

6

Referências Bibliográficas

Aldair, R. P., Qvale, E. B., Pearson J.T., **Instantaneous Heat Transfer to the Cylinder Wall in Reciprocating Compressors**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 521-526, 1972.

ASHRAE, **ANSI/ASHRAE Standard 23: Methods of testing for rating positive displacement refrigerant compressor and condensing unit**, pp. 1-11, 2005.

ASHRAE, **ASHRAE Handbook of HVAC Systems and Equipment**, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., **Compressor**, chapter 37, Cooling equipment and components, 2008.

ASHRAE, **ASHRAE Handbook of Refrigeration**, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., **Cooling and Freezing Times of Food**, chapter 20, Food cooling and store, 2010.

Apréa C., Greco A., **An exergy analysis of R22 substitution**, Applied Thermal Engineering 22, pp. 1455-1469, 2002

Becerra, V., Parise, J.A.R, **Análise Numérica do Escoamento no Interior da Carcaça de um Compressor Hermético**, Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul, Curitiba, Brasil, pp. 1-13, 2008.

Bing Y., Bradshaw R.C., Groll A., **Modeling of a semi-hermetic CO₂ reciprocating compressor including lubrication submodels for piston rings and bearings**, International Journal of Refrigeration, pp. 1-13, 2012.

Cavalcante, P., Farsterling, S., Tegethoff, W., Stulgies, N., Köhler, J., **Transient modeling and sensitivity analysis of a controlled R744 swash plate compressor**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1-8, 2008.

Cavallini A., Doretti, L.; Longo, G.A., Rosetto L., Bella, B., Zannerio A. **Thermal Analysis of a hermetic reciprocating compressor**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 535-540, 1996.

Cuevas, C., Winandy, E., Lebrun, J., **Testing and modelling of an automotive wobble plate compressor**, International Journal of Refrigeration 31, pp. 423-431, 2008.

Darr, J.H., Crawford, R.R., **Modeling of an automotive air conditioning compressor based on experimental data, report ACRCTR-14**, Air Conditioning and Refrigeration Center University of Illinois, USA, 1992.

Deschamps C.J., Sanvezzo, J., **A Heat Transfer Model Combining differential and Integral Formulation for Thermal Analysis of Reciprocating Compressor**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1-10, 2012.

Dirlea, R., Gauthy, L., Grodent, M., Khamsi, Y., Lebrun, J., Negoiu, D., **Modeling of wobble plate compressors used in automotive air-conditioning**. International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 255-260, 1998

Dittus, P.W., Boelter, L.M.K., **Heat Transfer in Automobile Radiators of the tubular type**, Univ. Calif. Pub. Eng., pp. 443-461, 1930.

Domanski P., Didion D.A., **Computer modeling of the vapor compression cycle with constant low area expansion device**, NBS Building Science Series

155, National Institute of Standards and Technology, Washington. DC, USA, 1983.

Dossat, R. J., **Princípios de Refrigeração**, Editor da Edição Brasileira ELI BEHAR, 2004.

Duprez, M.E., Dumont, E., Frère, M., **Modelling of reciprocating and scroll compressors**, International Journal of Refrigeration 30, pp. 873-886, 2007.

Dutra, T., Deschamps, J. C., **Experimental Investigation of Heat Transfer in Components of a Hermetic Reciprocating Compressor**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1-9, 2010.

Eborn, J., Tummescheit, H., Prölß, K., **AirConditioning - a Modelica library for dynamic simulation of AC systems**, 4th International Modelica Conference, March 7-8, Hamburg University of Technology, Hamburg-Harburg, Germany, pp. 185-192, 2005.

Eckhard, A. G., **Short Course on Introduction To Compressors (Compressor 101)**, Purdue University, USA, 2010.

Edgar, T. F., Himmelblau, D. M., **Optimization of Chemical Processes**. McGraw-Hill International Editions, 2001.

Embraco, **Manual de Aplicação de Compressores**. Disponível em: <<http://www.embraco.com/DesktopModules/DownloadsAdmin/Arquivos/000004.pdf>>. Acesso em: 14 Agosto, 2012.

Estados Unidos. **National Oceanic and Atmospheric administration**. Disponível em: <<http://www.weather.gov/>>. Acesso em 01 mai. 2012.

Fagotti F., Todescat, M. L., **Heat Transfer Modeling in a Reciprocating Compressor**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, paper 1043, 1994.

Fukuta, M., Yanagisawa, T., Shimizu, T., Suzuki, Y., **Mathematical-model of vane compressors for computer simulation of automotive air conditioning cycle**. JSME International Journal Series B-Fluids and Thermal Engineering 38, pp. 199-205, 1995

Grace, I. N, Tassou, S. A., **Dynamic simulation of liquid chillers**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 133-138, 2000.

Groll, E.A., **Modeling of compressors. USCN/IIR short course: Simulation tools for vapor compression systems and component analysis**. International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, July 10-11, 2004.

Haberschill P., Laflemand M., Borg S., Mondot M., **Hermetic Compressor Models Determination of Parameters from a Minimum Number of Tests**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 133-138, 1994.

Hamilton, J.F., **Extension of mathematical modeling of positive displacement type compressor**, Short Course, Ray W. Laboratories, Purdue University, 1974.

Hermes, C. J., Melo, C., **How to get the most out from a reciprocating compressor semi-empirical model using a minimum data set**, International Conference on Compressor and Coolants, Papiernicka, Slovak Republic, 2006.

Hiller C. C., Glicksman L. R., **Detailed Modeling and Computer Simulation of Reciprocating Refrigeration Compressors**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 12-17, 1976.

Honeywell Inc., **Comparative Performance of R1234yf with R134a in Mobile AC Systems**, Internal communication. Buffalo Research Laboratory – Refrigerants Applications Laboratory, 2007.

Hughes, J. M., Qvale, E. B., **Experimental investigation of thermodynamic aspects refrigerating compressor**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 516-520, 1972.

Hulsey, K., **Automotive Engine and Car Motor**, Disponível em: <http://www.khulsey.com/stockimages_engines.html>. Acesso em: 09 Jun. 2008.

Hundy, G.F., Trott, A.R., Welch, T.C., **Refrigeration and Air-Conditioning**, Elsevier Ltd., Fourth Edition, 2008.

Ignatiev, K.M., **Compressor simulation. USCN/IIR short course: Simulation tools for vapor compression systems and component analysis**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, July 23-24, 2000.

Incropera, P., Dewitt, P., Bergman, L. Lavine, S., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., sexta edição, 2008.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., **Climate Change 1990: the Scientific Basis**, University Press, Cambridge (1990).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), **Climate Change Synthesis Report**, University Press, Cambridge (2007)

Jahning, D.I., Reindl, D.T., Klein, S.A., **A Semi-empirical method for Representing Domestic Refrigerator/Freezer Compressor Calorimeter**, Ashrae Transactions, pp. 122-130, 2000.

Joudi, K.A., Mohammed, A.S.K., Aljanabi, M.R., **Experimental and computer performance study of an automotive air conditioning system with alternative refrigerant**, Energy Conversion and Management 44, pp. 2959-2976, 2003.

Kara, S., Oguz, E., **Thermal Analysis of a Small Hermetic Reciprocating Compressor**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1-8, 1993.

Kiatsiriroat, T., Euakit, T., **Performance analyses of an automobile air-conditioning system with R22/R124/R152A refrigerant**, Applied Thermal Engineering 17, pp. 1085-1097, 1997.

Kim, M.H., Bullard, C.W., **Thermal performance analysis of small hermetic refrigeration and air- conditioning compressors**, JSME International Journal, Series B, Vol. 45(4), 2002.

Kline, J., McClintock, A., **Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments**, Mechanical Engineering, Vol. 75, No. 1, 1953.

KOTAS, T. J., **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**, Krieger Publish Company, Malabar, FL, 1995.

Lee, J.H., An, K.H., Lee, I.S., **Design of the suction muffler of a reciprocating compressor**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, C11-5, 2002.

Lee, Y., Jung, D., **A brief performance comparison of R1234yf and R134a in a bench tester for automobile applications**, Applied Thermal Engineering 35, pp. 240-242, 2012.

Lemmon E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O., NIST Standard Reference Database 23, **NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties - REFPROP**, Version 8.0, 2007.

Longo, G. A., Caracciolo, R., **Unsteady State Analysis of a Hermetic Reciprocating Compressor: Heat Transfer Inside the Cylinder and Valve Dynamic**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1-9, 2002.

Mackensen, A., Klein, S. A., Reindl, D. T., **Characterization of Refrigeration System Compressor Performance**, International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, USA, pp. 1-9, 2002.

McGovern, J. A, Hart S., **An exergy method for compressor performance analysis**, International Journal of Refrigeration 18, pp. 421-433, 1995.

Meyer, W. A., Doyle, T. H., **An Analytical model of heat to the suction gas in a low-side hermetic refrigeration compressor**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 898-907, 1990.

