SBI, é possível identificar um conjunto diversificado de grandezas associadas, por um lado, às grandezas de saída relacionadas com a libertação de calor (*vide* figura 13), e por outro lado, às grandezas de saída associadas à produção de fumo (*vide* figura 14).

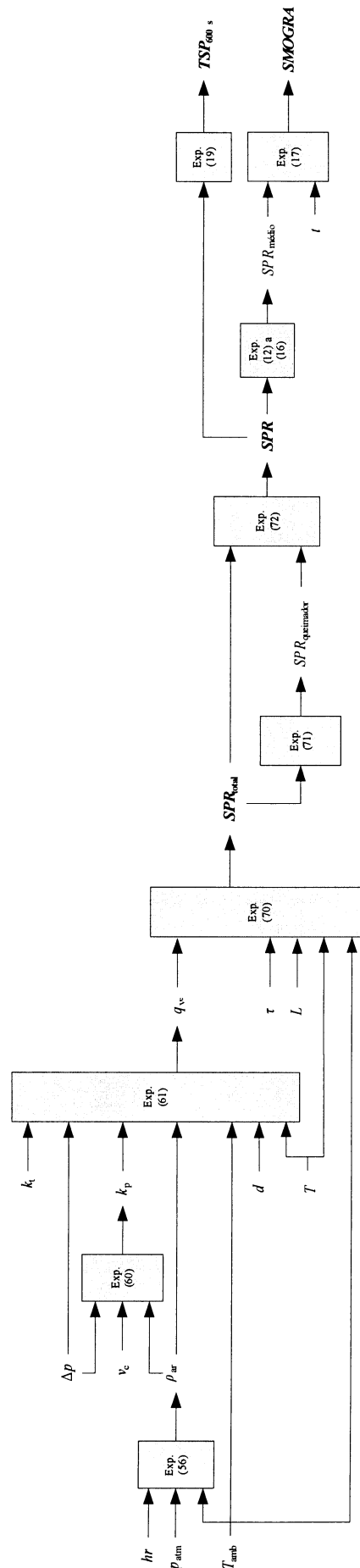
Destaca-se, em particular, a grandeza factor de correcção global pela sua presença em ambas as vertentes do ensaio SBI, acrescido do número significativo de grandezas e respectivas relações funcionais que lhe estão associadas, conforme é possível verificar na figura 15.

Na secção seguinte, concretiza-se a fase de formulação com a enumeração e descrição das componentes de incerteza associadas a uma dada grandeza de entrada do ensaio SBI.





**Figura 13:** Representação esquemática das grandezas e respectivas relações funcionais da vertente do ensaio SBI relativa à libertação de calor.



**Figura 14:** Representação esquemática das grandezas e respectivas relações funcionais da vertente do ensaio SBI relativa à produção de fumo.



## 4.2 Componentes de incerteza

### 4.2.1 Humidade relativa

Na medição da grandeza humidade relativa destacam-se duas componentes de incerteza. No que concerne ao instrumento de medição, menciona-se a calibração do termohigrómetro enquanto que ao nível da metodologia de medição e, refere-se a variação ambiental da humidade relativa no decorrer do ensaio SBI em virtude da sua medição pontual na fase de inicialização do ensaio. A tabela seguinte resume as componentes de incerteza identificadas assim como as respectivas funções de densidade de probabilidade adoptadas.

**Tabela 2:** Componentes de incerteza associadas à grandeza humidade relativa.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Incerteza-padrão ou parametrização
$\delta hr_{\text{calibração}}$	Calibração do termohigrómetro	N	$\pm 1,0 \%$
$\delta hr_{\text{método}}$	Variação ambiental da humidade relativa durante o ensaio	R	$\pm 2,0 \%$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

### 4.2.2 Pressão atmosférica

A medição da grandeza pressão atmosférica é assegurada por um transdutor de pressão instalado no interior do painel de instrumentação do ensaio SBI. Na tabela 3, podemos observar as componentes de incerteza identificadas com base nas especificações técnicas [15, 16] dos elementos da cadeia de medição (transdutor e sistema de aquisição de dados).

Salienta-se que, o conhecimento disponível do sistema de medição não permitiu contabilizar a componente de incerteza relativa à calibração do transdutor, nomeadamente as incertezas-padrão associadas às pressões atmosféricas e tensões eléctricas de referência utilizadas, as quais constituem os pontos extremos da gama de medição.

Note-se que, como a variação de temperatura no interior do painel de instrumentação não é significativamente elevada, despreza-se o efeito de variação de temperatura enquanto componente de incerteza da indicação do transdutor.

**Tabela 3:** Componentes de incerteza associadas à grandeza pressão atmosférica.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Incerteza-padrão ou parametrização
$\delta p_{\text{atm}}_{\text{linearidade}}$	Linearidade		
$\delta p_{\text{atm}}_{\text{reversibilidade}}$	Reversibilidade	N	$\pm 0,18$ kPa
$\delta p_{\text{atm}}_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade		
$\delta p_{\text{atm}}_{\text{estabilidade}}$	Estabilidade	R	$\pm 0,24$ kPa
$\delta V_{\text{DAQ}}$	Tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados	N	$\pm (3,5 \times 10^{-5} \cdot V + 5 \times 10^{-6})$ V

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.3 Temperatura dos gases na conduta de extracção

No ensaio SBI, a estimativa da grandeza temperatura dos gases na conduta de extracção é obtida mediante o cálculo da média aritmética das indicações de três termopares posicionados na mesma secção da conduta e formando entre si um ângulo de 120°. Por este motivo, a incerteza-padrão associada à estimativa desta grandeza resulta, por um lado, da incerteza-padrão associada à média aritmética calculada e, por outro lado, do próprio método de medição adoptado, em particular, a dispersão de valores obtidos com a utilização simultânea de três termopares.

A incerteza-padrão relativa à média aritmética corresponde ao seu desvio-padrão experimental, obtido com base na dimensão da amostra considerada e na incerteza-padrão associada à cadeia individual de medição de temperatura, cujas componentes de incerteza são apresentadas na tabela seguinte.

**Tabela 4:** Componentes de incerteza associadas à cadeia de medição de temperatura dos gases na conduta.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Incerteza-padrão ou parametrização
$\delta T_{\text{calibração}}$	Calibração do termopar	N	$\pm 1,0$ °C
$\delta T_{\text{escoamento}}$	Efeito dinâmico do escoamento	R	$\pm 0,04$ °C
$\delta T_{\text{DAQ}}$	Tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados	N	$\pm 1,0$ °C

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

Destacam-se, em particular, a calibração do termopar na gama de medição de temperatura no ensaio SBI (25 °C a 400 °C), o efeito dinâmico do escoamento sobre o termopar referido em [17] e, ainda, o sistema de aquisição de dados enquanto elemento constituinte da cadeia de medição [15]. Nesta avaliação consideraram-se desprezáveis as trocas de calor existentes entre a conduta de extracção e o termopar.

Por sua vez, a incerteza-padrão do método de medição é determinada com base no desvio-padrão experimental dos valores obtidos simultaneamente pelos três termopares.

#### 4.2.4 Temperatura ambiente

No que concerne à medição da grandeza temperatura ambiente, a tabela seguinte apresenta as funções de distribuição de probabilidade e respectivas incertezas-padrão ou parametrizações relativas às componentes de incerteza identificadas: a calibração do termopar utilizado; a uniformidade da temperatura do ar na sala laboratorial; e a tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados utilizado [15].

**Tabela 5:** Componentes de incerteza associadas à grandeza temperatura ambiente.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Incerteza-padrão ou parametrização
$\delta T_{\text{amb calibração}}$	Calibração do termopar	N	$\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$
$\delta T_{\text{amb uniformidade}}$	Uniformidade	R	$\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$
$\delta T_{\text{DAQ}}$	Tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados	N	$\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.5 Libertação de calor por unidade de massa de oxigénio consumido

A incerteza-padrão associada a esta grandeza foi avaliada de acordo com a indicação do nível de exactidão declarado por Huggett [4], tendo-se adoptado uma função de densidade de probabilidade normal, conforme é possível observar na tabela seguinte.

**Tabela 6:** Incerteza-padrão da libertação de calor por unidade de massa de oxigénio consumido.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa e incerteza-padrão
$\delta E$	Libertação de calor por unidade de massa de oxigénio consumido	N	$(13,1 \pm 0,7) \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.6 Massa volúmica do oxigénio

A incerteza-padrão associada a esta grandeza foi avaliada de acordo com a indicação presente em [17], relativa à massa volúmica do oxigénio a uma temperatura de 25 °C, tendo-se adoptado uma função de densidade de probabilidade normal, conforme é possível observar na tabela 7.

**Tabela 7:** Incerteza-padrão da massa volúmica do oxigénio a uma temperatura de 25 °C.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa e incerteza-padrão
$\delta \rho_{O_2}$	Massa volúmica do oxigénio a 25 °C	N	$(1,308 \pm 0,006) \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### **4.2.7 Fracção molar de oxigénio**

Na sua vertente de medição do teor de oxigénio, o princípio de funcionamento do analisador de gases utilizado pelo LERF-LNEC baseia-se no comportamento paramagnético evidenciado pela molécula de oxigénio. De acordo com [17], esta metodologia de medição evidencia uma sensibilidade própria a eventuais variações de temperatura e pressão atmosférica na região de recolha da amostra, assim como da variação da potência eléctrica fornecida ao analisador. Com base na informação técnica disponível, assume-se uma quantificação baseada no nível de exactidão citado pelo fabricante do analisador [18].

Atendendo que as medições da fracção molar de oxigénio têm por base o modelo matemático linear dado pela expressão (20), definido pela realização do ensaio preliminar de ajuste dos pontos extremos da gama de medição (zero e teor de oxigénio do ar seco atmosférico), é necessário contabilizar também as seguintes componentes de incerteza:

- tensão eléctrica obtida com o sistema de aquisição de dados;
- tensão eléctrica medida durante a realização experimental dos pontos extremos da gama de medição (zero e teor de oxigénio do ar seco atmosférico);
- fracção molar de oxigénio de referência na realização experimental do zero;
- fracção molar de oxigénio de referência na realização do ponto experimental relativo ao teor de oxigénio no ar seco atmosférico.

No que concerne à componente de incerteza da tensão eléctrica obtida com o sistema de aquisição, considera-se o valor majorado do nível de exactidão citado pelo fabricante do sistema de aquisição de dados [15] para um período de funcionamento de 1 ano no intervalo de temperatura de  $(23 \pm 5) \text{°C}$ .

Por sua vez, a quantificação da componente de incerteza associada à tensão eléctrica na realização experimental dos pontos extremos da gama de medição foi realizada com recurso a um processo de amostragem com dimensão igual a 20.

De acordo com as indicações do boletim de composição química do azoto (grau de pureza de 99,999 %) utilizado na realização experimental do zero, a quantidade máxima de oxigénio residual presente no reservatório de azoto corresponde a 2 ppm [19]. Desta forma, para esta componente de incerteza, assume-se uma função densidade de probabilidade  $\frac{1}{2}$  arco seno cujo limite inferior – com menor probabilidade de ocorrência – é igual a zero e cujo limite superior – com maior probabilidade de ocorrência – corresponde à quantidade máxima de oxigénio residual citada.

Por último refere-se que, adopta-se como estimativa da fracção molar de oxigénio no ar seco atmosférico, o valor de 0,209 476 citado em [20], considerando-se a sua incerteza pouco significativa quando comparada com as outras componentes.

A consulta dos registos históricos do LERF-LNEC relativos à determinação experimental da deriva e ruído do analisador de gases (na vertente de medição de teor de oxigénio), possibilitou a caracterização probabilística destas duas componentes de incerteza, tendo-se considerado uma amostra com uma dimensão igual a 26, conforme se pode observar pelas figuras seguintes.

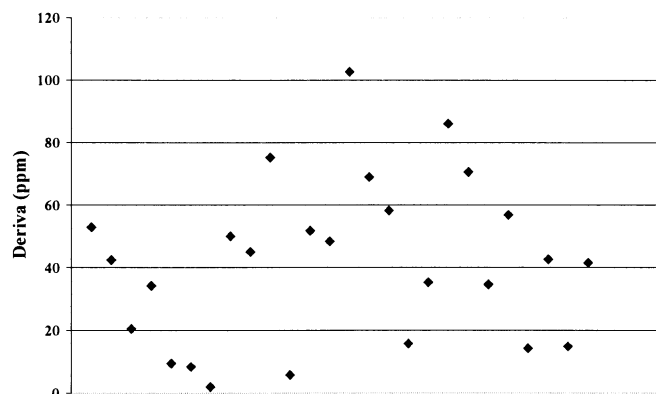


Figura 16: Dispersão dos valores de deriva do analisador.

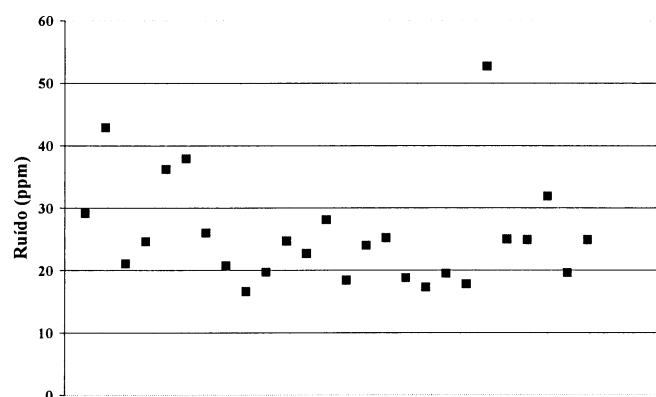


Figura 17: Dispersão dos valores de ruído do analisador.

Apresentam-se na tabela seguinte, de forma sumária, as diversas componentes de incerteza referidas anteriormente e as respectivas distribuições de probabilidade, estimativas, incertezas-padrão e parametrizações adoptadas.

**Tabela 8:** Componentes de incerteza associadas à grandeza fracção molar de oxigénio.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa, incerteza-padrão ou parametrização
$\delta x_{\Delta T, \Delta p, \Delta V}$	Variações de temperatura, pressão atmosférica e energia eléctrica	N	$0 \pm 0,0015 \cdot x_{O_2}$
$\delta V_{DAQ}$	Tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados	N	$\pm(3,5 \times 10^{-5} \cdot V + 5 \times 10^{-6}) V$
$\delta V_{zero}$	Tensão eléctrica na realização do zero	R	$(2,253 \pm 0,003) V$
$\delta V_{O_2 \text{ ambiental}}$	Tensão eléctrica na realização do oxigénio ambiental	R	$(9,806 \pm 0,001) V$
$\delta x_{O_2 \text{ residual}}$	Oxigénio residual no reservatório de azoto	$\frac{1}{2} U$	$(0; 2 \times 10^{-6} \cdot x_{O_2})$
$\delta x_{deriva}$	Deriva	T	$(40 \pm 30) \times 10^{-6}$
$\delta x_{ruído}$	Ruído	R	$(27 \pm 11) \times 10^{-6}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

Salienta-se que se considerou, no contexto deste estudo, a presença de outros gases (vapor de água, por exemplo) com comportamento paramagnético no analisador como uma componente de incerteza desprezável face às outras componentes apresentadas anteriormente.

