

## Referências bibliográficas

- [1] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional 2015, Relatório Síntese**. v. 1, p. 1–56, 2015.
- [2] MINISTÉRIO DE CIENCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Estimativas Anuais de Emissões de gases de Efeito Estufa no Brasil**. v. 2, p. 1–81, 2014.
- [3] LOAIZA, J. C. V. **Ignição por Compressão com Reatividade Controlada de Óleo Diesel e Etanol em Máquina de Compressão Rápida**. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [4] MUÑOZ, L. F. M. **Contribución al Estudio del Ruido de Combustión en Conceptos Avanzados de Combustión Diesel**. Tese (Doutorado) — Universitat Politècnica de València, València, Espanha, 2013.
- [5] EHLESKOG, M. **Low Temperature Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine**. Tese (Doutorado) — Chalmers University of Technology, Göteborg, Suécia, 2012.
- [6] GAN, S.; NG, H.; PANG, K. **Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion: Implementation and effects on pollutants in direct injection diesel engines**. *Applied Energy*, v. 88, p. 559 – 567, 2011.
- [7] MILANEZ, A. Y.; FILHO, P. de S. C. F.; ROSA, S. E. S. da. **Perspectivas para o Etanol Brasileiro**. *BNDES Setorial*, v. 27, p. 21–38, 2008.
- [8] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Caderno de Energia EPE - Perspectivas para o Etanol Brasileiro**. v. 1, p. 1–67, 2008.
- [9] HARDENBERG, H. O.; SCHAEFER, A. J. **The Use of Ethanol as a Fuel for Compression Ignition Engines**. *SAE Technical Paper 811211*, v. 1, p. 37 – 48, 1981.
- [10] SCHAEFER, A. J.; HARDENBERG, H. O. **Ignition Improvers for Ethanol Fuels**. *SAE Technical Paper 810249*, v. 1, p. 9–20, 1981.
- [11] CHEN, T. **Diesel Engine Operation on Alcohol Fuels Using a Computer Controlled Fumigation Process**. Dissertação (Mestrado) — University of Canterbury, Canterbury, Inglaterra, 1991.

- [12] SIMONSEN, H.; CHOMIAK, J. **Testing and Evaluation of Ignition Improvers for Ethanol in a DI Diesel Engine**. *SAE Technical Paper 952512*, v. 1, p. 1–12, 1985.
- [13] YILMAZ, N.; DONALDSON, A. B.; JOHNS, A. **Some Perspectives on Alcohol Utilization in a Compression Ignition Engine**. *SAE Technical Paper 2005-01-3135*, v. 1, p. 1–7, 1993.
- [14] LEE, D.; HOCHGREB, S.; KECK, JAMES C. **Autoignition of Alcohols and Ethers in a Rapid Compression Machine**. *SAE Technical Paper 932755*, v. 1, p. 1–6, 1993.
- [15] BIKA, A. S.; FRANKLIN, L. M.; KITTELSON, D. B. **Hydrogen as a Combustion Modifier of Ethanol in Compression Ignition Engines**. *SAE Technical Paper 2009-01-2814*, v. 1, p. 1–9, 2009.
- [16] LIF, A.; SVENNBERG, S. **An ethanol fuel and the use of an ignition improver**. Berol Nobel Ab, Anna Lif, Stig Svennberg, Patente WO1995005437 A1, 23 Fev. 1995.
- [17] LÖFVENBERG, U.; ÖSTENSSON, B. **Ethanol-based fuel for compression engines**. SEKAB BioFuels & Chemicals AB, Patente EP 2204433 A1, 7 Jul. 2010.
- [18] CADDET IEA OECD. **Ethanol - Powered Buses in Skaraborg**. [S.l.], 1998. Disponível em: <<http://www.caddet-re.org/assets/no91.pdf>>.
- [19] MOREIRA, J. R. et al. **Projeto Best - Bioetanol Para um Transporte Sustentável**. *3rd International Congress of University-Industry Cooperation (UNINDU 2008)*, v. 1, p. 1–8, 2008.
- [20] BIRATH, K. **The BEST Experiences with bioethanol buses**. [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://bit.ly/HWVFJ5>>.
- [21] VELAZQUEZ, S. M. S. G. et al. **O Projeto BEST - BioEtanol para o Transporte Sustentável - Uma Contribuição ao Meio Ambiente das Metrôpoles**. *XIII Congresso Brasileiro de Energia - XIII CBE*, v. 1, p. 1–14, 2010.
- [22] FILHO, F. F. **Análise de um Motor do Ciclo Diesel operando no Modo Bicomustível: Diesel/Etanol**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2011.