Meyer W.A., Thompson, H.D. **An analytical model of heat transfer to the suction gas in a low-side hermetic refrigeration compressor**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 898-907, 1988.

Minor, B. and Spatz, M., **HFO-1234yf Low GWP Refrigerant Update**, International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, USA, pp. 1-8, 2008.

Motta, S.Y., Braga, S.L., Parise, J.A.R., 1996. **A study on the polytropic exponent of reciprocating hermetic compressors**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 89-94, 1996.

Motta, S.Y., **Simulação numérica de componentes em sistemas de refrigeração de pequeno porte**, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1995.

Navarro, E., Granryd, E., Urchueguía, J.F., Corberán, J.M., **A phenomenological model for analyzing reciprocating compressors**, International Journal of Refrigeration 30, pp. 1254-1265, 2007.

Navarro, E., Urchueguía, J.F., Corberán, J.M., Granryd, E., **Performance analysis of a series of hermetic reciprocating compressors working with R290**

(propane) and R407C, International Journal of Refrigeration 30, pp. 1244-1253, 2007.

Negrao, O. R., Erthal, H., Andrade, D. E., Silva, W., **An Algebraic Model for Transient Simulation of Reciprocating Compressor**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1-9, 2010.

Ooi, K. T., **Heat transfer study of a hermetic refrigeration compressor**, Applied Thermal Engineering 23, pp. 1931-1945, 2003.

Park, J. I., Adams, D. E., Ichikawa, Y., Bayyouk, J., **Modeling and simulation of the suction process in a multi-cylinder automotive compressor**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1-8, 2004.

Pascal S., Mohand T., Pierre W., **Thermodynamic analysis of reciprocating compressor**, International Journal of Thermal Science. 40, pp. 52-66, 2001.

Prakash, R. Singh, R., **Mathematical Modeling and Simulation of Refrigerating Compressors**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 274-285, 1974.

Popovic, P., Shapiro, H. N., **A Semi-empirical method for modeling a reciprocating compressor in refrigeration systems**, ASHRAE Transactions, pp. 367-382, 1995.

Ramanujam, S., Doyle, T. H., **How the design of the suction return affects compressor efficiency**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 615-622, 1990.

Rasmussen, B. D. and Jakobsen, A., **Review of compressor models and performance characterizing variables**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 515-522, 2000.

Real, M. A., Nunes, M. A., De Marqui, A. L., **Experimental Characterization of Noise Source in Suction Chamber of Reciprocating Hermetic Compressor.**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, 1-9, 2010.

Rigola J., Pérez Segarra C.D. Oliva A. **Advanced Numerical Simulation Model of Hermetic Reciprocating Compressors, Parametric Study and Detailed Experimental Validation**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 25-28, 2000.

Rigola J., Raush, G., Pérez Segarra C.D. Oliva A. **Numerical Study and Experimental Comparison of CO₂ Reciprocating Compressors for Small Cooling and/ or Freezing Capacity Applications**, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1-9, 2006.

Sánchez, D., Torrell, E., Cabello, R., Lopis R., **Influence of the superheat associated to a semihermetic compressor of a transcritical CO₂ refrigeration plant**, Applied Thermal Engineering 30, pp. 302-309, 2010.

Saiz Jabardo, J.M., Gonzales Mamani, W., Ianella, M.R., **Modeling and experimental evaluation of an automotive air conditioning system with a variable capacity compressor**, International Journal of Refrigeration 25, pp. 1157–1172, 2002.

Spatz, M. W., **Update on a Low GWP Refrigerant: Fluid H**, Alternatives Refrigerant Systems Symposium, July 17-19, 2007.

Spatz, M. W., **Update on an Ultra-Low GWP Refrigerant for Mobile Air Conditioning Applications**, SAE 7th Alternative Refrigerant Systems Symposium. June 28th, 2006.

Tian, C., Dou, C., Yang, X., Li, X., **A mathematical model of variable displacement wobble plate compressor for automotive air conditioning system**, Applied Thermal Engineering 24, pp. 2467–2486, 2004.

Tian, C., Liao, Y., Li, X., **A mathematical model of variable displacement swash plate compressor for automotive air conditioning system.** International Journal of Refrigeration 29, pp. 270–280, 2006.

Tian, C., Xu, H., Xianting Li, X., Liao, Y., **Simulation and performance analysis of control mechanism in variable displacement swash plate compressor.** Applied Thermal Engineering 27, pp. 1868–1875, 2007.

Tian, C., Xu, H., Zhang, L., Li, X., **Experimental investigation on the characteristics of variable displacement swash plate compressor,** Applied Thermal Engineering 29, pp. 2824–2831, 2009.

Todescat, M., Fagotti, F., Prata, R., **Thermal energy analysis in reciprocating hermetic compressors,** International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1419-1428, 1992.

Todescat, M., **Modelos de transferência de calor em cilindros de compressores,** XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, volume II, pp. 793-796, 1993.

Todescat, M. L., Prata T. A., **A New Correlation for Instantaneous Heat Transfer Between Gas and Cylinder in Reciprocating Compressor,** International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 871-876, 1998.

Tojo, K., Takao, K., Ito, M., Hayase, I., Takahashi, Y., **Dynamic behaviour of variable displacement compressor for automotive air conditioners,** SAE Technical Paper Series 900084, International Congress and Exposition, Detroit, USA, pp. 1-9, 1990.

United Nations Environmental Programme (UNEP), **Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer Final Act.,** New York., United Nations., 1987.

Vakil, H. B., **Performance of reciprocating compressor with non-azeotropic mixtures**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 1051-1062, 1986.

Winandy, O.C., Saavedra, J. Lebrun., **Simplified modeling of an open-type reciprocating compressor**, International Journal of Thermal Science 41, pp. 183-192, 2002.

Yi, F.S., Groll, E.A., Braun, J.A., **Modeling and testing of an automobile ac scroll compressor, Part I: model development**, International Compressor Engineering Conference at Purdue University, USA, pp. 1-8, 2004.

Yian, G. Yezheng, W., **Experimental investigation on heta transfer in the manifold of refrigerating compressors**, International Compressor Engineering Conference at Purdue, USA, pp. 175-186, 1986.

Yunus C. A., Boles Michael A., **Termodinâmica**, McGraw-Hill, Brasil, quinta edição, 2006.

Zilio, C., Brown, J.S., Schiochet, G., Cavallini, A., **The refrigerant R1234yf in air conditioning systems**, Energy 36, pp. 611-612, 2011.

APÊNDICE A

A1

Método de gradiente reduzido generalizado (GRG)

O método GRG aplica-se a problemas de otimização não-linear (Edgar e Himmelblau, 2001) com restrições na forma:

$$\text{Minimizar } f(\bar{x}) \quad (\text{A.1})$$

Sujeito a:

$$h_k(\bar{x}) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, m_i) \quad (\text{A.2})$$

$$g_j(\bar{x}) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{A.3})$$

$$l_i \leq x_i \leq u_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{A.4})$$

O método transforma o problema de otimização em problemas apenas com restrições de igualdade, através da introdução de uma variável de folga para cada restrição de desigualdade:

$$h_k(\bar{x}) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, m_i) \quad (\text{A.5})$$

$$g_j(\bar{x}) + x_{j+n} = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{A.6})$$

$$l_i \leq x_i \leq u_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{A.7})$$

$$x_{j+n} \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{A.8})$$

A equação (A.6) requer a adição de m variáveis de folga não negativas o que origina um aumento no numero de variáveis.

O vetor x contém agora as n variáveis originais mais as m variáveis de folga. Por conveniência, deve-se escrever x da seguinte forma:

$$x = \begin{pmatrix} z \\ y \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Em que z é o vetor das $(n - m_i)$ variáveis independentes e y é o vetor das $(m + m_i)$ variáveis dependentes.