Por outro lado, faz-se notar que a fase inicial do ensaio SBI prevê a obtenção da estimativa da grandeza fracção molar de oxigénio inicial mediante o cálculo da média aritmética da fracção molar de oxigénio durante o intervalo de tempo compreendido entre 30 s e 90 s, motivo pelo qual a incerteza-padrão associada a esta grandeza apresenta duas componentes: a incerteza-padrão associada à média, obtida através do seu desvio-padrão experimental, atendendo à dimensão da amostra e às componentes de incerteza citadas na tabela 8; e a incerteza-padrão associada ao método de medição, determinada pelo desvio-padrão experimental dos valores de fracção molar registados no intervalo de tempo compreendido entre 30 s e 90 s.

#### **4.2.8 Fracção molar de dióxido de carbono**

O analisador de gases utilizado no LERF-LNEC para a medição da fracção molar de dióxido de carbono baseia-se no fenómeno de absorção, por esta molécula, de radiação na região de comprimento de onda do infravermelho, apresentando assim uma metodologia de medição distinta da que é referida na secção anterior. Apesar deste facto, as componentes de



incerteza consideradas para esta grandeza são idênticas às apresentadas na secção anterior, considerando uma quantificação própria com base nas mesmas referências bibliográficas citadas e nos ensaios experimentais realizados.

A principal diferença reside no modelo matemático linear no qual se baseiam as medições efectuadas, designadamente, na componente de incerteza relativa à realização experimental dos pontos extremos de medição da gama de medição. Deste modo, a componente de incerteza associada à realização do zero da gama é quantificada de acordo com a quantidade máxima de dióxido de carbono residual presente no reservatório de azoto, (neste caso, 1 ppm) [19]. Por sua vez, na realização experimental do outro ponto extremo da gama de medição, a correspondente componente de incerteza é quantificada de acordo com o valor de incerteza associado ao teor de dióxido de carbono citado pelo fornecedor da mistura gasosa, neste caso  $(9,00 \pm 0,02) \%$ , considerando um intervalo de confiança de 95 %.

Na tabela 9 apresentam-se as diversas componentes de incerteza consideradas na medição da grandeza fracção molar de dióxido de carbono.

**Tabela 9:** Componentes de incerteza associadas à grandeza fracção molar de dióxido de carbono.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa, incerteza-padrão ou parametrização
$\delta x_{\Delta T, \Delta p, \Delta V}$	Variações de temperatura, pressão atmosférica e energia eléctrica	N	$0 \pm 0,001 \cdot x_{CO_2}$
$\delta V_{DAQ}$	Tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados	N	$\pm(3,5 \times 10^{-5} \cdot V + 5 \times 10^{-6}) V$
$\delta V_{zero}$	Tensão eléctrica na realização do zero	R	$(2,004 \pm 0,002) V$
$\delta V_{CO_2, \text{referência}}$	Tensão eléctrica na realização do ponto extremo de medição (9 % CO <sub>2</sub> )	N	$(9,215 \pm 0,013) V$
$\delta x_{CO_2, \text{residual}}$	Dióxido de carbono residual no reservatório de azoto	$\frac{1}{2} U$	$(0; 1 \times 10^{-6} \cdot x_{CO_2})$
$\delta x_{CO_2, \text{referência}}$	Teor de dióxido de carbono na mistura gasosa de referência	N	$(0,0900 \pm 0,0001)$
$\delta x_{\text{deriva}}$	Deriva	T	$(15 \pm 10) \times 10^{-6}$
$\delta x_{\text{ruído}}$	Ruído	R	$(14 \pm 4) \times 10^{-6}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

É de referir que se considerou a absorção de radiação na região de comprimento de onda do infravermelho por parte de outros gases (vapor de água, por exemplo) que poderia ser detectada pelo analisador, uma componente de incerteza desprezável face às outras componentes apresentadas anteriormente.

Salienta-se, ainda, que a fase inicial do ensaio SBI prevê a obtenção da estimativa da grandeza fracção molar de dióxido de carbono inicial, de forma similar ao mencionado na secção anterior, mediante o cálculo da média aritmética da fracção molar de dióxido de carbono durante o intervalo de tempo compreendido entre 30 s e 90 s. Novamente, a incerteza-padrão associada a esta grandeza apresenta duas componentes: a incerteza-padrão associada à média, obtida através do seu desvio-padrão experimental, atendendo à dimensão da amostra e às componentes de incerteza citadas na tabela 9; e a incerteza-padrão associada ao método de medição, determinada pelo desvio-padrão experimental dos valores de fracção molar registados no intervalo de tempo compreendido entre 30 s e 90 s.

#### **4.2.9 Pressão diferencial**

O estudo das especificações técnicas [21] associadas ao transdutor de pressão utilizado para a medição da grandeza pressão diferencial (sensor bidireccional de pressão) permitiu identificar diversas componentes de incerteza, designadamente, a calibração, a linearidade, a reversibilidade, a repetibilidade e a variação térmica. Refere-se, ainda, a componente de incerteza associada ao sistema de aquisição de dados enquanto elemento constituinte da cadeia de medição da grandeza pressão diferencial [15].

No que se refere à metodologia utilizada, identificaram-se como componentes de incerteza:

- a realização experimental do zero da cadeia de medição;
- a presença de um escoamento turbulento no interior da conduta.

No primeiro caso, a componente de incerteza foi quantificada com recurso a uma amostragem de dimensão igual a 20 enquanto que, no segundo caso, a observação da estabilidade da indicação da cadeia de medição na ausência de combustão determinou a quantificação desta componente.

A tabela 10 evidencia as diversas componentes de incerteza referidas anteriormente, em particular, as respectivas funções de densidade de probabilidade, estimativas, incertezas-padrão e parametrizações adoptadas.

**Tabela 10:** Componentes de incerteza associadas à grandeza pressão diferencial.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa, incerteza-padrão ou parametrização
$\delta \Delta p_{\text{calibração}}$	Calibração do transdutor de pressão	N	$\pm 1,0$ Pa
$\delta \Delta p_{\text{linearidade}}$	Linearidade	R	$\pm 1,0$ Pa
$\delta \Delta p_{\text{reversibilidade}}$	Reversibilidade	R	$\pm 0,1$ Pa
$\delta \Delta p_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade	R	$\pm 0,05$ Pa
$\delta \Delta p_{\text{temperatura}}$	Variação da temperatura	R	$\pm 0,1$ Pa
$\delta V_{\text{DAQ}}$	Tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados	N	$\pm (3,5 \times 10^{-5} \cdot V + 5 \times 10^{-6})$ V
$\delta V_{\text{zero}}$	Tensão eléctrica na realização do zero	R	$(0,24 \pm 0,06)$ V
$\delta \Delta p_{\text{turbulência}}$	Escoamento turbulento	R	$\pm 4,0$ Pa

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.10 Velocidade do escoamento de gases na conduta

A determinação experimental do perfil de velocidade numa secção da conduta, com recurso a um anemómetro de fio quente, permite estimar a velocidade do escoamento em diversos pontos da secção, nomeadamente, no centro da conduta. Deste modo, para a cada ponto de medição considerado (*vide* secção 2.4.6), a grandeza velocidade do escoamento apresenta como componentes de incerteza: a calibração do instrumento de medição utilizado; e a repetibilidade das medições efectuadas no ponto de medição considerado, quantificada mediante a observação experimental da dispersão das indicações do instrumento de medição nos diversos ensaios realizados. A tabela seguinte apresenta as diversas componentes de incerteza referidas anteriormente, em particular, as respectivas funções de densidade de probabilidade, incertezas-padrão ou parametrizações adoptadas.

**Tabela 11:** Componentes de incerteza associadas à velocidade do escoamento de gases na conduta.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Incerteza-padrão ou parametrização
$\delta v_{\text{calibração}}$	Calibração do anemómetro	N	$\pm 0,208$ m·s <sup>-1</sup>
$\delta v_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade (centro da conduta)	R	$\pm 0,7$ m·s <sup>-1</sup>
$\delta v_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade (posição 1)	R	$\pm 0,5$ m·s <sup>-1</sup>
$\delta v_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade (posição 2)	R	$\pm 0,5$ m·s <sup>-1</sup>
$\delta v_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade (posição 3)	R	$\pm 0,2$ m·s <sup>-1</sup>
$\delta v_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade (posição 4)	R	$\pm 0,4$ m·s <sup>-1</sup>
$\delta v_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade (posição 5)	R	$\pm 0,5$ m·s <sup>-1</sup>

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.11 Diâmetro da conduta

A norma do ensaio SBI atribui um valor nominal de 315 mm como melhor estimativa da grandeza diâmetro da conduta, à qual podem-se associar diversas componentes de incerteza (*vide* tabela 12): a tolerância dimensional do valor nominal estipulada pela norma do ensaio; o fenómeno de expansão térmica resultante do aumento da temperatura interna da conduta [17]; a tolerância geométrica de circularidade; a deformação mecânica associada à instalação da conduta; e a deposição de resíduos resultantes do processo de combustão [17].

Note-se que, para as componentes de incerteza cuja função densidade de probabilidade é a função  $\frac{1}{2}$  arco seno, adoptou-se uma parametrização na qual o limite inferior da função apresenta menor probabilidade de ocorrência comparativamente com limite superior.

**Tabela 12:** Componentes de incerteza associadas à grandeza diâmetro da conduta.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Incerteza-padrão ou parametrização
$\delta d_{\text{tolerância}}$	Tolerância associada ao diâmetro nominal	R	$\pm 1,0$ mm
$\delta d_{\Delta T}$	Expansão térmica	$\frac{1}{2}$ U	(0; 0,5) mm
$\delta d_{\text{circularidade}}$	Circularidade	R	$\pm 1,0$ mm
$\delta d_{\text{deformação}}$	Deformação mecânica associada à instalação	R	$\pm 1,0$ mm
$\delta d_{\text{resíduos}}$	Deposição de resíduos	$\frac{1}{2}$ U	(0; 1) mm

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.12 Comprimento do trajecto do feixe óptico na presença de fumo

Apesar de tratar-se de uma grandeza distinta da mencionada na secção anterior, a instalação do sistema óptico para a medição de fumo na conduta traduz-se na existência de componentes de incerteza comuns entre as grandezas diâmetro da conduta e comprimento do trajecto do feixe óptico na presença de fumo, com a excepção da componente relativa à deposição de resíduos. De facto, o sistema óptico utilizado incorpora um circuito pneumático de ar pressurizado que evita a deposição de resíduos sobre as lentes, o que permite considerar a referida componente de incerteza desprezável.

Considera-se, ainda, a componente de incerteza relativa ao alinhamento entre a lâmpada policromática e o detector fotoeléctrico, conforme é possível observar na tabela 13.

**Tabela 13:** Componentes de incerteza associadas à grandeza comprimento do feixe óptico.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Incerteza-padrão ou parametrização
$\delta L_{\text{tolerância}}$	Tolerância associada ao diâmetro nominal	R	$\pm 1,0$ mm
$\delta L_{\Delta T}$	Expansão térmica	$\frac{1}{2}$ U	(0; 0,5) mm
$\delta L_{\text{circularidade}}$	Circularidade	R	$\pm 1,0$ mm
$\delta L_{\text{deformação}}$	Deformação mecânica associada à instalação	R	$\pm 1,0$ mm
$\delta L_{\text{alinhamento}}$	Alinhamento entre a lâmpada e o detector	R	$\pm 1,0$ mm

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.13 Transmitância

A medição da grandeza transmitância tem por base a adopção do modelo matemático linear expresso por (21), de acordo com valores de transmitância e tensão eléctrica aos terminais do detector fotoeléctrico considerados como referência nas condições de 0 % e 100 %, sendo assim necessário contabilizar as seguintes componentes de incerteza:

- tensão eléctrica obtida com o sistema de aquisição de dados;
- tensão eléctrica medida durante a realização experimental dos pontos extremos da gama de medição (condições de 0 % e 100 % de transmitância);
- radiação residual presente na conduta de extracção na realização experimental do zero do sistema de medição;
- transmitância em circuito óptico aberto.

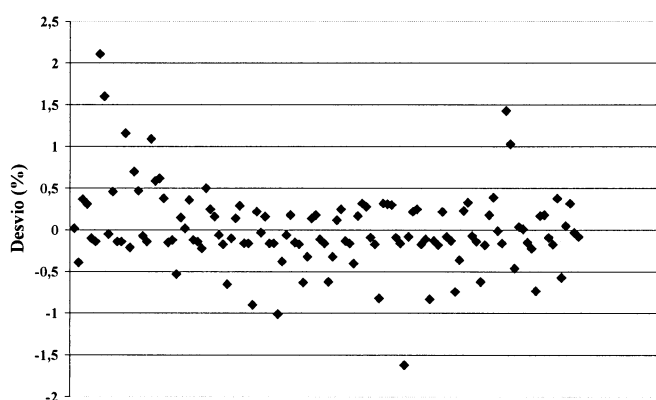
No que concerne à componente de incerteza da tensão eléctrica obtida com o sistema de aquisição, considera-se o valor majorado do nível de exactidão citado pelo fabricante do sistema de aquisição de dados [15] para um período de funcionamento de 1 ano no intervalo de temperatura de  $(23 \pm 5)$  °C.

Por sua vez, a quantificação da componente de incerteza associada à tensão eléctrica na realização experimental dos pontos extremos da gama de medição foi realizada com recurso a um processo de amostragem com dimensão igual a 20.

Na componente de incerteza relativa à radiação residual adopta-se a função densidade de probabilidade  $\frac{1}{2}$  arco seno cujo limite inferior apresenta menor probabilidade de ocorrência comparativamente ao seu limite superior. De forma análoga, atribui-se à componente de incerteza da transmitância em circuito aberto uma função densidade de probabilidade  $\frac{1}{2}$  arco seno cujo limite superior apresenta, neste caso, uma menor

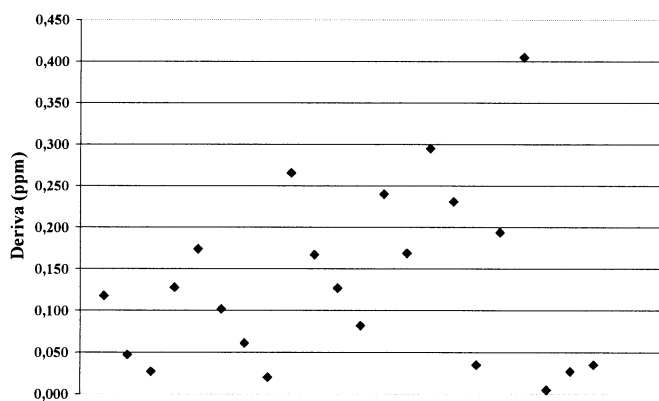
probabilidade de ocorrência comparativamente ao seu limite inferior. Salienta-se que em ambos os casos a parametrização referida baseia-se no conhecimento empírico disponível.

Atendendo tratar-se de um sistema de medição fundamentado num modelo matemático linear, procedeu-se à quantificação da componente de incerteza da linearidade com base nos registos históricos do LERF-LNEC relativos aos ensaios de comparação entre a indicação do sistema de medição e os valores de referência de filtros ópticos colocados no circuito óptico. A identificação da função de densidade de probabilidade e respectiva parametrização teve por base uma amostra com uma dimensão igual a 120, conforme é possível observar na figura seguinte.