- [23] HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 1. ed. Singapura: McGraw-Hill, 1988.
- [24] TURNS, S. **An Introduction to Combustion: Concepts and Applications**. 2. ed. Singapura: McGraw Hill, 2000.
- [25] EGÚSQUIZA, J. C. C. **Redução das Emissões em Motores Diesel - Gas**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2006.
- [26] RATHORE, M. M. **Thermal Engineering**. 1. ed. Nova Deli - India: McGraw Hill, 2010.
- [27] VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. 6. ed. São Paulo - Brasil: Edgard Blücher Ltda, 2003.
- [28] BAMBRILA, J. A. **Estudo experimental e simulação termodinâmica de desempenho em um motor de combustão interna operando com óleo diesel e etanol**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.
- [29] SHAHABUDDIN, M. et al. **Ignition delay, combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 21, p. 623–632, 2013.
- [30] ASTM. **Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil**. *D 613-05*, v. 41, p. 1–31, 2000.
- [31] PEREIRA, P. A. de P.; ANDRADE, J. B. de. **Fontes, reatividade e Quantificação de Metanol e Etanol na Atmosfera**. *Química Nova*, v. 21, p. 744–754, 1998.
- [32] UNICA. **Produção e uso do etanol combustível no Brasil - Respostas às Questões mais Frequentes**. v. 1, p. 1–70, 2007.
- [33] PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ, Etanol Hidratado Combustível EHC. (Etanol Anidro Combustível EAC)**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://bit.ly/2cHcjf0>>.
- [34] PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ, Etanol Hidratado Combustível EHC. (Etanol Hidratado Combustível EHC)**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://bit.ly/1siCX5D>>.

- [35] EGÚSQUIZA, J. C. C. **Avaliação Experimental de um Motor do Ciclo Diesel Operando no Modo Bicombustível: Diesel/Etanol e Diesel/Gás.** Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [36] ABU-QUDAIS, M.; HADDAD, O.; QUDAISAT, M. **The Effect of Alcohol Fumigation on Diesel Engine Performance and Emissions.** *Energy Conversion & Management*, v. 41, p. 389–399, 2000.
- [37] SILVA, N. R. D. **Metodologia para Determinação da Potência Indicada em Motores de Combustão Interna.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 2006.
- [38] HANSEN, A. C.; LYNE, P. W. L.; ZHANG, Q. **Ethanol - Diesel Blends: A Step Towards a Bio - Based Fuel for Diesel Engines.** *ASAE Paper 2001-01-6048*, v. 1, p. 1 – 14, 2001.
- [39] ECKLUND, E. E. et al. **State - of - the - Art report on the Use of Alcohols in Diesel Engines.** *SAE Technical Paper 840118*, v. 1, p. 1 – 22, 1984.
- [40] WATERLAND, L. R.; VENKATESH, S.; UNNASCH, S. **Safety and Performance Assessment of Ethanol/Diesel Blends (E - Diesel).** 2003. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/34817.pdf>>.
- [41] CARO, P. S. de et al. **Interest of combining an additive with diesel - ethanol blends for use in diesel engines.** *Fuel*, v. 80, p. 565 – 574, 2001.
- [42] STRAIT, J.; BOEDICKER, J. J.; JOHANSEN, K. C. **Diesel Oil and Ethanol Mixtures for Diesel - Powered Farm Tractors.** *SAE Technical Paper 790958*, v. 1, p. 1 – 16, 1979.
- [43] WRAGE, K. E.; GOERING, C. E. **Technical Feasibility of Diesohol.** *Transactions of the ASAE*, v. 23, p. 1338 – 1343, 1980.
- [44] SALMAN, Y. K.; ABDUL-HADI, M. A.; ABDUL-KAHDIM, M. H. **Study of Performance and Prediction of Heat Release in Compression Ignition Engine Working on Ethyl Alcohol and Gas-Oil Solution.** *Journal of Engineering*, v. 11, p. 137 – 147, 2005.
- [45] MEIRING, P. et al. **Tractor Performance and Durability with Ethanol-Diesel Fuel.** *Transactions of the ASAE*, v. 26, p. 59 – 62, 1983.