Simplifica-se, assim, o problema, uma vez que agora, existem somente restrições de igualdade:

$$\text{Minimizar } f(z, y) \quad (\text{A.10})$$

Sujeito a:

$$h_j(\bar{x}) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m + m_i) \quad (\text{A.11})$$

$$l_i \leq x_i \leq u_i \quad (i = 1, 2, \dots, n + m) \quad (\text{A.12})$$

Em seguida, calcula-se as derivadas da função objetivo e das restrições:

$$df(\bar{x}) = \nabla_z f(\bar{x}) * dz + \nabla_y f(\bar{x}) * dy \quad (\text{A.13})$$

$$dh_j(\bar{x}) = \nabla_z h_j(\bar{x}) * dz + \nabla_y h_j(\bar{x}) * dy \quad (j = 1, \dots, m + m_i) \quad (\text{A.14})$$

Simplificando:

$$\nabla_z h_j(\bar{x}) = A \quad (\text{A.15})$$

$$\nabla_y h_j(\bar{x}) = B \quad (\text{A.16})$$

Tem-se que:

$$dh(x) = A^* dz + B^* dy \quad (\text{A.17})$$

Como $dh(\bar{x}) = 0$ para qualquer variação nas variáveis independentes dz pode-se obter a correspondente variação dy nas variáveis dependentes:

$$dy = B^{-1} A^* dz \quad (\text{A.18})$$

Substituindo a equação (A.18) na equação (A.13), vem:

$$df(\bar{x}) = \left\{ \nabla_z^T f(\bar{x})^* dz + \nabla_y^T f(\bar{x})^T [B^{-1} A^*] \right\}^* dz \quad (\text{A.19})$$

Então,

$$G_r = \frac{df(\bar{x})}{dz} = \nabla f(\bar{x}) - [B^{-1} A^*]^T \nabla_y f(\bar{x}) \quad (\text{A.20})$$

Esta equação define o gradiente reduzido generalizado G_r e agora pode ser utilizado para determinar a direção “ d ” de procura, para utilizar na equação:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (\text{A.21})$$

Na forma mais simples, a direção de procura corresponde ao gradiente reduzido com sinal negativo:

$$d = -G_r \quad (\text{A.22})$$

Pode-se então resumir o método no seguinte algoritmo:

- 1 Escolher as variáveis dependentes e independentes.
- 2 Calcular o gradiente reduzido G_r .
- 3 Através do gradiente reduzido, determinar a direção de procura (d) nas variáveis de decisão.
- 4 Procurando nesta direção, para cada valor de α_k faz-se a atualização do vetor y .

- 5 Determinar x_{k+1} .
- 6 Encontrando um mínimo nesta direção, o processo repete-se até se conseguir a convergência.

A2

Incertezas nos modelos de simulação de compressores alternativos

Neste apêndice é apresentado o procedimento para a estimativa das incertezas nos modelos de simulação de compressores alternativos desenvolvidos nos capítulos anteriores.

A melhor estimativa do valor real é normalmente dado pelo valor medido, ou pela média, m , caso existam vários valores medidos (Kline e McClintok, 1953). Uma medida da confiabilidade é dada pela incerteza δm . Então uma maneira correta de reportar uma medida é:

$$m \pm \delta m \quad (\text{A.23})$$

A determinação da parcela da incerteza δm pode ser realizada por:

- Testes experimentais onde são feitas várias medidas, a partir das quais pode-se calcular o desvio padrão.
- Estimativa das incertezas dos instrumentos fornecida pelos fabricantes.

A2.1

Propagação de incertezas

Considere medições independentes, das variáveis $x_1, x_2, \dots, x_n$, que serão utilizadas para calcular algum resultado R . A incerteza relativa a cada grandeza, medida independentemente, é estimada como u_i . Desejamos analisar como as incertezas nos x_i propagam-se no cálculo de R a partir dos valores medidos. Em geral R pode ser expresso como:

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{A.24})$$

Kline e McKintock (1953) descrevem um método para o cálculo da incerteza relativa em função da soma quadrática das incertezas individuais:

$$w_r = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \partial x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \partial x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \partial x_n\right)^2} \quad (\text{A.25})$$

onde $\frac{\partial R}{\partial x_1}, \frac{\partial R}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial R}{\partial x_n}$ são as derivadas em relação as variáveis

$x_1, x_2, \dots, x_n$, utilizadas no cálculo de R . Também, $\partial x_1, \partial x_2, \dots, \partial x_n$, representam as incertezas dos instrumentos utilizados para medir os valores das variáveis $x_1, x_2, \dots, x_n$.

A2.2

Propagação de incertezas no modelo de simulação do compressor automotivo

Como resultado do modelo de simulação do compressor automotivo, foram obtidas duas variáveis: i) Vazão mássica do fluido refrigerante, $\dot{m}_r$, ii). Temperatura na descarga do compressor, T_4 .

Para determinar as incertezas no cálculo da vazão mássica do fluido refrigerante, é preciso obter uma função R a partir das variáveis que contribuem na propagação de incertezas. Esta função é expressa da seguinte forma:

$$R_{\dot{m}_r} = f(P_1, T_1, P_4, T_4, RPM) \quad (\text{A.26})$$

O mesmo procedimento é utilizado na propagação das incertezas no cálculo da temperatura na descarga.

$$R_{T_4} = f(\dot{m}_r, P_1, T_1, P_4, RPM) \quad (\text{A.27})$$

onde P_1 e T_1 são a pressão e temperatura na sucção, P_4 e T_4 pressão e temperatura na descarga e RPM é velocidade angular de compressão.

a) Vazão mássica do fluido refrigerante

A incerteza relativa da vazão mássica do fluido refrigerante é obtida a partir da seguinte equação:

$$\partial \dot{m}_r = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial P_1} \partial P_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial T_1} \partial T_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial P_4} \partial P_4\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial T_4} \partial T_4\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial RPM} \partial RPM\right)^2} \quad (\text{A.28})$$

onde a contribuição para a incerteza em $\partial \dot{m}_r$ devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

Utilizando a equação (2.25), se tem:

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial P_1} = \left(\frac{\Delta_1}{1,75} (P_1 - P_2)^{0,4286} \right) \quad (\text{A.29})$$

Substituindo as equações (2.12) e (2.13) na equação (2.11)

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial T_1} = \left(\frac{\Delta_2^{1,25}}{0,8} (T_3 - T_1)^{-2,25} \right) \quad (\text{A.30})$$

Utilizando a equação (2.26), tem-se:

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial P_4} = \left(-\frac{\Delta_3}{1,75} (P_3 - P_4)^{0,4286} \right) \quad (\text{A.31})$$

Substituindo as equações (2.13) e (2.15) na equação (2.14)

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial T_4} = \left(-\frac{\Delta_4^{1,25}}{0,8} (T_4 - T_2)^{-2,25} \right) \quad (\text{A.32})$$

E, utilizando a equação (2.29), chega-se a:

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial RPM} = \left(\frac{\eta_{v23} \rho_2 V_d}{60} \right) \quad (\text{A.33})$$

onde os valores de Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 e Δ_4 são obtidos mediante as seguintes equações:

$$\Delta_1 = \left(\frac{\rho_1}{CP_{12}\mu^{0,25}} \right)^{0,571} \quad (\text{A.34})$$

$$\Delta_2 = \left(\frac{2\dot{Q}_{12}}{CH_{12}k_1^{0,667}c_{p1}^{0,333}\mu_1^{-0,467}} \right) \quad (\text{A.35})$$

$$\Delta_3 = \left(\frac{\rho_4}{CP_{34}\mu^{0,25}} \right)^{0,571} \quad (\text{A.36})$$

$$\Delta_4 = \left(\frac{2\dot{Q}_{34}}{CH_{34}k_4^{0,667}c_{p4}^{0,333}\mu_4^{-0,467}} \right) \quad (\text{A.37})$$

b) Temperatura na descarga

A incerteza relativa à temperatura na descarga é obtida a partir da substituição das equações (2.13) e (2.15) na equação (2.14). A nova expressão para estimar a propagação da incerteza da temperatura na descarga, T_4 , é dada por:

$$T_4 = T_2 + \Delta_1 \dot{m}_r^{-0,8} \quad (\text{A.38})$$

$$\Delta_5 = \left(\frac{2\dot{Q}_{34}}{CH_{34}k_4^{0,667}c_{p4}^{0,333}\mu_4^{-0,467}} \right) \quad (\text{A.39})$$

onde k é a condutividade térmica, μ é a viscosidade dinâmica, c_p é o calor específico do fluido na saída do compressor, CH_{34} é o parâmetro característico de transferência de calor relativo ao volume de controle na descarga e $\dot{Q}_{34}$ é a taxa de transferência de calor na descarga.

A contribuição para a incerteza em T_4 devido a incertezas em cada variável utilizada em seu cálculo é dado por:

$$\partial T_4 = \sqrt{\left(\frac{\partial T_4}{\partial \dot{m}_r} \partial \dot{m}_r\right)^2 + \left(\frac{\partial T_4}{\partial P_1} \partial P_1\right)^2 + \left(\frac{\partial T_4}{\partial T_1} \partial T_1\right)^2 + \left(\frac{\partial T_4}{\partial P_4} \partial P_4\right)^2 + \left(\frac{\partial T_4}{\partial RPM} \partial RPM\right)^2} \quad (A.40)$$

onde a contribuição para a incerteza em ∂T_4 devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

Utilizando a equação (A.38), se tem:

$$\frac{\partial T_4}{\partial \dot{m}_r} = (-0,8 \Delta_5 \dot{m}_r^{-1,8}) \quad (A.41)$$

Substituindo à equação (2.4), (2.26), (2.29) e (2.11) em (A.38), tem-se, respectivamente:

$$\frac{\partial T_4}{\partial P_1} = 0,571 \Delta_1^{-1} \left(\frac{\dot{Q}_{34}}{C P_{34}} \right) \left((P_1 - P_2)^{-1,571} \right) \quad (A.42)$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial P_4} = 0,4571 \Delta_3^{-0,8} \Delta_5 \left((P_3 - P_4)^{-1,4571} \right) \quad (A.43)$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial RPM} = -0,8 \Delta_5 \left(\frac{\eta_{v23} \rho_2 V_d}{60} \right)^{-0,8} RPM^{-1,8} \quad (A.44)$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial T_1} = -\frac{\Delta_5}{\Delta_2} \quad (A.45)$$

c) Resultados do cálculo da propagação de incertezas do compressor automotivo

A tabela A2.1 apresenta os valores das incertezas dos instrumentos de medição utilizados para o cálculo da propagação de incertezas.