**Figura 18:** Dispersão dos desvios de transmitância.

Por sua vez, a consulta dos registos históricos do LERF-LNEC relativos à determinação experimental da deriva e ruído do sistema de medição, possibilitou a quantificação destas duas componentes de incerteza, tendo-se considerado, para cada uma delas, uma amostra com uma dimensão igual a 22 (*vide* figura 19 e 20).



**Figura 19:** Dispersão dos valores de deriva.

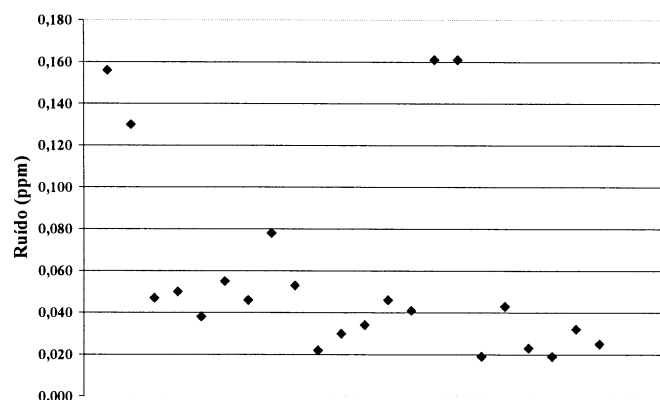


Figura 20: Dispersão dos valores de ruído.

A tabela seguinte resume as diferentes componentes de incerteza mencionadas anteriormente para a grandeza transmitância.

Tabela 14: Componentes de incerteza associadas à grandeza transmitância.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa, incerteza-padrão ou parametrização
$\delta V_{\text{DAQ}}$	Tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados	N	$\pm(4 \times 10^{-5} \cdot V + 7 \times 10^{-6}) \text{ V}$
$\delta V_{\tau_{100\%}}$	Tensão eléctrica na realização do ponto extremo de medição (100 %)	R	$(0,103 \pm 0,001) \text{ V}$
$\delta V_{\text{zero}}$	Tensão eléctrica na realização do zero	R	$(0,005 \pm 0,001) \text{ V}$
$\delta \tau_{100\%}$	Transmitância de 100 % em circuito óptico aberto	$\frac{1}{2} \text{ U}$	$(0,99; 1)$
$\delta \tau_{\text{nulo}}$	Transmitância nula (radiação residual)	$\frac{1}{2} \text{ U}$	$(0; 0,01)$
$\delta \tau_{\text{linearidade}}$	Linearidade	N	$0 \pm 0,007$
$\delta \tau_{\text{deriva}}$	Deriva	T	$(15 \pm 15) \times 10^{-6}$
$\delta \tau_{\text{ruído}}$	Ruído	R	$(36 \pm 17) \times 10^{-6}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.14 Factor $\beta$

Na impossibilidade de se conhecer com rigor a composição química das amostras dos materiais testados no ensaio SBI, o factor  $\beta$  é estimado como o valor médio dos factores associados à combustão completa de carbono e hidrogénio. Na tabela 15, podemos observar os valores atribuídos ao factor  $\beta$  para diversas substâncias combustíveis com base na sua combustão completa.

**Tabela 15:** Factor  $\beta$  de algumas substâncias combustíveis.

Substância	Fórmula química	Reacção química	Factor $\beta$
Carbono	C	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	1
Heptano	$C_7H_{16}$	$C_7H_{16} + 11O_2 \rightarrow 7CO_2 + 8H_2O$	1,4
Propano	$C_3H_8$	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	1,4
Propeno	$C_3H_6$	$2C_3H_6 + 9O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	1,3
Butano	$C_4H_{10}$	$2C_4H_{10} + 13O_2 \rightarrow 8CO_2 + 10H_2O$	1,4
Etano	$C_2H_6$	$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O$	1,4
Eteno	$C_2H_4$	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	1,3
Metano	$CH_4$	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	1,5
Hidrogénio	$H_2$	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	2

Atendendo aos valores apresentados, considera-se que a incerteza do factor  $\beta$  está associada a uma função de distribuição de probabilidade rectangular compreendida entre 1 e 2, centrada no valor médio deste intervalo.

Note-se que, para o caso da combustão de substâncias com composição química conhecida, como é o caso dos ensaios preliminares de combustão de propano e heptano citados anteriormente, a estimativa do factor  $\beta$  é conhecida, assumindo-se como componentes de incerteza o grau de pureza da substância combustível e a ocorrência de combustão incompleta. Contudo, atendendo à dificuldade na quantificação destas componentes de incerteza, adopta-se a convenção do factor  $\beta$  relativo a uma substância com composição química indefinida, conforme apresentado na tabela seguinte.

**Tabela 16:** Componente de incerteza associada à grandeza factor  $\beta$ .

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Parametrização
$\delta\beta$	Composição química indefinida	R	(1; 2)

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.15 Tempo de duração do ensaio

A realização do ensaio SBI envolve a medição de um conjunto de grandezas, com uma periodicidade de três segundos, pretendendo-se que as medições sejam efectuadas em intervalos de tempo equivalentes.

Atendendo às limitações inerentes a leituras multicanal existentes no sistema de aquisição de dados, a medição da grandeza encontra-se associada a uma incerteza de



medição. Adicionalmente, os dados experimentais requerem a realização de sincronização devido aos tempos de atraso associados às leituras de temperatura dos gases na conduta e às fracções molares de oxigénio e dióxido de carbono.

Pelos motivos apresentados e atendendo à periodicidade das leituras efectuadas, propõe-se uma majoração da incerteza associada à grandeza tempo e assume-se uma distribuição rectangular compreendida entre  $\pm 3$  s como representativa da sua variabilidade, conforme se observa na tabela seguinte.

**Tabela 17:** Componente de incerteza associada à grandeza tempo.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Parametrização
$\delta t$	Simultaneidade das leituras e sincronização	R	$\pm 3$ s

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### **4.2.16 Libertação de calor do propano por unidade de massa de oxigénio consumido**

No que se refere à grandeza libertação de calor do propano por unidade de massa de oxigénio consumido, destaca-se como componente de incerteza o grau de pureza do propano utilizado ao longo da realização do ensaio SBI. De facto, a norma de ensaio impõe a utilização de propano comercial com um grau de pureza mínimo de 95 %, admitindo implicitamente a combustão de outros elementos residuais (propeno, etano, eteno e butano, por exemplo) constituintes da sua composição química. Este facto influencia o valor energético da mistura gasosa utilizada no ensaio.

Com base na composição química do propano comercial [17], é possível estimar a libertação de calor por unidade de massa de oxigénio consumido (*vide* anexo 1) atendendo às entalpias de combustão dos diversos elementos constituintes da mistura [22-25] e à massa molar do oxigénio [26] consumido, sendo essa estimativa resultante de se assumir a ocorrência de uma reacção de combustão completa de cada elemento presente na mistura.

No que concerne à incerteza de medição das fracções molares presentes no propano comercial, adopta-se uma função densidade de probabilidade meio arco seno na qual as melhores estimativas das fracções molares dos diversos componentes assumem a maior probabilidade de ocorrência, enquanto que a probabilidade de ocorrência mínima é definida para uma fracção molar unitária, no caso do propano, e para uma fracção molar nula para os restantes componentes. A tabela 18 apresenta as diversas componentes de incerteza associadas às grandezas citadas anteriormente.

**Tabela 18:** Componentes de incerteza associadas à libertação de calor do propano por unidade de massa de oxigénio consumido.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa, incerteza-padrão ou parametrização
$\delta H_{c, \text{propano}}^1$	Entalpia de combustão inferior do propano		
	Entalpia de formação molar do propano	N	$(-104,7 \pm 0,5) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do dióxido de carbono	N	$(-393,51 \pm 0,13) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do vapor de água	N	$(-241,826 \pm 0,040) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\delta H_{c, \text{propeno}}^1$	Entalpia de combustão inferior do propeno		
	Entalpia de formação molar do propeno	N	$(22,2 \pm 5,1) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do dióxido de carbono	N	$(-393,51 \pm 0,13) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do vapor de água	N	$(-241,826 \pm 0,040) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\delta H_{c, \text{etano}}^1$	Entalpia de combustão inferior do etano		
	Entalpia de formação molar do etano	N	$(-83,8 \pm 0,3) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do dióxido de carbono	N	$(-393,51 \pm 0,13) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do vapor de água	N	$(-241,826 \pm 0,040) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\delta H_{c, \text{eteno}}^1$	Entalpia de combustão inferior do eteno		
	Entalpia de formação molar do eteno	N	$(51,5 \pm 4,2) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do dióxido de carbono	N	$(-393,51 \pm 0,13) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do vapor de água	N	$(-241,826 \pm 0,040) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\delta H_{c, \text{butano}}^1$	Entalpia de combustão inferior do butano		
	Entalpia de formação molar do butano	N	$(-125,60 \pm 0,67) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do dióxido de carbono	N	$(-393,51 \pm 0,13) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do vapor de água	N	$(-241,826 \pm 0,040) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\delta x_{\text{propano}}$	Fracção molar de propano na mistura gasosa comercial	$\frac{1}{2} U$	$(0,949 ; 1)$
$\delta x_{\text{propeno}}$	Fracção molar de propeno na mistura gasosa comercial	$\frac{1}{2} U$	$(0 ; 0,008)$
$\delta x_{\text{etano}}$	Fracção molar de etano na mistura gasosa comercial	$\frac{1}{2} U$	$(0 ; 0,010)$
$\delta x_{\text{eteno}}$	Fracção molar de eteno na mistura gasosa comercial	$\frac{1}{2} U$	$(0 ; 0,010)$
$\delta x_{\text{butano}}$	Fracção molar de butano na mistura gasosa comercial	$\frac{1}{2} U$	$(0 ; 0,023)$
$\delta M_{O_2}$	Massa molar do oxigénio	N	$(31,9988 \pm 0,0004) \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.17 Poder calorífico inferior do propano

De acordo com a formulação termodinâmica apresentada no anexo 1, esta grandeza é estimada mediante a determinação da entalpia de combustão inferior do propano e da sua massa molar. De facto, assumindo-se uma reacção de combustão completa do propano e

possuindo o conhecimento das entalpias de formação molar dos diversos reagentes e produtos de combustão [22, 23], é possível estimar a entalpia de combustão inferior do propano e conseqüentemente, em conjunto com a sua massa molar [26], o poder calorífico inferior do propano.

A tabela seguinte resume as componentes de incerteza identificadas assim como as respectivas funções de densidade de probabilidade adoptadas, estimativas e incertezas-padrão.

**Tabela 19:** Componentes de incerteza associadas à grandeza poder calorífico inferior do propano.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa e incerteza-padrão
$\delta H_c^l$ propano	Entalpia de combustão inferior do propano		
	Entalpia de formação molar do propano	N	$(-104,7 \pm 0,5) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do dióxido de carbono	N	$(-393,51 \pm 0,13) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do vapor de água	N	$(-241,826 \pm 0,040) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\delta M$ propano	Massa molar do propano	N	$(44,096 \pm 0,002) \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.18 Caudal mássico de propano

Com base na informação disponibilizada pelo fabricante do caudalímetro, considera-se uma componente de incerteza relativa ao valor de exactidão citado em [17]. Note-se que a avaliação metrológica do caudalímetro realizada pelo fabricante recorre, em regra, a outras substâncias para concretizar esse processo, uma vez que a natureza inflamável do propano traduz-se numa condição de risco elevado.

Atendendo à metodologia de medição adoptada no ensaio, é necessário considerar adicionalmente uma componente de incerteza relativa à realização do zero do sistema de medição. Refere-se por último, a componente de incerteza relativa ao sistema de aquisição de dados [15], cf. apresentado na tabela seguinte.

**Tabela 20:** Componentes de incerteza associadas à grandeza caudal mássico.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa e incerteza-padrão
$\delta q_m$ exactidão	Valor de exactidão do caudalímetro	N	$\pm 2,5 \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\delta q_m$ zero	Tensão eléctrica na realização do zero	R	$(0,015 \pm 0,005) \text{ V}$
$\delta V_{\text{DAQ}}$	Tensão eléctrica obtida pelo sistema de aquisição de dados	N	$\pm (3,5 \times 10^{-5} \cdot V + 5 \times 10^{-6}) \text{ V}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.19 Libertação de calor do heptano por unidade de massa de oxigénio consumido

O heptano utilizado no ensaio preliminar de combustão possui um elevado grau de pureza (superior a 99 %) pelo que se consideram as seguintes componentes de incerteza da libertação de calor do heptano por unidade de volume de oxigénio consumido: a entalpia de combustão inferior [23, 27] desta substância; e a massa molar do oxigénio [26]. Salieta-se que considera-se a ocorrência de uma reacção de combustão completa.

A tabela seguinte apresenta as componentes de incerteza identificadas assim como as respectivas funções de densidade de probabilidade adoptadas, estimativas e incertezas-padrão.

**Tabela 21:** Componentes de incerteza associadas à libertação de calor do heptano por unidade de massa de oxigénio consumido.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa e incerteza-padrão
$\delta H_c^1$ heptano	Entalpia de combustão inferior do heptano		
	Entalpia de formação molar do heptano (no estado líquido)	N	$(-224,40 \pm 0,79) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do dióxido de carbono	N	$(-393,51 \pm 0,13) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do vapor de água	N	$(-241,826 \pm 0,040) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\delta M_{O_2}$	Massa molar do oxigénio	N	$(31,9988 \pm 0,0004) \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.20 Poder calorífico inferior do heptano

De forma idêntica ao indicado na secção 4.2.17, apresentam-se na tabela seguinte as componentes de incerteza relativas à grandeza poder calorífico inferior do heptano [22, 25, 26].

**Tabela 22:** Componentes de incerteza associadas à grandeza poder calorífico inferior do heptano.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa e incerteza-padrão
$\delta H_c^1$ heptano	Entalpia de combustão inferior do heptano		
	Entalpia de formação molar do heptano (estado líquido)	N	$(-224,40 \pm 0,79) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do dióxido de carbono	N	$(-393,51 \pm 0,13) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Entalpia de formação molar do vapor de água	N	$(-241,826 \pm 0,040) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\delta M_{\text{heptano}}$	Massa molar do heptano	N	$(100,202 \pm 0,006) \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

#### 4.2.21 Massa de heptano

Na medição da massa de heptano utilizada no respectivo ensaio preliminar de combustão identificam-se as seguintes componentes de incerteza (*vide* tabela seguinte): a calibração da balança, a repetibilidade, a linearidade e resolução. Neste caso, atendendo ao procedimento adoptado, consideram-se desprezáveis as contribuições associadas aos desvios de excentricidade e reversibilidade.

**Tabela 23:** Componentes de incerteza associadas à grandeza massa do heptano.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Parametrização
$\delta m_{\text{calibração}}$	Calibração da balança	N	$\pm 0,035$ g
$\delta m_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade	R	$\pm 0,1$ g
$\delta m_{\text{linearidade}}$	Linearidade	R	$\pm 0,2$ g
$\delta m_{\text{resolução}}$	Resolução	R	$\pm 0,1$ g

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco seno; P – Trapezoidal.