- [46] RAMADHAS, A. S. **Alternative Fuels for Transportation**. 1. ed. USA: CRC Press, 2011.
- [47] MOSES, C. A. **Engine Experiments with Alcohol/Diesel Fuel Blends**. *Third International Symposium on Alcohol Fuels Technology*, Paper III - 51, p. 1 – 11, 1979.
- [48] LAWSON, A. et al. **Heavy-Duty Truck Diesel Engine Operation on Unstabilized Methanol/Diesel Fuel Emulsions**. *SAE Technical Paper 810346*, v. 1, p. 99 – 108, 1981.
- [49] CAN Özer; CELIKTEN, I.; USTA, N. **Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection Diesel engine running at different injection pressures**. *Energy Conversion and Management*, v. 45, p. 2429 – 2240, 2004.
- [50] ALPERSTEIN, M.; SWIM, W. B.; SCHWEITZER, P. H. **Fumigation Kills Smoke - Improves Diesel Performance**. *SAE Technical Paper 580058*, v. 1, p. 574 – 595, 1958.
- [51] BARANESCU, R. A. **Fumigation of Alcohols in a Multicylinder Diesel Engine-Evaluation of Potential**. *SAE Technical Paper 860308*, v. 1, p. 1 – 20, 1986.
- [52] HAYES, T. et al. **The Effect of Fumigation of Different Ethanol Proofs on a Turbocharged Diesel Engine**. *SAE Technical Paper 880497*, v. 1, p. 1 – 12, 1988.
- [53] HEISEY, J. B.; LESTZ, S. S. **Aqueous Alcohol Fumigation of a Single-Cylinder DI Diesel Engine**. *SAE Technical Paper 811208*, v. 1, p. 1 – 14, 1981.
- [54] IMRAN, A. et al. **Review on alcohol fumigation on diesel engine: A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 26, p. 739 – 751, 2013.
- [55] CHEN, J. et al. **Ethanol Fumigation of a Turbocharged Diesel Engine**. *SAE Technical Paper 810680*, v. 1, p. 1 – 16, 1981.
- [56] BROUKHIYAN, E. M. H.; LESTZ, S. S. **Ethanol Fumigation of a Light Duty Automotive Diesel Engine**. *SAE Technical Paper 811209*, v. 1, p. 15 – 25, 1981.

- [57] GAO, X. et al. **Ignition Delay and Heat Release Analysis of an Ethanol Fumigated Turbocharged Diesel Engines.** *ASME*, v. 83 - DGP - 1, p. 321 – 329, 1983.
- [58] KWON, S.-I.; ARAI, M.; HIROYASU, H. **Effects of Fumigated Fuel on the Ignition and Initial Combustion Stages in a D. I. Diesel Engine.** *SAE Technical Paper 891880*, v. 1, p. 1 – 11, 1989.
- [59] REIS, A. do V. **Investigação Experimental do Desempenho de Motores do Ciclo Diesel com Etanol Hidratado no Modo Duplo Combustível.** Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2004.
- [60] PISCHINGER, F. F.; HAVENITH, C. **A New Way of Direct Injection of Methanol in a Diesel Engine.** *Third International Symposium on Alcohol Fuels Technology*, Paper II - 28, p. 1 – 11, 1979.
- [61] KOKJOHN, S. L. et al. **Fuel Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI): A Pathway to Controlled High-Efficiency Clean Combustion.** *International Journal of Engine Research*, v. 12 - 3, p. 209 – 226, 2011.
- [62] BANDEL, W. **A Review of the Possibilities of Using Alternative Fuels in Commercial Vehicle Engines.** *Resources and Conservation*, v. 10, p. 135 – 160, 1983.
- [63] ULLMAN, T. L.; HARE, C. T. **Emission Characterization of an Alcohol / Diesel - Pilot Fueled Compression - Ignition Engine and Its Heavy - Duty Diesel Counterpart.** *U. S. Environmental Protection Agency*, v. 1, p. 1 – 237, 1981.
- [64] WISSINK, M. L. et al. **Investigation of Injection Strategies to Improve High Efficiency RCCI Combustion With Diesel and Gasoline Direct Injection.** *ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, Paper No. ICEF2012-92107, p. 327 – 338, 2012.
- [65] TAYLOR, C. F. **Análise dos Motores de Combustão Interna.** 1. ed. São Paulo, Brasil: Edgard Blucher, 1976.
- [66] SZKLO, A. S.; ULLER, V. C.; BONFÁ, M. H. p. **FUNDAMENTOS DO REFINO DE PETRÓLEO Tecnologia e Economia.** 3. ed. Brasil: Editora Interciência, 2012.