Tabela A2.1 – Incertezas dos instrumentos utilizados nos testes experimentais do compressor automotivo

P_{su}	P_{ds}	m_r	RPM	T_{su}, T_{ds}
[kPa]	[kPa]	[%]	[RPM]	[°C]
2,068	3,447	0,1	0,5	0,2

Tabela A2.2 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica do compressor automotivo operando com R134a

<i>Vazão mássica do fluido refrigerante R134a</i>							
Test	$(\delta m_r / \delta P_1) * \delta P_1$	$(\delta m_r / \delta T_1) * \delta T_1$	$(\delta m_r / \delta P_4) * \delta P_4$	$(\delta m_r / \delta T_4) * \delta T_4$	$(\delta m_r / \delta RPM) * \delta RPM$	δm_r	$\delta m_r / m$
	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
I45	0,0275	0,00009	-0,0006	-0,0001	0,0000144	0,0276	2,8
L45	0,0174	0,00010	-0,0005	-0,0001	0,0000100	0,0174	1,7
M45	0,0143	0,00009	-0,0004	-0,0001	0,0000078	0,0143	1,4
I50a	0,0285	0,00009	-0,0006	-0,0001	0,0000157	0,0286	2,9
I35a	0,0266	0,00011	-0,0005	-0,0001	0,0000159	0,0266	2,7
L35a	0,0166	0,00011	-0,0004	-0,0001	0,0000110	0,0166	1,7
M35a	0,0137	0,00011	-0,0003	-0,0001	0,0000087	0,0137	1,4
I40c-3C	0,0266	0,00007	-0,0006	-0,0001	0,0000122	0,0266	2,7

Tabela A2.3 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica do compressor automotivo operando com R1234yf

<i>Vazão mássica do fluido refrigerante R1234yf</i>							
Test	$(\delta m_r / \delta P_1) * \delta P_1$	$(\delta m_r / \delta T_1) * \delta T_1$	$(\delta m_r / \delta P_4) * \delta P_4$	$(\delta m_r / \delta T_4) * \delta T_4$	$(\delta m_r / \delta RPM) * \delta RPM$	δm_r	$\delta m_r / m$
	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
I45	0,0278	0,00012	-0,0006	-0,0001	0,0000176	0,0278	2,8
L45	0,0175	0,00014	-0,0005	-0,0002	0,0000128	0,0175	1,7
M45	0,0141	0,00015	-0,0004	-0,0002	0,0000105	0,0141	1,4
I50a	0,0283	0,00013	-0,0006	-0,0002	0,0000190	0,0283	2,8
I35a	0,0268	0,00015	-0,0005	-0,0002	0,0000185	0,0268	2,7
L35a	0,0167	0,00017	-0,0004	-0,0002	0,0000134	0,0167	1,7
M35a	0,0134	0,00017	-0,0003	-0,0002	0,0000110	0,0134	1,3
I40c-3C	0,0269	0,00011	-0,0006	-0,0001	0,0000149	0,0269	2,7

Tabela A2.4 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga do compressor automotivo operando com R134a

<i>Temperatura na descarga com o fluido R134a</i>						
Test	$(\delta T_4/\delta P_1)*\delta P_1$	$(\delta T_4/\delta P_4)*\delta P_4$	$(\delta T_4/\delta m_r)*\delta m_r$	$\delta T_4/\delta RPM$	$(\delta T_4/\delta T_1)*\delta T_1$	$\delta T_4/T_4$
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
I45	0,00000010	1,249	-0,0534	-0,019	-0,169	1,26
L45	0,00000006	0,894	-0,0678	-0,012	-0,170	0,91
M45	0,00000005	0,749	-0,0727	-0,009	-0,170	0,77
I50a	0,00000010	1,262	-0,0549	-0,019	-0,170	1,27
I35a	0,00000007	0,736	-0,0451	-0,016	-0,168	0,76
L35a	0,00000004	0,561	-0,0592	-0,010	-0,169	0,59
M35a	0,00000003	0,469	-0,0636	-0,008	-0,168	0,50
I40c-3C	0,00000011	1,347	-0,0520	-0,018	-0,169	1,36

Tabela A2.5 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga do compressor automotivo operando com R1234yf

<i>Temperatura da descarga do fluido R1234yf</i>						
Test	$(\delta T_4/\delta P_1)*\delta P_1$	$(\delta T_4/\delta P_4)*\delta P_4$	$(\delta T_4/\delta m_r)*\delta m_r$	$\delta T_4/\delta RPM$	$(\delta T_4/\delta T_1)*\delta T_1$	$\delta T_4/T_4$
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
I45	0,00000007	0,831	-0,0441	-0,015	-0,171	0,86
L45	0,00000003	0,565	-0,0557	-0,010	-0,171	0,60
M45	0,00000002	0,441	-0,0601	-0,007	-0,169	0,48
I50a	0,00000007	0,844	-0,0458	-0,016	-0,172	0,87
I35a	0,00000005	0,536	-0,0378	-0,013	-0,168	0,57
L35a	0,00000003	0,384	-0,0488	-0,008	-0,168	0,43
M35a	0,00000002	0,309	-0,0540	-0,007	-0,166	0,36
I40c-3C	0,00000008	0,940	-0,0431	-0,015	-0,170	0,97

Os resultados nas Tabelas A2.2 e A2.3 podem ser apresentadas nas Figuras A2.1 e A2.2, a seguir:

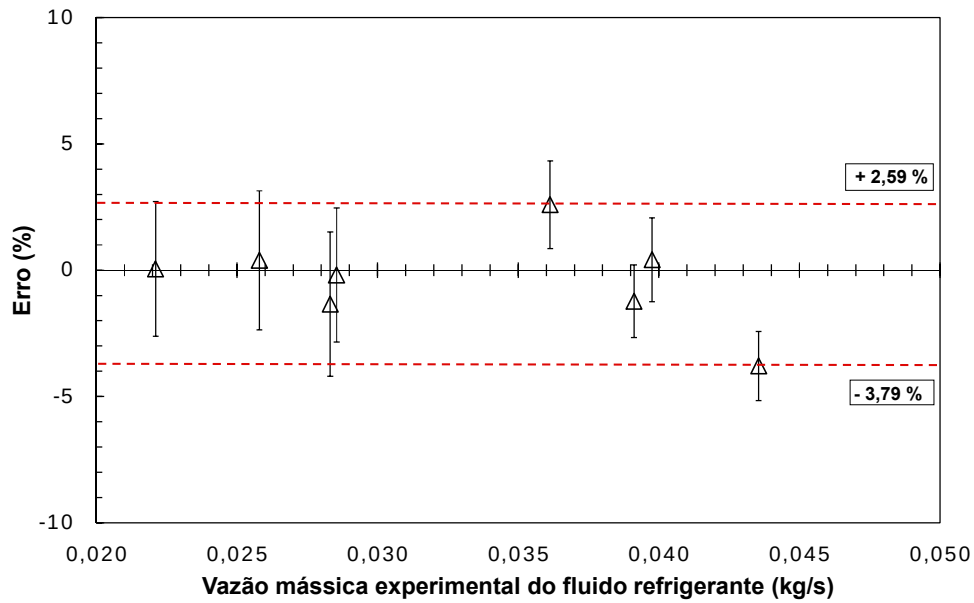


Figura A2.1 – Incertezas da vazão mássica obtido pelo modelo de simulação para o compressor automotivo, operando com o fluido R134a.