### 4.3 Avaliação de incertezas pelo Método de Monte Carlo

O conhecimento da dependência matemática das diversas mensurandas relativamente às grandezas de entrada presentes no ensaio SBI, cuja caracterização metrológica consta nas secções anteriores, permite que se proceda à fase de simulação numérica visando a determinação da incerteza de medição das grandezas de saída.

Para esse efeito, adoptou-se um procedimento de avaliação de incertezas baseado no MMC, cuja aplicação requer um conjunto de recursos algorítmicos para a concretização das diferentes etapas que o constituem, conforme é possível observar na figura 21. Nesta figura, destacam-se as seguintes etapas genéricas do MMC:

- a geração de sequências de números pseudo-aleatórios, com distribuição de probabilidade uniforme;
- a conversão das sequências geradas para outras funções de distribuição de probabilidade de acordo com as especificidades próprias de cada grandeza de entrada;
- a combinação das sequências geradas de acordo com o modelo matemático, originando as sequências associadas às grandezas de saída;
- a ordenação de cada sequência de saída;
- a obtenção dos percentis e o do nível de exactidão das simulações realizadas.

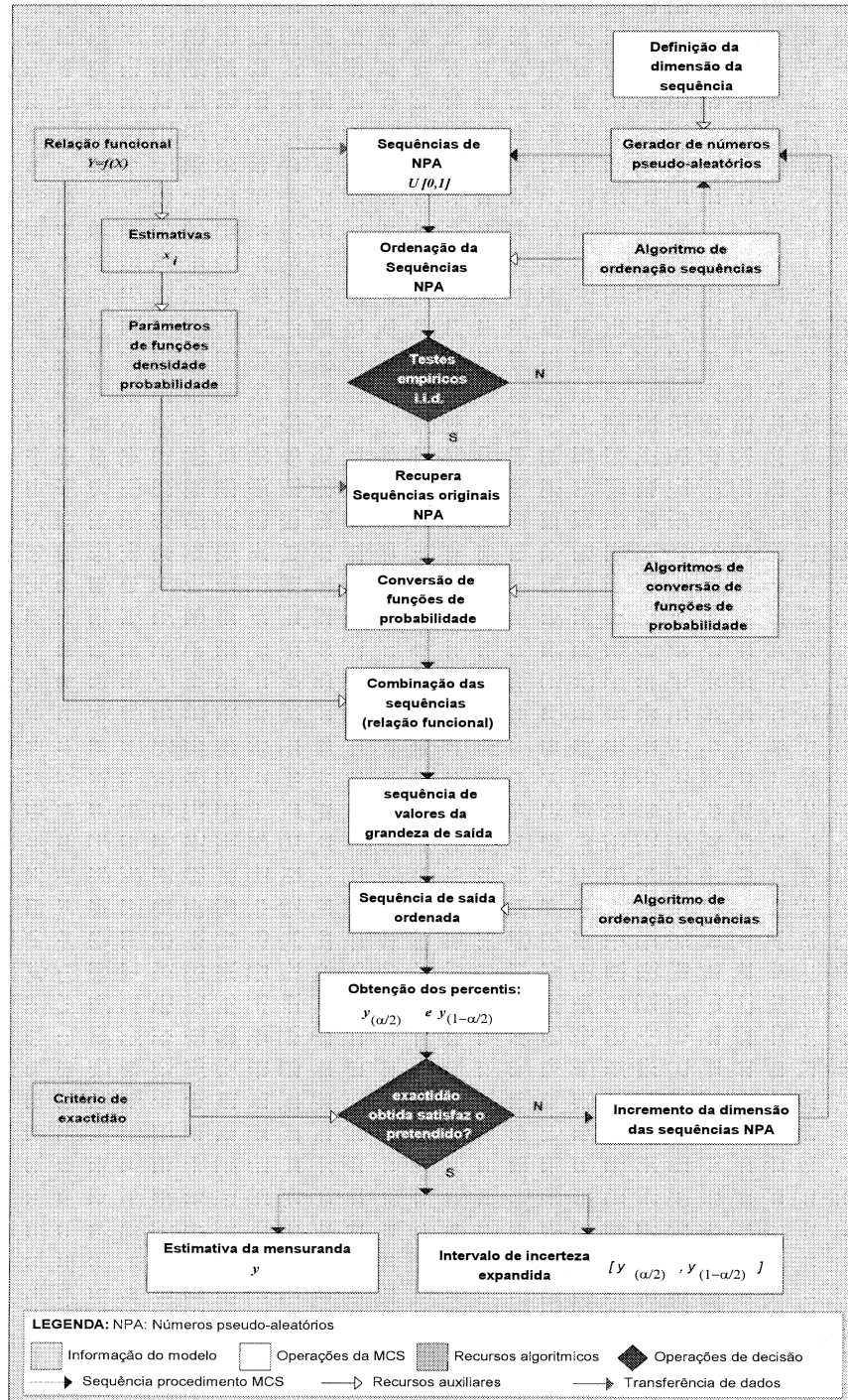


Figura 21: Diagrama ilustrativo do processo de simulação pelo MMC [14].

Em concreto, recorreu-se neste estudo ao gerador de números pseudo-aleatórios Mersenne Twister [28] para a obtenção de sequências numéricas com uma dimensão típica de  $10^6$ , tendo sido utilizados algoritmos de conversão e ordenação descritos em [29]. O nível de exactidão das simulações numéricas efectuadas foi obtido de acordo com o algoritmo descrito por Cox [30].

No processo de cálculo de incertezas destaca-se a grandeza de entrada factor de correcção global, pela sua presença em ambas as vertentes do ensaio SBI (libertação de calor e produção de fumo) e pela dimensão do conjunto de grandezas inerentes à sua determinação por via indirecta (*vide* figura 15). Deste conjunto mencionam-se as seguintes grandezas:

- taxa de libertação de calor, obtida mediante a realização experimental do ensaio preliminar de combustão de propano (*vide* secção 2.4.4);
- libertação total de calor, determinada a partir da realização experimental do ensaio preliminar de combustão de heptano (*vide* secção 2.4.5).

Em ambos os casos, foi necessário proceder à realização prévia de simulações numéricas visando a determinação da incerteza associada às duas grandezas referidas de forma a possibilitar, conseqüentemente, a avaliação da incerteza associada à grandeza factor de correcção global. Posteriormente procedeu-se à realização de simulações numéricas visando alcançar o objectivo inicial deste estudo: a determinação das incertezas de medição das grandezas de saída.

## 4.4 Resultados obtidos

### 4.4.1 Taxa de libertação de calor no ensaio de combustão de propano

A realização do processo de simulação numérica associado à determinação da incerteza da taxa de libertação de calor no ensaio de combustão de propano, recorreu a um conjunto de dados de entrada mencionados na tabela seguinte.

**Tabela 24:** Dados de entrada utilizados no processo de simulação numérica de *HRR*.

Grandeza	Estimativa	Grandeza	Estimativa
$hr$ (%)	44,6	$x_{CO_2}^{inicial}$	0,0003
$p_{atm}$ (kPa)	101,7	$s(x_{CO_2}^{inicial})$	$2,2 \times 10^{-6}$
$T_{inicial}$ (K)	298,9	$x_{CO_2}$	0,0019
$s(T_{inicial})$ (K)	0,003	$d$ (m)	0,315
$\rho_{O_2}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,308	$T$ (K)	320,8
$M_{O_2}$ (g·mol <sup>-1</sup> )	31,9988	$s(T)$ (K)	0,1
$E_{propano}$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	13,1	$T_{amb}$ (K)	298,7
$x_{O_2}^{inicial}$	0,2095	$\Delta p$ (Pa)	71,2
$s(x_{O_2}^{inicial})$	$6,6 \times 10^{-6}$	$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6
$x_{O_2}$	0,2066	$\beta$	1,5

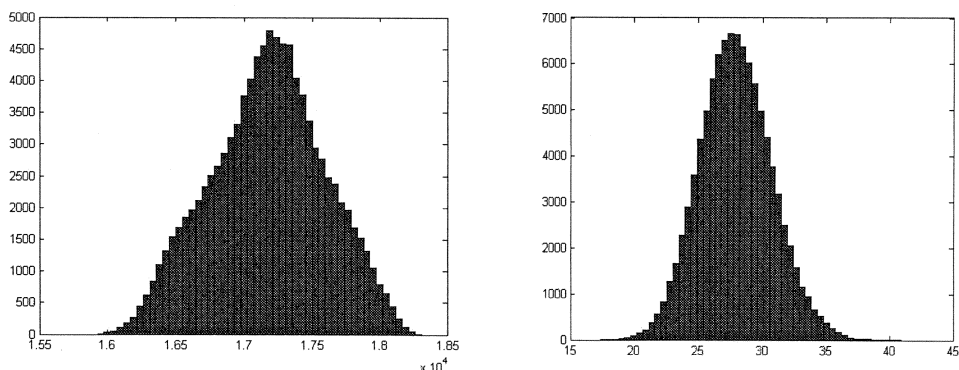
A tabela seguinte enumera os resultados obtidos para as grandezas presentes no ensaio preliminar de combustão de propano.

**Tabela 25:** Resultados obtidos pelo processo de simulação numérica de *HRR* no ensaio de combustão de propano.

Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
$hr$ (%)	44,6	$\pm 1,1$	$\pm 2,2$	0,05	0,03
$p_{atm}$ (kPa)	101,7	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	0,05	0,004
$T_{inicial}$ (K)	298,9	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	0,05	0,004
$\rho_{O_2}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,308	$\pm 0,003$	$\pm 0,006$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$M_{O_2}$ (g·mol <sup>-3</sup> )	31,9988	$\pm 0,0004$	$\pm 0,0008$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
$E_{propano}$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	13,1	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	0,05	0,01
$x_{O_2}^{inicial}$	0,2095	$\pm 4 \times 10^{-5}$	$\pm 7 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
$x_{O_2}$	0,2067	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
$x_{CO_2}^{inicial}$	0,0003	$\pm 5 \times 10^{-6}$	$\pm 1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-7}$
$x_{CO_2}$	0,0019	$\pm 2 \times 10^{-5}$	$\pm 3 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$
$d$ (m)	0,315	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$T$ (K)	320,8	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	0,05	0,01
$T_{amb}$ (K)	298,7	$\pm 0,7$	$\pm 1,8$	0,05	0,03
$\Delta p$ (Pa)	71,2	$\pm 2,1$	$\pm 4,1$	0,05	0,04
$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,05	0,03
$\beta$	1,5	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	0,05	0,002
$x_{H_2O}^0$	0,0146	$\pm 0,0004$	$\pm 0,0008$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
$\rho_{ar}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,180	$\pm 0,005$	$\pm 0,009$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$k_p$	1,15	$\pm 0,09$	$\pm 0,17$	0,005	0,004
$x_{O_2}^0$	0,2064	$\pm 0,0001$	$\pm 0,0002$	$5 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-6}$
$\alpha$	1,10	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	0,005	$4 \times 10^{-4}$
$\phi$	0,015	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$q_{v_c}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,53	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,001
$q_{v_s}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,52	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,001
$E_{propano}^i$ (MJ·m <sup>-3</sup> )	17,2	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	0,05	0,01
<b><i>HRR</i> (kW)</b>	<b>28</b>	<b><math>\pm 3</math></b>	<b><math>\pm 6</math></b>	<b>0,5</b>	<b>0,01</b>



No processo de simulação numérica efectuado, destacam-se as seqüências numéricas geradas para as variáveis aleatórias  $E'_{\text{propano}}$  e  $HRR$ , representadas nas figuras seguintes pelos respectivos histogramas.



Figuras 22 e 23: Histogramas das grandezas  $E'_{\text{propano}}$  e  $HRR$ .

Salienta-se que, o histograma relativo à grandeza  $E'_{\text{propano}}$  apresenta uma configuração de curva assimétrica distinta das curvas convencionais (como por exemplo no caso de uma distribuição Gaussiana) em virtude da presença e influência de componentes de incerteza cuja função densidade de probabilidade é assimétrica (vide 4.2.16).

#### 4.4.2 Libertação total de calor no ensaio de combustão de heptano

No que concerne à determinação da incerteza da libertação total de calor no ensaio de combustão de heptano, mediante um processo de simulação numérica próprio, recorreu-se a um conjunto de dados de entrada mencionados na tabela seguinte.

Tabela 26: Dados de entrada utilizados no processo de simulação numérica de  $THR$  no ensaio de combustão de heptano.

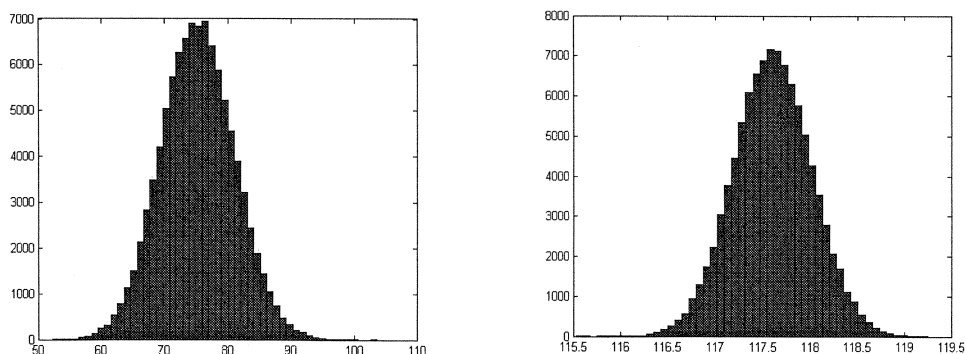
Grandeza	Estimativa	Grandeza	Estimativa
$hr$ (%)	60,1	$x_{\text{CO}_2}^{\text{inicial}}$	0,0003
$p_{\text{atm}}$ (kPa)	101,4	$s(x_{\text{CO}_2}^{\text{inicial}})$	$4,4 \times 10^{-6}$
$T_{\text{inicial}}$ (K)	288,3	$x_{\text{CO}_2}$	0,0053
$s(T_{\text{inicial}})$ (K)	0,003	$d$ (m)	0,315
$\rho_{\text{O}_2}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,308	$T$ (K)	337,9
$M_{\text{O}_2}$ (g·mol <sup>-1</sup> )	31,9988	$s(T)$ (K)	0,17
$E_{\text{heptano}}$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	12,7	$T_{\text{amb}}$ (K)	288,9
$x_{\text{O}_2}^{\text{inicial}}$	0,2095	$\Delta p$ (Pa)	65,9
$s(x_{\text{O}_2}^{\text{inicial}})$	$2,2 \times 10^{-6}$	$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6
$x_{\text{O}_2}$	0,2017	$\beta$	1,5

Na tabela seguinte, procede-se à apresentação dos resultados obtidos para as grandezas inerentes ao ensaio preliminar de combustão de heptano.