- [67] American Society for Testing and Materials. **Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil - D613-05**. *ASTM*, v. 41, p. 1–31, 2000.
- [68] OLIVARES, V. M. **Estudo Experimental do Uso de Misturas de Biocombustíveis em um Motor CFR/ASTM**. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.], 2012.
- [69] Ministerio do Meio Ambiente (MMA). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. *ANP*, v. 2, p. 1–115, 2013.
- [70] JIN, C. et al. **Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 4080 – 4106, 2011.
- [71] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP N° 19, DE 15.4.2015 - DOU 16.4.2015 - Republicada DOU 17.4.2015 - Republicada DOU 20.4.2015**. v. 1, 2015.
- [72] BEHLER, A. et al. **Alkaline earth metal salts of vicinally hydroxy, alkoxy-substituted C.sub.16 -C.sub.22 fatty acids, a process for their production and their use as alkoxylation catalysts**. Henkel Kommanditgesellschaft Auf Aktien, Patente US 5164124 A, 17 Nov. 1992.
- [73] LIN, W. O.; ALECRIM, J. O. S. **Avaliação e pesquisa bibliográfica sobre aditivos para Etanol Combustível em Motor Diesel**. v. 1, p. 6–10, 2012.
- [74] GONZÁLES, P.; CAMACHO, F.; BLÁZQUEZ, G. **Density and Viscosity of Concentrated Aqueous Solutions of Polyethylene Glycol**. *Journal of Chemical and Engineering Data*, v. 39, p. 611–614, 1994.
- [75] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung - IFA. **GESTIS Substance Database**. [S.l.], 2007. Disponível em: <<http://gestis-en.itrust.de>>.
- [76] OLOFSSON, M. **SEKAB - Polish Bioethanol as Clean Alternative for urban Heavy Transport**. [S.l.], 2009. Disponível em: <<http://stockholm.trade.gov.pl/pl/download/file/f,4009>>.
- [77] LEMES, J. F.; SOUZA, A. C. C. de. **Análise preliminar do uso do biobutanol como combustível veicular**.

<http://eventos.ufgd.edu.br/enepex/anais/arquivos/299.pdf>, v. 1, p. 1–20, 2014.

- [78] FREITAS, J. F. de. **Identificação de Oportunidades para a Produção de Produtos Químicos a partir de Rotas Sucroquímicas e Alcoolquímicas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2012.
- [79] NEJAME, S. **Butanol as Fuel - View From the Field**. [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/BPfanpage/butanol-as-fuel-view-from-the-field>>.
- [80] TESTEM. **TeRCM-K84 - Rapid Compression Machine analyzing in cylinder spray development and combustion processes**. [S.l.], 2000. Disponível em: <<http://www.testem.de/downloadarea/4/>>.
- [81] SÁNCHEZ, F. Z. et al. **Ethanol-Powered Combustion Experimental Study in a Rapid Compression Machine**. *SAE Technical Paper 2013-36-0313*, v. 1, p. 1–6, 2013.
- [82] BOSCH. **Funcionamento do Sistema Common Rail de Injeção Eletrônica Diesel**. [S.l.], 2009. Disponível em: <<ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM181-256/.pdf>>.
- [83] PARCHE, M. **Injection System and Engine Strategies for Advanced Emission Standards**. [S.l.], 2006. Disponível em: <<http://1.usa.gov/1bcyAi7>>.
- [84] EFS. **ICU - Injetvision Control Unit EFS 8412**. [S.l.], 2006. Disponível em: <<http://bit.ly/18WNdjR>>.
- [85] EFS. **IPoD Coil Power Driver - EFS 8427**. [S.l.], 2008. Disponível em: <<http://bit.ly/19OKnwJ>>.
- [86] KRISHNAN, S. R. **Heat Release Analysis of Dual Fuel Combustion in a Direct Injection Compression Ignition Engine**. Tese (Doutorado) — University of Alabama, Alabama, Estados Unidos, 2001.
- [87] MASSA, C. V. C. **Modelo Teórico - Experimental para Análise da Combustão em Motores Otto**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.
- [88] ADHIKESAVAN, C.; RAJADURAI, J. S. **Influence of B20 Biodiesel Blends on Diesel Engine Combustion**. *Journal of the Japan Institute of Energy*, v. 93, p. 675–683, 2014.