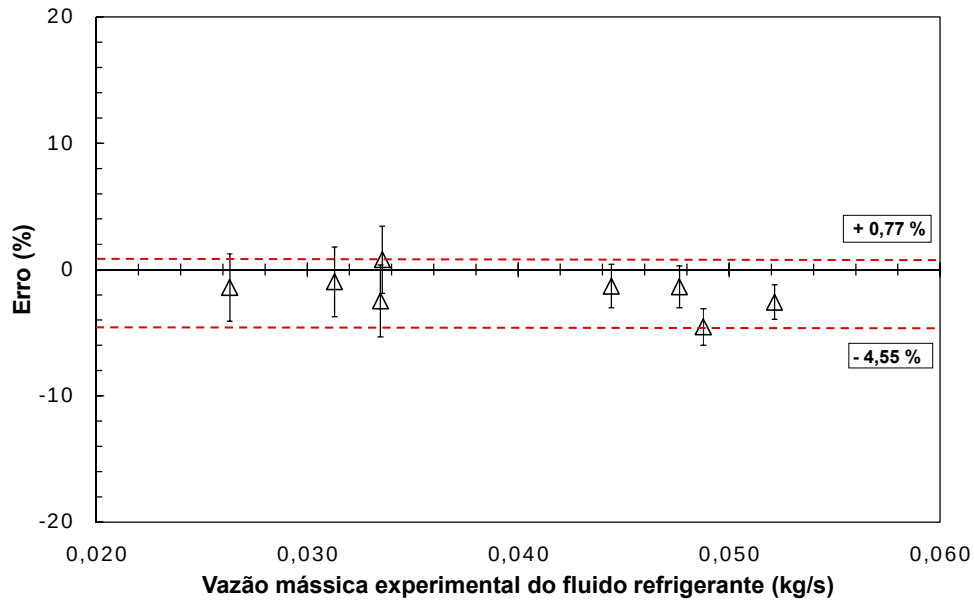


Figura A2.2 – Incertezas da vazão mássica obtido pelo modelo de simulação para o compressor automotivo, operando com o fluido R1234yf.

Os resultados nas Tabelas A2.4 e A2.5 podem ser apresentadas nas Figuras A2.3 e A2.4.

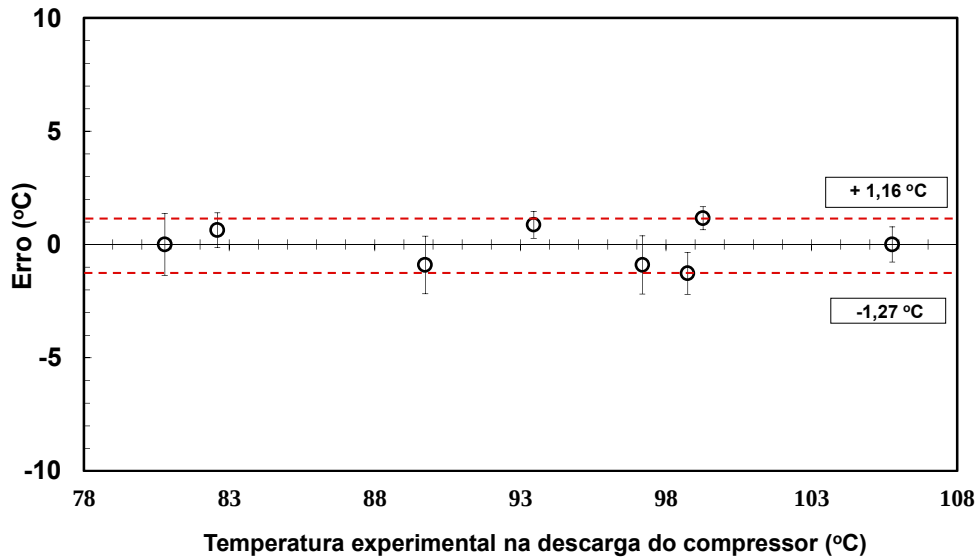


Figura A2.3 – Incertezas da temperatura na descarga obtido pelo modelo de simulação para o compressor automotivo, operando com o fluido R134a.

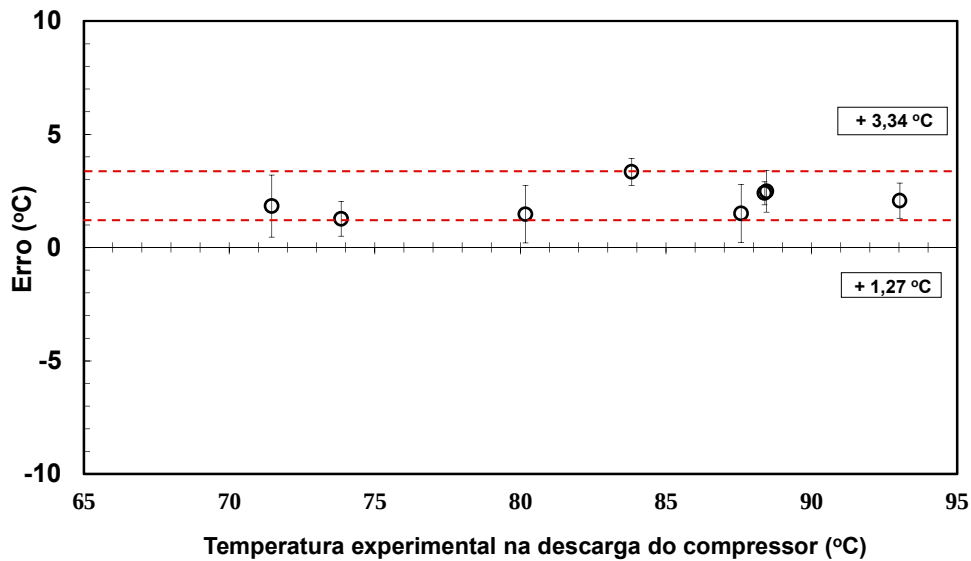


Figura A2.4 – Incertezas da temperatura na descarga obtido pelo modelo de simulação para o compressor automotivo, operando com o fluido R1234yf.

As incertezas para determinação da vazão mássica do fluido refrigerante apresentadas, nas Figuras (A2.1) e (A2.2), e para a temperatura na descarga apresentadas nas Figuras (A2.3) e (A2.4), obtida pelo modelo de simulação do compressor automotivo operando com os fluidos R134a e R1234yf, situaram-se na faixa do limite superior e inferior estabelecido pela comparação dos dados numéricos e experimentais nas Figuras 2.14, 2.15 e Figuras 2.16, 2.17, respectivamente, o que confirma que o modelo consegue prever as condições de operação estabelecidas para o compressor automotivo tipo “swash plate”.

A2.3

Propagação de incertezas no modelo de simulação do compressor hermético

A propagação de incertezas no compressor hermético, é baseada na metodologia utilizada para o compressor automotivo (A2.2). A função para o cálculo da incerteza da vazão mássica do fluido refrigerante $R_{\dot{m}_r}$ fica em função da pressão e temperatura na sucção, (P_1, T_1) , pressão e temperatura na descarga, (P_7, T_7) , e o consumo de energia (E).

$$R_{\dot{m}_r} = f(P_1, T_1, P_7, T_7, E) \quad (\text{A.46})$$

A equação (A.46) pode-se rescrever da seguinte forma:

$$R_{\dot{m}_r} = f(h_1, h_7, E) \quad (\text{A.47})$$

onde $h_1 = f(P_1, T_1)$ e $h_7 = f(P_7, T_7)$. Os valores da incerteza obtidos para as entalpias na entrada, h_1 , e saída, h_7 , foram obtidas mediante o software EES (*Engineering Equation Solver*), onde $\delta h_1 = 0,18 \text{ kJ/kg}$ e $\delta h_7 = 0,22 \text{ kJ/kg}$.

A função para o cálculo da incerteza da temperatura na descarga R_{T_7} é dada pela equação:

$$R_{T_7} = f(h_1, P_7, \dot{m}_r, E) \quad (\text{A.48})$$

a) Vazão mássica do fluido refrigerante

A incerteza relativa da vazão mássica do fluido refrigerante é obtida a partir da equações (3.1), a qual pode-se rescrever da seguinte forma:

$$\dot{m}_r = (\dot{Q}_{ca} - E)(h_1 - h_7)^{-1} \quad (\text{A.49})$$

onde a contribuição para a incerteza em $\partial \dot{m}_r$ devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo, é dada por:

$$\partial \dot{m}_r = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial h_1} \partial h_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial h_7} \partial h_7\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial E} \partial E\right)^2} \quad (\text{A.50})$$

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial h_1} = -(\dot{Q}_{ca} - E)(h_1 - h_7)^{-2} \quad (\text{A.51})$$

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial h_7} = (\dot{Q}_{ca} - E)(h_1 - h_7)^{-2} \quad (\text{A.52})$$

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial E} = -\frac{1}{h_1 - h_7} \quad (\text{A.53})$$

b) Temperatura na descarga

A incerteza relativa da temperatura na descarga é obtida substituindo-se a equação (3.4) em (3.30).