**Tabela 27:** Resultados obtidos pelo processo de simulação numérica de *THR* no ensaio de combustão de heptano.

Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
$hr$ (%)	60,1	$\pm 1,2$	$\pm 2,3$	0,05	0,03
$p_{atm}$ (kPa)	101,4	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	0,05	0,004
$T_{inicial}$ (K)	288,3	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	0,05	0,004
$\rho_{O_2}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,308	$\pm 0,003$	$\pm 0,006$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$M_{O_2}$ (g·mol <sup>-1</sup> )	31,9988	$\pm 0,0004$	$\pm 0,0008$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
$E_{heptano}$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	12,685	$\pm 0,004$	$\pm 0,007$	0,0005	0,0001
$x_{O_2}^{inicial}$	0,2095	$\pm 4 \times 10^{-5}$	$\pm 7 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
$x_{O_2}$	0,2018	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
$x_{CO_2}^{inicial}$	0,0003	$\pm 5 \times 10^{-6}$	$\pm 1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-7}$
$x_{CO_2}$	0,0053	$\pm 3 \times 10^{-5}$	$\pm 6 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
$d$ (m)	0,315	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$T$ (K)	337,9	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	0,05	0,02
$T_{amb}$ (K)	288,9	$\pm 0,7$	$\pm 1,8$	0,05	0,03
$\Delta p$ (Pa)	65,9	$\pm 2,1$	$\pm 4,1$	0,05	0,04
$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,05	0,03
$\beta$	1,5	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	0,05	0,002
$x_{H_2O}^0$	0,0102	$\pm 0,0002$	$\pm 0,0004$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$
$\rho_{ar}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,220	$\pm 0,005$	$\pm 0,009$	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
$k_p$	1,11	$\pm 0,09$	$\pm 0,17$	0,005	0,004
$x_{O_2}^0$	0,2074	$\pm 5 \times 10^{-5}$	$\pm 0,0001$	$5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$
$\alpha$	1,10	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	0,005	$5 \times 10^{-4}$
$\phi$	0,040	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$q_{v_c}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,55	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,002
$q_{v_c}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,54	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,002
$E'_{heptano}$ (MJ·m <sup>-3</sup> )	16,59	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,05	0,002
$HRR$ (kW)	75	$\pm 6$	$\pm 11$	0,5	0,2
<b><math>THR</math> (MJ)</b>	<b>117,6</b>	<b><math>\pm 0,4</math></b>	<b><math>\pm 0,8</math></b>	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>

Apresentam-se nas figuras seguintes, os histogramas das sequências numéricas representativas das variáveis aleatórias  $HRR$  e  $THR$ .



Figuras 24 e 25: Histogramas das grandezas  $HRR$  e  $THR$ .

#### 4.4.3 Factor de correcção global

Mediante os resultados obtidos nas secções 4.4.1 e 4.4.2 e atendendo ao conjunto de dados de entrada expressos na tabela 28, procedeu-se à realização do processo de simulação numérica associado à grandeza factor de correcção global cujos resultados são apresentados na tabela 29.

Tabela 28: Dados de entrada utilizados no processo de simulação numérica de  $k_t$ .

Grandeza	Estimativa	Grandeza	Estimativa
$v_c$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	9,6	$ \Delta h_c^1 _{\text{propano}}$ ( $kJ \cdot kg^{-1}$ )	46 334
$v_1$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	9,1	$ \Delta h_c^1 _{\text{heptano}}$ ( $kJ \cdot kg^{-1}$ )	44 558
$v_2$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	8,1	$HRR_2$ (kW)	29,2
$v_3$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	7,8	$s(HRR_2)$ (kW)	0,08
$v_4$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	7,4	$HRR_3$ (kW)	29,2
$v_5$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	2,4	$s(HRR_3)$ (kW)	0,08
$q_{m2}$ ( $kg \cdot s^{-1}$ )	$6,47 \times 10^{-4}$	$HRR_5$ (kW)	30,1
$q_{m3}$ ( $kg \cdot s^{-1}$ )	$6,47 \times 10^{-4}$	$s(HRR_5)$ (kW)	0,08
$q_{m5}$ ( $kg \cdot s^{-1}$ )	$6,47 \times 10^{-4}$	$THR$ (MJ)	117,6
$m_{\text{heptano}}$ (kg)	2,84		

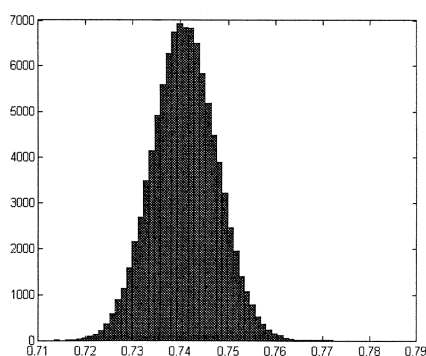
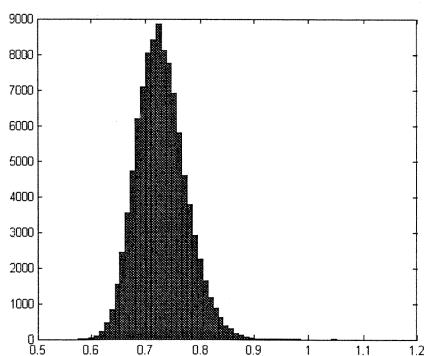
Salienta-se que, as estimativas das taxas de libertação de calor do ensaio de combustão de propano correspondem às médias aritméticas dos valores das taxas de libertação de calor registadas nos últimos dois minutos dos patamares realizados, pelo que as correspondentes incertezas de medição apresentam uma componente associada à incerteza da média aritmética (quantificada de acordo com o seu desvio-padrão experimental) e uma

componente relativa ao método de medição (quantificada de acordo com o desvio-padrão experimental dos valores de taxa de libertação de calor).

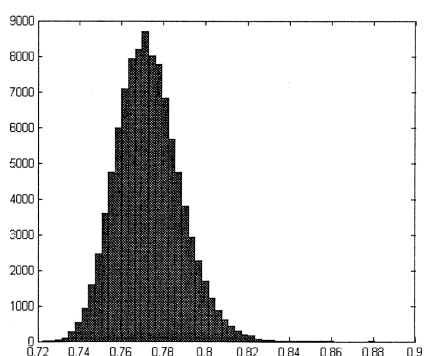
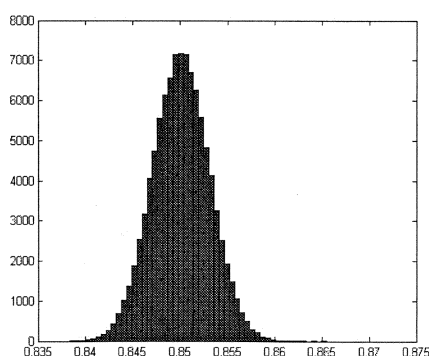
**Tabela 29:** Resultados obtidos pelo processo de simulação numérica de  $k_t$ .

Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6	± 0,7	± 1,4	0,05	0,02
$v_1$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,1	± 0,5	± 1,0	0,05	0,02
$v_2$ (m·s <sup>-1</sup> )	8,1	± 0,5	± 1,0	0,05	0,02
$v_3$ (m·s <sup>-1</sup> )	7,8	± 0,7	± 1,4	0,05	0,02
$v_4$ (m·s <sup>-1</sup> )	7,4	± 0,4	± 0,8	0,05	0,02
$v_5$ (m·s <sup>-1</sup> )	2,4	± 0,5	± 1,0	0,05	0,02
$q_m$ (kg·s <sup>-1</sup> )	$6,47 \times 10^{-4}$	± $2 \times 10^{-6}$	± $3 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-8}$
$ \Delta h_c^1 _{\text{propano}}$ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	46 334	± 15	± 30	0,5	0,5
$HRR_2$ (kW)	29,2	± 0,5	± 0,9	0,05	0,02
$HRR_3$ (kW)	29,2	± 0,5	± 0,9	0,05	0,01
$HRR_5$ (kW)	30,1	± 0,5	± 0,9	0,05	0,02
$m_{\text{heptano}}$ (kg)	2,84	± $2 \times 10^{-4}$	± $3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$
$ \Delta h_c^1 _{\text{heptano}}$ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	44 558	± 13	± 25	0,5	0,5
$THR$ (MJ)	117,6	± 0,4	± 0,8	0,05	0,02
$k_{t,v}$	0,73	± 0,05	± 0,09	0,005	0,002
$k_{t,\text{propano}}$	0,741	± 0,005	± 0,010	0,0005	0,0003
$k_{t,\text{heptano}}$	0,850	± 0,003	± 0,006	0,0005	0,0001
<b><math>k_t</math></b>	<b>0,77</b>	<b>± 0,02</b>	<b>± 0,03</b>	<b>0,005</b>	<b>0,001</b>

As figuras 26 a 29 ilustram a dispersão típica das sequências numéricas mais relevantes no contexto do processo de simulação numérica desenvolvido, nomeadamente, as sequências associadas aos factores de correcção resultantes dos ensaios preliminares de combustão (propano e heptano), do ensaio de determinação do perfil de velocidades do escoamento na conduta, e por último, ao factor de correcção global.



Figuras 26 e 27: Histogramas das grandezas  $k_{t,v}$  e  $k_{t,propano}$ .



Figuras 28 e 29: Histogramas das grandezas  $k_{t,heptano}$  e  $k_t$ .

#### 4.4.4 Taxa de libertação de calor total

A grandeza taxa de libertação de calor total possui uma relevância acrescida no conjunto das grandezas presentes no ensaio SBI ao exprimir, de uma forma global, as contribuições energéticas da combustão do material de construção ensaiado e do próprio queimador utilizado.

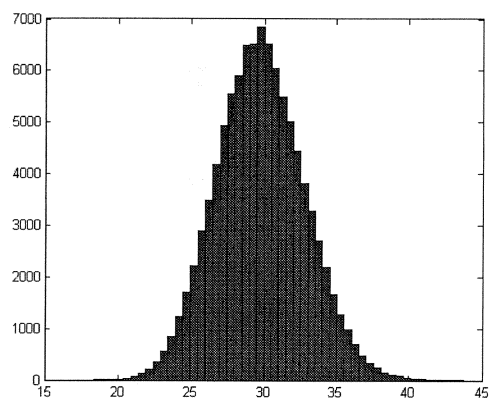
Deste modo, a existência de um processo de simulação numérica visando avaliar a incerteza associada à taxa de libertação de calor total possibilita: a determinação da incerteza associada à taxa de libertação de calor do queimador recorrendo, neste caso, a um conjunto de dados de entrada relativos à **fase inicial do ensaio** (taxa de libertação total de calor próxima dos 30 kW); e a determinação da incerteza associada à taxa de libertação de calor do material ensaiado, numa **fase avançada do ensaio** (taxa de libertação total de calor superior a 30 kW).

A tabela seguinte apresenta os dados de entrada relativos à fase inicial do ensaio SBI, os quais permitiram obter os resultados que se encontram na tabela 31.

**Tabela 30:** Dados de entrada relativos a uma taxa de libertação de calor total próxima dos 30 kW.

Grandeza	Estimativa	Grandeza	Estimativa
$hr$ (%)	60,1	$s(x_{CO_2}^{inicial})$	0,0003
$p_{atm}$ (kPa)	101,4	$x_{CO_2}$	0,0018
$T_{inicial}$ (K)	288,3	$d$ (m)	0,315
$s(T_{inicial})$ (K)	0,003	$T$ (K)	313,8
$\rho_{O_2}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,308	$s(T)$ (K)	0,12
$M_{O_2}$ (g·mol <sup>-1</sup> )	31,9988	$T_{amb}$ (K)	288,6
$E$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	13,1	$\Delta p$ (Pa)	68,6
$x_{O_2}^{inicial}$	0,2095	$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6
$s(x_{O_2}^{inicial})$	$2,2 \times 10^{-6}$	$\beta$	1,5
$x_{O_2}$	0,2066	$k_t$	0,77
$x_{CO_2}^{inicial}$	$4,4 \times 10^{-6}$		

A figura seguinte ilustra a dispersão da sequência numérica gerada para a grandeza taxa de libertação de calor total num nível próximo de 30 kW.



**Figura 30:** Histograma da grandeza  $HRR_{total}$ .

Adicionalmente, com recurso a diferentes conjuntos de dados de entrada, o processo de simulação numérico possibilitou o conhecimento da sua incerteza de medição relativamente a níveis de potência térmica total superiores ao apresentado anteriormente, conforme é possível constatar na tabela seguinte.

**Tabela 31:** Resultados obtidos pelo processo de simulação numérica de  $HRR_{total} = 30$  kW.

Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
$hr$ (%)	60,1	$\pm 1,1$	$\pm 2,2$	0,05	0,03
$p_{atm}$ (kPa)	101,4	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	0,05	0,004
$T_{inicial}$ (K)	288,3	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	0,05	0,003
$\rho_{O_2}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,308	$\pm 0,003$	$\pm 0,006$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$M_{O_2}$ (g·mol <sup>-1</sup> )	31,9988	$\pm 0,0004$	$\pm 0,0008$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
$E$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	13,1	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	0,05	0,01
$x_{O_2}^{inicial}$	0,2095	$\pm 4 \times 10^{-5}$	$\pm 7 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
$x_{O_2}$	0,2067	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
$x_{CO_2}^{inicial}$	0,0003	$\pm 5 \times 10^{-6}$	$\pm 1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-7}$
$x_{CO_2}$	0,0018	$\pm 2 \times 10^{-5}$	$\pm 3 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$
$d$ (m)	0,315	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$T$ (K)	313,8	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	0,05	0,02
$T_{amb}$ (K)	288,6	$\pm 0,7$	$\pm 1,8$	0,05	0,03
$\Delta p$ (Pa)	68,6	$\pm 2,1$	$\pm 4,1$	0,05	0,04
$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,05	0,03
$\beta$	1,5	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	0,05	0,002
$k_t$	0,77	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	0,005	$5 \times 10^{-4}$
$x_{H_2O}^0$	0,0146	$\pm 0,0004$	$\pm 0,0008$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
$\rho_{ar}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,180	$\pm 0,005$	$\pm 0,009$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$k_p$	1,15	$\pm 0,09$	$\pm 0,17$	0,005	0,004
$x_{O_2}^0$	0,2074	$\pm 5 \times 10^{-5}$	$\pm 0,0001$	$5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$
$\alpha$	1,10	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	0,005	$4 \times 10^{-4}$
$\phi$	0,015	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-5}$
$q_{v_c}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,55	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,001
$q_{v_s}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,55	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,001
$E'$ (MJ·m <sup>-3</sup> )	17,1	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	0,05	0,01
<b><math>HRR_{total}</math> (kW)</b>	<b>30</b>	<b><math>\pm 3</math></b>	<b><math>\pm 6</math></b>	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>

**Tabela 32:** Resultados obtidos para níveis de potência térmica superiores a 30 kW.

Estimativa (kW)	Incerteza padrão (kW)	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %) (kW)	Nível de exactidão requerida (kW)	Nível de exactidão da simulação (kW)
37	± 4	9	± 7	0,5	0,1
40	± 4	9	± 7	0,5	0,1
44	± 4	9	± 8	0,5	0,2
45	± 4	9	± 8	0,5	0,2
85	± 7	8	± 14	0,5	0,3
108	± 9	8	± 17	0,5	0,3
246	± 20	8	± 39	5	0,7

#### 4.4.5 Taxa de produção de fumo total

De forma análoga ao mencionado na secção anterior, mas numa vertente de ensaio distinta, a taxa de produção de fumo total possui também uma relevância acrescida no conjunto das grandezas presentes no ensaio SBI, dado quantificar as contribuições do material de construção ensaiado e do próprio queimador utilizado, no que concerne à produção de fumo.