- [89] CROWELL, T. J. **Evaluation of enhanced ethanol with fumigation as a diesel fuel replacement**. Dissertação (Mestrado) — University of Illinois, Illinois, Estados Unidos, 1990.
- [90] MERKER, G. P. et al. **Simulating Combustion - Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development**. 1. ed. Wiesbaden - Alemanha: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [91] REDDY, P. R. et al. **Evaluation of Combustion Parameters in Direct Injection Diesel Engines - An Easy and Reliable Method**. *SAE Technical Paper 930605*, v. 1, p. 159–165, 1993.
- [92] TAZEROUT, M.; CORRE, O. L. **A New Method to Determine the Start and End of Combustion in an Internal Combustion Engine Using Entropy Changes**. *International Joournal Applied Thermodynamics*, v. 3, p. 49–55, 2000.
- [93] GREEN, D.; PERRY, R. **Perry, Perry's Chemical Engineer's Handbook**. 8. ed. USA: McGraw-Hill, 2008.
- [94] PSA Citroën. **Book Engine Test DW10CTED4 - Phase PRSEL**. 3. ed. França: PSA Citroën, 2008.
- [95] TAYLOR, J. W. **Smooth Transition Exponential Smoothing**. *Journal of Forecasting*, v. 23, p. 385–394, 2004.
- [96] YU, H. et al. **Experimental investigation on spray-wall impingement characteristics of n-butanol/diesel blended fuels**. *Fuel*, v. 182, p. 248–258, 2016.
- [97] SIWALE, L. et al. **Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine**. *Fuel*, v. 107, p. 409–418, 2013.
- [98] MOFFAT, R. J. **Describing the uncertainties in experimental results**. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 1, p. 3–17, 1988.

# A

## Software de Analise de Dados

```
%%PROGRAMA PARA O ANALISE DE DADOS DE TESTES NA MCR  
EM MATLAB
```

```
%%-----%%  
%%-----%%
```

```
clear all
```

```
clc
```

```
Arq=[xlsread('Arquivo')];
```

```
t=[Arq(8001:12001,1)]; %s
```

```
Pbar=[Arq(8001:12001,2)]*25+1.01325; %bar
```

```
S=[Arq(8001:12001,3)]*65.535; %mm
```

```
P=[Pbar]*105; %Pa
```

```
%%Corrigindo o stroke %%-----  
-----%%
```

```
sm=max(S);
```

```
Stroke=sm;
```

```
%%Determinação do Volume
```

```
%%-----%%
```

```
D=84; %mm
```

```
m=length(S);
```

```
for i=1:m
```

```
V(i)=((Stroke-S(i))*pi/4*D2+14000+26842.03)/109; %m3
```

```
end
```

```
V=V';
```

```
%%Determinação do Coeficiente politrópico compressão
```

```
%%-----%%
```

```
To=25+273.15; %°K
```

```

Po=1.65*10^5; %Pa
Vo=(Stroke*pi/4*D^2+14000+26842.03)/10^9; %m3
for i=1:m
T(i)=P(i)*V(i)*To/(Po*Vo); %°K
end

Ao=3.04473;
A1=1.33805*10^-3;
A2=-4.88256*10^-7;
A3=8.55475*10^-11;
A4=-5.70132*10^-15;

for i=1:m
cR(i)=Ao+A1*T(i)+A2*(T(i))^2+A3*(T(i))^3+A4*(T(i))^4;
end

for i=1:m
n(i)=(1 - (cR(i))^(1))^(1));
end

%%Determinação da taxa de transferência de calor e calor acumulado
%%-----%%
%%air no cftool para determinar as derivadas da Pressão e Volume
dP=[dPdt.dydx];
dV=[dVdt.dydx];

for i=1:m
dQ(i)=n(i)/(n(i)-1)*P(i)*dV(i)+1/(n(i)-1)*V(i)*dP(i);
end
%%air no cftool para determinar a Integral da Taxa de Liberação de Calor
Q=[Q.integral];