$$T_7 = T_{wt} + \Delta_1 \dot{m}_r^{0,2} (h_2 - h_7) + \Delta_1 \dot{m}_r^{-0,8} E - \Delta_1 \dot{m}_r^{-0,8} \dot{Q}_{pe} - \Delta_1 \dot{m}_r^{-0,8} \dot{Q}_{pm} - \Delta_1 \dot{m}_r^{-0,8} \dot{Q}_w \quad (\text{A.54})$$

$$\Delta_1 = \left(\frac{1}{CH_{67} k_6^{0,667} c_{p6}^{0,333} \mu_6^{-0,467}} \right) \quad (A.55)$$

onde a contribuição para a incerteza em ∂T_7 devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

$$\partial T_7 = \sqrt{\left(\frac{\partial T_7}{\partial h_1} \partial h_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial T_7}{\partial P_7} \partial P_7 \right)^2 + \left(\frac{\partial T_7}{\partial \dot{m}_r} \partial \dot{m}_r \right)^2 + \left(\frac{\partial T_7}{\partial E} \partial E \right)^2} \quad (A.56)$$

$$\frac{\partial T_7}{\partial h_1} = 0 \quad (A.57)$$

$$\frac{\partial T_7}{\partial P_7} = 0 \quad (A.58)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_7}{\partial \dot{m}_r} = & 0,2\Delta_1 \dot{m}_r^{-0,8} (h_2 - h_7) - 0,8\Delta_1 \dot{m}_r^{-1,8} E + \\ & 0,8\Delta_1 \dot{m}_r^{-1,8} \dot{Q}_{pe} + 0,8\Delta_1 \dot{m}_r^{-1,8} \dot{Q}_{pm} + 0,8\Delta_1 \dot{m}_r^{-1} \end{aligned} \quad (A.59)$$

$$\frac{\partial T_7}{\partial E} = \Delta_1 \dot{m}_r^{-0,8} \quad (A.60)$$

c) Consumo de energia

A incerteza relativa para o cálculo do consumo de energia é obtida a partir da equação (3.1):

$$E = \dot{Q}_{ca} - \dot{m}_r h_1 + \dot{m}_r h_7 \quad (A.61)$$

Onde a contribuição para a incerteza em ∂E devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

$$\partial E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial h_1} \partial h_1\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial h_7} \partial h_7\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{m}_r} \partial \dot{m}_r\right)^2} \quad (\text{A.62})$$

$$\frac{\partial E}{\partial h_1} = -\dot{m}_r \quad (\text{A.63})$$

$$\frac{\partial E}{\partial h_7} = \dot{m}_r \quad (\text{A.64})$$

$$\frac{\partial E}{\partial \dot{m}_r} = -h_1 + h_7 \quad (\text{A.65})$$

d) Resultados do cálculo da propagação de incertezas do compressor hermético

A tabela A2.6 apresenta os valores das incertezas dos instrumentos de medição utilizados para o cálculo da propagação de incertezas.

Tabela A2.6 – Incertezas dos instrumentos utilizados nos testes experimentais para o compressor hermético

P_{su}	P_{ds}	$\dot{m}_r$	E	T_{su}, T_{ds}
[kPa]	[kPa]	[%]	[kW]	[°C]
2,068	3,447	0,1	0,0032	0,2

Os resultados do cálculo de incertezas da vazão mássica, temperatura na descarga e o consumo de energia são apresentados nas tabelas A2.7, A2.8 e A2.9.

Tabela A2.7 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica do compressor hermético operando com R134a

Vazão mássica do fluido refrigerante R134a					
Test	$(\delta \dot{m}_r / \delta h_1) * \delta h_1$	$(\delta \dot{m}_r / \delta h_7) * \delta h_7$	$(\delta \dot{m}_r / \delta E) * \delta E$	$\delta \dot{m}_r$	$\delta \dot{m}_r / \dot{m}_r$
	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[g/s]	[%]
45°C/-25°C	4,54E-06	-5,57E-06	4,561E-05	4,62E-02	4,62

45°C/-15°C	8,74E-06	-1,06E-05	5,04E-05	5,23E-02	5,23
45°C/-5°C	1,52E-05	-1,81E-05	5,34E-05	5,84E-02	5,84
55°C/-25°C	3,97E-06	-5,01E-06	4,33E-05	4,38E-02	4,38
55°C/-15°C	7,64E-06	-9,57E-06	4,65E-05	4,81E-02	4,81
55°C/-5°C	1,32E-05	-1,62E-05	4,85E-05	5,28E-02	5,28
65°C/-25°C	3,31E-06	-4,33E-06	4,10E-05	4,14E-02	4,14
65°C/-15°C	5,67E-06	-7,29E-06	3,78E-05	3,89E-02	3,89
65°C/-5°C	1,18E-05	-1,51E-05	4,54E-05	4,93E-02	4,93

Tabela A2.8 – Propagação de incertezas da temperatura da descarga do compressor hermético operando com R134a

<i>Temperatura da descarga do fluido R134a</i>					
Test	$(\delta T_7/\delta h_1)*\delta h_1$	$(\delta T_7/\delta P_7)*\delta P_7$	$(\delta T_7/\delta m_r)*\delta m_r$	$(\delta T_7/\delta E)*\delta E$	δT_7
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
45°C/-25°C	0	0	-0,150	4,592	4,59
45°C/-15°C	0	0	-0,151	3,007	3,01
45°C/-5°C	0	0	-0,156	2,072	2,08
55°C/-25°C	0	0	-0,157	4,801	4,80
55°C/-15°C	0	0	-0,162	3,071	3,08
55°C/-5°C	0	0	-0,170	2,093	2,10
65°C/-25°C	0	0	-0,160	5,209	5,21
65°C/-15°C	0	0	-0,199	3,198	3,20
65°C/-5°C	0	0	-0,181	2,114	2,12

Tabela A2.9 – Propagação de incertezas do consumo de energia do compressor hermético operando com R134a

<i>Consumo de energia do compressor hermético operando com o fluido R134a</i>					
Test	$(\delta E/\delta h_1)*\delta h_1$	$(\delta E/\delta h_7)*\delta h_7$	$(\delta E/\delta m_r)*\delta m_r$	δE	$\delta E/E$
	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]
45°C/-25°C	-0,0003	0,00039096	3,24E-03	0,0033	0,3
45°C/-15°C	-0,0006	0,00067392	3,32E-03	0,0034	0,3
45°C/-5°C	-0,0009	0,00108432	3,50E-03	0,0038	0,4
55°C/-25°C	-0,0003	0,00037074	3,23E-03	0,0033	0,3
55°C/-15°C	-0,0005	0,00065785	3,31E-03	0,0034	0,3
55°C/-5°C	-0,0009	0,0010704	3,48E-03	0,0037	0,4
65°C/-25°C	-0,0003	0,0003381	3,23E-03	0,0033	0,3
65°C/-15°C	-0,0005	0,00062517	3,29E-03	0,0034	0,3
65°C/-5°C	-0,0008	0,0010626	3,47E-03	0,0037	0,4

Os resultados nas Tabelas A2.7 e A2.8 e A2.9 podem ser apresentadas nas Figuras A2.5, A2.6 e A2.7.

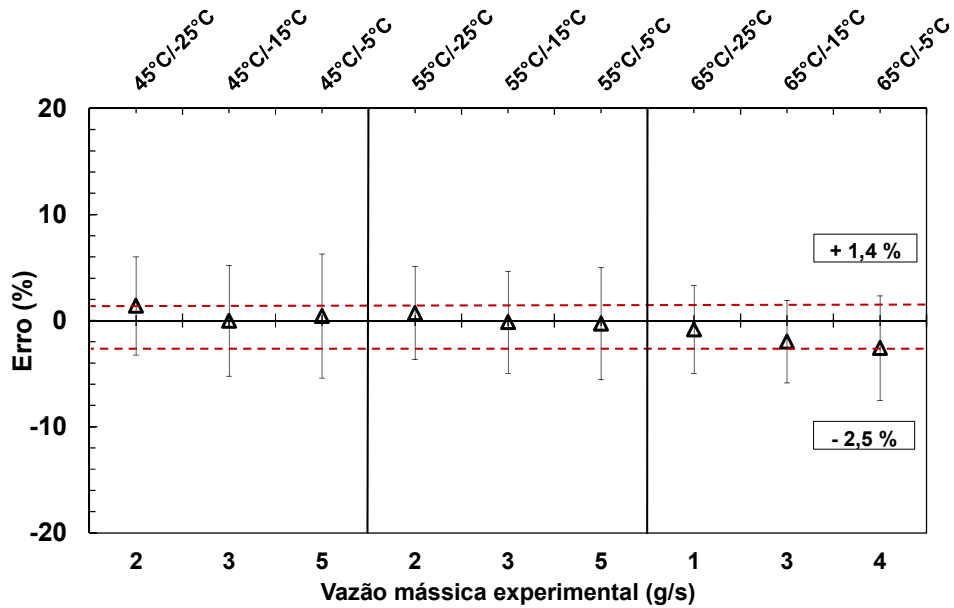


Figura A2.5 – Incertezas da vazão mássica obtido pelo modelo de simulação para o compressor hermético, operando com o fluido R134a.