Justifica-se, portanto, a existência de um processo de simulação numérica visando avaliar a incerteza associada à taxa de produção de fumo total em duas fases distintas: a **fase inicial do ensaio**, possibilitando a determinação da incerteza associada à taxa de produção de fumo do queimador recorrendo a um determinado conjunto de dados de entrada relativos a uma taxa de produção de fumo próxima dos  $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (*vide* tabela 33); e a **fase avançada do ensaio**, permitindo a determinação da incerteza associada à taxa de produção de fumo do material ensaiado, com recurso a dados de entrada relativos a uma taxa de produção de fumo superior a  $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Tabela 33:** Dados de entrada relativos a uma taxa de produção de fumo total próxima dos  $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Grandeza	Estimativa	Grandeza	Estimativa
$hr$ (%)	60,1	$s(T)$ (K)	0,12
$p_{\text{atm}}$ (kPa)	101,4	$T_{\text{amb}}$ (K)	288,6
$d$ (m)	0,315	$\Delta p$ (Pa)	68,6
$L$ (m)	0,315	$v_c$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	9,6
$\tau$	0,98	$k_t$	0,77
$T$ (K)	313,8		

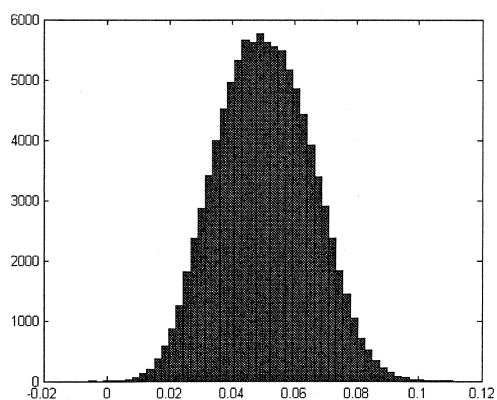


Mediante os dados de entrada apresentados na tabela anterior, o processo de simulação numérica desenvolvido permitiu obter os resultados expressos na tabela seguinte.

**Tabela 34:** Resultados obtidos pelo processo de simulação numérica de  $SPR_{total} = 0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
$hr$ (%)	60,1	$\pm 1,1$	$\pm 2,2$	0,05	0,03
$p_{atm}$ (kPa)	101,4	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	0,05	0,005
$d$ (m)	0,315	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$L$ (m)	0,315	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-5}$
$\tau$	0,974	$\pm 0,005$	$\pm 0,01$	0,0005	0,0002
$T$ (K)	313,8	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	0,05	0,02
$T_{amb}$ (K)	288,6	$\pm 0,9$	$\pm 1,8$	0,05	0,03
$\Delta p$ (Pa)	68,6	$\pm 2,1$	$\pm 4,1$	0,05	0,04
$v_c$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	9,6	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,05	0,03
$k_t$	0,77	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	0,005	$5 \times 10^{-4}$
$\rho_{ar}$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1,220	$\pm 0,005$	$\pm 0,009$	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
$k_p$	1,11	$\pm 0,09$	$\pm 0,17$	0,005	0,004
$q_{v_c}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	0,55	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,002
<b><math>SPR_{total}</math> (<math>\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}</math>)</b>	<b>0,05</b>	<b><math>\pm 0,02</math></b>	<b><math>\pm 0,03</math></b>	<b>0,005</b>	<b>0,0005</b>

A figura seguinte ilustra a dispersão da sequência numérica gerada para a grandeza taxa de produção de fumo total num nível próximo de  $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .



**Figura 31:** Histograma da grandeza  $SPR_{total}$ .

Adicionalmente, com recurso a diferentes conjuntos de dados de entrada, o processo de simulação numérico desenvolvido anteriormente para a grandeza citada, possibilitou o

conhecimento da sua incerteza de medição relativamente a níveis de produção de fumo total superiores ao apresentado anteriormente, conforme é possível constatar na tabela seguinte.

**Tabela 35:** Resultados obtidos para taxas de produção de fumo totais superiores a  $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Estimativa ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Incerteza padrão ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %) ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Nível de exactidão requerida ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Nível de exactidão da simulação ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
0,15	$\pm 0,02$	12	$\pm 0,04$	0,005	$6 \times 10^{-4}$
0,17	$\pm 0,02$	11	$\pm 0,04$	0,005	$7 \times 10^{-4}$
0,19	$\pm 0,02$	11	$\pm 0,04$	0,005	$7 \times 10^{-4}$
0,19	$\pm 0,02$	11	$\pm 0,04$	0,005	$8 \times 10^{-4}$
0,22	$\pm 0,02$	10	$\pm 0,04$	0,005	$8 \times 10^{-4}$
0,25	$\pm 0,03$	10	$\pm 0,05$	0,005	$8 \times 10^{-4}$
6,8	$\pm 0,6$	9	$\pm 1,2$	0,05	0,02

#### 4.4.6 Taxa de desenvolvimento de fogo

O processo de simulação numérica desenvolvido no âmbito da grandeza de saída FIGRA, teve por base os dados de entrada apresentados na tabela seguinte.

**Tabela 36:** Dados de entrada relativos ao processo de simulação numérica de FIGRA.

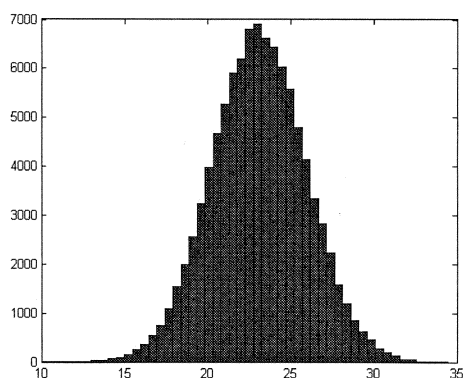
Grandeza	Estimativa	Grandeza	Estimativa
$hr$ (%)	67,5	$d$ (m)	0,315
$p_{\text{atm}}$ (kPa)	102,7	$T$ (K)	315,4
$T_{\text{inicial}}$ (K)	286,8	$s(T)$ (K)	0,17
$s(T_{\text{inicial}})$ (K)	0,001	$T_{\text{amb}}$ (K)	287,4
$\rho_{\text{O}_2}$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1,308	$\Delta p$ (Pa)	78,8
$M_{\text{O}_2}$ ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	31,9988	$v_c$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	9,6
$E$ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	13,1	$\beta$	1,5
$x_{\text{O}_2}^{\text{inicial}}$	0,2095	$k_t$	0,77
$s(x_{\text{O}_2}^{\text{inicial}})$	$2,2 \times 10^{-6}$	$HRR_{\text{queimador}}$ (kW)	30,2
$x_{\text{O}_2}$	0,2058	$s(HRR_{\text{queimador}})$ (kW)	0,15
$x_{\text{CO}_2}^{\text{inicial}}$	0,0003	$HRR_{\text{médio}}$ (kW)	9,0
$s(x_{\text{CO}_2}^{\text{inicial}})$	$4,4 \times 10^{-6}$	$s(HRR_{\text{médio}})$ (kW)	0,36
$x_{\text{CO}_2}$	0,0025	$t$ (s)	690,0

Do conjunto de grandezas intermédias envolvidas no referido processo de simulação numérica destacam-se, pela sua relevância, as seguintes grandezas:

- taxa de libertação de calor do queimador;
- taxa de libertação de calor média.

Ambas as grandezas apresentam como melhores estimativas, as médias aritméticas obtidas com base nas respectivas amostras, o que se traduz na existência de duas componentes de incerteza: a incerteza da média, quantificada pelo desvio-padrão experimental da média (no qual se assume uma incerteza-padrão associada à estimativa máxima existente na amostra); e a incerteza do método, quantificada pelo desvio-padrão experimental da amostra de valores.

A tabela 37 contém os resultados obtidos pela simulação numérica sendo possível observar na figura seguinte, o histograma relativo à sequência numérica de *FIGRA*.



**Figura 32:** Histograma da grandeza *FIGRA*.

O recurso a diferentes conjuntos de dados de entrada possibilitou o conhecimento da sua incerteza de medição relativamente a níveis de desenvolvimento de fogo superiores ao apresentado anteriormente, conforme é possível observar na tabela 38.

**Tabela 37:** Resultados obtidos pelo processo de simulação numérica de *FIGRA*.

Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
$hr$ (%)	67,5	$\pm 1,1$	$\pm 2,2$	0,05	0,03
$p_{atm}$ (kPa)	102,7	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	0,05	0,005
$T_{inicial}$ (K)	286,8	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	0,05	0,003
$\rho_{O_2}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,308	$\pm 0,003$	$\pm 0,006$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$M_{O_2}$ (g·mol <sup>-1</sup> )	31,9988	$\pm 0,0004$	$\pm 0,0008$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
$E$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	13,1	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	0,05	0,01
$x_{O_2}^{inicial}$	0,2095	$\pm 4 \times 10^{-5}$	$\pm 7 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
$x_{O_2}$	0,2059	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
$x_{CO_2}^{inicial}$	0,0003	$\pm 5 \times 10^{-6}$	$\pm 1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-7}$
$x_{CO_2}$	0,0025	$\pm 2 \times 10^{-5}$	$\pm 4 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-7}$
$d$ (m)	0,315	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$T$ (K)	315,4	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	0,05	0,02
$T_{amb}$ (K)	287,4	$\pm 0,7$	$\pm 1,8$	0,05	0,03
$\Delta p$ (Pa)	78,8	$\pm 2,1$	$\pm 4,1$	0,05	0,04
$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,05	0,02
$\beta$	1,5	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	0,05	0,002
$k_t$	0,77	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	0,005	$5 \times 10^{-4}$
$t$ (s)	690,0	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,5	0,01
$x_{H_2O}^0$	0,0103	$\pm 0,0002$	$\pm 0,0004$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$
$\rho_{ar}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,240	$\pm 0,005$	$\pm 0,009$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$k_p$	1,18	$\pm 0,09$	$\pm 0,18$	0,005	0,004
$x_{O_2}^0$	0,2074	$\pm 5 \times 10^{-5}$	$\pm 0,0001$	$5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$
$\alpha$	1,10	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	0,005	$4 \times 10^{-4}$
$\phi$	0,019	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-5}$
$q_{v_c}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,55	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,002
$q_{v_s}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,55	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,002
$E'$ (MJ·m <sup>-3</sup> )	17,1	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	0,05	0,02
$HRR_{total}$ (kW)	37,4	$\pm 3,5$	$\pm 7,0$	0,5	0,1
$HRR_{queimador}$ (kW)	30,2	$\pm 0,7$	$\pm 1,3$	0,5	0,02
$HRR$ (kW)	7,1	$\pm 3,5$	$\pm 7,0$	0,5	0,1
$HRR_{médio}$ (kW)	9,0	$\pm 1,1$	$\pm 2,2$	0,5	0,04
<b>FIGRA (W·s<sup>-1</sup>)</b>	<b>23</b>	<b><math>\pm 3</math></b>	<b><math>\pm 6</math></b>	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>

**Tabela 38:** Resultados obtidos para taxas de desenvolvimento de fogo superiores a 23 W·s<sup>-1</sup>.

Estimativa (W·s <sup>-1</sup> )	Incerteza padrão (W·s <sup>-1</sup> )	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %) (W·s <sup>-1</sup> )	Nível de exactidão requerida (W·s <sup>-1</sup> )	Nível de exactidão da simulação (W·s <sup>-1</sup> )
113	± 14	12	± 28	0,5	0,5
130	± 12	10	± 24	0,5	0,4
143	± 13	9	± 26	0,5	0,5
308	± 14	5	± 28	0,5	0,5
368	± 23	6	± 46	0,5	0,5
394	± 17	4	± 34	0,5	0,5

#### 4.4.7 Libertação total de calor

No que concerne à grandeza de saída  $THR_{600s}$ , considerou-se a utilização de um conjunto de dados de entrada (*vide* tabela 39) associado ao valor de taxa de libertação de calor máximo utilizado no somatório de determinação desta grandeza, visando a majoração da sua componente de incerteza.

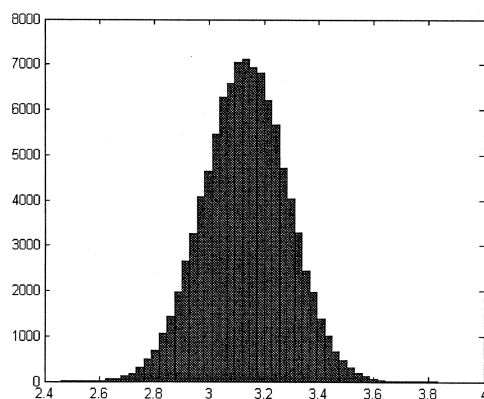
**Tabela 39:** Dados de entrada relativos ao processo de simulação numérica de  $THR_{600s}$ .

Grandeza	Estimativa	Grandeza	Estimativa
$hr$ (%)	67,5	$x_{CO_2}$	0,0027
$P_{atm}$ (kPa)	102,7	$d$ (m)	0,315
$T_{inicial}$ (K)	286,8	$T$ (K)	317,6
$s(T_{inicial})$ (K)	0,001	$s(T)$ (K)	0,17
$\rho_{O_2}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,308	$T_{amb}$ (K)	287,7
$M_{O_2}$ (g·mol <sup>-1</sup> )	31,9988	$\Delta p$ (Pa)	77,5
$E$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	13,1	$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6
$x_{O_2}^{inicial}$	0,2095	$\beta$	1,5
$s(x_{O_2}^{inicial})$	$2,2 \times 10^{-6}$	$k_t$	0,77
$x_{O_2}$	0,2056	$HRR_{queimador}$ (kW)	30,2
$x_{CO_2}^{inicial}$	0,0003	$s(HRR_{queimador})$ (kW)	0,15
$s(x_{CO_2}^{inicial})$	$4,4 \times 10^{-6}$		

Apresentam-se os resultados na tabela seguinte, efectuando-se na figura 33, a representação da dispersão da sequência numérica de  $THR_{600s}$ .