```

## B Análise das Incertezas

A incerteza de medição apresenta-se como um valor associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao valor verdadeiro da grandeza. Portanto recomenda-se que todo dado experimental deve ser analisado através de algum tipo de procedimento que permita indicar uma medida de confiabilidade.

### B.1 Análise na Medição de Variáveis

No trabalho de pesquisa desenvolvido, a incerteza de medição, em sala de teste, possui diversos componentes que devem ser agrupados em duas categorias, em função do método utilizado para estimar seu valor. As incertezas podem ser do tipo A ( $I_A$ ) e B ( $I_B$ ).

A incerteza de tipo A é uma incerteza padrão, é atribuída à repetibilidade dos resultados de medições sucessivas nas mesmas condições de medição. O valor de esta incerteza é calculado mediante um análise estatístico de uma série de observações válidas para tratamentos de dados como o calculo do desvio padrão ou o método de mínimos quadrados.

A incerteza de tipo B ( $I_B$ ), diz respeito aos métodos de avaliação de incerteza independentes de análises estatísticas de séries de dados. O Tipo B refere-se a incertezas atribuídas a resoluções, certificados, curvas de calibração de equipamentos, bem como padrões utilizados. Portanto, a incerteza Tipo B consiste em uma combinação de diversos fatores, em que  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_i$  representam as diferentes componentes de incerteza deste Tipo ( $I_B$ ) na Equação B-1:

$$I_B = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_i^2} \quad (\text{B-1})$$

De maneira similar, a obtenção da incerteza combinada ( $I_C$ ) é dada pela combinação entre as incertezas do Tipo A e do Tipo B, conforme a equação B-2:

$$I_C = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \quad (\text{B-2})$$

A incerteza expandida ( $I_E$ ) define um intervalo em torno do resultado de uma medição em que se abrange grande parte da distribuição de valores que possam ser atribuídos ao mensurado. A relevância desta parcela de distribuição dos valores pode ser entendida como a probabilidade de abrangência ou nível de confiança do intervalo, estimado pelo fator de abrangência. Este fator é um multiplicador da incerteza padrão combinada utilizado na obtenção da incerteza expandida. Para os casos analisados nesta dissertação, em que houve números significativos de medições, é razoável aproximar a 2 (dois) o fator de abrangência para um grau de confiança de 95%.

A Tabela B.1, lista as incertezas, seguidas das respectivas incertezas padrão dos equipamentos utilizados nas medições dos ensaios ao longo do desenvolvimento da tese.

Tabela B.1: Incertezas dos equipamentos utilizados.

Instrumento	Unidade	Valor	Incerteza padrão
Injetor da MCR	mm <sup>3</sup>	±0,43%	±0,30%
Sensor de pressão	V	±0,50%	0,289%
Amplificador	V	±0,10%	0,058%
Sensor de deslocamento	mm	0,05	±0,014
Medição de tempo	ms	0,01	±0,00289

Em posse dos dados de incerteza padrão dos equipamentos utilizados durante os testes, deve-se determinar a incerteza do Tipo B daquelas grandezas que são geradas por relações diretas entre valores medidos, conforme exposto na equação B-2. Portanto a incerteza do Tipo B na medição de pressão, dada pelo sensor de pressão e seu amplificador, é representada por:

$$\delta P = \sqrt{\delta_{Sensor}^2 + \delta_{Amplificador}^2} \quad (B-3)$$

Ao longo deste trabalho foram tomadas inúmeras precauções durante os procedimentos de coleta dos dados para que houvesse boa repetibilidade nos resultados, assim como metodologias de testes que utilizassem tomadas apropriadas do número de amostras, para a minimização de incertezas do Tipo A.