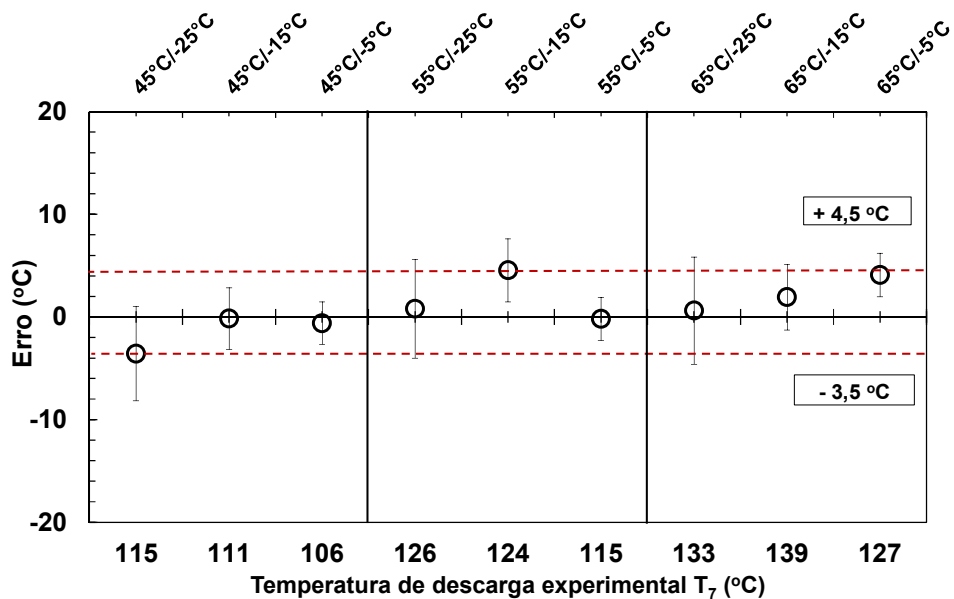


Figura A2.6 – Incertezas da temperatura na descarga obtido pelo modelo de simulação para o compressor hermético, operando com o fluido R134a.

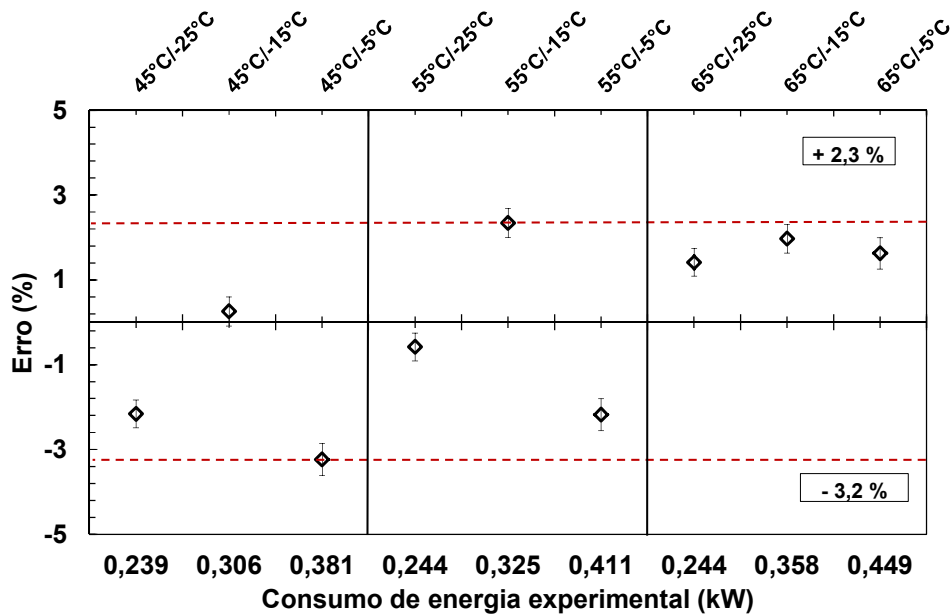


Figura A2.7 – Incertezas do consumo de energia obtido pelo modelo de simulação para o compressor hermético, operando com o fluido R134a.

Os resultado das incertezas para a vazão mássica do fluido refrigerante apresentada na Figura (A2.5) e temperatura na descarga apresentada na Figura (A2.6), obtidos pelo modelo de simulação do compressor hermético operando com o fluido R134a, ficaram na faixa do limite superior e inferior estabelecido pela comparação dos dados numéricos e experimentais, validando o modelo de simulação para o compressor hermético. Entretanto, os valores obtidos para o consumo de energia na Figura (A2.7) mostram valores de incerteza muito pequenos, o que demonstra que, mesmo os valores estimados fiquem dentro da faixa do limite superior e inferior obtidos na comparação com os dados experimentais, os modelo de simulação não consegue prever satisfatoriamente o consumo de energia.

A2.4

Propagação de incertezas no modelo de simulação do compressor semi-hermético

A propagação de incertezas no compressor semi-hermético é baseada na mesma metodologia aplicada aos compressores automotivo e hermético:

a) Vazão mássica do fluido refrigerante

A incerteza relativa da vazão mássica do fluido refrigerante é obtida a partir da equação (4.1), a qual pode ser escrita da seguinte forma:

$$\dot{m}_r = (\dot{Q}_{ca} - E)(h_1 - h_5)^{-1} \quad (\text{A.66})$$

onde a contribuição para a incerteza em $\partial \dot{m}_r$ devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

$$\partial \dot{m}_r = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial h_1} \partial h_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial h_5} \partial h_5 \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial E} \partial E \right)^2} \quad (\text{A.67})$$

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial h_1} = -(\dot{Q}_{ca} - E)(h_1 - h_5)^{-2} \quad (\text{A.68})$$

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial h_7} = (\dot{Q}_{ca} - E)(h_1 - h_5)^{-2} \quad (\text{A.69})$$

$$\frac{\partial \dot{m}_r}{\partial E} = -\frac{1}{h_1 - h_5} \quad (\text{A.70})$$

b) Temperatura na descarga

A incerteza relativa da temperatura na descarga é obtida mediante a equação (4.18).

$$T_5 = T_4 - \Delta_1 \dot{m}_r^{-0,2} (T_4 - T_w) \quad (\text{A.71})$$

$$\Delta_1 = \left(\frac{CH_{45} k_4^{0,667} c_{p4}^{0,333} \mu_4^{-0,467}}{c_{p45}} \right) \quad (\text{A.72})$$

onde a contribuição para a incerteza em ∂T_5 devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

$$\partial T_5 = \sqrt{\left(\frac{\partial T_5}{\partial h_1} \partial h_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial T_5}{\partial P_5} \partial P_5 \right)^2 + \left(\frac{\partial T_5}{\partial \dot{m}_r} \partial \dot{m}_r \right)^2 + \left(\frac{\partial T_5}{\partial E} \partial E \right)^2} \quad (\text{A.73})$$

$$\frac{\partial T_5}{\partial h_1} = 0 \quad (\text{A.74})$$

$$\frac{\partial T_5}{\partial P_5} = 0 \quad (\text{A.75})$$

$$\frac{\partial T_5}{\partial \dot{m}_r} = 0, 2\Delta_1 \dot{m}_r^{-1,2} (T_4 - T_w) \quad (\text{A.76})$$

$$\frac{\partial T_5}{\partial E} = 0 \quad (\text{A.77})$$

c) Consumo de energia

A incerteza relativa para o cálculo do consumo de energia é obtida a partir da equação (4.1):

$$E = \dot{Q}_{ca} - \dot{m}_r h_1 + \dot{m}_r h_5 \quad (\text{A.78})$$

onde a contribuição para a incerteza em ∂E devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

$$\partial E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial h_1} \partial h_1\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial h_5} \partial h_5\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{m}_r} \partial \dot{m}_r\right)^2} \quad (\text{A.79})$$

$$\frac{\partial E}{\partial h_1} = -\dot{m}_r \quad (\text{A.80})$$

$$\frac{\partial E}{\partial h_5} = \dot{m}_r \quad (\text{A.81})$$

$$\frac{\partial E}{\partial \dot{m}_r} = -h_1 + -h_5 \quad (\text{A.82})$$

d) Resultados do cálculo da propagação de incertezas do compressor semi-hermético

A tabela A2.10 apresenta os valores das incertezas dos instrumentos de medição utilizados para o cálculo da propagação de incertezas.

Tabela A2.10 – Incertezas dos instrumentos utilizados nos testes experimentais para o compressor semi-hermético

P_{su}	P_{ds}	$\dot{m}_r$	E	T_{su}, T_{ds}
[kPa]	[kPa]	[%]	[kW]	[°C]
2,068	3,447	0,1	0,0032	0,2

Os resultados do cálculo de incertezas da vazão mássica, temperatura na descarga e o consumo de energia do compressor semi-hermético para aplicações de baixa e média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis e inflamáveis são apresentados nas Tabelas A2.11 até A2.22.