**Tabela 40:** Resultados obtidos pelo processo de simulação numérica de  $THR_{600s}$ .

Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
$hr$ (%)	67,5	$\pm 1,1$	$\pm 2,2$	0,05	0,03
$p_{atm}$ (kPa)	102,7	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	0,05	0,004
$T_{inicial}$ (K)	286,8	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	0,05	0,003
$\rho_{O_2}$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	1,308	$\pm 0,003$	$\pm 0,006$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$M_{O_2}$ (g·mol)	31,9988	$\pm 0,0004$	$\pm 0,0008$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
$E$ ( $MJ \cdot kg^{-1}$ )	13,1	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	0,05	0,01
$x_{O_2}^{inicial}$	0,2095	$\pm 4 \times 10^{-5}$	$\pm 7 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
$x_{O_2}$	0,2057	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
$x_{CO_2}^{inicial}$	0,0003	$\pm 5 \times 10^{-6}$	$\pm 1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-7}$
$x_{CO_2}$	0,0025	$\pm 2 \times 10^{-5}$	$\pm 4 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-7}$
$d$ (m)	0,315	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$T$ (K)	315,4	$\pm 0,5$	$\pm 0,9$	0,05	0,02
$T_{amb}$ (K)	287,7	$\pm 0,7$	$\pm 1,8$	0,05	0,03
$\Delta p$ (Pa)	78,8	$\pm 2,1$	$\pm 4,1$	0,05	0,04
$v_c$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	9,6	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,05	0,02
$\beta$	1,5	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	0,05	0,002
$k_t$	0,77	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	0,005	$5 \times 10^{-4}$
$x_{H_2O}^0$	0,0103	$\pm 0,0002$	$\pm 0,0004$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$
$\rho_{ar}$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	1,238	$\pm 0,005$	$\pm 0,009$	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
$k_p$	1,18	$\pm 0,09$	$\pm 0,18$	0,005	0,004
$x_{O_2}^0$	0,2074	$\pm 5 \times 10^{-5}$	$\pm 0,0001$	$5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$
$\alpha$	1,10	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	0,005	$4 \times 10^{-4}$
$\phi$	0,019	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-5}$
$q_{v_e}$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	0,55	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,001
$q_{v_e}$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	0,55	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,001
$E'$ ( $MJ \cdot m^{-3}$ )	17,1	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	0,05	0,02
$HRR_{total}$ (kW)	39,1	$\pm 3,5$	$\pm 7,0$	0,5	0,1
$HRR_{queimador}$ (kW)	30,2	$\pm 0,7$	$\pm 1,3$	0,5	0,02
$HRR$ (kW)	8,9	$\pm 3,5$	$\pm 7,0$	0,5	0,1
<b><math>THR_{600s}</math> (MJ)</b>	<b>3,1</b>	<b><math>\pm 0,2</math></b>	<b><math>\pm 0,3</math></b>	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>



**Figura 33:** Histograma da grandeza  $THR_{600s}$ .

Adicionalmente, com recurso a diferentes conjuntos de dados de entrada, foi possível efectuar simulações numéricas complementares para níveis de libertação total de calor superiores ao mencionado anteriormente, conforme é possível observar na tabela seguinte.

**Tabela 41:** Resultados obtidos para uma libertação total de calor superior a 3,1 MJ.

Estimativa (MJ)	Incerteza padrão (MJ)	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %) (MJ)	Nível de exactidão requerida (MJ)	Nível de exactidão da simulação (MJ)
6,7	± 0,2	3	± 0,4	0,05	0,01
8,9	± 0,2	2	± 0,4	0,05	0,01
9,1	± 0,2	2	± 0,4	0,05	0,01
29,3	± 0,3	1	± 0,7	0,05	0,01
30,3	± 0,8	3	± 1,6	0,05	0,03
33,4	± 0,4	1	± 0,8	0,05	0,02

#### 4.4.8 Taxa de desenvolvimento de fumo

No processo de simulação numérica desenvolvido no âmbito da avaliação de incertezas da grandeza de saída *SMOGRA*, destacam-se as seguintes grandezas:

- taxa de produção de fumo do queimador;
- taxa de produção de fumo média.

No ensaio SBI, ambas as grandezas citadas apresentam como melhores estimativas as médias aritméticas obtidas com base nas respectivas amostras, o que traduz-se na existência de duas componentes de incerteza: a incerteza da média, quantificada pelo desvio-padrão experimental da média (no qual se assume uma incerteza-padrão associada à estimativa

máxima existente na amostra), e a incerteza do método, quantificada pelo desvio-padrão experimental da amostra.

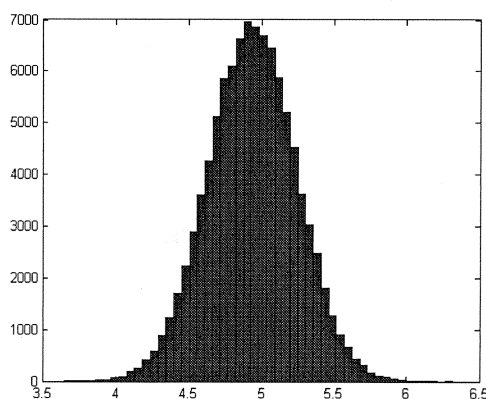
A tabela seguinte ilustra os dados de entrada utilizados no âmbito do processo de simulação numérica desenvolvido para esta grandeza de saída.

**Tabela 42:** Dados de entrada relativos ao processo de simulação numérica de *SMOGRA*.

Grandeza	Estimativa	Grandeza	Estimativa
$hr$ (%)	44,6	$T_{amb}$ (K)	298,4
$p_{atm}$ (kPa)	101,7	$\Delta p$ (Pa)	75,7
$d$ (m)	0,315	$v_c$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	9,6
$L$ (m)	0,315	$k_t$	0,77
$\tau$	0,910	$t$ (s)	504,0
$T$ (K)	331,5	$SPR_{queimador}$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	0,033
$s(T)$ (K)	0,16	$s(SP_{queimador})$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	0,0012

Na tabela 43 procede-se à apresentação dos resultados obtidos para as diversas grandezas envolvidas nas diferentes relações funcionais estabelecidas ao nível da grandeza de saída *SMOGRA*.

A figura seguinte ilustra a sequência numérica representativa da dispersão de valores atribuídos à grandeza *SMOGRA*.



**Figura 34:** Histograma da grandeza *SMOGRA*.

Neste contexto, efectuaram-se simulações complementares visando obter incertezas de medição da grandeza *SMOGRA* para níveis diferentes do apresentado anteriormente, e cujos resultados são apresentados na tabela 44.



**Tabela 43:** Resultados obtidos pelo processo de simulação numérica de *SMOGRA*.

Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
$hr$ (%)	44,6	$\pm 1,1$	$\pm 2,2$	0,05	0,03
$p_{atm}$ (kPa)	101,7	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	0,05	0,004
$d$ (m)	0,315	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$L$ (m)	0,315	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$5 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-5}$
$\tau$	0,905	$\pm 0,005$	$\pm 0,01$	0,0005	0,0002
$T$ (K)	331,5	$\pm 0,4$	$\pm 0,9$	0,05	0,02
$T_{amb}$ (K)	298,4	$\pm 0,9$	$\pm 1,8$	0,05	0,03
$\Delta p$ (Pa)	75,7	$\pm 2,1$	$\pm 4,1$	0,05	0,03
$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,05	0,02
$k_t$	0,77	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	0,005	$5 \times 10^{-4}$
$t$ (s)	504,0	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,5	0,01
$\rho_{ar}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,181	$\pm 0,005$	$\pm 0,009$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$k_p$	1,19	$\pm 0,09$	$\pm 0,18$	0,005	0,004
$q_{v_c}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,55	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	0,005	0,002
$SPR_{total}$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,19	$\pm 0,02$	$\pm 0,04$	0,005	0,0007
$SPR_{queimador}$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,033	$\pm 0,004$	$\pm 0,007$	0,0005	0,0001
$SPR$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,16	$\pm 0,02$	$\pm 0,04$	0,005	0,0007
$SPR_{médio}$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,101	$\pm 0,006$	$\pm 0,012$	0,0005	0,0002
<b><i>SMOGRA</i> (m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>)</b>	<b>4,9</b>	<b><math>\pm 0,3</math></b>	<b><math>\pm 0,6</math></b>	<b>0,5</b>	<b>0,01</b>

**Tabela 44:** Resultados obtidos para diferentes taxas de desenvolvimento de fumo.

Estimativa (m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )	Incerteza padrão (m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %) (m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )	Nível de exactidão requerida (m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )	Nível de exactidão da simulação (m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )
1,0	$\pm 0,05$	5	$\pm 0,1$	0,5	0,002
1,1	$\pm 0,05$	5	$\pm 0,1$	0,5	0,002
1,2	$\pm 0,05$	5	$\pm 0,1$	0,5	0,002
3,0	$\pm 0,2$	4	$\pm 0,3$	0,5	0,01
3,5	$\pm 0,2$	5	$\pm 0,4$	0,5	0,01
104	$\pm 4$	4	$\pm 8$	0,5	0,2

#### 4.4.9 Libertação total de fumo

Nesta secção apresentam-se os resultados do processo de simulação desenvolvido no âmbito da grandeza  $TSP_{600s}$ , conforme é possível observar na tabela 46. Para tal, recorreu-se ao conjunto de dados de entrada presentes na tabela seguinte.

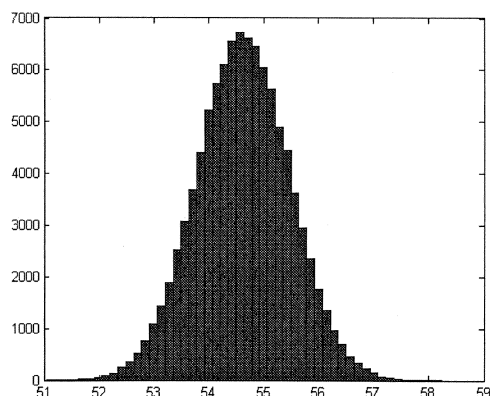
**Tabela 45:** Dados de entrada relativos ao processo de simulação numérica de  $TSP_{600s}$ .

Grandeza	Estimativa	Grandeza	Estimativa
$hr$ (%)	44,6	$T_{amb}$ (K)	298,5
$p_{atm}$ (kPa)	101,7	$\Delta p$ (Pa)	73,9
$d$ (m)	0,315	$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6
$L$ (m)	0,315	$k_t$	0,77
$\tau$	0,910	$SPR_{queimador}$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,033
$T$ (K)	331,2	$s(SP_{queimador})$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,0012
$s(T)$ (K)	0,09		

**Tabela 46:** Resultados obtidos pelo processo de simulação numérica de  $TSP_{600s}$ .

Grandeza	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza expandida (95 %)	Nível de exactidão requerida	Nível de exactidão da simulação
$hr$ (%)	44,6	± 1,1	± 2,2	0,05	0,03
$p_{atm}$ (kPa)	101,7	± 0,2	± 0,3	0,05	0,004
$d$ (m)	0,315	± 0,001	± 0,002	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$
$L$ (m)	0,315	± 0,001	± 0,002	$5 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-5}$
$\tau$	0,905	± 0,005	± 0,01	0,0005	0,0002
$T$ (K)	331,2	± 0,4	± 0,8	0,05	0,01
$T_{amb}$ (K)	298,5	± 0,8	± 1,8	0,05	0,03
$\Delta p$ (Pa)	73,9	± 2,1	± 4,1	0,05	0,04
$v_c$ (m·s <sup>-1</sup> )	9,6	± 0,7	± 1,4	0,05	0,02
$k_t$	0,77	± 0,02	± 0,03	0,005	$5 \times 10^{-4}$
$\rho_{ar}$ (kg·m <sup>-3</sup> )	1,181	± 0,005	± 0,009	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
$k_p$	1,17	± 0,09	± 0,18	0,005	0,003
$q_{v_c}$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,55	± 0,04	± 0,08	0,005	0,001
$SPR_{total}$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,19	± 0,02	± 0,04	0,005	0,0008
$SPR_{queimador}$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,033	± 0,004	± 0,007	0,0005	0,0001
$SPR$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0,16	± 0,02	± 0,04	0,005	0,0008
<b><math>TSP_{600s}</math> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>54,6</b>	<b>± 0,9</b>	<b>± 1,7</b>	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>

A figura 35 constitui uma representação dispersão associada à sequência numérica da grandeza  $TSP_{600s}$  produzida pela simulação numérica realizada.



**Figura 35:** Histograma da grandeza  $TSP_{600s}$ .

Adicionalmente, com recurso a outros conjuntos de dados de entrada, foi possível determinar a incerteza de medição da grandeza  $TSP_{600s}$  para outros níveis de produção de fumo, conforme é possível observar na tabela seguinte.

**Tabela 47:** Resultados obtidos para diferentes níveis de produção total de fumo.

Estimativa (m <sup>2</sup> )	Incerteza padrão (m <sup>2</sup> )	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (m <sup>2</sup> )	Nível de exactidão requerida (m <sup>2</sup> )	Nível de exactidão da simulação (m <sup>2</sup> )
11,4	± 0,7	7	± 1,5	0,05	0,03
14,3	± 0,7	5	± 1,4	0,05	0,03
37,2	± 0,8	2	± 1,6	0,05	0,03
44,5	± 0,9	2	± 1,7	0,05	0,03
48,5	± 0,8	2	± 1,7	0,05	0,03
1228,5	± 26	2	± 52	5	1



## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu realizar a caracterização metrológica das diversas grandezas incorporadas no ensaio SBI e com base nesta, parametrizar as distribuições de probabilidade aplicáveis na avaliação de incertezas de medição de um conjunto de mensurandas que, globalmente, permitem efectuar uma classificação dos materiais de construção relativamente ao seu comportamento no contexto da reacção ao fogo.

Na vertente do ensaio SBI associada à libertação de calor, procedeu-se à avaliação das incertezas de medição das grandezas *FIGRA* e *THR<sub>600s</sub>*, para diferentes classes, apresentando-se uma síntese dos resultados obtidos, usando o método de Monte Carlo, nas tabelas 48 e 49.

**Tabela 48:** Incertezas de medição da grandeza *FIGRA*.

<i>FIGRA</i> (W·s <sup>-1</sup> )				
Classe	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %)
A2 ou B	23	± 3	12	± 6
A2 ou B	113	± 14	12	± 28
C	130	± 12	10	± 24
C	143	± 13	9	± 26
D	308	± 14	5	± 28
D	368	± 23	6	± 46
D	394	± 17	4	± 34

**Tabela 49:** Incertezas de medição da grandeza *THR<sub>600s</sub>*.

<i>THR<sub>600s</sub></i> (MJ)				
Classe	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %)
A2 ou B	3,1	± 0,2	5	± 0,3
A2 ou B	6,7	± 0,2	3	± 0,4
C	8,9	± 0,2	2	± 0,4
C	9,1	± 0,2	2	± 0,4
D	29,3	± 0,3	1	± 0,7
D	30,3	± 0,8	3	± 1,6
D	33,4	± 0,4	1	± 0,8

Na vertente do ensaio SBI associada à produção de fumo, procedeu-se à avaliação das incertezas de medição das grandezas *SMOGRA* e *TSP<sub>600s</sub>*, para diferentes classes, apresentando-se uma síntese dos resultados obtidos, usando o método de Monte Carlo, nas tabelas 50 e 51.