## B.2

### Propagação das incertezas

Para determinar a faixa de incerteza experimental com a que se trabalha, utiliza-se o método de Kleine e McClintock descrito por Robert Moffat [98], o qual

é também conhecido como a combinação da pior situação.

Para uma função  $R$  que esta em função de diferentes variáveis independentes, pode ser representada como  $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , onde a variação de  $\delta x_i$  em  $x_i$  causa uma variação  $\delta R$  em  $R$ , como mostra-se a seguir:

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B-4})$$

Onde:

$R$  = Grandeza a ser avaliada.

$\partial R$  = Incerteza na grandeza  $R$ .

$x_i$  = Variável independente.

$\delta x_i$  = Incerteza na variável  $x_i$ .

Na equação B-4, cada um dos termos é a atribuição feita por cada incerteza de cada uma das variáveis independentes utilizadas para o calculo do resultado de  $R$ .

É preciso fazer uma consideração de uma situação típica em trabalhos de engenharia que é o experimento de "amostra única", onde uma medição é feita para cada ponto. Julio Cesar Cuisano [25] menciona, que uma estimativa razoável da incerteza devido ao erro aleatório em um experimento de amostra única é, geralmente, mais o menos a metade da menor divisão da escala do instrumento.

A seguir apresentam-se as expressões de algumas grandezas dispostas no transcórre da dissertação, cujos cálculos de estimativas de incerteza exigiam a aplicação do método de propagação de incertezas.

A equação da taxa de liberação de calor (equação 4-8) é função de algumas variáveis independentes, o que faz com que neste caso seja necessária a utilização da propagação de incertezas das variáveis independentes no cálculo de incerteza da grandeza. No entanto a determinação da incerteza da taxa de liberação de calor exige algumas etapas de manobras algébricas, uma vez que as próprias incertezas das variáveis independentes da formulação original também precisam utilizar-se da propagação de incertezas.

Para que seja conhecida a incerteza da razão entre calores específicos ( $\gamma$ ), que é uma das variáveis independentes da taxa de liberação de calor, deve-se antes trabalhar com as incertezas das variáveis independentes que compõe o parâmetro, ou ainda avaliar a incerteza relacionada à temperatura, conforme indica a equação B-7, pela análise da expressão da equação B-5 e as derivadas parciais relevantes da equação B-6:

$$T = \frac{P_i V_i T_0}{P_0 V_0} \quad (\text{B-5})$$

$$\frac{\partial T}{\partial P_i} = \frac{V_i T_0}{P_0 V_0} \quad \frac{\partial T}{\partial P_0} = -\frac{P_i V_i T_0}{P_0^2 V_0} \quad \frac{\partial T}{\partial V_i} = \frac{P_i T_0}{P_0 V_0} \quad \frac{\partial T}{\partial V_0} = -\frac{P_i V_i T_0}{P_0 V_0^2} \quad (\text{B-6})$$

É importante esclarecer que os termos nas expressões que levem em conta o volume, estão associados à incerteza padrão do deslocamento na MCR, pois se estabeleceu uma relação direta entre as incertezas do deslocamento e do volume.

$$\delta T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial P_i} \delta P\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial P_0} \delta P\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial V_i} \delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial V_0} \delta L\right)^2} \quad (\text{B-7})$$

Então, a relação entre calores específicos, definida pela equação B-8, pode ter sua incerteza associada determinada pela equação B-10 com auxílio da equação B-9 da derivada parcial em função da temperatura:

$$\gamma = \left(1 - \frac{1}{A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4}\right)^{-1} \quad (\text{B-8})$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial T} = -\frac{4A_4 T^3 + 3A_3 T^2 + 2A_2 T + A_1}{(A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4 - 1)^2} \quad (\text{B-9})$$

$$\delta \gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \delta T\right)^2} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \delta T \quad (\text{B-10})$$