Tabela A2.11 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis

<i>Vazão mássica do fluido refrigerante R404a</i>					
Test	$(\delta \dot{m}_r / \delta h_1) * \delta h_1$	$(\delta \dot{m}_r / \delta h_5) * \delta h_5$	$\delta \dot{m}_r / \delta E$	$\delta \dot{m}_r$	$\delta \dot{m}_r / \dot{m}_r$
	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
13°C/-18°C	0,0001	-0,0002	4,99E-05	0,0002	0,02

24°C/-18°C	0,0001	-0,0002	4,78E-05	0,0002	0,02
35°C/-18°C	0,0001	-0,0001	4,31E-05	0,0002	0,02
13°C/-26°C	0,0001	-0,0001	4,64E-05	0,0001	0,01
24°C/-26°C	0,0001	-0,0001	4,40E-05	0,0001	0,01
35°C/-26°C	0,0001	-0,0001	4,00E-05	0,0001	0,01

Tabela A2.12 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica para aplicações de média temperatura, operando com não inflamáveis

Vazão mássica do fluido refrigerante R404a					
Test	$(\delta m_r / \delta h_1) * \delta h_1$	$(\delta m_r / \delta h_5) * \delta h_5$	$\delta m_r / \delta E$	δm_r	$\delta m_r / m_r$
	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
13°C/2°C	0,0002	-0,0003	9,96E-05	0,0003	0,03
27°C/2°C	0,0002	-0,0002	8,83E-05	0,0003	0,03
35°C/2°C	0,0002	-0,0002	7,76E-05	0,0003	0,03
13°C/10°C	0,0003	-0,0004	1,24E-04	0,0005	0,05
27°C/10°C	0,0003	-0,0004	1,09E-04	0,0005	0,05
35°C/10°C	0,0002	-0,0003	9,22E-05	0,0004	0,04

Tabela A2.13 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis

Vazão mássica do fluido refrigerante R404a					
Test	$(\delta m_r / \delta h_1) * \delta h_1$	$(\delta m_r / \delta h_5) * \delta h_5$	$\delta m_r / \delta E$	δm_r	$\delta m_r / m_r$
	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
24°C/-18°C	0,0001	-0,0002	4,68E-05	0,0002	0,02
35°C/-18°C	0,0001	-0,0002	4,19E-05	0,0002	0,02
24°C/-26°C	0,0001	-0,0001	4,23E-05	0,0001	0,01
35°C/-26°C	0,0001	-0,0001	3,82E-05	0,0001	0,01

Tabela A2.14 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis

Vazão mássica do fluido refrigerante R404a					
Test	$(\delta m_r / \delta h_1) * \delta h_1$	$(\delta m_r / \delta h_5) * \delta h_5$	$\delta m_r / \delta E$	δm_r	$\delta m_r / m_r$
	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[%]
13°C/2°C	0,0003	-0,0003	1,33E-04	0,0005	0,05
27°C/2°C	0,0002	-0,0003	9,80E-05	0,0003	0,03
35°C/2°C	0,0002	-0,0002	8,52E-05	0,0003	0,03
13°C/10°C	0,0004	-0,0006	1,67E-04	0,0007	0,07
27°C/10°C	0,0003	-0,0004	1,18E-04	0,0005	0,05
35°C/10°C	0,0003	-0,0003	9,99E-05	0,0005	0,05

Tabela A2.15 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis

<i>Temperatura da descarga do fluido R404A</i>					
Test	$(\delta T_5/\delta h_1)*\delta h_1$	$(\delta T_5/\delta P_5)*\delta P_5$	$(\delta T_5/\delta m_r)*\delta m_r$	$(\delta T_5/\delta E)*\delta E$	δT_7
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
13°C/-18°C	0	0	0,008	0	0,008
24°C/-18°C	0	0	0,009	0	0,009
35°C/-18°C	0	0	0,009	0	0,009
13°C/-26°C	0	0	0,010	0	0,010
24°C/-26°C	0	0	0,010	0	0,010
35°C/-26°C	0	0	0,011	0	0,011

Tabela A2.16 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis

<i>Temperatura da descarga do fluido R404A</i>					
Test	$(\delta T_5/\delta h_1)*\delta h_1$	$(\delta T_5/\delta P_5)*\delta P_5$	$(\delta T_5/\delta m_r)*\delta m_r$	$(\delta T_5/\delta E)*\delta E$	δT_7
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
13°C/2°C	0	0	0,001	0	0,001
27°C/2°C	0	0	0,001	0	0,001
35°C/2°C	0	0	0,001	0	0,001
13°C/10°C	0	0	0,001	0	0,001
27°C/10°C	0	0	0,001	0	0,001
35°C/10°C	0	0	0,001	0	0,001

Tabela A2.17 – Propagação de incertezas da temperatura na descarga para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis

<i>Temperatura da descarga do fluido R404A</i>					
Test	$(\delta T_5/\delta h_1)*\delta h_1$	$(\delta T_5/\delta P_7)*\delta P_7$	$(\delta T_5/\delta m_r)*\delta m_r$	$(\delta T_5/\delta E)*\delta E$	δT_7
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
24°C/-18°C	0	0	0,008	0	0,008
35°C/-18°C	0	0	0,009	0	0,009
24°C/-26°C	0	0	0,009	0	0,009
35°C/-26°C	0	0	0,010	0	0,010

Tabela A2.18 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis

<i>Temperatura da descarga do fluido R404A</i>					
Test	$(\delta T_5/\delta h_1)*\delta h_1$	$(\delta T_5/\delta P_5)*\delta P_5$	$(\delta T_5/\delta m_r)*\delta m_r$	$(\delta T_5/\delta E)*\delta E$	δT_7
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
13°C/2°C	0	0	0,001	0	0,001
27°C/2°C	0	0	0,001	0	0,001
35°C/2°C	0	0	0,001	0	0,001
13°C/10°C	0	0	0,000	0	0,000
27°C/10°C	0	0	0,001	0	0,001
35°C/10°C	0	0	0,001	0	0,001

Tabela A2.19 – Propagação de incertezas na medida do consumo de energia para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis

<i>Consumo de energia operando com o fluido R404A</i>					
Test	$(\delta E/\delta h_1)*\delta h_1$	$(\delta E/\delta h_5)*\delta h_5$	$(\delta E/\delta m_r)*\delta m_r$	δE	$\delta E/E$
	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]
13°C/-18°C	-0,008	0,010	0,205	0,013	1,35
24°C/-18°C	-0,008	0,010	0,214	0,013	1,34
35°C/-18°C	-0,008	0,011	0,238	0,014	1,40
13°C/-26°C	-0,006	0,008	0,221	0,010	0,99
24°C/-26°C	-0,006	0,008	0,233	0,010	0,99
35°C/-26°C	-0,006	0,007	0,256	0,010	0,97

Tabela A2.20 – Propagação de incertezas na medida do consumo de energia para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis

<i>Consumo de energia operando com o fluido R404A</i>					
Test	$(\delta E/\delta h_1)*\delta h_1$	$(\delta E/\delta h_5)*\delta h_5$	$(\delta E/\delta m_r)*\delta m_r$	δE	$\delta E/E$
	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]
13°C/2°C	-0,006	0,008	0,103	0,011	1,06
27°C/2°C	-0,006	0,008	0,116	0,010	1,03
35°C/2°C	-0,006	0,008	0,132	0,010	1,03
13°C/10°C	-0,008	0,011	0,083	0,014	1,37
27°C/10°C	-0,008	0,011	0,094	0,014	1,38
35°C/10°C	-0,008	0,011	0,111	0,014	1,37

Tabela A2.21 – Propagação de incertezas na medida do consumo de energia para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis

Consumo de energia operando com o fluido R404A					
Test	$(\delta E/\delta h_1) \cdot \delta h_1$	$(\delta E/\delta h_5) \cdot \delta h_5$	$(\delta E/\delta m_r) \cdot \delta m_r$	δE	$\delta E/E$
	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]
24°C/-18°C	-0,009	0,011	0,219	0,015	1,49
35°C/-18°C	-0,009	0,011	0,244	0,015	1,51
24°C/-26°C	-0,007	0,009	0,242	0,011	1,11
35°C/-26°C	-0,007	0,008	0,268	0,011	1,11

Tabela A2.22 – Propagação de incertezas na medida do consumo de energia para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis

Consumo de energia operando com o fluido R404A					
Test	$(\delta E/\delta h_1) \cdot \delta h_1$	$(\delta E/\delta h_5) \cdot \delta h_5$	$(\delta E/\delta m_r) \cdot \delta m_r$	δE	$\delta E/E$
	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]
13°C/2°C	-0,007	0,008	0,077	0,011	1,07
27°C/2°C	-0,007	0,008	0,105	0,011	1,08
35°C/2°C	-0,007	0,009	0,120	0,011	1,09
13°C/10°C	-0,008	0,011	0,061	0,014	1,36
27°C/10°C	-0,009	0,011	0,087	0,014	1,42
35°C/10°C	-0,009	0,011	0,103	0,014	1,42

Os resultados do cálculo das incertezas para a vazão mássica ficaram na faixa de 0,0001 até 0,0005 kg/s, para a temperatura na descarga do compressor semi-hermético, na faixa entre 0,001 °C e 0,011 °C, e, para o consumo de energia, na faixa entre 1,03% e 1,51%. Estes valores confirmam os resultados obtidos na comparação dos dados experimentais e numéricos obtidos no capítulo 4, os quais apresentam valores próximos a os dados experimentais.