**Tabela 50:** Incertezas de medição da grandeza *SMOGRA*.

<i>SMOGRA</i> (m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )				
Classe	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %)
s1	1,0	± 0,05	5	± 0,1
s1	1,1	± 0,05	5	± 0,1
s1	1,2	± 0,05	5	± 0,1
s1	3,0	± 0,2	4	± 0,3
s1	3,5	± 0,2	5	± 0,4
s1	4,9	± 0,3	6	± 0,6
s2	104	± 4	4	± 8

**Tabela 51:** Incertezas de medição da grandeza *TSP<sub>600s</sub>*.

<i>TSP<sub>600s</sub></i> (m <sup>2</sup> )				
Classe	Estimativa	Incerteza padrão	Incerteza padrão relativa (%)	Incerteza expandida (95 %)
s1	11,4	± 0,7	7	± 1,5
s1	14,3	± 0,7	5	± 1,4
s1	37,2	± 0,8	2	± 1,6
s1	44,5	± 0,9	2	± 1,7
s1	48,5	± 0,8	2	± 1,7
s2	54,6	± 0,9	2	± 1,7
s3	1228,5	± 26	2	± 52

Refira-se que, em qualquer dos casos, a aplicação do método de Monte Carlo na avaliação das incertezas de medição se revelou adequada, permitindo obter resultados dentro dos requisitos de exactidão previamente estabelecidos, tendo em consideração que as estimativas das grandezas de saída e as respectivas incertezas obtidas no ensaio SBI são determinantes na classificação do material ensaiado.

Finalmente, considera-se que o presente estudo evidencia a adequação do sistema de medição que suporta as medições integradas no ensaio SBI realizado no LERF-LNEC e que, no seu conteúdo, se encontra informação para o desenvolvimento de estudos posteriores de

interesse no âmbito da qualidade das medições, nomeadamente: a identificação das grandezas cujas componentes de incerteza são predominantes; a análise de resultados de comparação interlaboratorial; e a concretização de modificações da metodologia e da instrumentação visando incrementar o rigor das medições efectuadas no ensaio SBI.





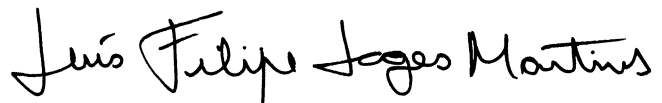
**VISTOS**

O Director do CIC



Francisco Carvalho  
Investigador Coordenador

**AUTORIA**



Luís Filipe Lages Martins  
Eng.º Mecânico  
Bolsheiro de Iniciação à Investigação Científica



Álvaro Silva Ribeiro  
Lic.º Física Tecnológica, Doutor  
Investigador Auxiliar, Chefe do NQM



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NP EN ISO/IEC 17025:2005 – Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração, 2ª edição – Lisboa (Portugal), Instituto Português da Qualidade (IPQ), Dezembro de 2005.
- [2] NP EN 13501-1:2004 – Classificação do desempenho face ao fogo de produtos e de elementos de construção – Parte 1: Classificação utilizando resultados de ensaios de reacção ao fogo – Lisboa (Portugal), Instituto Português da Qualidade (IPQ), Dezembro de 2004.
- [3] EN 13823:2002 – Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item – Bruxelas (Bélgica), Comité Européen de Normalisation (CEN), Fevereiro de 2002.
- [4] Steckler, K. – *Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements*, In *A Century of Excellence in Measurements Standards and Technology – A Chronicle of Selected NBS/NIST Publications 1901-2000*, NIST Special Publication 958, Washington DC (EUA), Janeiro de 2001.
- [5] Mulholland, G. – How Well Are We Measuring Smoke?, In *Fire and Materials*, **6**, 2, 65-67, 1982.
- [6] Putorti Jr, A. – *Design Parameters for Stack-Mounted Light Extinction Measurement Devices* – National Institute of Standards and Technology Internal Report 6212, Washington DC (EUA), Julho de 1998.
- [7] *ES 5 – SBI (Single Burning Item) – Procedimentos Gerais (versão 01)*, Lisboa (Portugal), Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LERF-LNEC), Janeiro de 2007.
- [8] *User's Guide for the SBICalc Software Package*, Fire Testing Technology Limited, West Sussex (Reino Unido), Outubro de 2003.
- [9] Parker, W. – *Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications* – National Bureau of Standards Internal Report 81-2427-1, Washington, DC (EUA), Março de 1982.
- [10] Kochsiek, M. and Gläser M. – *Comprehensive Mass Metrology*. Berlin (Alemanha): Wiley-VCH, 2000.
- [11] McCaffrey, B. and Heskestad, G. – A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application, In *Combustion and Flame*, **26**, 1, 125-127, Fevereiro de 1976.

- [12] *Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*, Genève (Suíça), International Organization for Standardization (ISO), 1993, re-editado em 1995.
- [13] *EA4/02 – Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, European co-operation for Accreditation (EA), Dezembro de 1999.
- [14] Ribeiro, A. S. – *Avaliação de Incertezas de Medição em Sistemas Complexos Lineares e Não-Lineares*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa (Portugal), 2006.
- [15] *Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit User's Guide*, 4<sup>th</sup> edition, Agilent Technologies, Colorado (EUA), Junho de 2006.
- [16] *PTX/PMP 1400 Series – Druck Industrial Pressure Sensors*, GE Sensing, 2005.
- [17] Sette, B. – *Evaluation of Uncertainty and Improvement of the Single Burning Item Test Method*, Tese de Doutoramento, Universteit Gent – Faculteit Ingenieurswetenschappen, Gent (Bélgica), 2005.
- [18] *Servomex 4200/4210*, Servomex, East Sussex (Reino Unido), 2006.
- [19] *AlphaGaz 1 Product Specifications*, Air Liquide.
- [20] Psychrometrics – In *1993 ASHRAE Handbook Fundamentals*. SI edition. Atlanta (EUA), American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) Handbooks, 1993.
- [21] *Model 267/267MR Pressure Transducer Specifications*, Setra, Massachusetts (EUA), 2003.
- [22] Pittam, D. and Pilcher, G. – Measurements of heats of combustion by flame calorimetry – Part 8: Methane, ethane, propane, n-butane and 2-methylpropane, In *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, **1**, 68, 2224-2229, 1972.
- [23] Cox, J., Wagman, D. and Medvedev, V. – *CODATA key values for Thermodynamics* – New York (EUA), Hemisphere Publishing Corp, 1984.
- [24] Chase, M.– NIST-JANAF Thermochemical Tables, In *J. Physics. Chem. Ref. Data*, **9**, 1-1951, 1998.
- [25] *Gas-Phase Database*, compilada por Allendorf, M., Sandia National Laboratory (disponível em <http://public.ca.sandia.gov/HiTempThermo>).
- [26] *IUPAC Periodic Table of the Elements*, International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), Outubro de 2005.

- [27] Prosen, E. and Rossini, F. – Heats of combustion and formation of the paraffin hydrocarbons at 25 °C, In *J. Res. NBS*, 263-267, 1945.
- [28] Matsumoto, M. and Nishimura, T. – Mersenne Twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, In *AC Trans. on Model. and Comp. Sim.* **8**, 1, 3-30, 1998.
- [29] Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press (EUA), 1986.
- [30] Cox, M. G., Dainton, M. P. and Harris, P. M., *Software Specifications for Uncertainty Calculation and Associated Statistical Analysis*, National Physical Laboratory (NPL) Report CMSC 10/01, Teddington Middlesex (Reino Unido): Ed. Crown, 2001.
- [31] *Le Système International d'Unités (SI)*, 8<sup>ème</sup> édition. Paris (França): Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2006.
- [32] Moran, M., Shapiro, H., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 4<sup>th</sup> edition. New York (EUA): John Wiley & Sons, 2000.



## ANEXO 1 – ABORDAGEM TERMODINÂMICA DO FENÓMENO DA COMBUSTÃO

Este anexo tem por objectivo facilitar a compreensão dos fundamentos básicos de algumas das grandezas de natureza termodinâmica com uma relevância destacada no ensaio SBI. Simultaneamente, pretende-se contribuir para um conhecimento mais detalhado do fenómeno fulcral dos ensaios de reacção ao fogo: a combustão.

De uma forma simplificada, a combustão é um fenómeno físico que consiste essencialmente numa reacção química exotérmica, onde um elemento combustível reage com um comburente, como por exemplo o oxigénio presente no ar, mediante a presença de uma fonte de ignição. O resultado deste processo reactivo consiste na formação de um conjunto de produtos de combustão acompanhada pela libertação de uma determinada quantidade de energia.

Sob uma perspectiva termodinâmica, a entalpia<sup>2</sup> de um sistema,  $H$ , permite quantificar a energia necessária à criação deste mesmo sistema a partir da sua inexistência: por um lado, o trabalho mecânico,  $pV$ , ( $p$  representa a grandeza pressão e  $V$  corresponde à grandeza volume) necessário para remover as partículas da vizinhança de modo a existir espaço para criar o sistema; por outro lado, a energia interna,  $U$ , de formação do sistema. Esta relação traduz-se matematicamente por

$$H = U + pV . \quad (73)$$

Na avaliação de sistemas reactivos, a quantificação da grandeza entalpia tem como referência um estado arbitrário cuja entalpia é considerada nula, permitindo comparar as diferenças de entalpia entre estados distintos. Deste modo, convencionou-se que, para elementos como o hidrogénio ( $H_2$ ), o oxigénio ( $O_2$ ) e o azoto ( $N_2$ ), num estado de referência (temperatura igual a 298,15 K e pressão atmosférica de 101 325 Pa), a sua entalpia é nula.

Define-se a entalpia de formação,  $H_f^0$ , como a entalpia de um composto químico no estado de referência, exprimindo a energia libertada ou absorvida quando o composto químico é criado pela junção dos seus elementos fundamentais sujeitos às condições de

---

<sup>2</sup> Dado se ter constatado em bibliografia diversa o uso comum incorrecto do símbolo da grandeza entalpia refere-se que, de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI) [31], esta grandeza é representada por  $H$ , enquanto que as grandezas entalpia mássica e a entalpia molar apresentam, respectivamente, a simbologia  $h$  e  $H_m$ .

temperatura e pressão de referência. Para um estado diferente do estado de referência, a entalpia do composto químico corresponde a

$$H(T, p) = H_f^0 + [H(T, p) - H(T_0, p_{\text{atm}}^0)] = H_f^0 + \Delta H, \quad (74)$$

onde  $\Delta H$  indica a alteração da entalpia entre o estado de referência, caracterizado pelas condições padrão de temperatura,  $T_0$ , e pressão atmosférica,  $p_{\text{atm}}^0$ , e o estado que se pretende conhecer definido pela temperatura  $T$  e pela pressão  $p$ .

A entalpia de um composto químico pode assim ser dividida em dois componentes: a entalpia de formação, associada à sua formação a partir dos seus elementos químicos fundamentais; e a diferença de entalpia relativa à alteração de estado considerando-se uma composição química constante.

Assim, a grandeza entalpia assume um papel relevante na análise energética de um dado sistema reactivo onde ocorra um processo de combustão, permitindo conhecer a quantidade de energia libertada. Efectivamente, realizando um balanço energético,  $\Delta E$ , a um sistema reactivo típico de um processo de combustão (as variações de energia cinética,  $\Delta E_c$ , e de energia potencial,  $\Delta E_p$ , são desprezáveis; a pressão permanece constante ao longo de todo o processo e, consequentemente, o trabalho,  $W$ , é nulo), é possível deduzir que

$$\Delta E = 0, \quad (75)$$

$$W + Q + \sum_{\text{reagentes}} H - \sum_{\text{produtos}} H + \Delta E_c + \Delta E_p = 0, \quad (76)$$

$$-Q = \sum_{\text{reagentes}} H - \sum_{\text{produtos}} H, \quad (77)$$

$$-Q = \sum_{\text{reagentes}} (H_f^0 + \Delta H) - \sum_{\text{produtos}} (H_f^0 + \Delta H), \quad (78)$$

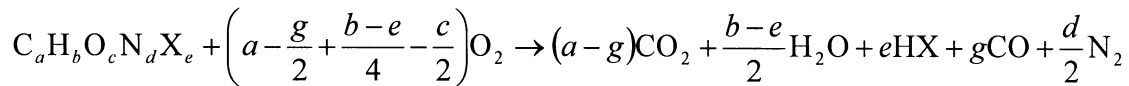
$$-Q = \sum_{\text{reagentes}} (H_f^0) - \sum_{\text{produtos}} (H_f^0) + \sum_{\text{reagentes}} (\Delta H) - \sum_{\text{produtos}} (\Delta H), \quad (79)$$

$$-Q = \Delta H_c^0 + \sum_{\text{reagentes}} (\Delta H) - \sum_{\text{produtos}} (\Delta H). \quad (80)$$

Surge, então, uma nova grandeza termodinâmica,  $\Delta H_c^0$ , designada por entalpia de combustão e definida como a diferença entre a entalpia de formação dos reagentes e a entalpia de formação dos produtos de combustão.



De uma forma generalizada, uma reacção de combustão é escrita como



onde X representa espécies atómicas como o flúor, o cloro, o brómio, entre outras.

Atendendo à definição de entalpia de combustão mencionada anteriormente, temos

$$\Delta H_c = \Delta H_{m_f}^0 \Big|_{C_a H_b O_c N_d X_e} - (a-g) \Delta H_{m_f}^0 \Big|_{CO_2} - \frac{b-e}{2} \Delta H_{m_f}^0 \Big|_{H_2O} - e \Delta H_{m_f}^0 \Big|_{HX} - g \Delta H_{m_f}^0 \Big|_{CO}, \quad (81)$$

verificando-se que a sua quantificação pode assumir dois valores distintos consoante a reacção de combustão conduza à formação de água no estado líquido ou no estado gasoso. Na primeira situação, a entalpia de combustão designa-se por entalpia de combustão superior,  $\Delta H_c^u$  (o índice superior resulta da designação em língua inglesa *upper*), enquanto que na segunda situação se designa por entalpia de combustão inferior,  $\Delta H_c^l$  (o índice superior resulta da designação em língua inglesa *lower*). A diferença energética entre ambas as situações é contabilizada como a energia que é necessária para vaporizar a água no estado líquido resultante da reacção de combustão [32].

Na caracterização de um dado combustível recorre-se a uma grandeza termodinâmica similar designada por poder calorífico que, por definição, é numericamente igual ao valor absoluto da entalpia mássica de combustão, fazendo-se também a distinção entre poder calorífico superior,  $|\Delta h_c^u|$ , e poder calorífico inferior,  $|\Delta h_c^l|$ <sup>3</sup>.

Atendendo aos fundamentos científicos que constituem a base da técnica de calorimetria por consumo de oxigénio [4, 9] empregue na realização do ensaio SBI, onde os reagentes e os produtos resultantes do processo de combustão estão ambos no estado de referência, a quantidade de calor libertado por unidade de massa de oxigénio consumido,  $E$ , é definida por

$$E = \frac{|\Delta H_c^l|}{M_{O_2} n_{O_2}} \quad (82)$$

---

<sup>3</sup> Em geral, a simbologia adoptada para representar estas grandezas corresponde a *PCS* e *PCI*, respectivamente.

onde  $M_{O_2}$  corresponde à massa molar da molécula de oxigénio e  $n_{O_2}$  é a quantidade de matéria de oxigénio consumido no processo de combustão. De forma similar, a quantidade de calor libertado por unidade de volume de oxigénio consumido,  $E'$ , corresponde a

$$E' = \frac{|\Delta H_c^1| \rho_{O_2}(T_0, p_{atm}^0)}{M_{O_2} n_{O_2}}, \quad (83)$$

em que  $\rho_{O_2}$  é a massa volúmica de oxigénio, neste caso para o estado de referência. A relação entre as duas constantes é dada por

$$E' = E \rho_{O_2}(T_0, p_{atm}^0). \quad (84)$$