Assim para a análise da incerteza do calor liberado ( $Q$ ) mediante a equação da taxa de liberação de calor ( $HRR$ ), expressa pela equação B-11, explicitam-se os termos derivativos da equação. Com isso, utilizando a definição da derivada e da integral, o calor liberado é reescrito na equação B-12, na qual o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) entre os pontos de medição nos instantes dos sub índices  $i$  e  $i - 1$  é de 0,01 ms (o intervalo pode ser representado também em segundos por  $10^{-5}$ ). É aconselhável ainda, fragmentar os dois grandes termos da equação B-11 em duas expressões, a fim de facilitar a avaliação e as operações algébricas dos cálculos de incerteza, o que é feito pelas equações B-13 e B-14, que são respectivamente  $Q_1$

e  $Q_2$ .

$$\frac{dQ}{dt} = HRR = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{dt} \quad (\text{B-11})$$

$$Q = \Delta t \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{dt} \right) \quad (\text{B-12})$$

$$Q_1 = \Delta t \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{dt} \right) \quad (\text{B-13})$$

$$Q_2 = \Delta t \left( \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{dt} \right) \quad (\text{B-14})$$

O próximo passo para a estimativa da incerteza da taxa de liberação de calor consiste em, explicitar as derivadas parciais dos termos  $Q_1$  (equações B-15, B-16 e B-17) e  $Q_2$  (equações B-18, B-19 e B-20) em função de suas variáveis:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \gamma} = \frac{\Delta t P (V_1 - V_{i-1})}{\gamma - 1} - \frac{\Delta t P (V_1 - V_{i-1}) \gamma}{(\gamma - 1)^2} \quad (\text{B-15})$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial P} = \Delta t \frac{\gamma}{\gamma - 1} (V_1 - V_{i-1}) \quad \frac{\partial Q_1}{\partial \Delta t} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P (V_1 - V_{i-1}) \quad (\text{B-16})$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial V_i} = \Delta t \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \quad \frac{\partial Q_1}{\partial V_{i-1}} = -\Delta t \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \quad (\text{B-17})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \gamma} = -\frac{\Delta t V (P_1 - P_{i-1})}{(\gamma - 1)^2} \quad (\text{B-18})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V} = \Delta t \frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_1 - P_{i-1}) \quad \frac{\partial Q_2}{\partial \Delta t} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} V (P_1 - P_{i-1}) \quad (\text{B-19})$$



$$\frac{\partial Q_1}{\partial P_i} = \Delta t \frac{\gamma}{\gamma - 1} V \quad \frac{\partial Q_1}{\partial P_{i-1}} = -\Delta t \frac{\gamma}{\gamma - 1} V \quad (\text{B-20})$$

O processo de avaliação da incerteza envolvida na taxa de liberação de calor, apesar de ligeiramente trabalhoso, fundamenta-se no conceito simples do método de propagação de incertezas. As equações B-23 e B-24 mostram a aplicação do método para que, finalmente, na equação B-25 apresente-se a estimativa para a incerteza da taxa de liberação de calor:

$$Q_{1-dV} = \left(\frac{\partial Q_1}{\partial V_i} \delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_1}{\partial V_{i-1}} \delta L\right)^2 \quad (\text{B-21})$$

$$Q_{2-dP} = \left(\frac{\partial Q_1}{\partial P_i} \delta P\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_1}{\partial P_{i-1}} \delta P\right)^2 \quad (\text{B-22})$$

$$\delta Q_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_1}{\partial \gamma} \delta \gamma\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_1}{\partial P} \delta P\right)^2 + Q_{1-dV} + \left(\frac{\partial Q_1}{\partial \Delta t} \delta \Delta t\right)^2} \quad (\text{B-23})$$

$$\delta Q_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_2}{\partial \gamma} \delta \gamma\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_2}{\partial V} \delta L\right)^2 + Q_{2-dP} + \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \Delta t} \delta \Delta t\right)^2} \quad (\text{B-24})$$

$$\delta Q = \sqrt{(\delta Q_1)^2 + (\delta Q_2)^2} \quad (\text{B-25})$$